

Identification and Analysis of Heatwave Characteristics in Iran Based on Multiple Indices

Alireza Shakiba^{1*} , **Neda Esfandiari²**, **Babak Mirbagheri³**, **Ehsan Allahgholipour⁴**

1. Corresponding Author, Associate Professor, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: a-shakiba@sbu.ac.ir

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-0973>

2. Postdoc Researcher, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. MSc. of GIS, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 12 July 2025 Revised: 03 September 2025 Accepted: 17 September 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Heatwave Characteristics, Probability Density Function (PDF), Temporal Trend, Critical Points, Maximum and Minimum Temperature, Iran.	Heatwaves are among the most critical climate-related hazards, posing serious risks to human societies and ecosystems. The accelerating pace of global warming highlights the need for detailed investigations of this phenomenon. In this study, daily maximum and minimum temperature data for 30 years (1995–2024) were used to identify local heatwave thresholds based on the 90th percentile and probability density functions. Five major heatwave characteristics: number of events, number of heatwave days, magnitude, amplitude, and longest duration were extracted across Iran. Their spatial distribution and hotspot regions were identified, and temporal trends were assessed using the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator. Results show that, in addition to arid and southeastern regions (e.g., Lut Desert, Central Plateau, Southern Baluchestan, Hamun basins), high-altitude areas of the Zagros Mountains—particularly the Tashk–Bakhtegan basin—are highly exposed in terms of heatwave frequency and duration. In the lowland plains of the southwest and southeast (e.g., Khuzestan, Lut Desert, Hamun, Baluchestan), heatwave intensity has in some years exceeded 50 °C (maximum) and 40 °C (minimum). Trend analysis revealed statistically significant increases in all heatwave characteristics, especially in the number of events and days, with average slopes of ~0.24 events and 1.2 days per year across most regions. While northern and southern coastal areas (e.g., Persian Gulf coast) have remained relatively unaffected by persistent daytime heatwaves, nighttime events show a clear increasing trend. Moreover, the highest long-term averages for all characteristics occurred during the last eight years of the study period, particularly in 2024.
How to Cite: Shakiba, A. , Esfandiari, N. , Mirbagheri, B. and Allahgholipour, E. (2026). Identification and Analysis of Heatwave Characteristics in Iran Based on Multiple Indices. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 175-202.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.52604.2125 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Heatwaves are among the most severe climate-related hazards, with impacts increasingly amplified by global warming. They are linked to excess mortality, pressure on infrastructure and energy systems, agricultural losses, and ecological disruption. Iran, situated in an arid and semi-arid region of the Middle East, is particularly vulnerable to the rising frequency and intensity of heatwaves. Previous studies in Iran have mainly relied on station-based temperature records, which offer limited spatial coverage. This study addresses this gap by employing high-resolution gridded temperature data and a probabilistic approach to detect and analyze heatwave events across Iran during 1995–2024.

DATA AND METHODOLOGY

Daily maximum and minimum temperature data for 1995–2024 were obtained from the ERA5 reanalysis dataset at 0.25° spatial resolution. Heatwave thresholds were defined using the Probability Density Function (PDF) method, based on the 90th percentile of temperature distributions, with a 21-day moving window applied to reduce temporal variability. Heatwaves were identified separately for maximum and minimum temperatures, with a minimum duration of three consecutive days.

Five key heatwave characteristics were extracted for each grid cell (Table 1): (i) number of events, (ii) number of heatwave days, (iii) magnitude (average intensity), (iv) amplitude (maximum daily value within the event), and (v) longest continuous duration. Spatial and temporal trends of these indicators were analyzed using the non-parametric Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator. Areas exceeding the 95th percentile in each index were classified as critical zones.

Table 1. Definition of Identified Heatwave Characteristics

Feature	Definition (Unit)
Number of Events	Number of heatwave or warm spell occurrences during the study period (events)
Number of Days	Total number of days associated with heatwaves or warm spells (days)
Heatwave Magnitude	Average temperature across all heatwave or hot period events (°C)
Heatwave amplitude	Highest daily temperature recorded during the hottest heatwave, selected based on the magnitude (°C)
Longest Heatwave Duration	The heatwave with the longest consecutive duration among all events (days)

RESULTS AND DISCUSSION

Spatial distribution maps indicated that heatwaves are not confined to desert and lowland regions; the Zagros highlands—particularly the Tashk–Bakhtegan basin—also exhibit high event frequencies. On average, 2–5 heatwave events per year were recorded based on maximum temperature. In southeastern Iran and the southwestern plains (e.g., Khuzestan), extreme intensities were observed, with maximum temperatures surpassing 50 °C in some years.

Heatwaves based on minimum temperature, reflecting nocturnal heat stress, showed increasing trends, especially along the southern and northern coasts. The highest average magnitudes occurred in southern and southeastern regions, where high humidity and limited nighttime cooling amplified nocturnal heat levels. The most extreme peak temperatures were identified in Khuzestan, the Lut Desert, and parts of Sistan and Baluchestan.

Temporal analysis revealed statistically significant upward trends in most indicators—particularly in the number of events and heatwave days. The steepest increases occurred in the Zagros foothills, where annual rises exceeded 0.24 events and 1.2 days. The longest continuous heatwaves lasted 7–10 days in desert areas, with some extreme events extending up to 40 days.

The composite risk map identified the Tashk–Bakhtegan basin, southern coasts, the Khuzestan plain and southeastern Iran as multi-dimensional hotspots, simultaneously exhibiting high frequency, magnitude, and amplitude. Annual records showed that the warmest years—especially 2021 and

2024—had the highest cumulative values across all heatwave indicators. Notably, eight of the hottest years fell within the final eight years of the study period, reflecting an accelerated warming trend (Figure 1)

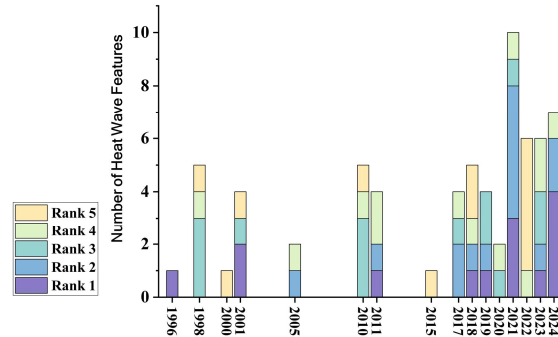


Figure 1: Top Five Highest Averages of Heatwave Characteristics Based on Ranking across the Study Years (1995–2024)

CONCLUSION

This study demonstrates that the intensity, duration, and frequency of heatwaves in Iran have increased significantly over the past three decades. These events are no longer limited to traditionally hot zones; mountainous and coastal areas are increasingly affected, particularly by nighttime heatwaves. By integrating high-resolution gridded data with a probabilistic approach, the study provided a more accurate representation of spatial and temporal patterns compared to station-based analyses.

The findings emphasize the urgent need for localized adaptation planning and early warning systems, particularly in newly identified hotspots such as the Zagros foothills and coastal regions. With continued warming, compounding risks related to human health, agriculture, and energy demand are likely to intensify. Future research should integrate heatwave characteristics with socio-economic vulnerabilities and land use changes to support comprehensive risk reduction strategies.

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.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is based upon research funded by the Iran National Science Foundation (INSF) under project No. 4036035.

REFERENCES

References [in Persian]

- Esmaeili, H., Roshani, A. and Parak, F. (2018). Trend analysis of climate compound extreme indices in IRAN. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 1(2), 97-113. [in Persian]
- Esmaeil Negad, M., Khosravi, M., Aligane, B. and Masaoodian, S. (2013). Identifying Heat Waves of Iran. *Geography and Development*, 11(33), 39-5. [in Persian]
- Alavinia, S. H. (2022). Analysis of Extreme Temperature Change Trend under Future Scenarios to Assess Climate Fluctuations (Case Study: Sanandaj and Saghez Synoptic Stations). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 11(41), 1-16. [in Persian]
- bijandi, M., daryabari, S. J., Ranjbar, A. and Arbabi Sabzevari, A. (2022). Extreme events of cold and heat waves in the northeastern regions of Iran during the period 2001-2020. *Journal of Climate Research*, 1401(50), 41-60. [in Persian]

- Dargahian, F., Heidarnajad, S. and Razavizadeh, S. (2021). Investigating the trend of changes in the heat wave properties related to climate change in arid regions (Case Study: Yazd City). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(3), 564-577. [in Persian]
- Doostkamian, M., Haghighi, E. and Bourbouri, R. (2017). Analyzing and Identifying Regional Changes of Hot and Cold Zones in Iran in indifferent Periods. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(2), 141-162. [in Persian]
- jahanbakhsh asl, S., ghavidel, F. and ashjaei, M. (2015). Recognition, Classification and synoptical Analysis of Heat waves decreasing human hazards in the North West of Iran. *Environmental Management Hazards*, 2(4), 377-391. [in Persian]
- Ghasemifar, E. and Naserpour, S. (2017). Synoptic analysis of heat and cold waves over the southern coast of the Caspian Sea. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 26(103), 137-146. [in Persian]
- Karampoor, M., Rafiee, J. and Jafari, A. (2017). Identification and Analysis of Synoptic Heat Waves in West of Iran (Case Study: Ilam, Khuzestan, Lorestan, Kermanshah). *Environmental Management Hazards*, 4(3), 263-279. [in Persian]
- Hamidianpour, M., Nazaripour, H., Khazaie Fizabad, E., Farzane, M. and Firoze, S. (2023). Determining the change point of temperature thresholds of heat and cold waves in Iran during 1966-2018. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(37), 133-150. [in Persian]
- Rezaei, F., Ahmadi, M. and Shakiba, A. (2019). Simulation of temperature threshold heat waves during warm spells in Iran based on scenarios RCP (2016-2045). *Research in Earth Sciences*, 10(3), 231-247. [in Persian]
- Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on the CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research*, 53(1), 75-90. [in Persian]

References [in English]

- Abbasnia, M. (2019). Climatic characteristics of heat waves under climate change: a case study of mid-latitudes, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 21(2), 637–656. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0052-4>
- Abbasnia, M., Tavousi, A., & Khosravi, M. (2016). Identification and analysis of heat waves in Iran during 1981–2010: Spatial and temporal variations. *Journal of Spatial Analysis & Environmental Hazards*, 13, 11–23.
- Ansari, A. , Mahmoudi, P. , & Nazaripour, H. (2024). Observed changes in the characteristics of heat waves in hot and dry regions of Iran. *Idojaras – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 128(4), 473–496.
- Barton, L., & Greig, D. (2019). Using dynamic heat thresholds to assess heatwave events in the context of climate change. *Environmental Research Letters*, 14(10), 104018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3c74>
- Barreca, A., Deschênes, O., Greenstone, M., & Shapiro, J. (2016). *The effect of absolute versus relative temperature on health and the environment: Evidence from Italy, 2001–2015*. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054001.
- Beyraghdar Kashkooli, O., Karimian, S., & Modarres, R. (2022). Spatiotemporal variability of the Persian Gulf and Oman Sea marine heatwaves during 1982-2020. *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114174>
- Bonshoms, M., Ubeda, J., Liguori, G. et al. (2022) .Validation of ERA5-Land temperature and relative humidity on four Peruvian glaciers using on-glacier observations. *J. Mt. Sci.* 19, 1849–1873. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7388-4>
- Climate Central. (2024, August 7). Analysis: Climate change is increasing the danger of nighttime temperatures across the globe. Climate Central.
- De Polt, K., et al. (2023). Quantifying the impact of relevant heatwave durations. *Environmental Research Letters*, 18(10), 104005.
- Fallah Ghalhari, G., Farhang Dehghan, S., Akhlaghi Pirposhteh, E., & Asghari, M. (2021). Trend analysis and temporal and spatial distribution of wet bulb globe temperature as a heat stress index in Iran during the summer season over 30 years. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 6(4), 1476–1493. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v6i4.8153>
- Fatahian, M., Hejazizadeh, Z., Karbalaee, A. R., Shahidinia, H., & Wang, J. (2025). Spatio Temporal Analysis of Changes in the Iranian Summer Subtropical High Pressure System from a Climate Change Perspective. *Atmosphere*, 16(3), 273. <https://doi.org/10.3390/atmos16030273>
- Gao, J. , et al. (2015). Impact of extreme high temperature on mortality and regional level definition of heat wave: a multi-city study in China. *Science of the Total Environment*, 505, 535–544.
- Hanna, E. G. , Kjellstrom, T. , Bennett, C. , & Dear, K. (2010). Climate Change and Rising Heat: Population Health Implications for Working People in Australia. *Asia Pacific Journal of Public Health*, 23(2_suppl), 14S-26S. <https://doi.org/10.1177/1010539510391457>
- Hirsch, A. L., et al. (2022). Changes in land–atmosphere coupling increase compound drought and heatwave risk. *Nature Communications*, 13, Article 2380. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-00325-8>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2012), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by C. B. Field et al., 52 pp., *Cambridge Univ. Press, Cambridge*, U.K., and New York.
- Jangi, M. R., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Intensifying heatwave trends in Iran based on observational data using the excess heat factor (EHF). *Natural Hazards*, 120(2), 2073-2090.
- Joyce, P.W.S., Tong, C.B., Yip, Y.L. et al. Marine heatwaves as drivers of biological and ecological change: implications of current research patterns and future opportunities. *Mar Biol* 171, 20 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00227-023-04340-y>
- Kamangar, M., Ahmadi, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, 121, 1265–1288.
- Kodra, E., & Ganguly, A. (2014). Asymmetry of projected increases in extreme temperature distributions. *Scientific Reports*, 4, 5884. <https://doi.org/10.1038/srep05884>

- Meehl, G. A. , Tebaldi, C. , Tilmes, S. , Lamarque, J. -F. , Bates, S. , Pendergrass, A. , & Lombardozzi, D. (2018). Future heat waves and surface ozone. *Environmental Research Letters*, 13(6), 64004.<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabdc>
- Mojarrad, F., Masoompour, J., & Rostami, T. (2015). Statistical–Synoptic Analysis of Heat Waves above 40°C in the West of Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 13, 11–23.
- Muñoz Sabater, J. , Dutra, E. , Agustí Panareda, A. , Albergel, C. , Arduini, G. , Balsamo, G. , ... Thépaut, J. N. (2021). ERA5 Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383.
- Müller, V., et al. (2024). Evening humid heat maxima near the southern Persian/Arabian Gulf. *Communications Earth & Environment*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). Thermal Properties of Water and Coastal Temperature Moderation. NOAA JetStream.
- Nuttall, J. G. , O’Leary, G. J. , Khimashia, N. , Asseng, S. , Fitzgerald, G. , & Norton, R. (2012). ‘Haying-off’ in wheat is predicted to increase under a future climate in south-eastern Australia. *Crop and Pasture Science*, 63(7), 593–605.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates (Chapter on Coastal Climates)*. Routledge.
- Orlov, A. , Sillmann, J. , Aaheim, A. , Aunan, K. , & de Bruin, K. (2019). Economic Losses of Heat-Induced Reductions in Outdoor Worker Productivity: a Case Study of Europe. *Economics of Disasters and Climate Change*, 3(3), 191–211.
- Perera, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezini, J. -L., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150–159.<https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>
- Perkins, S. E. (2015). A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, 164–165, 242–267.<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517.
- Poulos, G., & Zhong, S. (2008). An Observational History of Small-Scale Katabatic Winds in Mid-Latitudes. *Geography Compass*, 2, 1798–1821.<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00166.x>
- Raei, E. , Nikoo, M. , AghaKouchak, A. , & GHWR. (2018). GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox. *Scientific Data*, 5, 180206.<https://doi.org/10.1038/sdata.2018.206>
- Ren, Y. , Liu, J. , Zhang, T. , Shalamzari, M. J. , Arshad, A. , Liu, T. , Willems, P. , Gao, H. , Tao, H. , & Wang, T. (2023). Identification and Analysis of Heatwave Events Considering Temporal Continuity and Spatial Dynamics. *Remote Sensing*, 15(5), 1369.<https://doi.org/10.3390/rs15051369>
- Seneviratne, S. I. , Donat, M. G. , & Chérut, F. (2013). A review of the global impacts of extreme heat events and the implications for climate change adaptation. *Nature Climate Change*, 3(8), 559–563.<https://doi.org/10.1038/nclimate1857>
- Sharifi, M. , & Ehteram, N. (2016). Spatial-temporal analysis of heat waves in Iran over the last three decades (1981–2010). *Natural Environment Change*, 2(1), 29–38.
- Smith, J., & Zhang, L. (2018). Analysis of temperature extremes using the probability density function (PDF) approach in climate studies. *Journal of Climate Research*, 34(2), 101–113.<https://doi.org/10.1002/jcr.2345>
- Stefanon, M., D’Andrea, F., & Drobinski, P. (2012). Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014023.<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014023>
- Sutanto, S.J., Zarzoza Mora, S.B., Supit, I. et al. Compound and cascading droughts and heatwaves decrease maize yields by nearly half in Sinaloa, Mexico. *npj Nat. Hazards* 1, 26 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00026-7>
- Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K., & Anagnostopoulou, C. (2022). Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe. *Water*, 14(4), 543.<https://doi.org/10.3390/w14040543>
- Vogel, M. M. , Zscheischler, J. , Fischer, E. M. , & Seneviratne, S. I. (2020). Development of Future Heatwaves for Different Hazard Thresholds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9), e2019JD032070.<https://doi.org/10.1029/2019JD032070>
- Wang, Y., & Liu, J. (2024). Impacts of Massive Topographies on Heat Waves in Global Drylands. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2024GL109979.
- Wu, S., Luo, M., Zhao, R., et al. (2023). Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves. *npj Clim Atmos Sci*, 6, 36.<https://doi.org/10.1038/s41612-023-00365-8>
- Yousefi-Kebriya, A., Nadi, M., Afaridegan, E., et al. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan, Iran: insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific Reports*, 15, 13626.<https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>
- Zhai, J. , Xue, X. , Li, W. , et al. (2024). Heatwave magnitude quantization and impact factors analysis over the Tibetan Plateau. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 85.
- Zhao, M., Lee, J. K. W., Kjellstrom, T., & Cai, W. (2021). Assessment of the economic impact of heat-related labor productivity loss: a systematic review. *Climatic Change*, 167(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03160-7>

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

شناسایی و تحلیل ویژگی‌های امواج گرمایی ایران بر پایه شاخص‌های چندگانه

علیرضا شکیب^{۱*} , ندا اسفندیاری^۲، بابک میرباقری^۳، احسان اله قلی پور^۴

۱. دانشیار دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS (نویسنده مسئول)

ایمیل: a-shakiba@sbu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-0973>

۲. پژوهشگر پس‌ادکتری دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS

۳. استادیار دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS

۴. کارشناس ارشد دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های موج گرما، تابع چگالی احتمال، روند زمانی، نقاط بحرانی، دمای بیشینه و کمینه، ایران.	امواج گرما یکی از مخاطرات مهم آب‌وهوایی به‌شمار می‌روند که می‌توانند پیامدهای جدی برای جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها به‌همراه داشته باشند. روند فزاینده‌ی دمای جهانی، لزوم بررسی دقیق‌تر این پدیده را بیش‌ازپیش نمایان ساخته است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های ۳۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۴) دمای بیشینه و کمینه روزانه، آستانه‌های محلی موج گرما بر پایه صدک ۹۰ام و با به‌کارگیری تابع چگالی احتمال تعیین شد. سپس پنج ویژگی موج گرما شامل تعداد رخداد، تعداد روزهای موج، بزرگی رخداد، اوج دمای، طولانی‌ترین دوره پیوسته در گستره ایران استخراج گردید. سپس توزیع مکانی هر شاخص به‌همراه نواحی بحرانی شناسایی شدند و روندهای زمانی با آزمون من - کندال و روش شیب سنس ارزیابی شد. نتایج نشان داد که علاوه بر گستره‌های کویری و جنوب شرقی (حوضه‌های آبریز کویر لوت، مرکزی، بلوچستان جنوبی، هامون)، نواحی مرتفع زاگرس به‌ویژه در حوضه طشک - بختگان نیز از نظر «تعداد رخداد» و «تعداد روز موج» در معرض خطر فراوانی قرار دارند. در دشت‌های پست جنوب غرب و جنوب‌شرق (جلگه خوزستان، حوضه آبریز کویر لوت، هامون، بلوچستان)، شدت موج گرما براساس اوج دمای بیشینه (کمینه) در برخی سال‌ها بیش از ۵۰ °C (۴۰ °C) بوده است. تحلیل روندهای زمانی حاکی از افزایش معنادار در تمام ویژگی‌های امواج گرما به‌ویژه تعداد رخدادها و تعداد روزهای موج گرما (شیب متوسط حدود ۰.۲۴ رخداد و ۱.۲ روز در سال) در بیشتر نواحی بود. همچنین، سواحل شمال و جنوب (خلیج فارس) کشور تا حدودی از افزایش پایداری موج گرما در روز در امان بوده، اما تعداد رخداد موج‌های شبانه روندی افزایشی داشته است. علاوه بر این، یافته‌ها نشان داد بالاترین میانگین‌ها در هر ویژگی در بلندمدت مربوط به هشت سال آخر بازه مطالعاتی به‌ویژه ۲۰۲۴ بوده است.

استناد: شکیب، علیرضا، اسفندیاری، ندا، میرباقری، بابک و اله قلی پور، احسان. (۱۴۰۵). شناسایی و تحلیل ویژگی‌های امواج گرمایی ایران

بر پایه شاخص‌های چندگانه. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۲۰۲-۱۷۵.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52604.2125



مقدمه

امواج گرمایی یکی از رویدادهای آب‌وهوایی شدید است که به‌صورت کوتاه منفرد و در بازه‌های زمانی چندروزه ادامه دارد (پرکینز و الکساندر^۱، ۲۰۱۳). در دهه‌های اخیر، موج‌های گرما به یکی از مرگ‌بارترین مخاطرات طبیعی در برخی مناطق تبدیل شده‌اند و به‌عنوان "قاتلان خاموش" شناخته می‌شوند (ژائو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). این پدیده نه تنها تهدیدی فزاینده برای سلامت عمومی، زندگی و رفاه انسان ایجاد می‌کند، تأثیرات اجتماعی قابل‌توجهی از آسیب‌رساندن به زیرساخت‌ها، فشار بر واحدهای امداد و بیمارستان‌ها، افزایش بار شبکه‌های برق تا فلج کردن سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و هوایی را به جا می‌گذارند. همچنین، مخاطراتی را در بخش‌های کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی ایجاد می‌کنند. صرف‌نظر از پتانسیل سازگاری هر منطقه در برابر این پدیده، رویداد بالا بر اساس ویژگی‌های متعددی مانند شدت، فراوانی، تداوم و زمان وقوع می‌تواند نوع متفاوتی از خطر را بر بخش‌های مختلف ایجاد کنند (پرکینز و همکاران، ۲۰۱۵). به‌عنوان مثال، میزان مرگ‌ومیر انسان بیشتر تحت تأثیر شدت موج گرما قرار می‌گیرد (هانا^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). درحالی‌که سیستم‌های کشاورزی بیشتر تحت تأثیر زمان‌بندی موج گرما قرار می‌گیرند (نوتال^۴ و همکاران، ۲۰۱۲). امواج گرمایی طولانی‌تر می‌تواند منجر به اثرات قوی‌تری بر اکوسیستم شود (جویسی^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). در عین حال گستره فضایی امواج گرمای پیوسته بر ظرفیت کاری تأثیر می‌گذارد و بهره‌وری نیروی کار را به‌ویژه برای کارگران در فضای باز کاهش می‌دهد (اورلو^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). ترکیب امواج گرمای پیوسته و بزرگ می‌تواند بر کارایی سیستم‌های آبیاری، افزایش نیاز آبی گیاهان و در نهایت تولید مواد غذایی تأثیر بگذارد. امواج گرمایی گسترده به‌صورت مکانی و زمانی حتی می‌تواند الگوهای کاربری زمین را تغییر دهد (سوتانتو^۷ و همکاران، ۲۰۲۴). در بخش انرژی ممکن است تقاضای برق را در مناطق بزرگ برای مدت طولانی به‌دلیل استفاده بیشتر از تهویه مطبوع افزایش داده و در نتیجه خطر قطع برق را افزایش دهد (پرا^۸ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، به طور قابل‌توجهی در شروع یا تشدید آتش‌سوزی‌های جنگلی نقش داشته باشد و با تشکیل آزن در سطح زمین، باعث آلودگی جدی هوا شوند (میل^۹ و همکاران، ۲۰۱۸).

انتظار می‌رود در جهانی گرم‌تر با افزایش میانگین دما، امواج گرما نه‌تنها تکرار شوند، مدت و شدت آن‌ها نیز به احتمال زیاد افزایش یابد (هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی^{۱۰}، ۲۰۱۲) و در نتیجه خطرانی را که جمعیت مناطق آسیب‌پذیر با آن مواجه هستند تشدید کند. بنابراین، امواج گرما چالش‌های مهمی را برای جوامع در سراسر جهان به ویژه در مناطقی با آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک ایجاد می‌کنند. ایران نیز که در منطقه خاورمیانه قرار دارد، از این پدیده مستثنا نیست. این کشور با گستره وسیعی از زمین‌های خشک و نیمه‌خشک، با آسیب‌پذیری شدید در برابر اثرات نامطلوب امواج گرما مواجه است که می‌تواند به‌طور نامتناسبی بر بخش‌های مختلف آن تأثیر بگذارد و نابرابری‌های موجود را تشدید کند. از آنجایی‌که امواج گرما به‌شدت در حال تغییر هستند و خسارت‌های زیادی به‌همراه دارند،

¹ Perkins & Alexander

² Zhao

³ Hanna

⁴ Nuttall

⁵ Joyce

⁶ Orlov

⁷ Sutanto

⁸ Perera

⁹ Meehl

¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

خطرات آن‌ها احتمالاً با عدم سازگاری نسبی بشر تشدید می‌شود. بنابراین، نیاز به برنامه‌ریزی سازگاری مؤثر اهمیت دارد که انجام آن مستلزم درک کامل و به روز از توزیع فضایی - زمانی امواج گرمایی به همراه ثبت ویژگی‌های آن‌ها در مقیاس فضایی بزرگ جهت مدیریت مخاطرات ناشی از این پدیده و افزایش تاب‌آوری جوامع در ایران است.

مطالعات زیادی با دیدگاه‌های متفاوت در مورد امواج گرما وجود دارد. آن دسته از مطالعاتی که مربوط به منطقه مورد مطالعه پژوهش یعنی ایران و نزدیک‌تر به موضوع پیش رو هستند شامل این تحقیقات می‌باشند: اسمعیل نژاد و همکاران (۱۳۹۲) امواج گرمایی ایران را با استفاده از حداکثر دما و به روش درون‌یابی برای ایستگاه‌های همدیدی کشور شناسایی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد موج‌های گرمایی کوتاه نسبت به امواج طولانی مدت رخداد بیشتری داشته است و پایان زمستان و روزهای نخستین پاییز موج‌های گرمایی فراوان‌تر هستند. دوستکامیان و همکاران (۱۳۹۵) پهنه‌های گرم ایران را طی دوره‌های مختلف شناسایی کرده و به تغییرات آن‌ها پرداختند و نتایج آن‌ها بیانگر این بود که پهنه‌های گرمایی به سمت دوره‌های اخیر علاوه بر گستردگی مکانی به سمت عرض‌های جغرافیایی بالا کشیده شده است. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۷) تغییرپذیری فرین‌های اقلیمی را بر اساس شاخص‌های ترکیبی و امواج گرمایی در گستره حوضه‌های آبریز کشور مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کاهش معنادار در شاخص روزهای سرد و خشک و افزایش معنادار در شاخص روزهای گرم و خشک می‌باشد. قاهره و همکاران (۲۰۲۱) به تحلیل روند و توزیع مکانی - زمانی دمای حباب مرطوب به‌عنوان شاخص استرس گرمایی طی دوره تابستان پرداختند و نشان دادند این شاخص به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک ایران روند صعودی را دنبال کرده است. بیجندی و همکاران (۱۴۰۱) رخداد‌های فرین امواج گرمایی را در مناطق شمال شرقی ایران بررسی کردند. تعداد وقوع امواج گرمایی در برخی ایستگاه‌ها افزایشی و در برخی کاهش یافته است. حسین‌پور و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل آماری امواج گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز پرداختند. آنها با استفاده از داده‌های دمای بیشینه امواج گرما و برخی ویژگی‌های آن‌ها را شناسایی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که فراوانی موج‌های گرمایی کوتاه‌مدت بیشتر بوده است. جنگی و همکاران (۲۰۲۳) روند تشدید امواج گرمایی را مبتنی بر داده‌های ایستگاهی و با استفاده از شاخص تنش گرمایی در ایران مورد مطالعه قرار داده و از ویژگی‌های آن‌ها به تعداد و فراوانی مدت و بزرگی امواج گرم در نواحی مختلف اقلیمی پرداختند. رضایی و همکاران (۱۳۹۸) آستانه دمایی امواج گرما طی دوره گرم سال را در ایران شبیه‌سازی کردند. بر اساس این پژوهش، آستانه‌های دمایی موج گرما در زمان‌ها و مکان‌های مختلف یکسان نیست. حمیدیان پور و همکاران (۱۴۰۲) نقطه تغییر آستانه‌های دمایی امواج گرمایی در ایران را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند آستانه دمایی امواج گرمایی طی چند دهه گذشته افزایش یافته است و به ازای هر سال بین ۰/۰۹ و ۰/۰۵۲ درجه سلسیوس بوده است. این مسأله باعث افزایش بسامد دماهای بیشینه گردیده و منجر به افزایش روزهای گرم و کاهش شب‌های سرد خواهد شد. عباس‌نیا (۲۰۱۹) ویژگی‌های اقلیمی امواج گرما را تحت تأثیر تغییر اقلیم برای عرض‌های جغرافیایی میانی ایران مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که انتظار می‌رود میانگین‌های فصلی شدت امواج گرما افزایش و تعداد فصلی فراوانی امواج گرما با توجه به خروجی همه سناریوها در دهه‌های آینده کاهش یابد. علوی نیا و همکاران (۱۳۹۹) روند تغییرات فرین‌های دما را برای ایستگاه‌های همدیدی سنندج و سقز تحت سناریوهای آینده به‌منظور ارزیابی نوسانات اقلیمی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده روند افزایشی دمای بیشینه مطلق و دمای کمینه مطلق طی سی سال آینده بود. زرین و رودباری (۱۳۹۹) در پیش‌بینی دمای ایران به آشکارسازی تنش‌های گرمایی با استفاده از شاخص طول مدت گرما پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد میانگین دمای

سالانه کشور تا ۱/۲۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. درگاهیان و همکاران (۱۴۰۰) روند تغییرات ویژگی‌های امواج گرمایی مرتبط با تغییر اقلیم در شهرستان یزد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده افزایش معنی دار فراوانی امواج گرما بوده و این روند در سایر ویژگی‌ها مانند تداوم و شدت هم مشاهده شده است. جهانبخش و همکاران (۱۳۹۴) به شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی در پنج ماه گرم سال در شمال غرب ایران پرداختند. الگوهای غالب همدیدی به هنگام وقوع امواج گرمایی را شناسایی کردند. قاسمی فر و ناصر پور (۱۳۹۵) امواج گرم را در سواحل جنوبی دریای خزر تحلیل سینوپتیکی انجام داده‌اند. کرم پور و همکاران (۱۳۹۶) امواج گرمایی غرب ایران را شناسایی و تحلیل سینوپتیکی کردند و دارند و همکاران (۲۰۱۷) شرایط سینوپتیکی منجر به دوره‌های گرم را در غرب ایران مورد بررسی قرار داده‌اند.

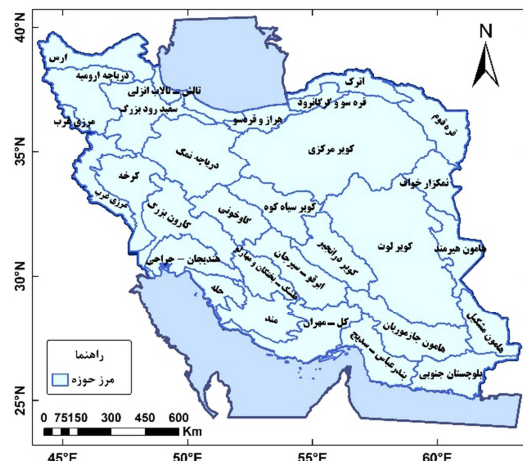
مطالعات داخل کشور امواج گرمایی را در قالب توزیع مکانی - زمانی، روند ناشی از تغییر اقلیمی و یا تحلیل همدیدی مورد مطالعه قرار داده‌اند. اگرچه این پژوهش به لحاظ شناسایی امواج گرمایی وجه مشترکی با سایر مطالعات دارد. با این حال تفاوت‌های آن ارزش و اهمیت این مطالعه را نشان می‌دهد: اغلب محققان در تجزیه و تحلیل‌های امواج گرما از داده‌های ایستگاهی هواشناسی استفاده کرده‌اند و کمتر به داده‌های شبکه‌ای توجه شده است. اگرچه این رویکردی عملی با نتایج قابل اعتماد است؛ اما نتایج آن تابع توزیع فضایی ایستگاه‌های هواشناسی است که اغلب از نظر فضایی متعادل نبوده یا نماینده دقیقی از همه انواع آب‌وهوا یا رژیم‌های دمایی در کشور نیستند. علاوه بر این، اقدام سازگانه در مواجهه با امواج گرمایی نیازمند شناسایی ابعاد زمانی و مکانی این پدیده است. بنابراین، در این پژوهش امواج گرمایی ایران به همراه ویژگی‌های طبیعی‌شان بررسی می‌شود، با این تفاوت که در شناسایی امواج گرمایی از داده‌های شبکه‌ای با دقت بالا استفاده می‌شود که نماینده مناسبی از دمای پهنه‌های جغرافیایی است. همچنین، از روش تابع چگالی احتمال به دلیل امکان تحلیل احتمالاتی و در نظر گرفتن دماهای نادر و انعطاف‌پذیری بالا در انواع توزیع‌ها استفاده می‌شود. امواج گرمایی براساس دمای کمینه و بیشینه به‌طور جداگانه شناسایی و تحلیل می‌شوند و امکان مقایسه را برای بخش‌های مختلف در معرض خطر فراهم می‌کند. در نهایت، این پژوهش، ویژگی‌های متنوع‌تری نسبت به سایر مطالعات را مورد تحلیل قرار می‌دهد که شامل فراوانی رخداد، تعداد روز، بزرگی رخداد، اوج دمایی موج، طول طولانی‌ترین دوره است.

داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات اقلیمی با دقت مکانی و زمانی بالا هستند. پارامترهای دمایی شامل کمینه و بیشینه دما، به صورت روزانه و در بازه بلندمدت ۳۰ ساله از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ برای تمام فصول سال به تفکیک ماه استخراج شده‌اند. این داده‌ها از پایگاه داده بازتحلیل نسل پنجم مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی اروپا^۱ با دقت شبکه‌ای ۰.۲۵ درجه قوسی دریافت شده‌اند. این پایگاه داده اطلاعات اقلیمی را در مقیاس‌های زمانی ساعتی و روزانه ارائه می‌دهد. داده‌های روزانه آن بر اساس جمع‌آوری داده‌های ساعتی در سطوح مختلف زمانی (یک، سه و شش ساعته) تهیه و منتشر شده‌اند و دقت آن در مطالعات بین‌المللی تأیید شده است؛ به‌طوری‌که خطای دمای ماهانه آن معمولاً از $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ فراتر نمی‌رود (ولیکو و همکاران ۲۰۲۲). این پایگاه داده در گزارش‌های IPCC، WMO

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

و تولید شاخص‌های اقلیمی^۱ GCOS نیز مورد استفاده قرار گرفته است (مونز^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). این داده‌ها در مناطق مختلف، از جمله در مناطق کوهستانی مانند یخچال‌های آند، اعتبارسنجی شده‌اند و مشخص شد مدل-ERA5 Land در بازتولید دمای دو متری هوا با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸۰ و خطای میانگین مربعات ریشه‌ای کمتر از $\pm 0.2^\circ\text{C}$ در مقیاس ماهانه عملکرد بسیار خوبی دارد. این نتایج نشان‌دهنده دقت قابل‌توجه، حتی در شرایط توپوگرافی پیچیده، هستند (بنشامز و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش، دمای دو متری سطح زمین به‌عنوان متغیر اصلی انتخاب شده که از طریق درون‌یابی بین پایین‌ترین سطح مدل و سطح زمین با در نظر گرفتن شرایط جوی، به دست آمده است. داده‌های این پایگاه که بر حسب کلون ارائه شدند، با کم کردن عدد ۲۷۳،۱۵ به درجه سلسیوس تبدیل و به کار گرفته شدند. همچنین، دمای کمینه و بیشینه روزانه با فراوانی ۶ ساعته دریافت شده است؛ به این معنی که این دما به صورت میانگین چهار بازه شش ساعته در طول ۲۴ ساعت (۰۰-۰۶، ۰۶-۱۲، ۱۲-۱۸، ۱۸-۲۴) محاسبه شده است. امواج گرما در محدوده کشور ایران شناسایی شدند و تحلیل‌های مرتبط به آن‌ها نیز در قالب حوضه‌های آبریز کشور ارائه شد (شکل ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه به همراه حوضه‌های آبریز درجه ۲. منبع: نویسندگان

روش‌ها

برای شناسایی موج گرما معمولاً از آستانه‌های دمایی استفاده می‌شود که می‌توانند به صورت ثابت یا نسبی تعریف شوند. آستانه‌های ثابت مانند دمای بالاتر از 40°C ساده و قابل مقایسه هستند؛ اما به دلیل بی‌توجهی به شرایط اقلیمی خاص مناطق مختلف، دقت کافی ندارند (وگل^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). در مقابل، آستانه‌های نسبی بر پایه داده‌های آماری بلندمدت اقلیمی و متناسب با اقلیم هر منطقه تنظیم می‌شوند (سنوریت^۴ و همکاران، ۲۰۱۳). همین‌طور، در شرایط تغییر اقلیم و افزایش دما که آستانه‌های ثابت ممکن است قادر به شناسایی صحیح موج‌های گرما نباشند، آستانه‌های نسبی قادرند به طور دائم با شرایط دمایی جدید همگام شوند (بارتون و گریگ^۵، ۲۰۱۹). بنابراین، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا از دقت و کارایی بیشتری در شناسایی موج‌های گرما برخوردار هستند. آستانه‌های نسبی خود

¹ Global Climate Observing System

² Muñoz

³ Vogel

⁴ Seneviratne

⁵ Barton & Greig

شاخص‌های مختلفی به‌وجود آورده‌اند که با مقایسه دماهای ثبت‌شده با مقادیر آماری مانند میانگین یا صدک‌های خاص کار می‌کنند. از آنجایی که ایران دارای تنوع اقلیمی گسترده‌ای است (از بیابان‌های گرم و خشک تا مناطق کوهستانی سرد) و استفاده از آستانه‌های مطلق ممکن است برای مناطق مختلف کشور مناسب نباشند؛ در این پژوهش از آستانه‌های نسبی و روش مبتنی بر تابع چگالی احتمال (PDF) برای شناسایی موج‌های گرما استفاده شده است. این رویکرد به‌جای اتکا به یک مقدار ثابت، دما را بر اساس توزیع آماری بلندمدت در هر نقطه جغرافیایی و برای هر روز سال ارزیابی می‌کند. در واقع، برای هر روز تقویمی یک مدل توزیعی از داده‌های دما بر اساس مشاهدات تاریخی ساخته شده و صدک‌های بالایی این توزیع (مانند صدک ۹۰ام) به‌عنوان آستانه انتخاب می‌شود (اسمیت و ژانگ^۱، ۲۰۱۸). چنین روشی این مزیت را دارد که آستانه‌ها با شرایط اقلیمی محلی سازگار می‌شوند. بنابراین، برای نقاطی که احتمال وقوع دماهای بسیار بالا در آن‌ها بیشتر است بهتر عمل می‌کند که این موضوع برای برنامه‌ریزی مدیریت بحران مهم است.

تابع چگالی احتمال به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$f(T) = (1 / (\sigma \sqrt{2\pi})) \times \exp(- (T - \mu)^2 / (2\sigma^2)) \quad (1)$$

که در آن T نشان‌دهنده مقدار دما است. μ میانگین داده‌های دما در بازه زمانی مورد نظر و σ انحراف معیار دما است. برای محاسبه آستانه‌های درصدی مثل ۷۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۹۵ از تابع توزیع احتمال، از رابطه ۲ استفاده می‌شود:

$$P(T_p) = \mu + Z_p \times \sigma \quad (2)$$

که در آن $P(T_p)$ آستانه دمایی در صدک p است. z_p مقدار Z-Score مربوط به صدک p در توزیع نرمال مثلاً: $Z_{90} = 1.282$ و $Z_{95} = 1.645$ است. μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌های دما هستند.

برای محاسبه این آستانه‌ها، به‌جای تمرکز صرف بر یک روز مشخص، از پنجره‌های زمانی متقارن در اطراف آن روز استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، برای تعیین آستانه روز ۱۵ ژوئن، داده‌های دمایی چند روز قبل و بعد از آن تاریخ در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از داده‌های موجود در این بازه، توزیع آماری دما محاسبه و آستانه صدکی مورد نظر استخراج می‌شود (استفان^۲ و همکاران، ۲۰۱۲). این روش باعث می‌شود که آستانه‌ها نه تنها به تغییرات اقلیمی محلی حساس باشند، بلکه اثر نوسانات کوتاه‌مدت فصلی نیز در نظر گرفته شود.

در این پژوهش، به منظور محاسبه امواج گرمایی، از کدهای توسعه داده‌شده توسط رائی و همکاران (۲۰۱۸) در محیط متلب^۳ استفاده شد و صدک ۹۰ام دما به‌عنوان آستانه بر اساس پنجره زمانی ۲۱ روزه (شامل ۱۰ روز قبل و ۱۰ روز بعد از روز موردنظر) محاسبه گردید. علاوه بر این، برای افزایش پایداری آماری، یک توالی حداقل سه روزه برای تعریف موج گرما در نظر گرفته شد. از آنجاکه طول پنجره زمانی می‌تواند بر نتایج تأثیرگذار باشد، بررسی‌های حساسیت اولیه نشان داد که افزایش طول پنجره منجر به شناسایی تعداد بیشتری رخداد می‌شود؛ درحالی که کاهش طول پنجره شرایط سخت‌گیرانه‌تری ایجاد کرده و رخدادهای کمتری شناسایی می‌شود. در نهایت، با توجه به یافته‌های پژوهش رائی و همکاران (۲۰۱۸) و برای ایجاد توازن میان دقت محاسبات و قابلیت مقایسه‌پذیری بین مناطق مختلف، پنجره ۲۱ روزه به‌عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. امواج گرما به‌صورت جداگانه برای دمای بیشینه و

¹ Smith

² Stefanon

³ MATLAB

کمینه شناسایی و تحلیل شده‌اند و برای هر رخداد، مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی (جدول ۱) استخراج و تحلیل شدند.

به‌منظور تحلیل الگوی مکانی امواج گرما در سطح کشور، ابتدا میانگین بلندمدت هر یک از ویژگی‌های موج گرما در پهنه‌ی جغرافیایی ایران محاسبه شد. در گام بعد، برای شناسایی بیشینه‌های محلی، مقادیر حداکثر هر ویژگی در طی بازه‌ی ۳۰ ساله (سالانه) استخراج گردید و نقاطی که از نظر آماری در صدک ۹۵ام قرار داشتند، به‌عنوان نواحی بحرانی مشخص شدند. ترکیب این نقاط بحرانی برای هر ویژگی، نقشه‌ای از نواحی پرمخاطره در برابر موج‌های گرما ارائه داد.

برای درک بهتر از ویژگی‌های آماری هر شاخص، از داده‌های سالانه نمودارهای باکس پلات^۱ تهیه شد که گستره، میانه و پراکندگی داده‌ها را در طول دوره زمانی بررسی می‌کند. همچنین، برای شناسایی سال‌های پرمخاطره، پنج سال با بالاترین میانگین سالانه برای هر ویژگی رتبه‌بندی شده و به‌صورت نمودار ستونی تجمعی نمایش داده شدند.

تحلیل روند زمانی هر یک از ویژگی‌ها با استفاده از آزمون ناپارامتری من - کندال^۲ انجام گرفت و در ادامه، برای نقاط دارای روند معنادار آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$)، شیب روند با بهره‌گیری از روش شیب سنس^۳ محاسبه شد.

مجموع این تحلیل‌ها بستری فراهم آورد تا بررسی جامع‌تری از امواج گرما در ابعاد مکانی، زمانی و اقلیمی صورت گیرد و نواحی با مخاطره‌پذیری بالاتر در برابر این پدیده‌ی اقلیمی شناسایی شوند.

جدول ۱: تعریف ویژگی‌های امواج گرمایی شناسایی‌شده

ویژگی	تعریف (واحد)
تعداد رخداد	تعداد رخداد موج / دوره گرم (رخداد)
تعداد روز	تعداد روزهای همراه با موج / دوره گرم (روز)
بزرگی موج	متوسط دمای تمام رخدادهای موج / دوره گرم را نشان می‌دهد. (سلسیوس)
اوج موج	بالاترین دمای روزانه در گرم‌ترین موج یا دوره گرم که بر اساس بزرگی موج انتخاب می‌شود. (سلسیوس)
طولانی‌ترین دوره موج	موج گرم یا دوره‌ای که بیشترین توالی زمانی را در میان سایر دوره‌ها داشته است. (روز)

نتایج و بحث

تحلیل ویژگی‌های امواج گرمایی

تعداد رخداد

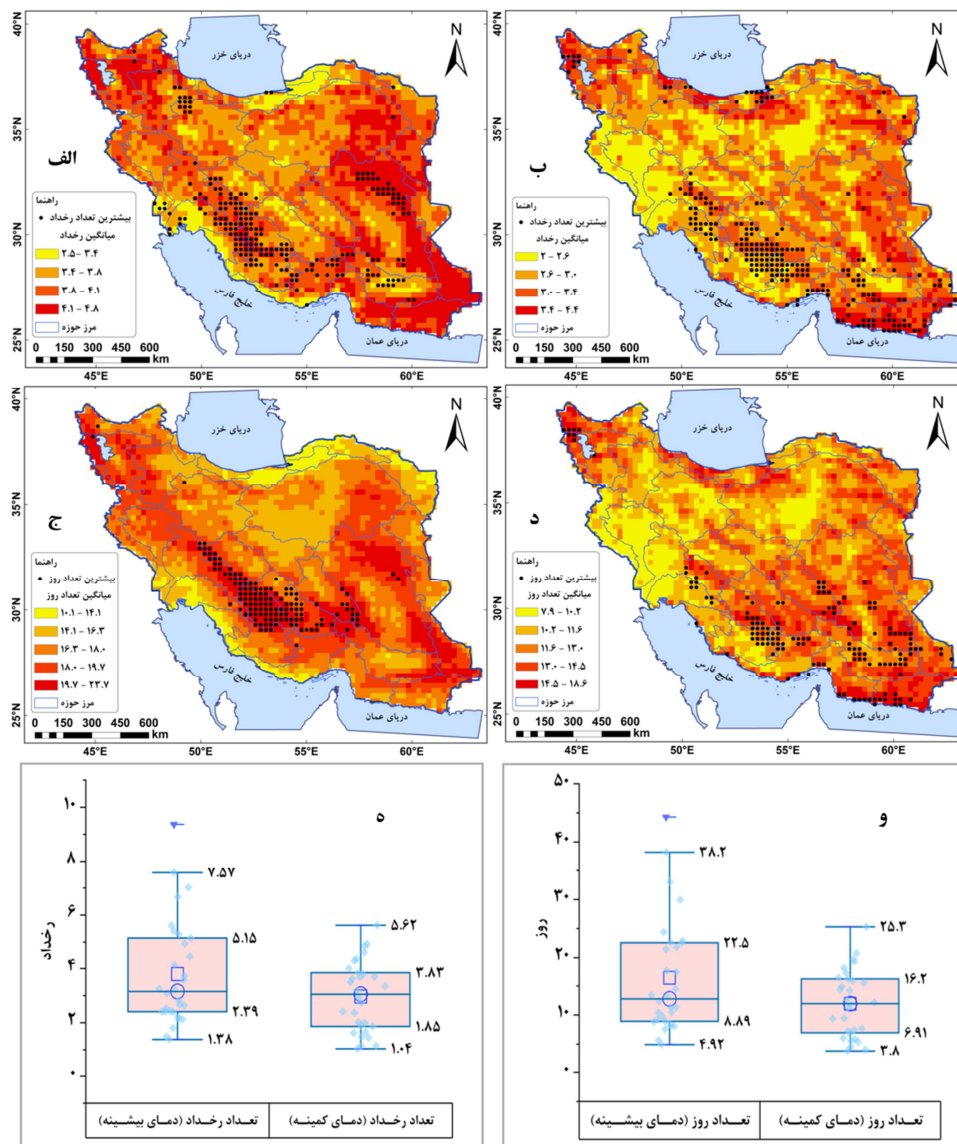
نقشه‌های الف و ب در شکل ۲، ویژگی تعداد رخداد امواج گرمای ناشی از دمای بیشینه و کمینه را نشان می‌دهد. توزیع مکانی این پدیده مناطقی را مشخص می‌کند که دمای روزانه به‌طور مکرر از آستانه‌های بلندمدت محلی فراتر رفته است.

بررسی این ویژگی براساس دمای بیشینه، نشان داد که در سطح کشور، به‌طور میانگین بین ۲ تا ۵ رخداد موج گرما در هر سال و برای هر شبکه‌ی جغرافیایی (با ابعاد تقریبی ۲۵ کیلومتر مربع) قابل‌پیش‌بینی است.

¹ Box-Plot

² Mann-Kendall

³ Sens'slope



شکل ۲: ویژگی‌های متوسط تعداد رخداد و تعداد روز به همراه نمودار باکس پلات آن‌ها. الف) متوسط تعداد رخداد براساس دمای بیشینه. ب) متوسط تعداد رخداد براساس دمای کمینه. ج) متوسط تعداد روز براساس دمای بیشینه. د) متوسط تعداد روز براساس دمای کمینه. ه) نمودار باکس پلات تعداد رخداد. و) نمودار باکس پلات تعداد روز. دایره میانه و مربع میانگین را نشان می‌دهد.

از نظر مکانی به جز نواحی ساحلی جنوب و جنوب غرب کشور و نیز حوضه‌های اترک، گرگانرود و هراز در شمال و شمال شرق، بیشتر نواحی کشور دارای تعداد رخدادهای متوسط تا بالا هستند. در مقابل، متوسط تعداد رخدادهای موج گرما بر اساس دمای کمینه، در مقیاس کشور کمتر بوده و گسترش مکانی محدودتری دارد. کمترین میزان رخداد در این شاخص، مربوط به مناطق مرزی غرب کشور (از جمله حوضه آبریز کرخه) و نواحی کویر مرکزی است. این مسأله ممکن است ناشی از ثبات نسبی در روند دمای کمینه یا پایداری دمای پایه در این مناطق باشد. سواحل جنوبی و بخش‌هایی از شمال و شمال غرب کشور، به دلیل رطوبت بالاتر، دمای کمینه به صورت متوالی از آستانه‌های محلی بالاتر رفته است، به طوری که در برخی نقاط این دما حداقل به مدت ۳ روز تداوم داشته است.

بررسی نقاط بحرانی به‌دست‌آمده از بازه ۳۰ ساله نشان داد این نواحی در حوضه‌های آبریز طشک - بختگان، بلوچستان جنوبی - هامون و بخش‌هایی از کویر لوت قرار دارند. این مناطق بیشترین شدت نوسان در امواج گرما را در مقیاس سالانه تجربه کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در شدیدترین حالت، تعداد رخدادها تا ۱۴ بار در سال گزارش شده است.

به‌طور کلی، الگوی پراکنش در هر دو نقشه بیشترین تعداد رخداد را در نواحی جنوب‌شرقی کشور و همچنین در بخش محدودی از مناطق مرزی شمال‌غرب (شامل غرب حوضه ارس و اطراف ارومیه) نشان می‌دهد.

تعداد روز

الگوی پراکنش میانگین تعداد روزهای موج گرما نیز تا حد زیادی مشابه تعداد رخدادهاست؛ اما نقشه مربوط به دمای بیشینه، یکپارچگی مکانی بیشتری در توزیع نشان می‌دهد (شکل ۲ ج، د). بر اساس این شاخص، در حوضه‌های آبریز کویر مرکزی، کویر سیاه‌کوه و دریاچه نمک، به‌طور میانگین بین ۱۴ تا ۱۸ روز موج گرما در سال ثبت شده است. در نواحی گسترده‌ای از جمله نوار غرب تا جنوب‌شرق کشور در امتداد کوه‌های زاگرس، شرق کویر مرکزی، شرق کویر لوت، هامون ماشکیل و بلوچستان جنوبی، این میانگین به ۱۸ تا ۲۴ روز می‌رسد.

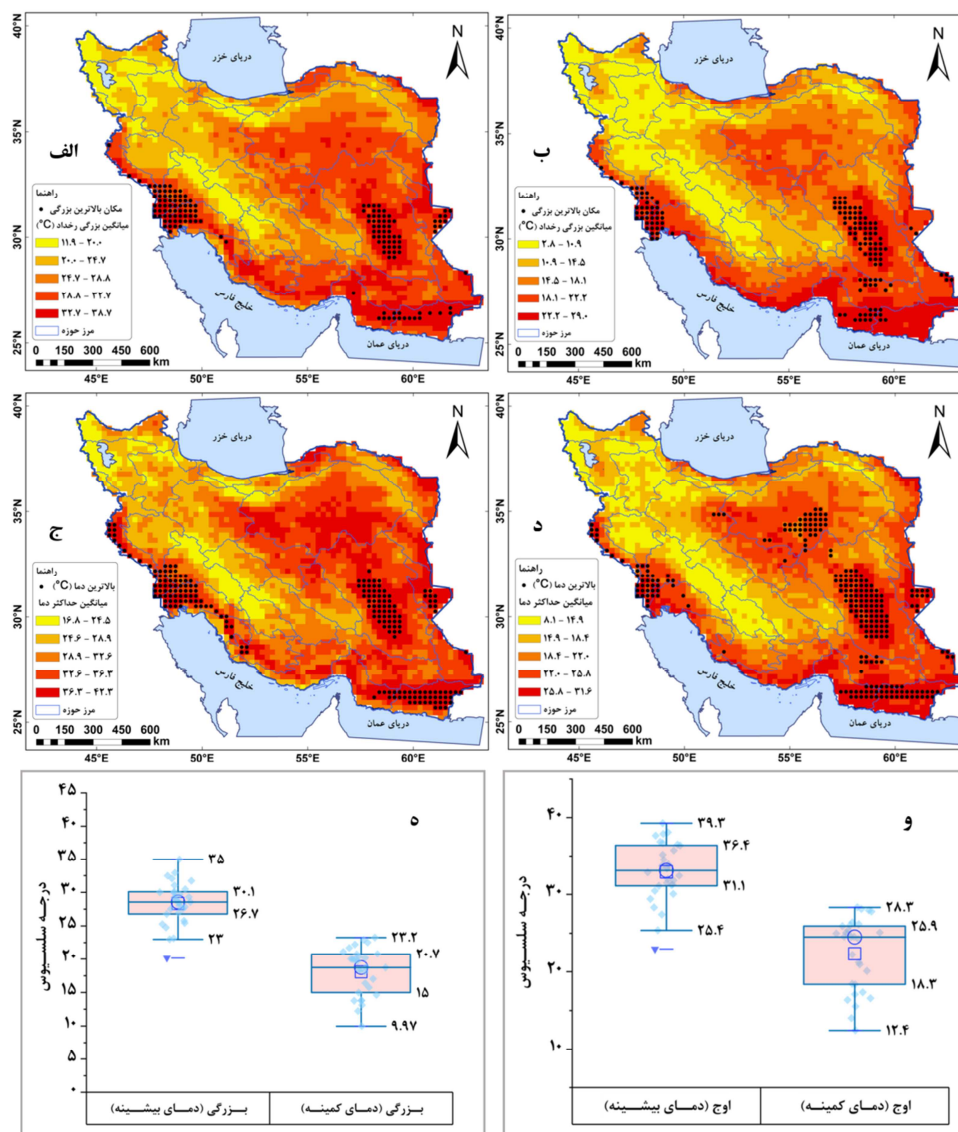
برای شاخص دمای کمینه نیز میانگین روزهای موج گرما تا حدود ۱۹ روز در سال، بیشتر در همان مناطقی ثبت شده که بیشترین تعداد رخداد را داشته‌اند. نقاط بحرانی مشترک در این شاخص نیز بیشتر با حوضه آبریز طشک - بختگان و بخش‌هایی از زاگرس انطباق دارند. در بحرانی‌ترین شرایط، تعداد روزهای موج گرما بر اساس دمای بیشینه به ۹۰ روز در سال رسیده است که بیشتر در نواحی زاگرس و شمال‌غرب دریاچه ارومیه و طی سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۴ رخ داده است. در مجموع، بررسی الگوی پراکنش و مقادیر بلندمدت مربوط به تعداد رخدادها و تعداد روزهای امواج گرما نشان می‌دهد که نواحی با دمای مطلقاً بالاتر الزاماً با فراوانی بیشتر موج گرما هم‌زمان نیستند. بلکه بروز و شدت این ویژگی بیشتر تابع نوسانات دمایی محلی و تغییرات نسبی نسبت به آستانه‌های منطقه‌ای - زمانی است تا فقط دمای مطلق روزانه یا شبانه (برسا^۱ و همکاران، ۲۰۱۶).

میانگین سالانه تعداد روزهای موج گرما در بسیاری از نواحی ۱۳ روز است؛ اما در مناطق خاصی همچون بخش‌هایی از زاگرس در حوضه طشک - بختگان (منطبق با نقاط بحرانی شکل ۲ ج)، این تعداد تا بیش از ۳۰ روز نیز افزایش یافته است. دامنه داده‌ها (شکل ۲ ه، و) براساس دمای بیشینه بین ۵ تا ۳۸ روز (۱ تا ۷ رخداد)، نشان‌دهنده پراکندگی بالای تعداد روز (رخداد) موج گرما در کشور است. با وجود نقاط پرت بالا که میانگین را به سمت خود کشیده است و تأیید می‌کند برخی مناطق به‌طور متوالی درگیر موج‌های گرمای روزانه هستند، میانه داده‌ها بیانگر این است که ۵۰ درصد داده‌ها (معادل ۱۵ سال) به‌طور میانگین کمتر از ۱۳ روز (۳ رخداد) موج گرم را تجربه کرده‌اند. داده‌های دمای کمینه توزیع نسبتاً متقارنی را داشتند و مانند دمای بیشینه حد بالایی داده‌ها توزیع گسترده‌تری نسبت به حد پایینی داشتند که نشان می‌دهد نواحی مستعد رخداد موج گرما احتمال توالی رخداد بالاتری نیز دارند. این مسأله می‌تواند با بررسی اثر تغییر اقلیم نمود بیشتری داشته باشد.

¹ Barreca

بزرگی رخداد

بزرگی رخداد به عنوان یکی دیگر از ویژگی‌های کلیدی امواج گرما، بر اساس هر دو شاخص دمای بیشینه و کمینه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). این ویژگی به دامنه دمایی در طول رخداد موج گرما اشاره دارد و نشان‌دهنده شدت حرارتی تجمع یافته طی دوره وقوع موج است.



شکل ۳: ویژگی‌های متوسط بزرگی رخداد و اوج رخداد به همراه نمودار باکس پلات آن‌ها. الف) متوسط بزرگی رخداد براساس دمای بیشینه. ب) متوسط بزرگی رخداد براساس دمای کمینه. ج) متوسط اوج موج براساس دمای بیشینه. د) متوسط اوج رخداد براساس دمای کمینه. ه) نمودار باکس پلات بزرگی رخداد. و) نمودار باکس پلات اوج رخداد

الگوی مکانی این ویژگی، در هر دو شاخص دمایی، شباهت زیادی به یکدیگر دارد (شکل ۳ الف، ب). حداقل مقادیر بزرگی رخداد بیشتر در نواحی مرتفع کوهستانی زاگرس و البرز مشاهده شده است. به نظر می‌رسد این موضوع ناشی از وجود پوشش گیاهی گسترده، جریان‌های هوایی محلی و سرمایش مؤثر شبانه در این مناطق باشد که منجر به

کاهش میانگین دمای موج گرما می‌شود. این کاهش به‌طور گسترده‌تری براساس دمای کمینه رخ داده است که می‌توان آن را به جریان‌های کاتباتیک مرتبط دانست (پائولوس و ژانگ^۱، ۲۰۰۸).

به‌طور کلی، پراکنش مکانی این ویژگی تابعی از موقعیت جغرافیایی و الگوی ناهموازی‌هاست (وانگ و لیو^۲، ۲۰۲۴). در مقابل، بیشترین بزرگی موج گرما در نواحی پست و کم‌ارتفاع شامل دشت‌های داخلی، مناطق جنوب و جنوب‌شرق کشور و به‌ویژه سواحل جنوبی ایران (نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان) مشاهده شده است. در این مناطق، دمای بالا و دامنه حرارتی زیاد به‌ویژه بر اساس دمای کمینه، به‌صورت گسترده و مکانی یکپارچه نمایان است. این پدیده بیشتر به‌دلیل رطوبت بالای این نواحی رخ می‌دهد که باعث کاهش بازدهی تابش شبانه زمین شده و مانع از خنک‌شدن مؤثر دما در ساعات شب می‌شود. همچنین، ذخیره‌سازی گرمای روزانه توسط سطح دریا (به‌ویژه هنگام رخداد موج گرما) و بازتاب آن از طریق گردش‌های محلی نظیر نسیم دریا - خشکی به سمت ساحل، از دیگر عواملی است که در پایداری گرمای بالا در شب مؤثرند (سازمان ملی اقیانوس و جو آمریکا^۳، ۲۰۲۳). این شرایط در الگوهای سالانه نیز به‌طور مستمر دیده شده و بر پایداری اقلیمی این الگو در بازه‌های بلندمدت دلالت دارد. به‌طور میانگین، بزرگی موج گرما در بازه ۳۰ ساله در این مناطق به ۳۹ درجه سلسیوس بر اساس دمای بیشینه و ۲۹ درجه سلسیوس بر اساس دمای کمینه می‌رسد. نواحی بحرانی از نظر این ویژگی، همپوشانی زیادی با سایر ویژگی‌های موج گرما دارند و شامل جلگه خوزستان (شامل چهار حوضه آبریز)، بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه کویر لوت و سه حوضه جنوبی استان سیستان و بلوچستان می‌شوند.

از نظر توزیع سالانه (شکل ۳، ه) برای بزرگی رخداد، میانگین و میانه در دمای حدود ۲۸ درجه منطبق برهم بوده و تمرکز داده‌ها در بازه‌ی ۲۳ تا ۳۵ درجه است. پراکندگی کم در این ویژگی، همگنی نسبی شدت موج‌های روزانه در سطح کشور را نشان می‌دهد. در دمای کمینه مربوط به این ویژگی، پراکندگی بیشتری با میانگین حدود ۱۶٫۵ درجه در داده‌ها دیده می‌شود (۹۷ تا ۲۳٫۲ درجه). نقاط کمینه حول ۱۰ درجه، نمایانگر وجود مناطق خاصی با سرمای شبانه حتی در زمان موج گرما هستند. این نقاط با دمای پایین‌تر تاحدودی میانگین را پایین‌تر از میانه داده‌ها آورده‌اند. باین‌حال، میانه داده‌ها نشان می‌دهد تمرکز نیمی از داده‌ها در دامنه دمایی فشرده‌تری بین ۱۷٫۵ تا ۲۳٫۲ درجه قرار داشته است. پراکندگی بیشتر در بزرگی دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه، نشان‌دهنده تنوع داده‌ای بیشتر در رخدادهای شناسایی‌شده بر مبنای دمای پایه است. این وضعیت به‌طور مشترک برای ویژگی اوج دمایی موج و بزرگی موج صدق می‌کند.

اوج موج

ویژگی دیگر مورد بررسی، اوج دمایی موج گرما است که به بیشترین دمای ثبت‌شده در طول رخداد اشاره دارد. این ویژگی، با توجه به واحد دما اندازه‌گیری می‌شود و معمولاً بیانگر زمان‌های اوج تابش خورشیدی در روز، نظیر اوایل بعدازظهر است. اوج دمایی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شدت تابش خورشید، وضعیت آسمان (ابری یا صاف)، نوع پوشش سطحی (بیابانی یا گیاهی) و سایر خصوصیت‌های فیزیکی سطح زمین قرار دارد (وو^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). به عبارت دیگر، این مشخصه نشان می‌دهد که در کدام نواحی هوا به سرعت گرم می‌شود و بنابراین مانند بزرگی موج،

¹ Poulos & Zhong

² Wang & Liu

³ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

⁴ Wu

بیش از همه از موقعیت جغرافیایی، فصل و ناهمواری‌ها تبعیت می‌کند (رن^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). از همین رو، الگوی مکانی آن بسیار مشابه با الگوی بزرگی موج است. نواحی بحرانی نیز همچنان در مناطق پست و با ارتفاع کم متمرکز هستند.

بر اساس میانگین داده‌های ۳۰ ساله (شکل ۳ ج، د)، حداکثر دما در مناطق مرتفع برای شاخص دمای بیشینه حدود ۲۵ درجه سلسیوس و برای دمای کمینه حدود ۱۵ درجه سلسیوس بوده است. در نواحی پست و گرم تابش‌پذیر، این مقادیر به ترتیب به ۴۳ درجه سلسیوس برای دمای بیشینه و ۳۲ درجه سلسیوس برای دمای کمینه رسیده‌اند. گفتنی است که در برخی سال‌ها برای برخی نقاط، اوج دما به بالای ۵۰ درجه بر اساس دمای بیشینه و ۴۰ درجه بر اساس دمای کمینه نیز رسیده است. این موارد بیشتر مربوط به سال‌هایی هستند که میانگین دمای کشور به‌طور کلی بالاتر از نرمال بوده است. این وضعیت به‌ویژه در مناطق گرم و مرطوب کشور، نظیر نواحی جنوبی و خوزستان که در آن‌ها به دلیل رطوبت بالا، اختلاف دمای شب و روز کاهش می‌یابد و دمای بیشینه نیز در فصل تابستان به‌طور قابل-توجهی با افزایش همراه است (یوسفی کبریایی، ۲۰۲۵)، بیشتر مشاهده می‌شود.

نکته قابل‌توجه در بررسی این ویژگی آن است که در برخی نواحی کوهستانی با ارتفاع بالا، دمای اوج موج گرما نسبتاً پایین بوده است. این مسأله اگرچه از دیدگاه سلامت انسانی ممکن است آسیب‌زا نباشند؛ اما از منظر اکولوژیکی، منابع آبی و فشار حرارتی بر پوشش گیاهی می‌توانند اهمیت قابل‌توجهی داشته باشند.

شکل ۳ (و) نشان می‌دهد دماهای ثبت‌شده برای مشخصه اوج موج‌های گرما بر اساس دمای بیشینه به‌طور میانگین ۳۴ درجه است. در برخی مناطق تا نزدیک ۴۰ درجه نیز رسیده است. میانه‌ی داده‌ها ۳۴٫۲ درجه است که منطبق با میانگین داده‌ها بوده و حکایت از توزیع نسبتاً متقارن داده‌ها دارد. با این وجود، حد پایین و بالای داده‌ها نشان می‌دهد بخش بیشتر داده‌ها در یک بازه‌ی دمایی نسبتاً متمرکز (حدود ۳۱ تا ۳۹ درجه) قرار گرفته‌اند. درحالی‌که مقادیر دمای کمینه از ۱۸٫۳ تا ۲۶ درجه (از چارک اول تا سوم) با میانگین حدود ۲۳ درجه پراکندگی دارند، در بعضی نواحی متوسط دمای کمینه به بیش از ۲۸ درجه رسیده و حداقل دمای پایه به زیر ۱۳ درجه نیز کاهش یافته است. همچنین، میانه بالاتر از میانگین در دمای کمینه نشان می‌دهد دمای پایه گرم‌تر توزیع بیشتری داشته است.

طولانی‌ترین موج

طولانی‌ترین موج گرما مشخصه مهم دیگری از موج گرمایی است که به تداوم شرایط بحرانی اشاره دارد و اثرات تجمعی بیشتری نسبت به موج‌های کوتاه دارد (دی پالت^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). این ویژگی نقش مهمی در ارزیابی شدت و تداوم گرمایش، تاب‌آوری مناطق و تحلیل فشار حرارتی بر انسان و محیط دارد (رن و همکاران، ۲۰۲۳). بر اساس میانگین بلندمدت، طولانی‌ترین رخداد موج گرما در کشور، برای هر دو شاخص دمای بیشینه و کمینه، حدود ۷ تا ۸ روز برآورد شده است (شکل ۴ الف، ب)

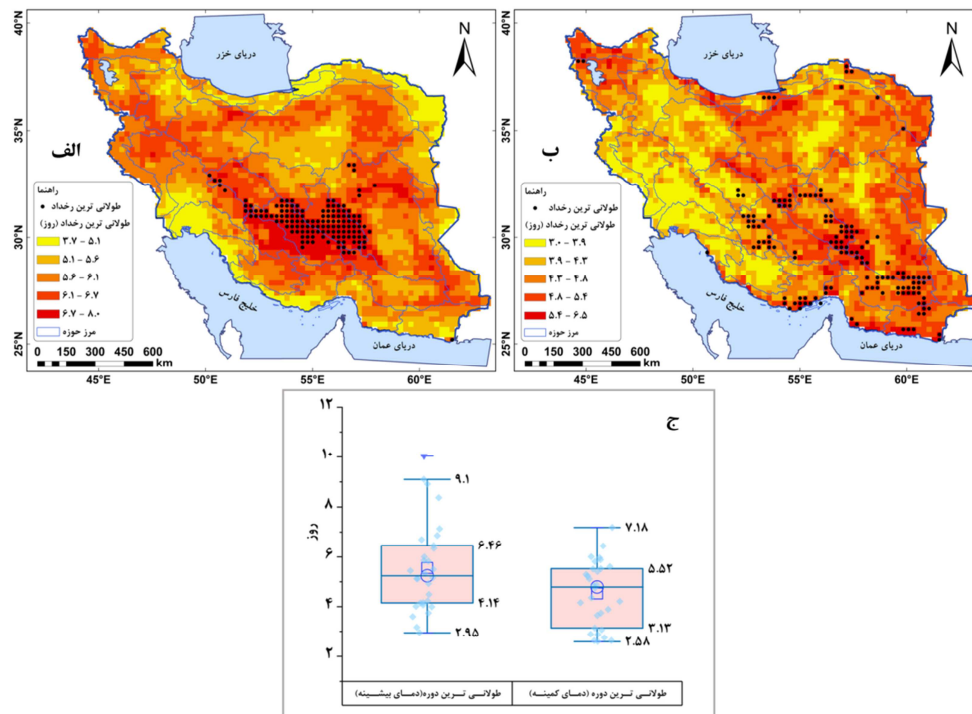
تحلیل فضایی این شاخص نشان داد که طولانی‌ترین رخدادها بیشتر در نواحی مرکزی و کویری کشور، به‌ویژه در حوضه‌های آبریز درانجیر، ابرقو - سیرجان بعلاوه طشک - بختگان - مهارلو رخ داده‌اند. این الگو، هم در میانگین و هم در مقادیر حداکثر سالانه مشاهده شد. این امر را می‌توان به مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی و جغرافیایی نسبت داد، از جمله اقلیم خشک و بیابانی، استقرار مداوم سامانه‌های پرفشارهای گرم، تابش شدید خورشیدی، ضعف پوشش

^۱ Ren

^۲ De Polt

گیاهی و توپوگرافی محصور و جریان‌های هوایی محدود همگی در حفظ دمای بالا و افزایش مدت زمان رخداد موج گرما در این نواحی نقش داشته‌اند.

در غرب کشور نیز نواحی مرزی همچون حوضه‌های آبریز ارس، دریاچه ارومیه و کرخه دوره‌های طولانی گرما (بین ۶ تا ۷ روز) را ثبت کرده‌اند. از دلایل اصلی این وضعیت می‌توان به الگوهای پرفشار تابستانه و فقدان منابع آبی یا تعدیل کننده دما اشاره کرد. همچنین، در حوضه‌هایی مانند کرخه، شرایط زمین‌های خشک و کم‌پوشش، همراه با توپوگرافی و دشت‌های گرم و محصور، می‌تواند به انباشت گرمای روزانه و تداوم موج گرما منجر شود (مجرد و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۴: ویژگی متوسط طولانی‌ترین دوره رخداد به همراه نمودار باکس پلات آن. الف) طولانی‌ترین دوره براساس دمای بیشینه. ب) طولانی‌ترین دوره موج براساس دمای کمینه. ج) نمودار باکس پلات طولانی‌ترین دوره موج گرما.

نکته جالب توجه دیگر، الگوی ثبت‌شده در جلگه خوزستان است. با وجود ثبت بالاترین مقادیر بزرگی و اوج دمایی موج گرما در این منطقه، طولانی‌ترین رخداد موج گرما کوتاه‌تر از بسیاری از مناطق دیگر بوده است (بین ۳ تا ۵ روز برای دمای بیشینه و ۳ تا ۴ روز برای دمای کمینه). این الگو نشان می‌دهد که امواج گرمایی در این ناحیه به صورت رخدادهایی به شدت گرم، اما با دوام کمتری ظاهر می‌شوند. ماهیت گرم اقلیم منطقه که منجر به سطح بالای آستانه ثبت رخداد می‌شود و همچنین، پویایی جوی ناپایدار در این نواحی می‌تواند علت کاهش طول دوره این رخدادهای باشد.

مقایسه دو شاخص دمای بیشینه و کمینه در سواحل شمالی و جنوبی کشور نیز تفاوت‌های قابل توجهی را نشان داد (شکل ۴ الف و ب). بر اساس دمای بیشینه، نواحی مجاور دریای خزر و خلیج فارس کمترین مقادیر طولانی‌ترین موج را ثبت کردند که بیانگر ناپایداری موج‌های گرمایی در این مناطق از منظر دمای بیشینه است. در مقابل، همین نواحی از نگاه دمای کمینه مقادیر بالاتری (میانگین ۵ تا ۶ روز) را تجربه کرده‌اند. این تفاوت را می‌توان به نقش

تعدیل‌کننده منابع آبی بزرگ نسبت داد. به این صورت که، دریای خزر و خلیج فارس با کاهش دامنه نوسان روزانه دما، از شدت و دوام موج گرما در روز می‌کاهند؛ اما هم‌زمان با جلوگیری از کاهش دمای شبانه، زمینه پایداری بیشتر موج گرما را از منظر دمای کمینه فراهم می‌کنند. از این‌رو، در این مناطق، موج گرما از منظر دمای کمینه تداوم بیشتری نسبت به دمای بیشینه دارد.

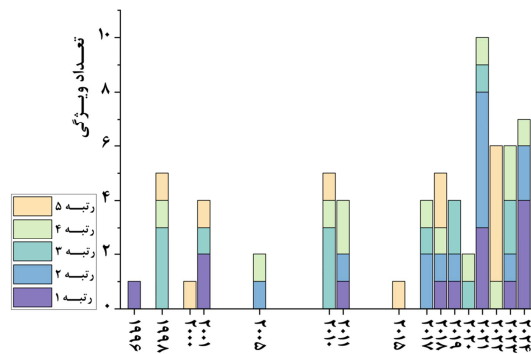
در نواحی شمال‌شرقی کشور نظیر حوضه‌های آبریز اترک، قره‌سو و گرگانرود نیز مقادیر طولانی‌ترین رخداد در مقایسه با سایر مناطق داخلی، به‌ویژه بر اساس شاخص دمای بیشینه، کمتر بوده است. این کاهش را می‌توان به تأثیرگذاری غیرمستقیم دریای خزر و نقش سامانه‌های ناپایدار شمالی نسبت داد که مانع پیوستگی دمای بالا، به‌خصوص در طول روز، می‌شوند (فتاحیان و همکاران ۲۰۲۵).

بر اساس نمودار باکس‌پلات (شکل ۴ ج)، طولانی‌ترین دوره‌های پیوسته موج گرما در شاخص دمای بیشینه، نوسانات بیشتری نسبت به دمای کمینه داشته‌اند. در این شاخص، میانگین داده‌ها اندکی بالاتر از میانه قرار گرفته که نشان‌دهنده وجود مقادیر بالای پراکنده در بخشی از دوره‌هاست. طولانی‌ترین موج گرما (میانگین کل کشور)، برای حدود ۴۶ درصد داده‌ها بر اساس دمای بیشینه و برای حدود ۵۰ درصد داده‌ها (معادل ۱۵ سال) بر اساس دمای کمینه بیش از ۵ روز به طول انجامیده است. افزون بر این، داده‌های پرت در شاخص دمای بیشینه نشان می‌دهند که احتمال وقوع موج‌های گرما با طول دوره ۱۰ روز یا بیشتر نیز وجود دارد. این موارد می‌توانند معرف سال‌هایی با شرایط اقلیمی خاص یا وقوع پدیده‌های شدیدتر گرمایی باشند که اثرگذاری بیشتری بر محیط‌زیست، سلامت و زیرساخت‌های منطقه‌ای دارند.

ویژگی‌های آماری امواج گرمایی

توزیع میانگین ۳۰ ساله ۷ ویژگی براساس رتبه (شکل ۵)، نشان داد ۸ سال اخیر بازه زمانی مورد مطالعه به‌طور متوالی بالاترین رتبه‌ها را از نظر میانگین بین ویژگی‌ها داشتند (بالاترین میانگین‌ها به ترتیب به رتبه‌های یک تا ۵ تقسیم شده‌اند) و هر سال بین ۲ تا ۱۰ ویژگی (مجموع ویژگی‌های کمینه و بیشینه)، بالاترین میانگین را از ۳۰ سال داده ثبت کرده است. بنابراین، می‌توان روند گرمایشی متفاوتی را در تغییرات ویژگی‌های موج گرما به خوبی مشاهده نمود. به‌طوری‌که سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۴ وخیم‌ترین شرایط گرمایی را به هنگام موج گرمایی داشته‌اند. در این سال‌ها ۳ الی ۴ ویژگی رتبه یک یا بالاترین میانگین را داشتند و رکورد تعداد ویژگی‌هایی که بالاترین میانگین ۳۰ ساله را داشته‌اند، (رتبه‌های ۱ و ۲) شکسته شده است.

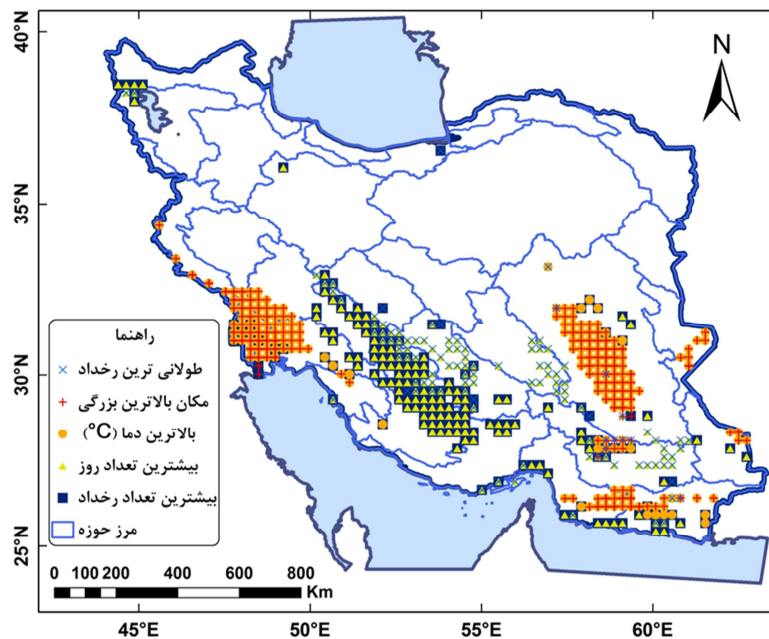
در بین سایر سال‌هایی که در یک الی دو ویژگی بالاترین میانگین (رتبه یک) را داشتند، می‌توان به سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۱ و ۲۰۱۱ اشاره کرد. درعین‌حال، سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۱۰ نیز تعداد ویژگی‌های بیشتری را در مجموع بالاترین میانگین‌ها (بین یک تا ۵) داشتند. روند بالاترین میانگین‌ها در مجموع ویژگی‌ها به وضوح و به‌طور چشمگیری افزایشی بوده است.



شکل ۵: معرفی ۵ مورد از بالاترین میانگین‌های ویژگی امواج گرمایی براساس رتبه در میان سال‌های مورد مطالعه (۱۹۹۵-۲۰۲۴)

شناسایی پرمخاطره‌ترین نواحی

ترکیب نقاط بحرانی هر یک از ویژگی‌های موج گرما (مانند تعداد رخداد، تعداد روز، بزرگی موج و اوج دمایی) به خوبی نواحی با مخاطره‌پذیری بالای این پدیده را آشکار می‌کند. در شکل ۶، مناطقی که نقاط بحرانی حداقل دو ویژگی موج گرما را شامل می‌شدند، به‌عنوان نقاط پرمخاطره شناسایی شده‌اند، همراه با نوع مخاطره نشان داده شده است.



شکل ۶: مناطق پرمخاطره از نظر ترکیب ویژگی‌های امواج گرمایی

تحلیل‌ها نشان داد حوضه‌های طشک - بختگان، کارون بزرگ و مند از منظر «تعداد رخداد» و «تعداد روز موج گرم» در معرض خطر ویژه قرار دارند. این نواحی بیشتر در پیش‌کوه‌ها و دامنه‌های جنوبی - شرقی زاگرس واقع‌اند. در این مناطق، به‌دلیل اثربخشی توپوگرافی کوهستانی در تداخل جریان‌های هوایی و ایجاد ناهمگنی دمایی و ناپایداری نسبت به میانگین محلی، موجب ثبت تعداد رخداد بالا و روزهای متوالی موج گرما شده است. از سوی دیگر، حوضه‌های آبریز مربوط به استان خوزستان (شامل جلگه خوزستان)، کویر لوت، هامون - هیرمند و بندرعباس - سدیج، از نظر

«بیشینه‌های دمایی یا اوج موج» و «بزرگی موج گرما» در سطح خطر بالا قرار دارند. این نواحی به سبب تأثیر مستقیم دمای مطلق بسیار بالا بر روی سلامت انسان (افزایش مرگ‌ومیر ناشی از گرما)، زیرساخت‌های شهری، تولید کشاورزی و مدیریت منابع آب، اهمیت ویژه‌ای دارند. با وجود این، این حوضه‌ها از نظر تعداد رخدادها و تعداد روزهای موج گرما مقداری پایین‌تر از سایر مناطق دارند. علت آن به نحوه تعیین آستانه‌های موج گرما بر اساس تاریخچه محلی (صدک‌های دمای تجمعی) برمی‌گردد؛ زیرا در نواحی پست و بیابانی که دماهای مطلق همیشه بالا است، نوسانات دمایی نسبت به مقدار میانگین محلی اندک‌تر است و کمتر از آستانه‌ی تعریف‌شده عبور می‌کند. به بیان دیگر، در این مناطق گرما به‌صورت ثابتی بالا باقی می‌ماند و اگرچه مقادیر حداکثر دما بسیار زیاد است، تغییرات نسبی (ناهنجاری‌های مثبت دمایی) که تعریف موج گرما بر آن استوار است، کمتر بروز می‌کند. استثنای این وضعیت ناحیه‌ی ساحلی شمال‌غرب خلیج فارس (نزدیک بندر ماهشهر) است که هم «بزرگ‌ترین بزرگی موج» و هم «بیشترین تعداد رخداد» را به‌طور هم‌زمان ثبت کرده است. علت اصلی آن، تداخل هم‌زمان شرایط رطوبتی و دمایی است که هم بر شدت (بیشینه) و هم بر فراوانی رخدادها تأثیر می‌گذارد. حوضه‌های کویر درانجیر، ابرقو - سیرجان و هامون - جازموریان نیز به لحاظ «طولانی‌ترین دوره پیاپی موج گرما» و «بیشترین تعداد روز» در ردیف مناطق پرخطر قرار دارند. در این نواحی، فشار گرمایی بالا (به‌دلیل تابش شدید خورشید و خشکی هوا) و تاب‌آوری محیطی پایین (کمبود پوشش گیاهی و منابع آبی) منجر به پایداری طولانی رخدادهای گرمایی شده است (هیرش^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

در مجموع، حوضه‌های شمالی هامون - جازموریان (بخش‌های پایکوهی)، جنوب بلوچستان، سواحل هرمزگان، شرق کارون بزرگ و طشک - بختگان به‌دلیل هم‌زمانی نقاط بحرانی در سه ویژگی مختلف موج گرما (اوج دما، تعداد رخداد و بزرگی موج) جزو مناطق با بالاترین درجه مخاطره به‌شمار می‌آیند. در بخش پایکوهی هامون - جازموریان حتی ترکیبی از چهار ویژگی نیز مشاهده شده است. این دسته‌بندی نشان می‌دهد که علاوه بر شدت دمایی مطلق، پایداری و تداوم رخدادهای گرما برای سنجش مخاطره‌پذیری اقلیمی بسیار تعیین‌کننده است و برنامه‌ریزی‌های سازگاری و مدیریت ریسک باید همه‌ی این ابعاد (شدت، فرکانس، طول دوره و توزیع مکانی) را در نظر داشته باشند.

تحلیل روند زمانی ویژگی‌های امواج گرمایی

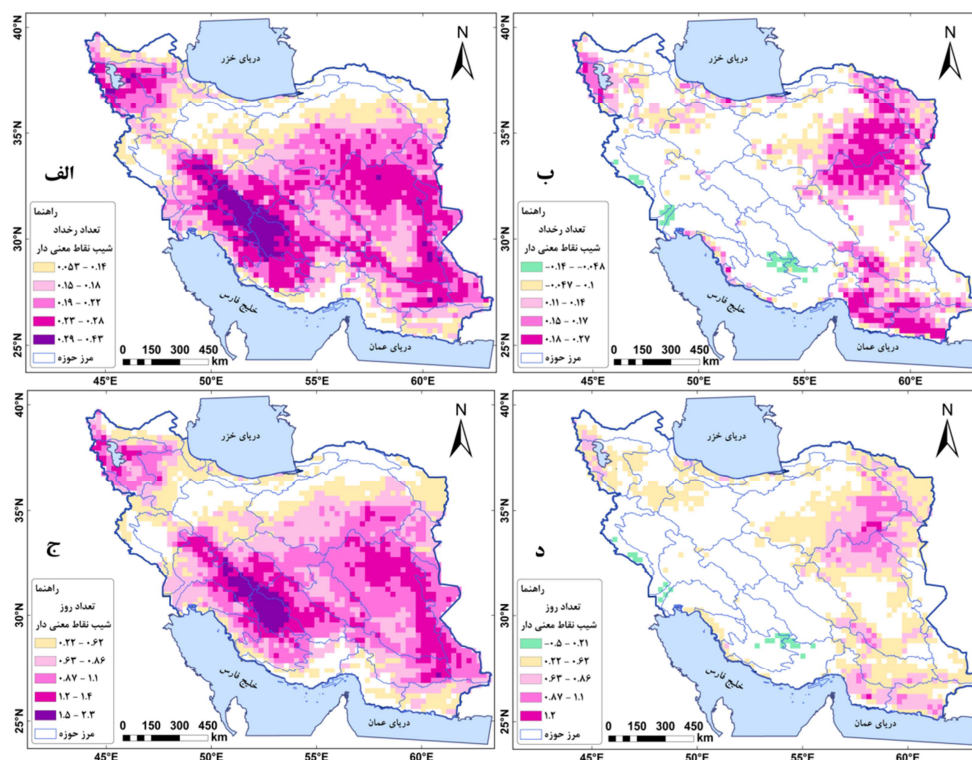
شیب روند زمانی هر یک از ویژگی‌های موج گرم برای هر شبکه جغرافیایی محاسبه و به‌صورت توزیع مکانی در نقشه‌های شکل‌های (۷، ۸ و ۹) نمایش داده شده است. در این نقشه‌ها تنها نقاطی نشان داده شده‌اند که براساس آزمون من - کندال از نظر روند دارای معنی‌داری آماری ($p < 0.05$) بوده‌اند. شیب این نقاط به‌گونه‌ای رنگ‌بندی و تقسیم‌بندی شده است که امکان مقایسه مستقیم روندها براساس دمای کمینه و بیشینه برای هر ویژگی فراهم شود.

تحلیل روند زمانی ویژگی‌های امواج گرمایی نشان داد که بر اساس دمای بیشینه در بخش اعظم کشور (به جز نوار شمالی کشور و بخش‌هایی از حوضه‌های غربی و جنوبی)، روند تعداد رخدادهای موج گرما و تعداد روزهای موج گرما، افزایشی بوده است (شکل ۷ الف، ج). به عبارت دیگر، در اغلب نقاط، هم تعداد دفعات وقوع موج حرارت و هم مدت زمان تجمعی آن در هر سال به مرور در حال افزایش است. این الگو را می‌توان به گرمایش عمومی و افزایش بسامد پرفشارهای تابستانه در ایران نسبت داد که شرایط را برای ماندگاری هوای گرم تسهیل می‌کنند. بزرگ‌ترین شیب افزایشی منطبق بر نواحی است که بالاترین میانگین رخداد را در این دو ویژگی داشته‌اند. نواحی مرتفع حوضه‌های

¹ Hirsch

طشک - بختگان به‌طور متمرکزی از نظر مکانی دارای شیب حداکثر ۰,۴۳ رخداد و بین یک تا دو روز در سال بوده اند. این مناطق علاوه بر حساسیت هیدرولوژیک (وجود تالاب‌ها و ذخایر آبی)، از نظر اقلیمی نیز تحت تأثیر کاهش بارش‌های تابستانه و افزایش دما قرار دارند که منجر به افزایش شدت رخدادها شده است.

از منظر دمای کمینه، الگوی متفاوت‌تری دیده شد (شکل ۷ ب). بخش‌هایی از حوضه‌های استان فارس و جلگه خوزستان و حوضه مرزی غرب از نظر تعداد رخداد، روند اندکی کاهشی دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از تداوم تبخیر - تعرق و نقش رطوبت خاک در تعدیل دماهای شبانه باشد. در مقابل، نوارهای ساحلی شمال و جنوب کشور از منظر موج گرمای شبانه (دمای کمینه) روند افزایشی معنی‌داری در تعداد رخدادها داشته‌اند. اگرچه حداکثر مقدار شیب معنی‌دار در دمای کمینه (حدود ۰,۲۷ رخداد در سال و ۱ روز در سال) کمی پایین‌تر از مقادیر متناظر دمای بیشینه است؛ اما این حداکثر در نواحی شمال‌شرقی (استان خراسان بزرگ، منطبق با نواحی پست و بیابانی شامل کویر مرکزی، لوت و نمک‌زار خواف) و همچنین در جنوبی‌ترین نقاط کشور (حوضه‌های بلوچستان جنوبی و بندرعباس - سدیج) مشاهده شده است.

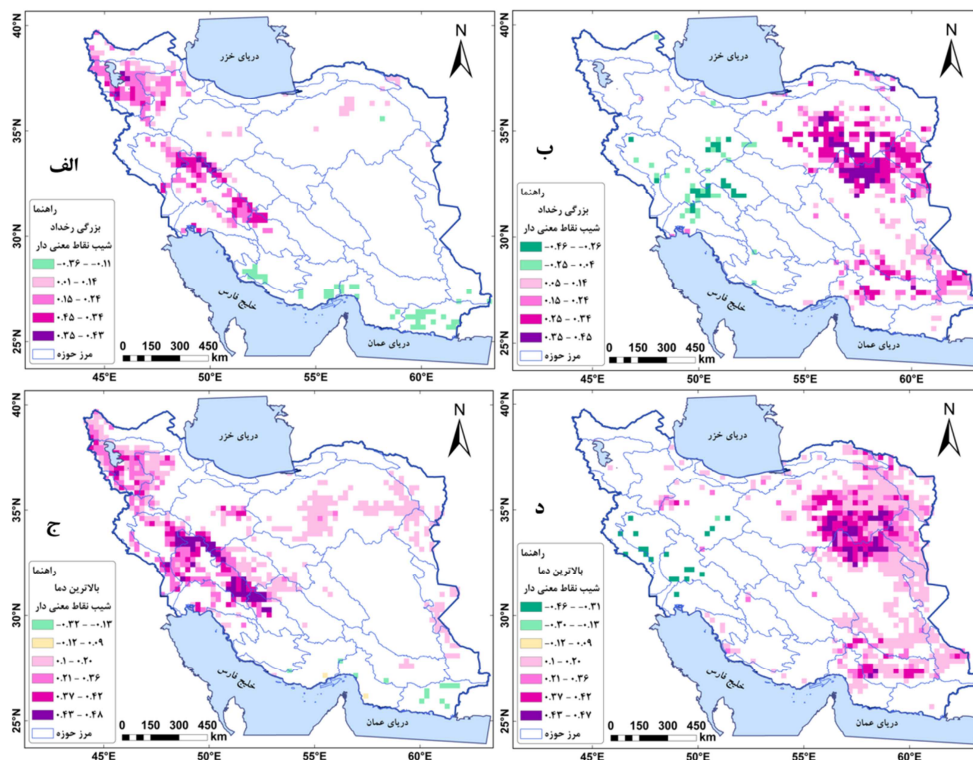


شکل ۷: شیب روند زمانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای ویژگی‌های تعداد رخداد و تعداد روز امواج گرما. الف و ج) شیب روند براساس دمای بیشینه. ب و د) شیب روند براساس دمای کمینه.

به لحاظ بزرگی رخداد بر اساس دمای بیشینه، در بخش‌هایی از حوضه‌های جنوبی ساحلی روندی کاهشی ضعیف مشاهده شد (شکل ۸ الف). برای اوج موج نیز در بلوچستان جنوبی همین الگو ثبت شد (شکل ۸ ج). این رفتار می‌تواند با تعدیل دریایی (نقش سامانه‌های نسیم دریا - خشکی)، رطوبت بالاتر و افزایش شار گرمای نهان (که بخشی از انرژی را از گرم کردن هوا منحرف می‌کند)، افزایش ابرناکی/شرجی بودن در دوره‌های مونسونی مرتبط باشد. عواملی

که معمولاً به محدود شدن دمای حداکثر روزانه منجر می‌شوند. با این وجود باید در نظر داشت، در حاشیه دریا ترکیب سلول‌های خشکی - دریا در بازتحلیل 0.25° می‌تواند نوسانات اوج دما را تضعیف کند؛ بنابراین، این کاهش ضعیف با احتیاط تفسیر می‌شود.

در مقابل، نواحی گسترده‌تری از حوضه‌های غربی کشور شامل طشک - بختگان، کارون بزرگ، کرخه جنوب غرب سفیدرود بزرگ، همین‌طور دریاچه ارومیه و سواحل شمال غربی خلیج فارس روند شیب افزایشی بوده است، به‌طوری‌که متوسط دمای موج افزایش متوسط رو به بالایی داشته است. این روند برای ویژگی اوج موج در همین مناطق بعلاوه بخش‌هایی از حوضه ارس و مرزی غرب مورد تأیید است. خشک شدن تالاب‌ها و دریاچه‌ها در این نواحی مثل ارومیه می‌تواند از عوامل موثر بر معنی‌دار شدن افزایش روند باشند.

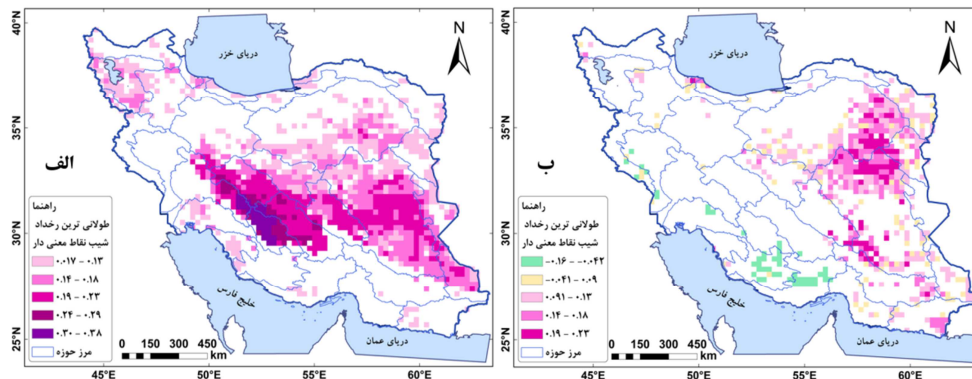


شکل ۸: شیب روند زمانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای ویژگی‌های بزرگی رخداد و اوج دمای امواج گرما. الف و ج) شیب روند براساس دمای بیشینه. ب و د) شیب روند براساس دمای کمینه.

سایر تفاوت‌های مکانی به این صورت است: نواحی پشت به باد زاگرس در حوضه‌های آبریز داخلی، حوضه آبریز کویر مرکزی و هامون، نمک‌زاد خواف و دریاچه نمک از نظر اوج دمای موج روند افزایشی معنی‌دار داشته‌اند (شکل ۸ ج). این روند افزایشی را می‌توان ناشی از تکرار اثر فون^۱ (نزول آدیاباتیک پس از عبور از ارتفاعات) دانست. علاوه بر این، کمبود رطوبت نسبی باعث می‌شود که تبخیر - تعرق نقش کمتری در تعدیل دما داشته باشد. همین امر سبب شده که نواحی مرتفع غربی و پشت‌باد زاگرس نسبت به سایر بخش‌های کشور در معرض خطر بالاتری از نظر اوج موج‌های گرما قرار گیرند. از نظر دمای کمینه، نواحی گسترده‌تری شیب روند افزایشی داشتند (شکل ۸ ب و د) و این روندها

¹ Föhn effect

در نواحی شرق و شمال شرق کشور رخ داده‌اند و در حوضه‌های آبریز کویر مرکزی و شمال کویر لوت شدت افزایش روند قوی‌تری در بزرگی و اوج موج داشته‌اند.



شکل ۹: شیب روند زمانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای ویژگی طولانی‌ترین دوره موج گرما. الف) شیب روند براساس دمای بیشینه. ب) شیب روند براساس دمای کمینه.

در نهایت، روند طولانی‌ترین موج‌ها نیز همگام با ویژگی‌های قبل دارای روند معنی‌دار افزایشی اغلب در همان مناطق است (شکل ۹). تنها نقاطی که براساس دمای کمینه روند منفی معنی‌دار داشته‌اند، مربوط به برخی حوضه‌های جنوبی کشور مانند مند و حله بوده است که شیب نسبتاً ضعیفی را نشان داده‌اند (شکل ۹ ب). این روند کاهش می‌تواند تحت تأثیر نزدیکی به خلیج فارس و دریای عمان و نقش تعدیل‌کننده آن‌ها (به‌صورت پویا با افزایش رطوبت نسبی و شدت تبخیر - تعرق) بر دماهای شبانه شکل گرفته باشد. مهم‌ترین تفاوت در الگوی طولانی‌ترین دوره موج مربوط به دمای بیشینه است (شکل ۹ الف). در این الگو تمام حوضه‌های کویری روند افزایشی معنی‌دار داشته‌اند. مقدار شیب در حوضه‌های کویر درانجیر و کویر لوت بالاتر بوده است. این روند می‌تواند ناشی از روند درازمدت خشک‌تر شدن اقلیم در این نواحی باشد که با کاهش رطوبت خاک، تبخیر کمتر و افزایش سهم گرمایش محسوس همراه است. این تغییرات، حتی در غیاب تغییرات آشکار سطحی، به تشدید روند افزایشی دمای بیشینه کمک می‌کنند؛ چرا که خاک خشک‌تر، در معرض تابش بیشتر و گرمایش سریع‌تری است و توانایی تعدیل دمای محیط در روزهای گرم را ندارد. این نتایج در مجموع بیانگر آن است که روندهای مشاهده‌شده بیشتر بازتابی از عوامل اقلیمی پویا مانند گرمایش منطقه‌ای، تغییر الگوی بارش و رطوبت خاک و اثرات مکانی مرتبط با ارتفاع و همجواری با دریا و کویر هستند. چنین عواملی در گذر زمان تغییرپذیر بوده و به‌طور مستقیم بر شدت و تواتر امواج گرمایی اثر گذاشته‌اند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با بهره‌گیری از تابع چگالی احتمال و آزمون‌های ناپارامتری، ویژگی‌های امواج گرمایی را در قالب پنج شاخص کلیدی (تعداد رخداد، تعداد روز، بزرگی موج، اوج دمای و طولانی‌ترین موج) با استفاده از ۳۰ ساله روزانه دمای بیشینه و کمینه (سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۲۴) در ایران بررسی کرد. نتایج نشان داد که آثار گرمایش تدریجی اقلیم ایران به‌وضوح بر تمامی جنبه‌های امواج گرما از کمیت (تعداد و مدت) تا کیفیت (شدت و اوج دما) رخدادها تأثیر گذاشته است.

پدیده موج گرما در ایران گستردگی بالایی داشته و نه تنها مناطق کمابیش کویری و خشک شرقی و جنوب شرق (کویر لوت، بلوچستان جنوبی - هامون)، بلکه بسیاری از نواحی غرب و جنوب غرب نیز به درجات مختلف تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. در این میان حوضه آبریز طشک - بختگان، در امتداد دامنه جنوب شرقی رشته کوه زاگرس، در معرض بیشتری از موج گرما از نظر تعداد رخداد و روزهای همراه با موج گرم بوده‌اند. همچنین، سواحل کشور براساس دمای کمینه تعداد روزهای رخداد بالایی را تجربه کردند. شدت موج‌های گرما (بزرگی و اوج موج) در نواحی بیشتر گرم که نوسان دمایی کمتری دارند (در نواحی کویری، جلگه خوزستان و سراسر سواحل جنوبی به‌ویژه از منظر دمای کمینه) بیشتر بود، به‌طوری‌که در برخی سال‌ها اوج دمای موج براساس دمای بیشینه به ۵۵ درجه رسیده است. طولانی‌ترین دوره‌های پیوسته موج گرما در این محدوده‌ها (تا متوسط بیش از ۱۰ روز و در مناطق کویری در برخی سال‌ها به ۴۰ روز) ثبت گردید. به لحاظ روند زمانی، توالی رخداد موج‌های گرمای شبانه (دمای کمینه) به‌خصوص در سواحل شمال و جنوب، رو به گسترش است که می‌تواند بحران‌های در حوزه‌های سلامت و انرژی (افزایش مصرف برق برای خنک‌سازی) را در فصل گرم تشدید کند. اگرچه تکرار موج براساس دمای بیشینه در بیشتر مناطق ساحلی شمال افزایش اندکی را تجربه کرده، اما شیب معنادار کمتری نسبت به مناطق کویری از خود بروز داده است. علاوه بر این، الگوی زمانی موج گرما نشان‌دهنده طولانی‌تر شدن فصل گرما، افزایش تعداد رخدادها و روزهای موج در پهنه‌های مختلف و کاهش خنکای شبانه در مناطق بحرانی (حوضه‌های آبریز هامون جزمویان، بلوچستان جنوبی، کویر مرکزی) است که با روند جهانی تغییر اقلیم همخوانی دارد (عباس نیا و همکاران ۲۰۱۶). یکی از نکات برجسته این پژوهش، تفکیک هم‌زمان شدت (بزرگی و اوج دما)، تعداد (رخداد و روز) و پایداری (طولانی‌ترین دوره) موج گرما بود. این شیوه ترکیبی نشان داد که نواحی کوهپایه‌ای زاگرس (امتداد طشک - بختگان) اگرچه شدت مطلق گرما در آن‌ها کمتر از دشت‌های پست جنوبی است؛ اما شیب رشد تعداد رخدادها و روزهای مداوم در آن‌ها معنادارتر از سایر مناطق است. سرانجام، تجمع نقاط بحرانی به ما امکان داد تا مجموعه‌ای از نواحی پرمخاطره در برابر موج گرما را با توجه به ترکیب سه و چهار ویژگی هم‌زمان شناسایی کنیم. ترکیب این تحلیل نشان داد که نواحی جنوبی و جنوب شرقی (بلوچستان، هرمزگان، خوزستان)، بخش‌های مرکزی کویری (درانجیر، ابرقو - سیرجان) و مسیرهای کوهپایه‌ای زاگرس (طشک - بختگان، مند، کارون بزرگ) بیشترین تداخل بحران‌ها را دارند و در صورت تدام روند فعلی گرمایش جهانی، بسیار آسیب‌پذیرتر خواهند بود.

نتایج این پژوهش درخصوص روندهای افزایشی بارز و معنادار امواج گرما در ایران، به‌ویژه در نواحی مرتفع غربی (به ویژه در دامنه‌های شرقی) به لحاظ تعداد رخداد با یافته‌های مجرد و همکاران (۲۰۱۵)، شریفی و احترام (۲۰۱۶) همخوانی دارد. همچنین، افزایش شدت امواج گرما (ویژگی‌های اوج و بزرگی موج) در مناطق کویری (کویر مرکزی و شمال لوت) با نتایج جوادی و همکاران (۲۰۲۴)، انصاری همکاران (۲۰۲۴) و همچنین کمانگر و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. این پژوهش، همچنین تفاوت طولانی‌ترین دوره موج گرما بین سواحل دریای عمان و خلیج فارس را تأیید می‌کند؛ همان‌گونه که در مطالعه بیرقدار و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده بود. افزایش وابستگی بزرگی موج گرما به ارتفاع نیز با نتایج ژای و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد. علاوه بر این، افزایش تعداد شب‌های گرم (نسبت به آستانه‌های محلی) که در گزارش جهانی اقلیم (۲۰۲۴) مطرح شده بود، با تحلیل ویژگی‌های موج گرم بر اساس دمای کمینه در این مطالعه تأیید شد.

مقایسه دقیق‌تر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که گسترش فضایی امواج گرما با نتایج عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶) در افزایش طول دوره‌های گرم نواحی کوهستانی زاگرس همخوانی دارد. با این حال، برخلاف گزارش جنگی و همکاران (۲۰۲۴) که حداکثر بزرگی و اوج موج گرما را در شمال غرب، شمال شرق و نواحی مرتفع گزارش کردند، در این مطالعه بالاترین مقادیر این ویژگی‌ها در جلگه خوزستان، بخش‌های مرکزی و جنوبی کویر لوت و سه حوضه جنوبی استان سیستان و بلوچستان مشاهده شد. این تفاوت می‌تواند ناشی از دقت مکانی داده‌ها و شاخص‌های متفاوت مورد استفاده برای شناسایی ویژگی‌های امواج گرما باشد.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه گرمایش تدریجی بر الگوهای تکرار، استمرار و شدت امواج گرما در ایران است و مناطق کلیدی نیازمند مداخله فوری را مشخص می‌کند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه پوشش زمین، تأثیر پوشش گیاهی و تغییرات دشت‌ها بر الگوهای موج گرما را بررسی کنند و مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای کاهش ریسک‌های سلامت و سازگاری اکولوژیک توسعه دهند. محدودیت‌های مطالعه شامل حساسیت روش تابع چگالی احتمال به طول پنجره زمانی و احتمال وجود خطاهای بازتحلیل در مناطق توپوگرافی پیچیده یا نواحی ساحلی به دلیل آمیختگی خشکی - دریا در دقت مکانی است.

تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره ۴۰۳۶۰۳۵ انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر خود را از این صندوق اعلام نمایند.

منابع

- اسماعیلی، حسین؛ روشنی، احمد؛ پرک، فاطمه. (۱۳۹۷). تغییرپذیری فرین‌های اقلیمی بر اساس شاخص‌های ترکیبی و امواج گرمایی در گستره حوضه‌های آبریز کشور. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۲۱(۲)، ۹۷-۱۱۳. https://www.ims-jmas.net/article_105242.html
- اسمعیل‌نژاد، مرتضی؛ خسروی، محمود؛ علیجانی، بهلول؛ مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۳۹۲). شناسایی امواج گرمایی ایران. نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۱(۳۳)، صص: ۳۹-۵۴.
- علوی‌نیا، سیدحسن؛ زارعی، مهدی. (۱۴۰۱). واکاوی روند تغییرات فرین‌های دما تحت تأثیر سناریوهای آینده به‌منظور ارزیابی نوسانات اقلیمی (مطالعه‌ی موردی: ایستگاه‌های همدیدی سنج و سقز. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۱(۴۱)، ۱-۱۶. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161521.html
- بیجندی، مجید؛ دریاباری، سیدجمال‌الدین؛ رنجبر، عباس؛ اربابی‌سبزواری، آزاده. (۱۴۰۱). رخدادهای فرین امواج سرمایی و گرمایی مناطق شمال شرقی ایران طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۰۱. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۰)، صص: ۴۱-۶۰. https://clima.irimo.ir/article_156650.html
- درگاهیان، فاطمه؛ حیدرنژاد، سمیه؛ رضوی‌زاده، سمانه. (۱۴۰۰). بررسی روند تغییرات ویژگی‌های امواج گرمایی مرتبط با تغییر اقلیم مطالعه موردی: شهرستان یزد. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۸(۳)، صص: ۵۶۴-۵۷۷. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125020>
- دوستکامیان، مهدی؛ حقیقی، اسماعیل؛ بوربوری، رضا. (۱۳۹۶). واکاوی و شناسایی تغییرات مکانی پهنه‌های گرم و سرد دمایی ایران طی دوره‌های مختلف. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۶(۲)، صص: ۱۴۱-۱۶۲. <https://doi.org/10.22067/geo.v6i2.59678>
- جهانبخش، سعید؛ قویدل، فاطمه؛ اشجعی، محمد. (۲۰۱۵). شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی به‌منظور کاهش مخاطرات انسانی در شمال غرب ایران. مدیریت مخاطرات محیطی، ۲(۴)، صص: ۳۷۷-۳۹۱. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.58265>

- قاسمی، فر. الهام؛ ناصری پور، سمیه. (۱۳۹۶). تحلیل سینوپتیکی امواج گرما و سرما در سواحل جنوبی دریای خزر. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، ۲۶(۱۰۳)، صص: ۱۳۷-۱۴۶. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2017.28899>
- کرم پور، مصطفی؛ رفیعی، جعفر؛ جعفری، ایوب. (۲۰۱۷). شناسایی و تحلیل سینوپتیکی امواج گرمایی غرب ایران (ایلام، خوزستان، لرستان، کرمانشاه). مدیریت مخاطرات محیطی، ۴(۳)، صص: ۲۶۳-۲۷۹. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2018.246557.296>
- حمیدیان پور، محسن؛ نظری پور، حمید؛ خزاعی فیض آباد، الناز؛ فرزانه، مهسا؛ فیروزه، صدیقه. (۱۴۰۲). تعیین نقطه تغییر آستانه‌های دمایی امواج گرمایی و سرمایی در ایران زمین طی دوره آماری ۱۹۶۶-۲۰۱۸. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۷)، صص: ۱۳۳-۱۵۰. <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.44464.1940>
- رضایی، فرشته؛ احمدی، محمود؛ شکیب، علیرضا. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی آستانه دمایی موج گرما طی دوره گرم سال در ایران بر اساس سناریوهای RCP در بازه زمانی (۲۰۴۵-۲۰۱۶). پژوهش‌های دانش زمین، ۱۰(۳)، صص: ۲۳۱-۲۴۱. <https://doi.org/10.52547/esrj.10.3.231>
- زرین، آذر؛ داداشی‌رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) بر اساس رویکرد همادی چندمدلی CMIP6. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۱۵۳(۱)، صص: ۷۵-۹۰. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.308361.1007551>
- Abbasnia, M. (2019). Climatic characteristics of heat waves under climate change: a case study of mid-latitudes, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 21(2), 637-656. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0052-4>
- Abbasnia, M., Tavousi, A., & Khosravi, M. (2016). Identification and analysis of heat waves in Iran during 1981-2010: Spatial and temporal variations. *Journal of Spatial Analysis & Environmental Hazards*, 13, 11-23.
- Ansari, A., Mahmoudi, P., & Nazaripour, H. (2024). Observed changes in the characteristics of heat waves in hot and dry regions of Iran. *Idojaras - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 128(4), 473-496.
- Barton, L., & Greig, D. (2019). Using dynamic heat thresholds to assess heatwave events in the context of climate change. *Environmental Research Letters*, 14(10), 104018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3c74>
- Barreca, A., Deschênes, O., Greenstone, M., & Shapiro, J. (2016). *The effect of absolute versus relative temperature on health and the environment: Evidence from Italy, 2001-2015*. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054001.
- Beyraghdar Kashkooli, O., Karimian, S., & Modarres, R. (2022). Spatiotemporal variability of the Persian Gulf and Oman Sea marine heatwaves during 1982-2020. *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114174>
- Bonshoms, M., Ubeda, J., Liguori, G. et al. (2022). Validation of ERA5-Land temperature and relative humidity on four Peruvian glaciers using on-glacier observations. *J. Mt. Sci.* 19, 1849-1873. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7388-4>
- Climate Central. (2024, August 7). Analysis: Climate change is increasing the danger of nighttime temperatures across the globe. Climate Central.
- De Polt, K., et al. (2023). Quantifying the impact of relevant heatwave durations. *Environmental Research Letters*, 18(10), 104005.
- Fallah Ghalhari, G., Farhang Dehghan, S., Akhlaghi Pirposhteh, E., & Asghari, M. (2021). Trend analysis and temporal and spatial distribution of wet bulb globe temperature as a heat stress index in Iran during the summer season over 30 years. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 6(4), 1476-1493. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v6i4.8153>
- Fatahian, M., Hejazizadeh, Z., Karbalaee, A. R., Shahidinia, H., & Wang, J. (2025). Spatio Temporal Analysis of Changes in the Iranian Summer Subtropical High Pressure System from a Climate Change Perspective. *Atmosphere*, 16(3), 273. <https://doi.org/10.3390/atmos16030273>
- Gao, J., et al. (2015). Impact of extreme high temperature on mortality and regional level definition of heat wave: a multi-city study in China. *Science of the Total Environment*, 505, 535-544.
- Hanna, E. G., Kjellstrom, T., Bennett, C., & Dear, K. (2010). Climate Change and Rising Heat: Population Health Implications for Working People in Australia. *Asia Pacific Journal of Public Health*, 23(2_suppl), 14S-26S. <https://doi.org/10.1177/1010539510391457>
- Hirsch, A. L., et al. (2022). Changes in land-atmosphere coupling increase compound drought and heatwave risk. *Nature Communications*, 13, Article 2380. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-00325-8>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2012), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by C. B. Field et al., 52 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., and New York.
- Jangi, M. R., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Intensifying heatwave trends in Iran based on observational data using the excess heat factor (EHF). *Natural Hazards*, 120(2), 2073-2090.
- Joyce, P.W.S., Tong, C.B., Yip, Y.L. et al. Marine heatwaves as drivers of biological and ecological change: implications of current research patterns and future opportunities. *Mar Biol* 171, 20 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00227-023-04340-y>
- Kamangar, M., Ahmadi, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, 121, 1265-1288.
- Kodra, E., & Ganguly, A. (2014). Asymmetry of projected increases in extreme temperature distributions. *Scientific Reports*, 4, 5884. <https://doi.org/10.1038/srep05884>
- Meehl, G. A., Tebaldi, C., Tilmes, S., Lamarque, J. -F., Bates, S., Pendergrass, A., & Lombardozzi, D. (2018). Future heat waves and surface ozone. *Environmental Research Letters*, 13(6), 64004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabdc4>

- Mojarrad, F., Masoompour, J., & Rostami, T. (2015). Statistical–Synoptic Analysis of Heat Waves above 40°C in the West of Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 13, 11–23.
- Muñoz Sabater, J., Dutra, E., Agustí Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... Thépaut, J. N. (2021). ERA5 Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383.
- Müller, V., et al. (2024). Evening humid heat maxima near the southern Persian/Arabian Gulf. *Communications Earth & Environment*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). Thermal Properties of Water and Coastal Temperature Moderation. NOAA JetStream.
- Nuttall, J. G., O’Leary, G. J., Khimashia, N., Asseng, S., Fitzgerald, G., & Norton, R. (2012). ‘Haying-off’ in wheat is predicted to increase under a future climate in south-eastern Australia. *Crop and Pasture Science*, 63(7), 593–605.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (Chapter on Coastal Climates). Routledge.
- Orlov, A., Sillmann, J., Aaheim, A., Aunan, K., & de Bruin, K. (2019). Economic Losses of Heat-Induced Reductions in Outdoor Worker Productivity: a Case Study of Europe. *Economics of Disasters and Climate Change*, 3(3), 191–211.
- Perera, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezzini, J. -L., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150–159. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>
- Perkins, S. E. (2015). A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, 164–165, 242–267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517.
- Poulos, G., & Zhong, S. (2008). An Observational History of Small-Scale Katabatic Winds in Mid-Latitudes. *Geography Compass*, 2, 1798–1821. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00166.x>
- Raei, E., Nikoo, M., AghaKouchak, A., & GHWR. (2018). GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox. *Scientific Data*, 5, 180206. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.206>
- Ren, Y., Liu, J., Zhang, T., Shalamzari, M. J., Arshad, A., Liu, T., Willems, P., Gao, H., Tao, H., & Wang, T. (2023). Identification and Analysis of Heatwave Events Considering Temporal Continuity and Spatial Dynamics. *Remote Sensing*, 15(5), 1369. <https://doi.org/10.3390/rs15051369>
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., & Chérut, F. (2013). A review of the global impacts of extreme heat events and the implications for climate change adaptation. *Nature Climate Change*, 3(8), 559–563. <https://doi.org/10.1038/nclimate1857>
- Sharifi, M., & Ehteram, N. (2016). Spatial-temporal analysis of heat waves in Iran over the last three decades (1981–2010). *Natural Environment Change*, 2(1), 29–38.
- Smith, J., & Zhang, L. (2018). Analysis of temperature extremes using the probability density function (PDF) approach in climate studies. *Journal of Climate Research*, 34(2), 101–113. <https://doi.org/10.1002/jcr.2345>
- Stefanon, M., D’Andrea, F., & Drobinski, P. (2012). Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014023>
- Sutanto, S.J., Zarzoza Mora, S.B., Supit, I. et al. Compound and cascading droughts and heatwaves decrease maize yields by nearly half in Sinaloa, Mexico. *npj Nat. Hazards* 1, 26 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00026-7>
- Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K., & Anagnostopoulou, C. (2022). Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe. *Water*, 14(4), 543. <https://doi.org/10.3390/w14040543>
- Vogel, M. M., Zscheischler, J., Fischer, E. M., & Seneviratne, S. I. (2020). Development of Future Heatwaves for Different Hazard Thresholds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9), e2019JD032070. <https://doi.org/10.1029/2019JD032070>
- Wang, Y., & Liu, J. (2024). Impacts of Massive Topographies on Heat Waves in Global Drylands. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2024GL109979.
- Wu, S., Luo, M., Zhao, R., et al. (2023). Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves. *npj Clim Atmos Sci*, 6, 36. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00365-8>
- Yousefi-Kebriya, A., Nadi, M., Afaridegan, E., et al. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan, Iran: insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific Reports*, 15, 13626. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>
- Zhai, J., Xue, X., Li, W., et al. (2024). Heatwave magnitude quantization and impact factors analysis over the Tibetan Plateau. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 85.
- Zhao, M., Lee, J. K. W., Kjellstrom, T., & Cai, W. (2021). Assessment of the economic impact of heat-related labor productivity loss: a systematic review. *Climatic Change*, 167(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03160-7>