

Analysis of changes in the frequency of maximum temperatures in Iran

Farahnaz Khorramabadi¹, Mohammad Sadegh Keikhsravi-Kiany^{2*} , Seyed Abolfazl Masoodian³

1. PhD student of Climatology, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran
 2. **Corresponding Author**, Assistant Professor of Climatology, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran
 Email: ms.keikhsravikiany@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8221-6264>
 3. Professor of Climatology, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 06 May 2025 Revised: 28 May 2025 Accepted: 06 June 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Extreme temperatures, Global warming, Era5 database, Iran.	In recent years, there has been a notable increase in the intensity and frequency of extreme temperatures, encompassing both extreme heat events-such as hot days, hot nights, and heat waves-and extreme cold events, including cold days and cold nights. This study analyzes changes in the frequency of maximum temperatures in Iran utilizing daily temperature data from the Era5 database, covering the period from 11/10/1357 to 10/10/1402. Following the year 1377, the frequency distribution of maximum temperatures exhibited a notable shift towards higher values, accompanied by a reduction in seasonal temperature differentiation. This transition resulted in a change in the temperature distribution from a biexponential to a uni exponential model, as well as an increase in leftward skewness within the temperature distribution. The frequency of 37 degrees Celsius experienced the most significant increase, recorded at 0.5 percent, while the frequency of 1 degree Celsius demonstrated the most substantial decrease, exceeding 0.3 percent. These observed changes may be attributable to local factors, such as urbanization and desertification, as well as broader influences stemming from global climatic phenomena, including significant El Niño events. An examination of the thickness of the 850-500 hectopascal layer indicates that the spike in maximum temperatures in Iran in 1998 is not merely a localized occurrence but rather a manifestation of global climate change that has disrupted the previous climatic equilibrium. These changes indicate the widespread and continuous effects of global warming on the climate of Iran and beyond.
How to Cite: Khorramabadi, F., Keikhsravi-Kiany, M. S. and Masoodian, S. A. (2026). Analysis of changes in the frequency of maximum temperatures in Iran. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 55-74.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.51939.2114 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

One of the most important challenges in human preparedness to face climate change is understanding the behaviour of extremes at the local scale. Extreme temperatures affect energy, health systems, and agriculture, thereby straining resources and the economy. Understanding the probability distribution of temperatures in the coming years, including extreme temperatures, plays an important role in the adaptation of humans and ecosystems to climate change (Guirguis et al., 2018: 1). In addition, under climate warming conditions, the characteristics of climate extremes will change; in particular, the intensity and frequency of high temperatures and heavy precipitation will increase, which will have potentially harmful effects on nature, the economy, and society (Delgado-Torres et al., 2023: 1). The impact of global warming on extreme climates (such as heat waves and extreme precipitation) is greater than on average climates, and the probability of extreme weather events will continue to increase in the future. The increase in extreme weather events has adverse effects on human society, health and well-being, economy, and natural ecosystems (Darand, 2020: 1). In recent years, various studies and research have been conducted on temperature changes and extreme weather events around the world (Easterling et al., 1997; Seneviratne et al., 2021; Sanchez et al., 2023). In the present study, an attempt has been made to analyze and investigate the frequency of temperature changes in Iran in detail.

DATA AND METHODOLOGY

To conduct the present study, the daily maximum temperature data of the ERA5 database from 11/10/1357 to 10/10/1402 for 16436 days over 44 to 64 degrees east and 25 to 40 degrees north with a spatial resolution of 0.25×0.25 , was utilized. Only the pixels covering the Iranian territory were utilized to examine Iran's temperature characteristics. To extract the daily maximum temperature from the ERA5 database, we extracted the hourly temperature for each day and considered the largest value among the 24 data on each day as the maximum temperature of that day. Also, to investigate the relationship between temperature changes and atmospheric thickness, geopotential data of 850 and 500 hectopascal levels, respectively as ground surface and middle layer atmospheric levels, were taken from the ECMWF database daily and at a spatial resolution of 0.25×0.25 degrees in (NC) format. Programming operations in the Python software environment were also used to process and analyze the data.

RESULTS AND DISCUSSION

In the initial phase of this study, an analysis of the general structure of maximum temperatures in Iran was conducted by calculating the average maximum temperature for each day across the country. The resulting time series of temperature data was smoothed using a 365-day moving window. This examination of the smoothed time series revealed a notable increase in maximum temperature in the year 1377, which is distinctly observable within the data (Figure 1). To assess whether this temperature increase in 1377 is consistent across the entirety of Iran, a maximum temperature dataset with dimensions of $81 \times 61 \times 16436$ was utilized. The smoothed time series for maximum temperature was computed for each grid cell using the same 365-day window, followed by the standardization of the smoothed temperature array. Subsequently, a principal component analysis (PCA) was performed on this standardized dataset. The results indicated that the scores of the first principal component were consistently positive before 1377 and predominantly negative thereafter. Furthermore, the investigation into temperature anomalies across Iran demonstrated that a significant temperature increase has been recorded in 45% of the country's area since 1377. To explore the potential causes of these temperature changes—whether they are attributable to factors such as urbanization, deforestation, desertification, the desiccation of lakes, and other anthropogenic influences, or whether broader climatic patterns are at play—data on geopotential height values over the Northern

Hemisphere at the 850 and 500 hectopascal levels were extracted. The atmospheric thickness in these two layers over Iran and the Northern Hemisphere was subsequently calculated. The findings indicate that atmospheric thickness over Iran has experienced a significant increase since 1377. Consequently, the year 1377 can be regarded as a jumping point in the temperature time series for the Northern Hemisphere, as the temperature values in the lower atmosphere are directly influenced by atmospheric thickness; thus, an increase in atmospheric thickness correlates with an increase in temperature.

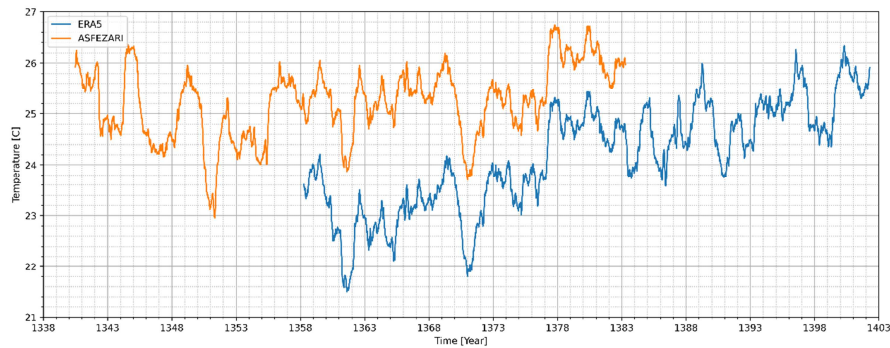


Figure 1. Smoothed time series of maximum temperature in Iran based on Asfazari data Era5 dataset.

CONCLUSION

This study analyzed daily maximum temperature data from 11/10/1357 to 10/10/1402, covering a total of 16,436 days, to investigate changes in maximum temperature characteristics in Iran. The smoothed time series revealed a significant increase in maximum temperatures in 1377, which was evident across most regions of Iran. Upon standardizing the data, the principal component analysis indicated that the scores for the first component were consistently positive before 1377 but became negative thereafter. This shift resulted in a frequency distribution of maximum temperatures that leaned towards higher values, with an increased occurrence of temperatures exceeding 23 degrees. Additionally, the seasonal temperature variation diminished, transforming the temperature distribution from biexponential to uni exponential, which reflects a reduced difference between hot and cold seasons. The thickness of the 500-850 hectopascal layer suggests that this temperature shift has also impacted the lower half of the atmosphere, highlighting the global nature of the warming phenomenon. Furthermore, the temperature jump in 1377 may be associated with the strong El Niño event that occurred that year, potentially influencing broader global climate change, disrupting the previous climate equilibrium, and leading to a new climatic state.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

REFERENCES

References [in Persian]

- Alizadeh-Choozari, O., Najafi, MS. (2017). Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*. 43(2), 569-584. [In Persian]
- Keikhosravi Kiany, MS. (2016). Climatology of snow cover in Iran using remote sensing data. Supervisor: Masoodian, Seyed Abolfazl, Isfahan University, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Department of Natural Geography. [In Persian]
- Masoodian, SA., Montazeri, M. (2015). Global warming and the thickness of the lower half of the atmosphere. *Geographical Research*. 117(2), 1-12. [In Persian]

Masoodian, SA (2020). An Analysis of Frequency Distribution of LST in Iran. *Geography and Development*. 60(18), 21-30. [In Persian]

References [in English]

- Al-Ataby, I. K., & Al-Tmimi, A. I. (2020). Estimate the probability density function of maximum temperature for the Middle East. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 29(4).
- Asakereh, H., Khosravi, Y., Doostkamian, M., & Solgimoghaddam, M. (2020). Assessment of spatial distribution and temporal trends of temperature in Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 549-561.
- Chowdhury, R., Chadalavada, S., Pakdel, H., & McDougall, K. (2022). Extreme Temperatures and Temperature-Duration-Frequency (TDF) Relationship in Australia
- Darand, M. (2020). Future changes in temperature extremes in climate variability over Iran. *Meteorological Applications*, 27(6), e1968.
- Delgado-Torres, C., Donat, M. G., Soret, A., González-Reviriego, N., Bretonnière, P. A., Ho, A. C., ... & Doblas-Reyes, F. J. (2023). Multi-annual predictions of the frequency and intensity of daily temperature and precipitation extremes. *Environmental Research Letters*, 18(3), 034031
- Dong, X., Zhang, S., Zhou, J., Cao, J., Jiao, L., Zhang, Z., & Liu, Y. (2019). Magnitude and frequency of temperature and precipitation extremes and the associated atmospheric circulation patterns in the Yellow River basin (1960–2017), China. *Water*, 11(11), 2334.
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., ... & Folland, C. K. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324), 364-367.
- Kiany, M. S. K., Masoodian, S. A., & Balling Jr, R. C. (2021). Climatology and variability of the start, end, and length of the frost-free season across Iran. *Climate Research*, 84, 59-73.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3-4), 1539-1562.
- Guirguis, K., Gershunov, A., Cayan, D. R., & Pierce, D. W. (2018). Heat wave probability in the changing climate of the Southwest US. *Climate Dynamics*, 50, 3853-3864.
- Javanshiri, Z., Pakdaman, M., & Falamarzi, Y. (2021). Homogenization and trend detection of temperature in Iran for the period 1960–2018. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1233-1250.
- Li, Z., Xue, H., Dong, G., Liu, X., & Lian, Y. (2024). Spatiotemporal Variation in Extreme Climate in the Yellow River Basin and its Impacts on Vegetation Coverage. *Forests*, 15(2), 307.
- Lin ML, Tsai CW, Chen CK. 2021. Daily maximum temperature forecasting in changing climate using a hybrid of multi-dimensional complementary ensemble empirical mode decomposition and radial basis function neural network. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 38(12):100923.
- Mahmoudi, P., Mohammadi, M., & Daneshmand, H. (2019). Investigating the trend of average changes in annual temperatures in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1079-1092.
- Mohammadi, H., Khalili, K., Rezaie, H., & Amini-Rakan, A. (2024). Analysis of Trend and Detection of Change Points in Lake Urmia Level and Climatological Parameters Using R Software. *Water Harvesting Research*, 7(2), 220-233.
- Murthy KVN, Saravana R, Kumar GK, Kumar KV. 2021. Modelling and forecasting for monthly surface air temperature patterns in India, 1951–2016: Structural time series approach. *Journal of Earth System Science*. 130(1):21
- Penha, R., & Hines, J. W. (2001, May). Using principal component analysis modeling to monitor temperature sensors in a nuclear research reactor. In Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2001).
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Derczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In 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, pp. 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013
- Singirankabo, E., Iyamuremye, E., Habineza, A., & Nelson, Y. (2023). Statistical modelling of maximum temperature in Rwanda using extreme value analysis. *Open Journal of Mathematical Sciences*, 7, 180-195.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464
- Van der Wiel, K., & Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

واکاوی تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران

فرحناز خرم آبادی^۱، محمدصادق کیخسروی کیانی^{۲*} , سید ابوالفضل مسعودیان^۳

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان

۲. استادیار آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)

ایمیل: ms.keikhosravikiany@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8221-6264>

۳. استاد آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: گرماهای فرین، سرماهای فرین، پایگاه (Era5) تغییرات فراوانی، ایران.	در سال‌های اخیر، شدت و فراوانی گرماهای فرین، شامل روزهای گرم، شب‌های گرم و موج‌های گرما و سرماهای فرین، شامل روزهای سرد و شب‌های سرد، افزایش یافته است. بنابراین، بررسی ابعاد تغییر اقلیم در ایران از منظر تغییرات فراوانی دما حائز اهمیت است. در این پژوهش، تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران با استفاده از داده‌های دمای روزانه پایگاه (Era5) برای دوره زمانی ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۲/۱۰/۱۰ به کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی در محیط پایتون مورد بررسی قرار گرفت. پس از سال ۱۳۷۷، توزیع فراوانی دمای بیشینه به سمت مقادیر بالاتر جابه‌جا شده و تمایز فصلی دما کاهش یافته است که این امر موجب تغییر توزیع دما از حالت دونمایی به تک‌نمایی و افزایش چولگی به چپ در توزیع دما شده است. فراوانی دمای ۳۷ درجه سلسیوس بیشترین افزایش (۵/۰ درصد) و دمای ۱ درجه سلسیوس بیشترین کاهش (بیش از ۳/۰ درصد) را نشان داده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از عوامل محلی مانند شهرسازی و بیابان‌زایی یا عوامل کلان‌تری نظیر پدیده‌های اقلیمی جهانی مانند رخداد نیرومند النینو باشد. بررسی ستبرای لایه ۸۵۰-۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که جهش دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ نه تنها یک پدیده محلی، بلکه یک تغییر اقلیمی جهانی است که توانسته تعادل اقلیمی پیشین را بر هم زده و وارد یک تعادل جدید کند. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده تأثیرات گسترده و پیوسته گرمایش جهانی بر اقلیم ایران و فراتر از آن است.

استناد: خرم آبادی، فرحناز، کیخسروی کیانی، محمدصادق و مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۴۰۵). واکاوی تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۷۴-۵۵.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.51939.2114



مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های آمادگی بشر برای روبه‌رو شدن با تغییر اقلیم، شناخت رفتار فرین‌ها در مقیاس محلی است. فرین‌های دمایی بر انرژی، نظام بهداشتی و کشاورزی اثر می‌گذارند و از این راه منابع و اقتصاد را تحت فشار می‌گذارند. شناخت توزیع احتمال دمای سال‌های پیش‌رو و از آن جمله دماهای فرین نقش مهمی در سازگاری انسان‌ها و زیست‌بوم‌ها با تغییر اقلیم دارد (گویرگیز و همکاران^۱، ۲۰۱۸، ۱). افزون بر این، در شرایط گرمایش اقلیم، ویژگی‌های فرین‌های اقلیمی دستخوش تغییر می‌شود؛ به‌ویژه شدت و فراوانی دماهای بالا و بارش‌های سنگین افزایش می‌یابد که این امر آثار بالقوه زیان‌باری برای طبیعت، اقتصاد و جامعه به‌همراه خواهد داشت (دلگادوتورس و همکاران^۲، ۲۰۲۳، ۱). دما یکی از اجزای مهم سیستم آب‌وهوایی بوده و نشانگر واکنش آب‌وهوا به انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط انسان است. طبق پنجمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی، میانگین دمای جهانی در حال افزایش است و در قرن بیست‌ویکم همچنان افزایش خواهد یافت. پیش‌بینی شده که تا سال ۲۱۰۰ میزان افزایش دمای جهان از ۲ به ۴ درجه سلسیوس خواهد رسید. این افزایش دما به معنای افزایش فراوانی دمایی روزها و شب‌های داغ و تداوم بیشتر دماهای فرین خواهد بود (چاودوری و همکاران^۳، ۲۰۲۲، ۱). تأثیر گرمایش زمین بر اقلیم‌های فرین (مثل امواج گرما و بارش‌های فرین) بیشتر از اقلیم میانگین بوده و احتمال وقوع رویدادهای آب-وهوایی فرین در آینده همچنان افزایش خواهد یافت. افزایش رویدادهای آب‌وهوایی فرین تأثیرات نامطلوبی بر جامعه بشری، سلامت و رفاه، اقتصاد و زیست‌بوم‌های طبیعی دارد (دارند، ۲۰۲۰، ۱). میانگین جهانی دمای هوا در طی سده بیستم ۰/۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است. واکاوی‌ها نشان می‌دهد که این افزایش تا اندازه‌ای ناشی از افزایش شتابان‌تر دمای کمینه یا کاهش دمای کمینه با آهنگی کندتر از دمای بیشینه است که منجر به کاهش دامنه دمای روزانه در بسیاری از نقاط جهان شده است (ایسترلینگ و همکاران^۴، ۱۹۹۷، ۳۶۴). شرایط آب‌وهوایی خاورمیانه بسته به فصل و جغرافیا بسیار متفاوت است، اما به‌طور کلی با دو کلمه توصیف می‌شود: گرم و خشک، البته زمستان‌ها معتدل همراه با بارندگی اندک است. خاورمیانه منطقه‌ای است که جنوب غربی آسیا، غرب آسیا و شمال شرقی آفریقا را در بر می‌گیرد. اگرچه بخش زیادی از منطقه خاورمیانه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای با زمستان‌های مرطوب و تابستان‌های خشک است، اما آب‌وهوای خشک حاکم بر کل منطقه است. آب‌وهوای خاورمیانه از تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد ترکیه و ایران، تا تابستان‌های گرم‌تر و زمستان‌های خنک شمال بین‌النهرین و سواحل مدیترانه، تا دماهای فرین بیابان عرب متفاوت است (الاتابی و همکاران^۵، ۲۰۲۰، ۵۱۸). در سال‌های اخیر، آسیا شاهد افزایش چشمگیر شدت و فراوانی گرماهای فرین شامل روزهای گرم، شب‌های گرم و موج‌های گرما و کاهش سرماهای فرین، شامل روزهای سرد و شب‌های سرد بوده است (سنویراتنه و همکاران^۶، ۲۰۲۱، ۱۵۵۶). ایران نیز از این قاعده مستثنی نبوده و در سال‌های اخیر با مجموعه‌ای از مشکلات بی‌سابقه اقلیمی ازجمله کاهش آب دریاچه‌ها و رودخانه‌ها، وقوع توفان‌های گردوغبار، ثبت رکوردهای دمایی، خشک‌سالی و همچنین سیل شدید، دست‌وپنجه نرم می‌کند (واقفی و همکاران، ۲۰۱۹، ۱). در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و رویدادهای فرین مرتبط با آن، به یکی از چالش‌های اساسی جهان تبدیل شده‌اند. پدیده‌هایی نظیر توفان، سیل، خشک‌سالی و گرمایش جهانی تأثیرات عمیقی

¹ - Guirguis et al.

² - Delgado-Torres et al.

³ - Chowdhury

⁴ - Easterling et al.

⁵ - Al-Ataby et al.

⁶ - Seneviratne et al.

بر پوشش گیاهی و پهنه‌های وسیع جغرافیایی داشته و زیست‌بوم‌ها را با تهدیدات جدی مواجه کرده‌اند. گرمایش جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل این تغییرات، موجب افزایش شدت و فراوانی رویدادهای اقلیمی شدید شده است (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۴، ۱). در طی سال‌های گذشته و به‌ویژه سال‌های اخیرتر، مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با تغییرات دما و فراوانی آن در بسیاری از قلمروهای جغرافیایی در جهان انجام گرفته است. برای نمونه، در مطالعه‌ای مورتی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) به مدل‌سازی و پیش‌بینی الگوهای ماهانه دمای هوا در هند طی سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۶ پرداختند. در این مطالعه، با استفاده از مدل سری‌های زمانی ساختاری (STS)، تغییرات دمای هوا در این بازه زمانی تحلیل و پیش‌بینی شد. نتایج پژوهش نشان داد که دمای هوا در هند روندی افزایشی داشته و پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های مشاهده‌شده و رفتارهای اقلیمی انطباق و هماهنگی بالایی دارد (مورتی و همکاران، ۲۰۲۱، ۲۱). لین و همکاران^۳ (۲۰۲۱) در پژوهش خود با استفاده از مدل ترکیبی MCEEMD-RBFNN، تغییرات دمای شدید در تایوان به‌ویژه در شهر تایپه را تحلیل و پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که دمای بیشینه در این منطقه روند افزایشی داشته و مدل مورد استفاده پیش‌بینی دقیقی از این تغییرات ارائه داده و به درک بهتر تغییرات اقلیمی و مدیریت مخاطرات آن کمک کرده است (لین و همکاران، ۲۰۲۱، ۱). دونگ و همکاران^۴ (۲۰۱۹) شدت و فراوانی دما و بارش‌های حدی و الگوهای گردش جوی مرتبط در حوضه رودخانه زرد چین را طی سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۱۷ بررسی کردند. نتایج نشان داد که شدت بارش‌های حدی افزایش یافته، مدت زمان بارش‌های شدید کاهش پیدا کرده و تغییرات رخدادهای دمای سرد نسبت به دمای گرم چشمگیرتر بوده است. همچنین، الگوهای جوی ENSO و AO تأثیر بیشتری بر رخدادهای دمایی حدی داشته است (دونگ و همکاران، ۲۰۱۹، ۱). سینگیرانکابو و همکاران^۵ (۲۰۲۰) با هدف مدل‌سازی آماری رفتار مقادیر فرین دمای بیشینه در رواندا، داده‌های روزانه ۹ ایستگاه هواشناسی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ را تحلیل کردند. نتایج نشان داد توزیع‌های گامبل و بتا بهترین برازش را داشته و سطوح بازگشت دما روند افزایشی را نشان می‌دهند (سینگیرانکابو و همکاران، ۲۰۲۰، ۱۸) وندرویل و همکاران^۶ (۲۰۲۱) با استفاده از مفهوم نسبت احتمالات در شبیه‌سازی‌های اقلیمی، نقش تغییرات میانگین اقلیم و تغییرپذیری اقلیمی را در رخدادهای حدی دما و بارش بررسی کردند. یافته‌ها نشان می‌دهد رخدادهای شدید دمایی ماهانه بیشتر تحت تأثیر گرم شدن میانگین اقلیم قرار دارند، درحالی‌که رخدادهای بارش سنگین به تغییرپذیری اقلیمی وابسته‌اند. بر اساس پژوهش‌های یادشده، مشخص شده است که گرمایش جهانی مستقیماً با افزایش وقوع رویدادهای گرمایی شدید مرتبط است، درحالی‌که نوسانات آب‌وهوایی نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت و فراوانی دماهای بیشینه ایفا می‌کند (وندرویل و همکاران، ۲۰۲۱، ۵۰۱). در ایران مطالعات مختلفی بر روی تغییرات دما و فرین‌های دمایی انجام شده است و همگی نشان‌دهنده‌ی روند افزایش دما هستند (علیزاده چوبری و نجفی ۱۳۹۶؛ محمودی و همکاران، ۲۰۱۹؛ فلاح قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹؛ عساکره و همکاران، ۲۰۲۰؛ جوانشیری و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات محدودی نیز در ایران به منظور بررسی تغییرات محیطی از روی تغییرات توزیع فراوانی دما به کمک داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است. برای نمونه، در پژوهشی مسعودیان (۱۴۰۰) به کمک تحلیل مؤلفه‌ی اصلی بر روی طبقات دمایی بر پایه‌ی داده‌های دمای ماهواره آکوا الگوهای توزیع فراوانی دمای رویه را در ایران استخراج نمود که از

¹ - Li et al.

² - Murthy et al.

³ - Lin et al.

⁴ - Dong et al.

⁵ - Seneviratne

⁶ - Van der Wiel

این نظر ۴ الگوی مؤلفه‌ی اصلی ۷۵ درصد از پراش داده‌ها را تبیین می‌کند (مسعودیان، ۱۴۰۰، ۲۳). اما هنوز به‌طور تفصیلی تغییرات دما از منظر بررسی تغییرات فراوانی دما انجام نشده است. بررسی تغییرات فراوانی دما می‌تواند ساختار تغییرات دما را در سری زمانی آشکار سازد و این که کدام دسته از طبقات دمایی دچار تغییر و جابه‌جایی شده‌اند. مطالعه کنونی از وجوه مختلفی پر اهمیت است. این که در این مطالعه تغییرات فراوانی دما به‌صورت زمانی و مکانی بررسی شده است، می‌تواند شناخت و درک ما را از اثرات تغییر اقلیم آشکارتر نماید. همچنین، بررسی نقاط جهش تغییر فراوانی دما به‌صورت مکانی ازجمله برجستگی‌های مهم در مطالعه کنونی است، چرا که این مسئله هنوز در کشور واکاوی نشده است.

داده‌ها و روش‌ها

داده‌های شبکه‌ای دمای بیشینه روزانه پایگاه ERA5 از روز ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۲/۱۰/۱۰ به مدت ۱۶۴۳۶ روز و بر روی چهارچوب ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی و ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی که شبکه‌ای به ابعاد ۶۱×۸۱ با تفکیک مکانی $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ از تارنمای این پایگاه استخراج شد. به این ترتیب آرایه داده‌ها به ابعاد $۱۶۴۳۶ \times ۶۱ \times ۸۱$ پایه و اساس بررسی ویژگی‌های دمای بیشینه ایران بوده است. از آنجا که از مجموع ۴۹۴۱ یاخته موجود در هر روز ۲۴۸۸ یاخته در مرز سیاسی خشکی اصلی ایران جای می‌گرفت، تنها همین یاخته‌ها در پردازش ویژگی‌های دمایی ایران منظور شد. در این صورت مجموع داده‌هایی که برای بررسی دمای بیشینه ایران به‌کار برده شده برابر ۴۰۸۹۲۷۶۸ مقدار بوده است. درعین‌حال برای نمایش نقشه‌ها تمام یاخته‌های چهارچوب لحاظ شده‌اند. برای استخراج دمای بیشینه روزانه از پایگاه داده ERA5 برای هر روز دمای ساعتی را استخراج و از میان ۲۴ داده در هر روز بزرگ‌ترین مقدار را به‌عنوان دمای بیشینه همان روز در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور بررسی ارتباط میان تغییرات دمایی و سبترای جو داده‌های ژئوپتانسیل ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌ترتیب به‌عنوان ترازهای سطح زمین و لایه‌ی میانی هواسپهر از پایگاه داده ECMWF به‌صورت روزانه و در تفکیک مکانی $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ درجه‌ی قوسی در فرمت (nc) بر روی پهنه مکانی ۴۴ تا ۶۳ درجه طول جغرافیایی و ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی برداشت گردید. برای پردازش و تحلیل داده‌ها نیز از عملیات‌های برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار پایتون بهره گرفته شد. همچنین، در گام پایانی به منظور تحلیل داده‌ها تحلیل مؤلفه اصلی به‌کار گرفته شد. چراکه واکاوی مؤلفه اصلی به‌عنوان یکی از شگردهای مدلسازی داده‌پایه، مجموعه‌ای از متغیرهای همبسته را به مجموعه کوچک‌تری از متغیرهای تازه تبدیل می‌کند که ناهمبسته‌اند و درعین‌حال بخش بزرگی از اطلاعات اولیه را در خود دارند. از این‌رو، می‌توان از مؤلفه‌های اصلی برای کاهش بعد داده‌ها بهره برد و ناهنجاری‌های موجود در داده‌های اولیه را به‌خوبی آشکارسازی و پیش‌بینی کرد (پنها^۱ و همکاران، ۲۰۰۱، ۱).

منطقه‌ی مورد مطالعه

ایران کشوری است با وسعت تقریبی ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع و میان عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه‌ی شرقی قرار دارد. میانگین ارتفاع کشور از سطح تراز دریا در حدود ۱۲۵۰ متر است. میانگین تقریبی بارش سالانه کشور در حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. میانگین دمای کمینه، میانگین و بیشینه‌ی ایران نیز به-

^۱ - Penha et al.,

ترتیب برابر با ۱۰/۸۵، ۱۸/۰۲ و ۲۵/۱۹ درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. به‌طور تقریبی نیز میانگین درصد گستره‌ی پوشش برف در ایران در حدود ۱/۹۶ درصد است که عدد بسیار کوچکی است (کیانی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کیخسروی، ۱۳۹۵). منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کل گستره‌ی ایران زمین را شامل می‌شود.

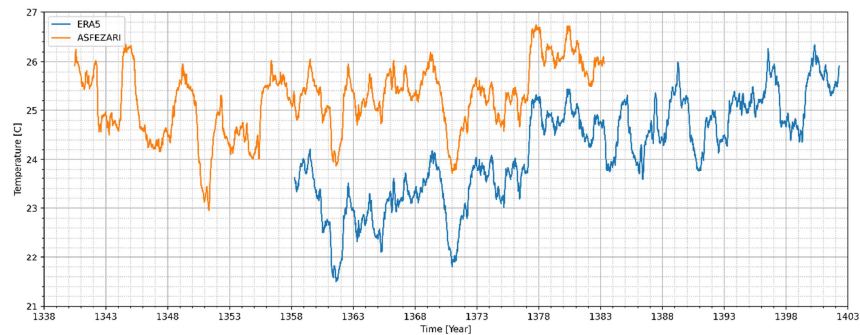


شکل ۱: منطقه مورد مطالعه. منبع: نویسندگان

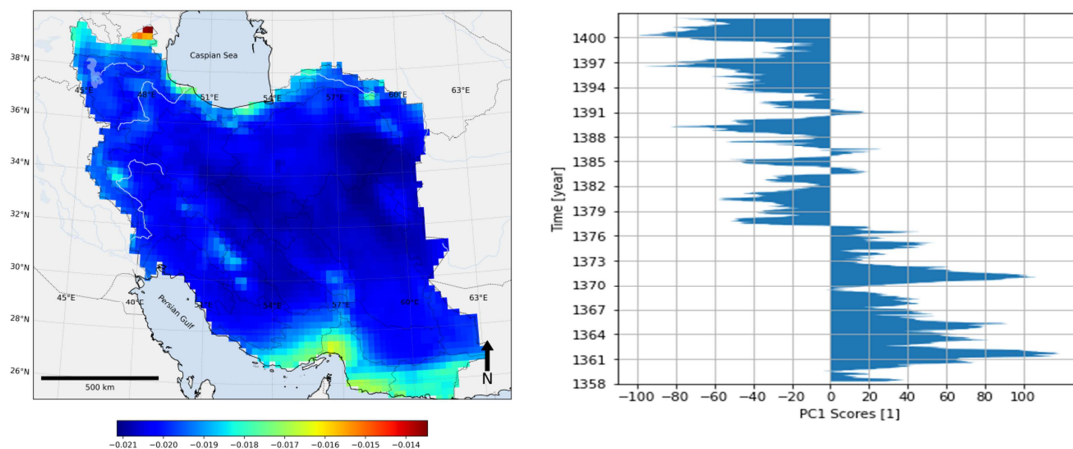
یافته‌های پژوهش

در گام نخست، برای بررسی وضعیت کلی دمای بیشینه‌ی ایران برای هر روز میانگین دمای بیشینه بر روی ایران محاسبه و سری زمانی دمای ایران با پنجره‌ی ۳۶۵ روزه هموار شد. بررسی سری زمانی هموارشده نشان می‌دهد دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ جهش داشته است که به‌صورت کاملاً آشکار در سری زمانی قابل رؤیت است. اما از آنجا که نمودار (شکل ۲) حاصل میانگین‌گیری بر روی ۲۴۸۸ یاخته درون ایران است، می‌بایست نگاه ژرف‌تری به این موضوع انداخت تا میزان عمومیت این ویژگی در ایران ارزیابی شود. به‌طور کلی، از دیدگاه آب و هواشناختی اگر در سری زمانی پهنه‌ای یک متغیر ویژگی معینی دیده شود، انتظار می‌رود همان ویژگی در همه یا اغلب نقاط آن پهنه وجود داشته باشد؛ در غیر این صورت ویژگی یادشده ناگزیر باید در طی فرایند میانگین‌گیری ناپدید شود. برای بررسی میزان عمومیت این ویژگی در ایران یا به بیان دیگر برای بررسی این که آیا جهش دمایی سال ۱۳۷۷ در کل گستره ایران نیز دیده می‌شود یا خیر، نخست به کمک آرایه دمای بیشینه به ابعاد $۱۶۴۳۶ \times ۶۱ \times ۸۱$ برای تک تک یاخته‌ها سری زمانی هموارشده دمای بیشینه روی پنجره ۳۶۵ روزه محاسبه شد و آرایه‌ای به ابعاد $۱۶۰۷۲ \times ۶۱ \times ۸۱$ به‌دست آمد. در مرحله دوم، از این آرایه تنها داده‌های یاخته‌هایی که در مرز ایران قرار داشتند بیرون کشیده شد و آرایه زمان - مکان به ابعاد ۱۶۰۷۲×۲۴۸۸ آماده شد. نظر به این که ایران به‌دلیل تنوع ناهمواری و گستردگی عرض جغرافیایی از نظر میانگین و پراش دما نایک‌نواخت است. در مرحله سوم، آرایه دمای هموارشده استانداردسازی شد، به‌طوری‌که میانگین همه یاخته‌ها صفر و انحراف معیار آنها یک شود. در مرحله چهارم، یک واکاوی مؤلفه اصلی روی این آرایه استانداردشده انجام گرفت. این بررسی روشن ساخت که: (۱) نمرات مؤلفه اول تا پیش از ۱۳۷۷/۰۳/۱۰ همواره مثبت بوده و پس از آن مگر در سه بازه زمانی کوتاه (۱۳۸۳/۰۵/۲۹ تا ۱۳۸۴/۰۳/۲۷ و ۱۳۸۵/۰۸/۱۵ تا

۱۳۸۶/۰۳/۲۲ و ۱۳۹۰/۰۷/۳۰ تا ۱۳۹۱/۰۵/۱۰) همواره منفی بوده است (شکل ۳، الف). همچنین، بررسی بردار ویژه مؤلفه اول در ایران گویای آن است که مقادیر منفی کموبیش در همه بخش‌های کشور به روشنی قابل رؤیت است (شکل ۳، ب).



نمودار ۲: سری زمانی هموار شده دمای بیشینه ایران بر اساس داده‌های اسفزاری و داده‌های ERA5. منبع: نویسندگان

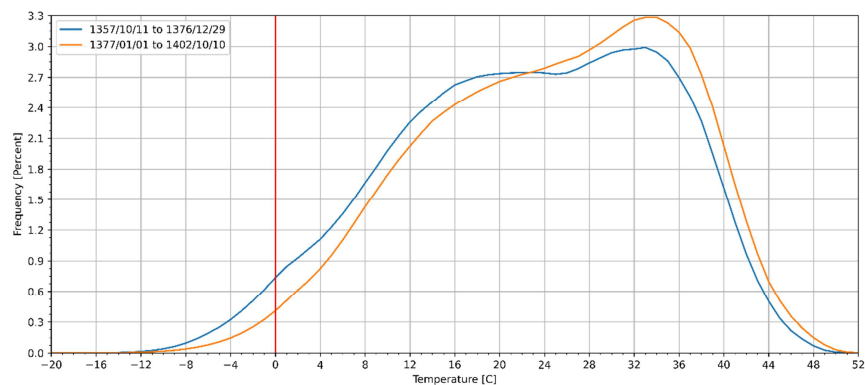


نمودار ۳: بردار ویژه مؤلفه اول و نمرات مؤلفه اول در گستره‌ی ایران. منبع: نویسندگان

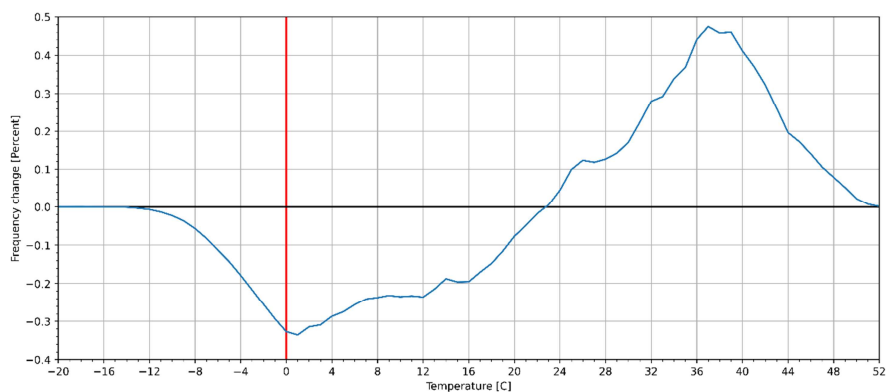
تغییر فراوانی دمای بیشینه پیش و پس از سال ۱۳۷۷

همان‌گونه که دیده می‌شود، سری زمانی دمای بیشینه در سال ۱۳۷۷ جهش نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این جهش ناشی از تغییر توزیع فراوانی دمای بیشینه بوده باشد. از این رو شایسته است توزیع فراوانی دمای بیشینه پیش و پس از سال ۱۳۷۷ شمارش و با یکدیگر سنجیده شود. برای دستیابی به این هدف، سری زمانی دمای بیشینه به دو بخش افراز شد: نخست از ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا ۱۳۷۶/۱۲/۲۹ به مدت ۷۰۱۹ روز و دوم از ۱۳۷۷/۰۱/۰۱ تا ۱۴۰۲/۱۰/۱۰ به مدت ۹۴۱۷ روز. با توجه به این که تعداد یاخته‌ها در مرز سیاسی ایران ۲۴۸۸ یاخته است، دو آرایه به ابعاد 7019×2488 و 9417×2488 برای این دو بازه زمانی به‌دست آمد. چون در سراسر بازه زمانی دمای بیشینه در درون مرزهای ایران بین $22/4$ تا $53/9$ درجه سلسیوس بوده است، دسته‌های دمایی از 23 تا 54 درجه سلسیوس با بازه یک درجه سلسیوس برای شمارش فراوانی به‌کار گرفته شد. از آنجا که یاخته‌ها ناهم‌اندازه هستند و مساحت کوچک‌ترین یاخته 596 کیلومتر مربع و مساحت بزرگ‌ترین یاخته 699 کیلومتر مربع است، مساحت نسبی

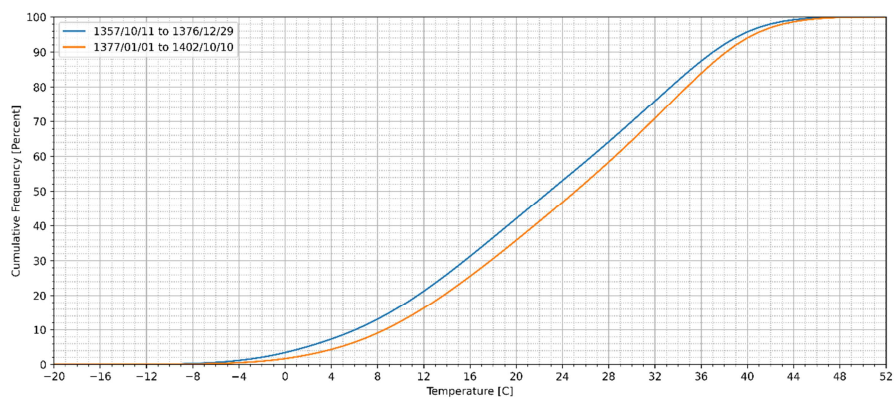
یاخته‌ها به‌عنوان وزن فراوانی دمای ثبت‌شده بر روی هر یاخته درنظر گرفته شد. از این‌رو، اگر در یک روز معین فراوانی وزنی یک بازه دمایی معین بر روی ایران برابر یک باشد، به این معنا است که سراسر ایران آن بازه دمایی را تجربه می‌کرده است و اگر نیم باشد یعنی نیمی از ایران در آن بازه دمایی قرار داشته است. سپس فراوانی مطلق به درصد فراوانی تبدیل شد تا داده‌های دو بخش ناهم‌اندازه با یکدیگر سنجش‌پذیر شوند. شکل ۴ برونداد این پردازش است. از این نمودار دو نکته بسیار با ارزش درباره توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران آشکار می‌شود: نخست این که توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران به راست جابه‌جا شده است. به سبب این جابه‌جایی فراوانی دماهای زیر ۲۳ درجه سلسیوس نسبت به گذشته کاهش و فراوانی دماهای بیش از ۲۳ درجه سلسیوس افزایش یافته است. دوم آن که تمایز فصلی دما که در گذشته بارزتر بوده و توزیع دما گواه آن است تضعیف شده و توزیع دما به سوی توزیع تک‌نمایی در حال تغییر شکل است. به بیان دیگر، تفاوت میان فصل گرم و فصل سرد در حال کاهش است. این ویژگی باعث شده تا چولگی به سمت چپ در توزیع دمای بیشینه بیشتر نمایان شود. شکل ۴ به روشنی نشان می‌دهد که میانه دمای بیشینه دو درجه سلسیوس افزایش یافته است. پیش از سال ۱۳۷۷ میانه دمای بیشینه ایران ۲۲/۹ درجه سلسیوس بوده است در حالی که پس از سال ۱۳۷۷ میانه به ۲۵/۱ درجه سلسیوس رسیده است. همین ویژگی درباره‌ی میانگین هم درست است. به بیان دیگر، میانگین دمای بیشینه ایران که پیش از سال ۱۳۷۷ برابر ۲۳ درجه سلسیوس بوده، پس از این سال به ۲۵ درجه سلسیوس رسیده است. فراوانی دمای بیشینه ۳۷ درجه سلسیوس بیشترین افزایش را نشان می‌دهد و نسبت به گذشته نزدیک به ۵/۰ درصد افزایش یافته است. در برابر آن فراوانی دمای بیشینه یک درجه سلسیوس بیشترین کاهش را نشان داده و نسبت به گذشته بیش از ۳/۰ درصد کاهش یافته است (شکل ۵). تفاضل دو نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که میانگین جابه‌جایی به راست دمای بیشینه ۱/۹ درجه سلسیوس بوده است. فراوانی دماهای زیر صفر که پیش از سال ۱۳۷۷ حدود ۲/۷ درصد بوده است، پس از سال ۱۳۷۷ نصف شده و به ۱/۳ درصد کاهش یافته است (شکل ۶). همچنین، برای بررسی دقیق‌تر ابعاد تغییرات دمایی سال‌های قبل و بعد از سال ۱۳۷۷ خورشیدی، مقدار جابه‌جایی دما بر روی هر یک از صدک‌های دمایی برای دو دوره محاسبه شد. همان‌گونه که در نمودار شکل ۷ دیده می‌شود، صدک‌های دمایی ده تا شصت درصد بین ۲ تا ۲/۵ درجه سلسیوس جابه‌جایی به راست داشته‌اند (شکل ۷). همچنین، همان‌گونه که دیده می‌شود صدک‌های دمایی ۹۰ تا ۱۰۰ کمترین افزایش دمایی را داشته‌اند. در واقع این نمودار نشان می‌دهد همه‌ی طبقات دمایی که در اینجا به‌صورت صدک آورده شده است، در دوره‌ی ۱۳۷۷ به بعد نسبت به دوره‌ی ۱۳۷۷ به قبل افزایش یافته‌اند که این نمودار به روشنی گویای آن است که دما در دوره‌ی بعد از سال ۱۳۷۷ نسبت به دوره‌ی پیش از آن به‌طور معناداری افزایش یافته است که بازتاب آن بر روی صدک‌های دمایی کاملاً روشن و آشکار است.



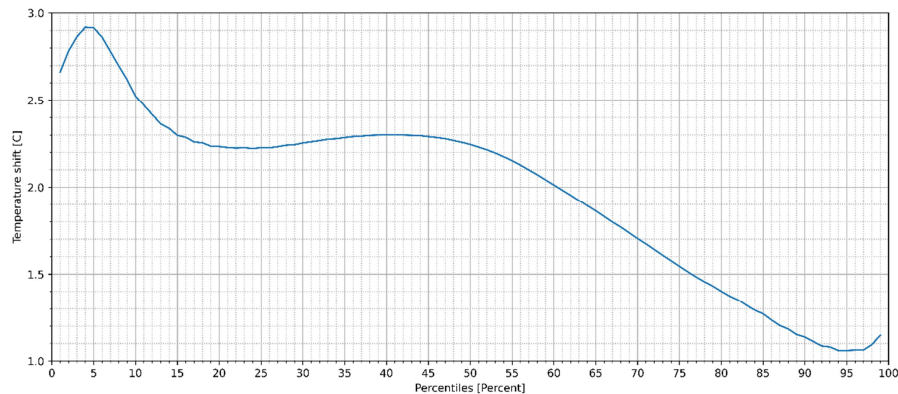
شکل ۴: توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان



شکل ۵: درصد تغییر توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان

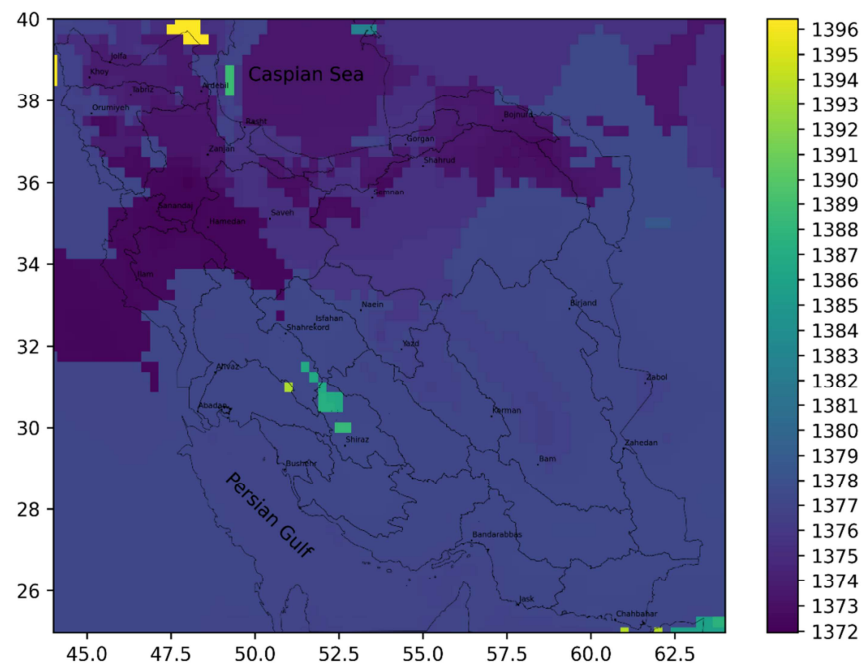


شکل ۶: درصد فراوانی انباشته (برابر و کمتر) دمای بیشینه ایران پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان

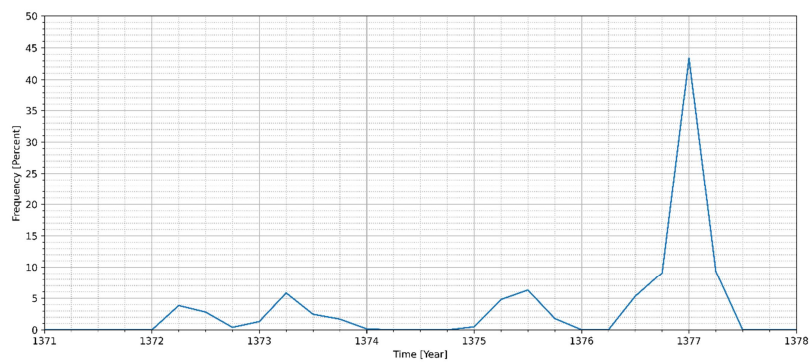


شکل ۷: مقدار جابه‌جایی دما در صدک‌های مختلف دمایی پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان

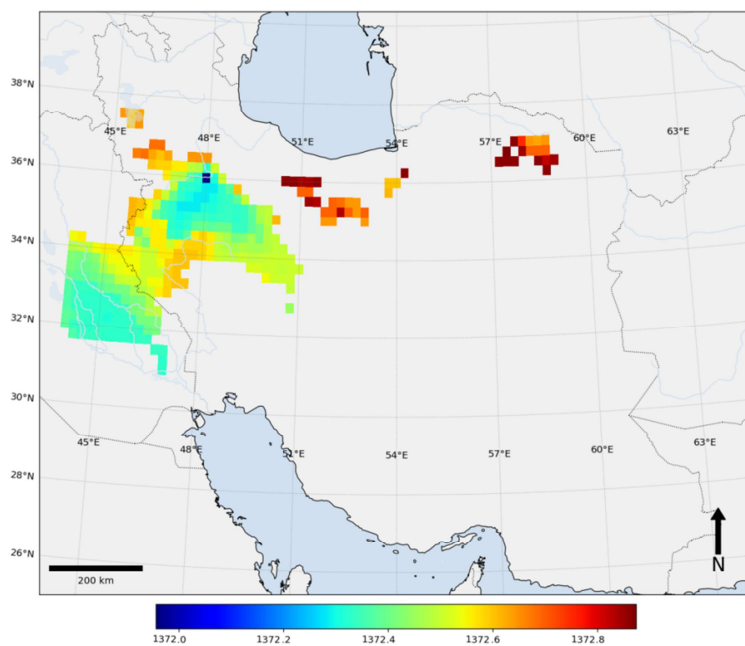
برای بررسی جهش در داده‌ها در گستره‌ی ایران بر روی هر یاخته زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای هموارشده روی پنجره ۳۶۵ روزه بر حسب سال محاسبه گردید. یافته‌ها نشان می‌دهد در غالب نقاط ایران یک جهش دمایی بین سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۷۷ به روشنی قابل رؤیت است (شکل ۸)، همین مسئله نیز بر روی نمودار سری زمانی داده‌ها دیده می‌شود به‌گونه‌ای که نزدیک به ۴۵ درصد از گستره‌ی ایران در سال ۱۳۷۷ خورشیدی دارای یک جهش دمایی است (شکل ۹). بازهم برای بررسی دقیق‌تر این مسئله قلمروهای مختلف ایران بر حسب سالی که جهش دمایی در آن رخ داده است، استخراج و ترسیم گردید. مقادیر جعبه رنگ بر حسب سال می‌باشند. جالب این که الگوهایی که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ دیده می‌شود، همه دارای الگوی جغرافیایی است. برای نمونه در سال ۱۳۷۲ خورشیدی بخش‌های غربی ایران دارای جهش در دمای بیشینه هستند (شکل ۱۰)؛ اما در سال ۱۳۷۳ خورشیدی جهش دمایی به بخش‌های شمالی کشور کشیده شده است. در سال ۱۳۷۵ خورشیدی جهش دمایی بر روی قسمت‌های مرکزی و شمالی دیده می‌شود (شکل ۱۱). اما بارزترین جهش مربوط به سال ۱۳۷۷ خورشیدی است که این جهش دمایی در دو سوم جنوبی ایران به روشنی خود را نشان داده است (شکل ۱۲).



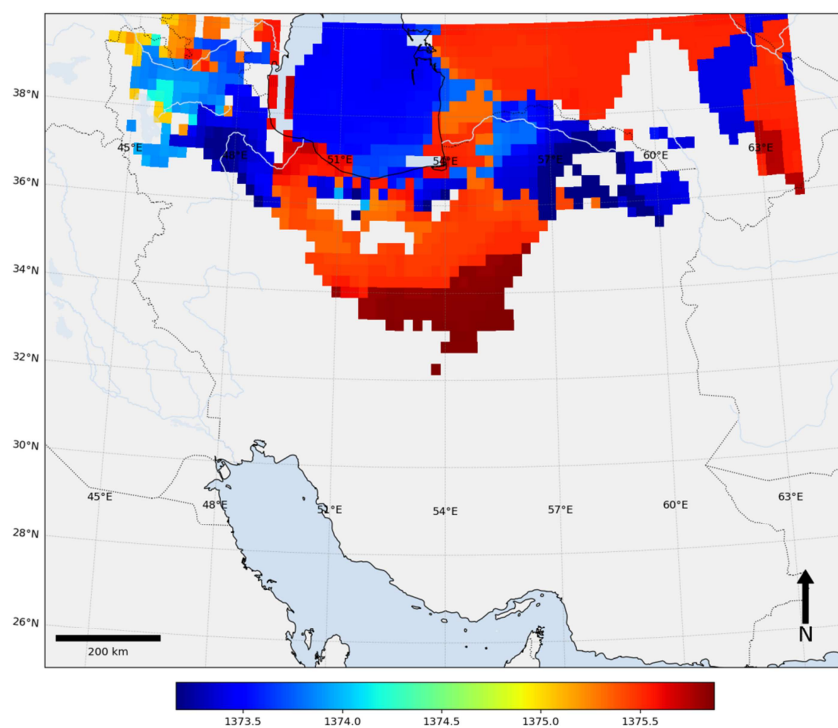
شکل ۸: زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای هموار شده روی پنجره ۳۶۵ روزه. منبع: نویسندگان



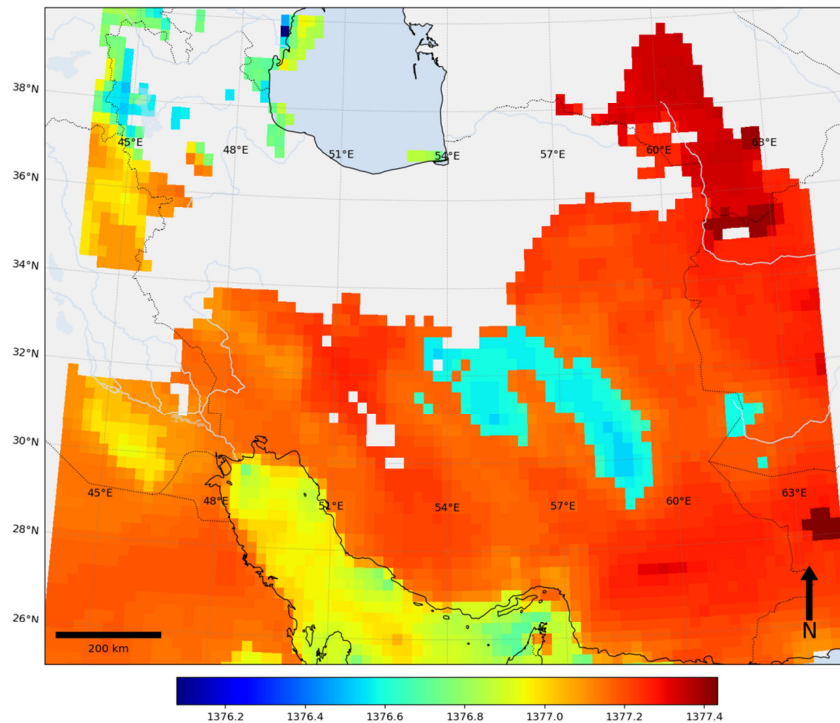
شکل ۹: درصد فراوانی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌ها. منبع: نویسندگان



شکل ۱۰: قلمرو جغرافیایی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای بیشینه (سال ۱۳۷۲). منبع: نویسندگان



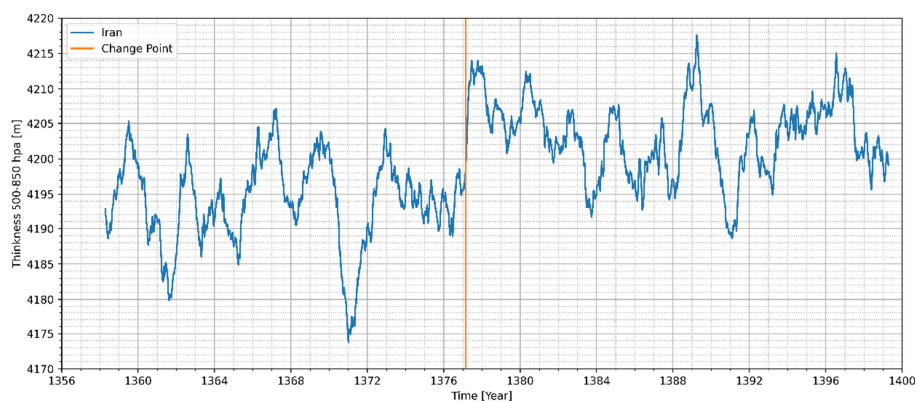
شکل ۱۱: قلمرو جغرافیایی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای بیشینه (سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۵). منبع: نویسندگان



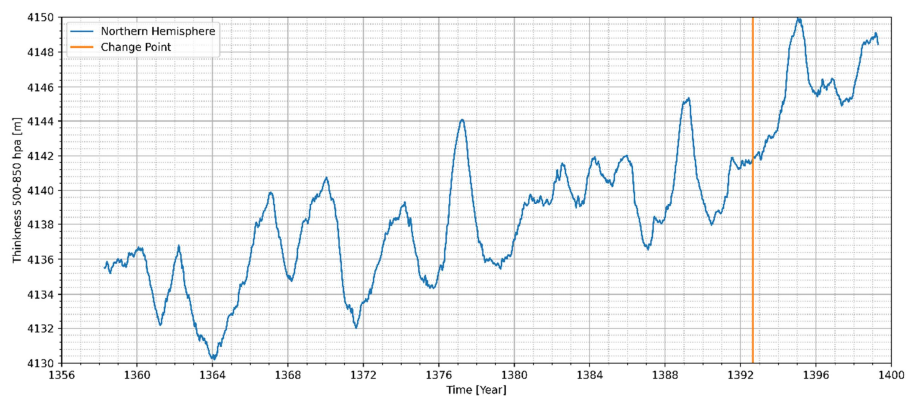
شکل ۱۲: قلمرو جغرافیایی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای بیشینه (سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۷). منبع: نویسندگان

دمای بیشینه کمیتی است که در نزدیکی سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. از این رو طبعاً می‌تواند از تغییراتی که در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد، بسیار اثر بپذیرد. گسترش شهرها، جنگل‌زدایی، بیابان‌زایی، خشکیدن دریاچه‌ها و عللی از این دست می‌توانند دمای بیشینه محل را دگرگون سازند. پس ناروا نخواهد بود اگر جهش دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ را ناشی از چنین عللی بپنداریم. از سوی دیگر، این گمان هم ناروا نیست که جهش دمای بیشینه ایران ناشی از بازیگران کلان‌تری باشد که در گستره‌های منطقه‌ای یا جهانی کار می‌کنند. در این صورت دور نیست که جهش دما محدود به سطح زمین نبوده بلکه ستبرای فراخی از هواسپهر را درگیر کرده باشد. برای بررسی این نظر میانگین وزنی هموارشده (پنجره ۳۶۵ روزه) ستبرای لایه ۸۵۰-۵۰۰ هکتوپاسکال بر فراز ایران و نیم‌کره شمالی بررسی شد. بسیار شایان توجه است که سری زمانی ستبرا در ۱۳۷۷/۰۲/۲۳ جهش نشان می‌دهد (شکل ۱۳). در سری زمانی نیم‌کره شمالی نیز در سال ۱۳۷۷ جهش دیده می‌شود؛ اما مهم‌ترین جهش این سری زمانی در ۱۳۹۲/۰۸/۱۹ رخ داده است (شکل ۱۴). این واقعیت که نه تنها دمای سطحی بلکه دمای نیمه زیرین هواسپهر جهش یافته است، می‌تواند نشانگر آن باشد که گرمایش نه پدیده‌ای محلی و منطقه‌ای بلکه پدیده‌ای جهانی است. در مطالعه‌ای نیز مسعودیان و منتظری (۱۳۹۴) تغییرات ستبرای هواسپهر را برای ترازهای ۱۰۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال برای دوره زمانی سال‌های ۱۳۵۷ تا ۱۳۹۲ بر روی ایران و نیم‌کره شمالی واکاوی نمودند. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد در سال ۱۳۷۷ خورشیدی بر روی نیم‌کره شمالی یک جهش قابل توجه و یک نقطه عطفی در سری زمانی ستبرای هواسپهر قابل‌رؤیت است و طی این دوره به‌طور کلی ۱۳ متر بر ستبرای هواسپهر نیم‌کره شمالی افزوده شده است. جالب این که نقطه‌ای عطفی که در سال ۱۳۷۷ در دمای بیشینه و همچنین در ستبرای هواسپهر به روشنی دیده می‌شود، بر روی وجوه دیگری نیز خود را نشان داده است. برای نمونه، در مطالعه‌ای محمدی و همکاران

(۲۰۲۴) تغییرات سطح آب دریاچه‌ی ارومیه را برای بازه‌ی زمانی ۱۹۷۳-۲۰۲۲ واکاوی نمودند. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۰ میلادی برابر با سال ۱۳۷۷ خورشیدی یک تغییر ناگهانی کاهشی در تراز آب دریاچه دیده می‌شود (محمدی و همکاران، ۲۰۲۴، ۲۲۰). با توجه به این که در سال ۱۳۷۷ زمین یکی از نیرومندترین النینیوی ثبت‌شده خود را تجربه کرده است، آیا جهش دمایی یاد شده ناشی از رخداد این رویداد بوده است؟ آیا رخداد النینیوی سال ۱۳۷۷ آنچنان نیرومند بوده است که حالت دستگاه اقلیم را تغییر داده و تعادل پیشین اقلیم جهان را بر هم زده و آن را وارد تعادل تازه‌ای کرده است؟ اگر چنین بوده باشد پرسش بسیار مهم دیگری که شایسته بررسی است آن خواهد بود که چه پدیده‌های دیگری یارای آن را دارند تا چنین تغییرات بازگشت‌ناپذیری در دستگاه اقلیم پدید آورند؟ آیا جامعه بشری توان پرداخت تاوان این تغییرات را دارد؟



شکل ۱۳: مهم‌ترین جهش در میانگین ستبرای لایه ۵۰۰-۸۵۰ هکتوپاسکال بر روی ایران. منبع: نویسندگان



شکل ۱۴: مهم‌ترین جهش در میانگین ستبرای لایه ۵۰۰-۸۵۰ هکتوپاسکال بر روی نیم‌کره شمالی. منبع: نویسندگان

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران پرداخته شد. تغییرات فرین‌های دمایی نقش مهمی در تأثیرگذاری بر انرژی، نظام بهداشتی، کشاورزی و منابع اقتصادی دارند و شناخت توزیع احتمال دماهای فرین برای سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است. با استفاده از داده‌های دمای بیشینه روزانه از تاریخ ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا

۱۴۰۲/۱۰/۱۰ برای ۱۶۴۳۶ روز بر روی چهارچوب مکانی ۶۱×۸۱ با تفکیک مکانی $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ درجه، تغییرات ویژگی‌های دمای بیشینه ایران مورد بررسی قرار گرفت. از مجموع ۴۹۴۱ یاخته روزانه در چارچوب مکانی ایران، تنها ۲۴۸۸ یاخته در مرزهای سیاسی ایران در تحلیل‌ها برای تعداد ۱۶۴۳۶ روز لحاظ شد. سری زمانی هموارشده دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ جهش قابل‌توجهی را نشان داد که این ویژگی در بیشتر نقاط ایران مشاهده شد. پس از استانداردسازی داده‌ها، واکاوی مؤلفه اصلی نشان داد که نمرات مؤلفه اول تا پیش از ۱۳۷۷/۰۳/۱۰ همواره مثبت بوده و پس از آن بیشتر منفی شد، مگر در سه بازه زمانی کوتاه. این تغییرات به وضوح در سراسر ایران قابل مشاهده است. توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران پس از سال ۱۳۷۷ به سمت مقادیر بالاتر جابه‌جا شده و فراوانی دماهای بالای ۲۳ درجه افزایش یافته است. تمایز فصلی دما نیز کاهش یافته و توزیع دما از دو نمایی به تک‌نمایی تغییر کرده است که نشان‌دهنده کاهش تفاوت دمایی میان فصل‌های گرم و سرد است. این تغییر موجب افزایش چولگی به چپ در توزیع دمای بیشینه شده است. همچنین، فراوانی دمای بیشینه ۳۷ درجه سلسیوس بیشترین افزایش (۵/۰ درصد) و دمای یک درجه سلسیوس بیشترین کاهش (۳/۰ درصد) را نشان داده است. این جهش دمایی در سال ۱۳۷۷ ممکن است ناشی از عوامل محلی مانند شهرسازی، بیابان‌زایی و تغییرات زمین‌شناختی باشد؛ اما بررسی ستبرای لایه ۵۰-۸۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که این جهش به نیمه زیرین هواسپهر نیز گسترش یافته است که نشان‌دهنده جهانی بودن پدیده گرمایش است. همچنین، ممکن است جهش دمایی سال ۱۳۷۷ با رخداد نیرومند النینو در همان سال مرتبط باشد که می‌تواند تغییرات اقلیمی جهانی را به‌طور گسترده‌تری تحت تأثیر قرار دهد و تعادل پیشین اقلیم را به هم بزند و وارد تعادل جدیدی کند.

منابع

- علیزاده چوبری، امید؛ نجفی، محمد. (۱۳۹۶). روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳(۴۳)، صص: ۵۸۴-۵۶۹.
- کیخسروی کیانی، محمدصادق. (۱۳۹۵). آب و هواشناسی پوشش برف در ایران با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی. استاد راهنما: مسعودیان، سید ابوالفضل، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، گروه جغرافیای طبیعی.
- مسعودیان، سید ابوالفضل؛ منتظری، مجید. (۱۳۹۴). گرمایش جهانی و ستبرای نیمه‌ی زیرین هواسپهر. فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، ۲(۱۱۷)، صص: ۱-۱۲.
- مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۴۰۰). واکاوی توزیع فراوانی دمای رویه‌ی زمین ایران با داده‌های مودیس آکوا. فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، شماره‌ی ۱۸(۶۰)، صص: ۳۰-۲۱.
- Al-Ataby, I. K., & Al-Tmimi, A. I. (2020). Estimate the probability density function of maximum temperature for the Middle East. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 29(4 [90]).
- Asakereh, H., Khosravi, Y., Doostkamian, M., & Solgimoghaddam, M. (2020). Assessment of spatial distribution and temporal trends of temperature in Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 549-561.
- Chowdhury, R., Chadalavada, S., Pakdel, H., & McDougall, K. (2022). Extreme Temperatures and Temperature-Duration-Frequency (TDF) Relationship in Australia
- Darand, M. (2020). Future changes in temperature extremes in climate variability over Iran. *Meteorological Applications*, 27(6), e1968.
- Delgado-Torres, C., Donat, M. G., Soret, A., González-Reviriego, N., Bretonnière, P. A., Ho, A. C., ... & Doblas-Reyes, F. J. (2023). Multi-annual predictions of the frequency and intensity of daily temperature and precipitation extremes. *Environmental Research Letters*, 18(3), 034031
- Dong, X., Zhang, S., Zhou, J., Cao, J., Jiao, L., Zhang, Z., & Liu, Y. (2019). Magnitude and frequency of temperature and precipitation extremes and the associated atmospheric circulation patterns in the Yellow River basin (1960–2017), China. *Water*, 11(11), 2334.
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., ... & Folland, C. K. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324), 364-367.

- Kiany, M. S. K., Masoodian, S. A., & Balling Jr, R. C. (2021). Climatology and variability of the start, end, and length of the frost-free season across Iran. *Climate Research*, 84, 59-73.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 138(3-4), 1539-1562.
- Guirguis, K., Gershunov, A., Cayan, D. R., & Pierce, D. W. (2018). Heat wave probability in the changing climate of the Southwest US. *Climate Dynamics*, 50, 3853-3864.
- Javanshiri, Z., Pakdaman, M., & Falamarzi, Y. (2021). Homogenization and trend detection of temperature in Iran for the period 1960–2018. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1233-1250.
- Li, Z., Xue, H., Dong, G., Liu, X., & Lian, Y. (2024). Spatiotemporal Variation in Extreme Climate in the Yellow River Basin and its Impacts on Vegetation Coverage. *Forests*, 15(2), 307.
- Lin ML, Tsai CW, Chen CK. 2021. Daily maximum temperature forecasting in changing climate using a hybrid of multi-dimensional complementary ensemble empirical mode decomposition and radial basis function neural network. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 38(12):100923.
- Mahmoudi, P., Mohammadi, M., & Daneshmand, H. (2019). Investigating the trend of average changes in annual temperatures in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1079-1092.
- Mohammadi, H., Khalili, K., Rezaie, H., & Amini-Rakan, A. (2024). Analysis of Trend and Detection of Change Points in Lake Urmia Level and Climatological Parameters Using R Software. *Water Harvesting Research*, 7(2), 220-233.
- Murthy KVN, Saravana R, Kumar GK, Kumar KV. 2021. Modelling and forecasting for monthly surface air temperature patterns in India, 1951–2016: Structural time series approach. *Journal of Earth System Science*. 130(1):21
- Penha, R., & Hines, J. W. (2001, May). Using principal component analysis modeling to monitor temperature sensors in a nuclear research reactor. In Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2001).
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In 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, pp. 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013
- Singirankabo, E., Iyamuremye, E., Habineza, A., & Nelson, Y. (2023). Statistical modelling of maximum temperature in Rwanda using extreme value analysis. *Open Journal of Mathematical Sciences*, 7, 180-195.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464
- Van der Wiel, K., & Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1.