



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Identification and analysis of the temporal-spatial trend of heat waves in Tehran

Abazar Esmaili Mahmoudabadi¹ | Aliakbar Shamsipour^{2*} | Hosein Mohammadi³

1. PhD Student at climatology, Physical Geography Department, University of Tehran, P.O. Box 14155-6465, Tehran, Iran. Email: Abesmaili@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Associate Professor, Physical Geography Department, University of Tehran, P.O. Box 14155-6465, Tehran, Iran. Email: shamsipr@ut.ac.ir

3. Full Professor, Physical Geography Department, University of Tehran, P.O. Box 14155-6465, Tehran, Iran. Email: Hmmohammadi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 05 February 2025
Revised: 09 June 2025
Accepted: 28 June 2025
Published: 07 July 2025

Keywords:
Urban heat island, climate change, trend identification, global warming, Iran.

ABSTRACT

Heat waves are one of the most important climate hazards today that devastate major cities worldwide. This study aims to explain the frequency, temporal distribution, continuity, and identification of the trend of their occurrence in Tehran, which was extracted using statistical methods and daily maximum temperature data from Tehran synoptic stations for a 30-year statistical period (1994-2023). First, the nonparametric Mann-Kendall method was used to identify the variability and monthly, seasonal, and annual trends of maximum temperatures. Then, percentile indices (95th and 99th) were used to identify its intensity, duration, and frequency. The study results showed that the frequency of short-term heat waves (two and three days) was higher. The highest frequency was related to the 2-day heat wave, which is more frequent at the geophysical station. The share of waves lasting 7 days or more was associated with a lower frequency. The highest frequency of seasonal events is also in autumn. The highest duration of heat waves was at Chitgar stations with 13 consecutive days in summer; Shemiran with 11 days in winter; Geophysics and Mehrabad with 10 and 9 days in autumn, spring and winter. The highest occurrence of heat waves was in Shemiran with 890 and the lowest in Mehrabad with 775 cases. Analysis of the trend indicates an increasing trend of heat wave occurrence in all seasons of the year. Therefore, it can be concluded that the effect of climate change in the region has led to the weakening of temperate latitude systems and the entry of warm masses from southern latitudes into the region. Its importance is in changing the type of precipitation from solid to liquid, reducing snow storage in highlands and destructive changes in plant phenology and the possibility of frost damage with late frosts for horticultural crops.

Cite this article: Esmaili Mahmoudabadi, A.; Shamsipour, A. & Mohammadi, H. (2025). Identification and analysis of the temporal-spatial trend of heat waves in Tehran. *Environmental Hazards Management*, 12 (1), 65-80. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.389996.865>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.389996.865>

Introduction

Environmental hazards (such as floods, heat waves, as well as man-made crises such as air pollution) as an inseparable part of human life, can minimize the level of human and ecosystem health (Zare & Moghimi, 2023). According to the World Health Organization, a heat wave is defined as a period in which the maximum and minimum apparent temperatures exceed the 90th percentile of the monthly distribution for at least two days (WHO, 2024). The Middle East is experiencing significant trends in heat waves, characterized by increasing frequency, intensity, and duration. Research shows that widespread heat days (WHDs) have increased significantly since 2000, particularly in regions such as western Iran, Syria, and Saudi Arabia (Zittis et al., 2021). Forecasts suggest that by the end of the 21st century, urban areas in the Middle East and North Africa region could face unprecedented heatwave

conditions, with temperatures exceeding 56°C and affecting more than 600 million people (shi et al., 2024).

Materials and Methods

To achieve the research objectives were obtained from the National Meteorological Organization the daily maximum temperature data of 4 Tehran synoptic stations including Mehrabad, Shemiran, Chitgar and Geophysics stations from 1994 to 2023. Following the research objective, in the first step, the temperature change trend of the four stations was examined monthly, seasonally and annually using the Mann-Kendall test. The temperature threshold was calculated for the data of all days of each year and data equal to the percentile (95th and 99th) with at least two days of continuity were extracted. The daily maximum temperature data for January to December were adjusted the index was calculated and the thresholds were determined for each month (because the heat wave threshold in February, April, August and November is different and important in different parts of Iran). Similarly, for each season and year (with daily data), the index was calculated and the extreme temperature thresholds of each station were determined. For each time scale of the study (month, season, and year), a heat wave was defined as a 2-day or longer period of maximum daily temperature equal to or greater than the temperature threshold determined at each station (this process was carried out separately for each synoptic station over 30 years). It was then determined at a seasonal (winter, spring, summer, and fall) and annual scale using heat wave characteristics at each station. Heat wave characteristics include maximum temperature, frequency, temperature frequency wave, and the highest heat wave.

Results

Heat waves are one of the climate hazards in different regions of the world, and their frequency has increased, especially in recent years, due to climate fluctuations. This study examined the climatic behavior of heat waves in different stations in Tehran and showed that in most months of the year, the maximum temperature has had a positive trend. The trend of temperature changes in the studied stations is significant at the 95th and 99th percentile levels, and the seasonal and annual temperature trends also indicate an increase in maximum temperatures in the last 30 years. Also, the number of heat waves has been increasing in four stations during this period, and most of the events are related to 2- and 3-day waves.

Conclusions

The results of this study clearly showed that in different seasons of the year, especially in summer and autumn, the trend of increasing maximum temperature at the stations is significantly observed. The increase in temperature in winter and spring is also more significant, especially in the geophysical stations and Shemiran and Chitgar. Also, contrary to expectations, in the cold seasons of the year, heat waves have occurred more than in the warm seasons of the year, which indicates the influence of local factors and meteorological systems on the occurrence of heat waves. These findings emphasize that to better predict and manage these phenomena, attention should be paid to the simultaneous influence of external and internal factors.

Data Availability Statement

To achieve the research objectives, daily maximum temperature data from 4 synoptic stations in Tehran, including Mehrabad, Shemiran, Chitgar, and Geophysics stations, from 1994 to 2023 were obtained from the Iran Meteorological Organization.

Acknowledgements

This research was conducted in the Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, and the members of that department and faculty are hereby thanked.

References

- Shi, P., Li, Y., Biswas, A., Wei, K., & Hou, M. (2024). Spatial-temporal evolution and intrinsic drivers of compound drought and heatwave events in Mainland China. *Science of The Total Environment*, 948, 174834.
- WHO. (2024). *The health impacts of 2024 summer heat-waves*. Briefing note for the delegations of the fifty-third session of the WHO Regional Committee for Europe.
- Zare, M., & Moghimi, E. (2023). Hazards typology in hazards science (Does hazards science have special types?). *Environmental Management Hazards*, 9(4), 383-390. doi: 10.22059/jhsci.2023.356665.770
- Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Almazroui, M., Bucchignani, E., Driouech, F., El Rhaz, K., ... & Lelieveld, J. (2021). Business-as-usual will lead to super and ultra-extreme heatwaves in the Middle East and North Africa. *npj Climate and Atmospheric Science*, 4(1), 20.
- Nasiri, B. (2016). The investigation of summer heat waves in Tehran city. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 7(3), S2. DOI: 10.5901/mjss.2016.v7n3s2p216.



شناسایی و تحلیل روند زمانی - مکانی امواج گرمایی در شهر تهران

اباذر اسمعیلی محمودآبادی^۱ | علی اکبر شمسی پور^{۲*} | حسین محمدی^۳

۱. دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Abesmaili@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Shamsipr@ut.ac.ir
۳. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Hmmohammadi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

موج های گرمایی امروزه از مهم ترین مخاطرات جوی هستند که در شهرهای بزرگ جهان اثرهای مخربی دارند. هدف این پژوهش، تبیین فراوانی، توزیع زمانی، استمرار و شناسایی روند رخداد موج های گرمایی در تهران است که با استفاده از روش های آماری و داده های روزانه دمای بیشینه ایستگاه های همیدی تهران برای دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۲۳-۱۹۹۴) استخراج شد. ابتدا برای شناخت میزان تغییرپذیری و روند ماهانه، فصلی و سالانه دماهای بیشینه از روش ناپارامتری من-کندال و سپس برای شناسایی شدت، دوام و بسامد آن، از نمایه های صدک (۹۵ و ۹۹) استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که فراوانی موج های گرمایی کوتاه مدت (دو و سه روزه) بیشتر بوده است. بیشترین فراوانی مربوط به موج گرمایی دوروزه است که در ایستگاه ژئوفیزیک فراوانی بیشتری دارد. موج های هفت روزه و بیشتر فراوانی کمتری داشته اند. بیشترین فراوانی رخداد فصلی نیز در پاییز است. بیشترین تداوم موج گرمایی در ایستگاه های چیتگر با ۱۳ روز متوالی در تابستان؛ شمیران با ۱۱ روز در زمستان؛ و ژئوفیزیک و مهرآباد با ۱۰ و ۹ روز در پاییز، بهار و زمستان بوده است. بیشترین رخداد موج گرمایی در شمیران با ۸۹۰ و کمترین آن در مهرآباد با ۷۷۵ مورد است. واکاوی روند حاکی از روند افزایشی رخداد امواج گرمایی در همه فصل های سال است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که اثر تغییر اقلیم در منطقه سبب تضعیف سامانه های عرض های معتدله و ورود توده های گرم عرض های جنوبی به منطقه شده است. اهمیت آن در تغییر نوع بارش از جامد به مایع، کاهش ذخیره برف ارتفاعات و تغییرات مخرب در فنولوژی گیاهی و احتمال سرمازدگی با سرماهای دیررس برای محصولات باغی و زراعی است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

کلیدواژه:

ایران،
تغییر اقلیم،
جزیره گرمای شهری،
روندیابی،
گرمایش جهانی.

استناد: اسمعیلی محمودآبادی، اباذر؛ شمسی پور، علی اکبر و محمدی، حسین (۱۴۰۴). شناسایی و تحلیل روند زمانی - مکانی امواج گرمایی در شهر تهران. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۲ (۱)، ۶۵-۸۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.389996.865>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.389996.865>



مقدمه

مخاطرات محیطی جزء جدایی‌ناپذیر زندگی انسان است و می‌تواند سطح سلامت انسانی و زیست‌بوم را به حداقل برساند (مقیمی، ۱۳۹۴: ۹۷۸). مدیریت کارآمد مخاطره از موارد مهمی است که می‌تواند خطرهای ناشی از آن را تا حد چشمگیری تعدیل کند (زارع و مقیمی، ۱۴۰۱). هنوز تعریف جامع و روشنی از امواج گرمایی در جهان وجود ندارد (Ren et al., 2023). موج گرما، نوسان دمای مثبت است که با دماهای حداکثر روزانه مشخص می‌شود و در طی روزها (گاهی هفته‌ها و ماه‌ها) به‌صورت متوالی در فضاهای جغرافیایی خاص استمرار زمانی دارند (جهانبخش و همکاران، ۱۳۹۴). سازمان بهداشت جهانی، موج گرما را دوره‌ای تعریف می‌کند که حداکثر و حداقل دمای ظاهری از صدک ۹۰ توزیع ماهانه برای حداقل دو روز تجاوز کند (WHO, 2024). در اروپا، موج گرما به‌عنوان یک دوره طولانی (دو یا چند روز) با دمای بسیار زیاد، با حداکثر دمای روزانه بیش از صدک ۹۵ و حداقل دمای بیش از صدک ۹۰ داده‌های تاریخی مشخص می‌شود (Joshua et al., 2023). در معنای کلی، موج گرما به دوره‌ای از افزایش غیرمعمول و مداوم دما گفته می‌شود که به‌طور معمول چند روز تا چند هفته طول می‌کشد و با رسیدن دما به سطوحی بالاتر از حد معمول فصلی همراه است. این پدیده می‌تواند سبب ایجاد شرایط تنش حرارتی در انسان‌ها و دیگر موجودات زنده، افزایش مصرف انرژی، آسیب دیدن کشاورزی و بروز حوادث محیطی شود. این رویدادها به‌ویژه در مناطق شهری که اثرهای جزیره گرمای شهری وجود دارد، پیامدهای شدیدتری در پی دارند و می‌توانند سلامت جمعیت را به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی در مناطق مختلف جهان درباره امواج گرمایی انجام گرفته است. گزارش ششم شورای بین‌دولتی تغییر اقلیم نشان می‌دهد که افزایش دمای جهانی سبب افزایش مکرر موج‌های گرمایی شدید شده است (IPCC, 2021). در آسیا روند موج گرمایی افزایش چشمگیری در فراوانی، شدت و مدت زمان در مناطق مختلف نشان می‌دهد که توسط ترکیبی از عوامل اقلیمی و محیطی هدایت می‌شود (Rahman, 2024). هرچند این روندها یکنواخت نبوده و ویژگی‌های متمایزی در آسیای شرقی، جنوب شرق، مرکزی و جنوبی مشاهده شده است (WHO, 2024). پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تا پایان قرن بیست‌ویکم، مناطق شهری در خاورمیانه و شمال آفریقا ممکن است با شرایط بی‌سابقه‌ای با موج گرما مواجه شوند، دماهایی حدود ۵۶ درجه سانتی‌گراد که جمعیتی بیش از ۶۰۰ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار دهد (Shi et al., 2024). فراوانی، مدت و شدت دمای شدید تابستان در اروپا از اواسط قرن بیستم افزایش یافته است (Famooss Paolini., 2024). پژوهشی در هند نشان می‌دهد که تعداد موج‌های گرمایی شدید در شهرهای بزرگ نظیر دهلی و بمبئی افزایش یافته است. نتایج بیانگر این است که این افزایش به‌طور مستقیم با افزایش آلودگی هوا و تغییر اقلیم مرتبط است (De Bont et al., 2024). در شرق آسیا، امواج گرما با افزایش چشمگیر حداقل دما در حال تکرار و طولانی‌تر شدن هستند که نشان‌دهنده شب‌های گرم‌تر است (Liu & Qin, 2023). طی پژوهشی توزیع مکانی و زمانی امواج گرما و آلودگی هوا در تیانجین چین تجزیه و تحلیل شد. این تحقیق بر نگرانی فزاینده در مورد محیط‌های شهری تأکید می‌کند، جایی که افزایش تراکم جمعیت می‌تواند اثرهای امواج گرما را تقویت کند (Jiao et al., 2023). همچنین پژوهشی در زمینه شدت و مدت موج‌های گرمایی در چین نشان می‌دهد که مناطق جنوبی چین طولانی‌ترین موج‌های گرمایی را تجربه می‌کنند، درحالی که شین‌جیانگ شاهد بیشترین شدت موج‌های گرمایی بوده است (Rezaei et al., 2023). نتایج پژوهشی نشان داد که امواج گرما هم پرتکرارتر شده است و هم مدت زمان بیشتری دارد. این روند در مناطق مختلف مشاهده شده است، با دست‌کم یک روز موج گرمای اضافی در هر دهه از سال ۱۹۵۰، به‌ویژه در مناطق عرض جغرافیایی پایین که افزایش می‌تواند به ۳ تا ۵ روز در هر دهه برسد (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). خاورمیانه در حال تجربه روندهای چشمگیری در موج گرماست که با افزایش فراوانی، شدت و مدت مشخص می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که روزهای گرمای گسترده (WHDs) به‌طور چشمگیری از سال ۲۰۰۰ افزایش یافته است، به‌ویژه در مناطقی مانند غرب ایران، سوریه و عربستان سعودی (Zittis et al., 2021). تحقیقات قبلی نیز نشان می‌دهد که از آغاز قرن بیستم، میانگین دماهای جهانی حدود ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. میانگین حداکثر دما در ایران نیز تقریباً ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است، درحالی که حداقل دما از دهه ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۸ حدود ۱/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (Namroodi et al., 2021). امواج گرما در سراسر اروپا مکرر و شدیدتر شده و از دهه ۱۹۵۰ افزایش چشمگیری در رویدادهای دمایی شدید داشته است (Bumbaco et al., 2013).

افزون بر این، پژوهش شریفی و همکاران درباره تغییرات مقطعی در ویژگی‌های موج گرما در سراسر ایالات متحده، ضرورت طرح‌های تاب‌آوری مناسب در مناطق شهری را برای کاهش اثرهای مضر امواج گرما برجسته می‌کند (Shafiei Shiva et al., 2019). پژوهشی درباره امواج گرمایی ایران نشان می‌دهد که بیشترین رخداد امواج گرمایی در نواحی کوهستانی و کوهپایه‌ای در راستای رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس و کمترین رخداد موج گرمایی نیز در نواحی ساحلی جنوبی و شمالی کشور رخ می‌دهد (همکاران، ۱۳۹۹). در ایران امواج گرمایی روند افزایشی را در تعداد روزهای بسیار گرم و شدت امواج گرمایی در دو دهه گذشته را نشان می‌دهد. این روند در تهران نیز مشهود است و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ روزهای گرم و امواج گرمایی بیشتری رخ دهد (Alizadeh-Choobari & najafi, 2018; Abbasnia et al., 2016). حسین‌پور و همکاران، با تحلیل آماری امواج گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز به بررسی آماری موج‌های گرمایی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که طی سی سال اخیر روند موج‌های گرمایی در این منطقه افزایش یافته است. همچنین رخداد موج گرمایی تابستانه طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ بررسی شد. نتایج نشان داد که موج‌های گرمایی تابستانه در ماه جولای بیشترین تکرار را داشته‌اند. تحلیل روند زمانی و مکانی امواج گرمایی در تهران به دلیل تغییرات سریع شهری و افزایش دما در این منطقه اهمیت زیادی دارد (حسین‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). در تهران، بیشتر پدیده‌های موج گرما در ماه جولای رخ داده‌اند و به‌طور معمول با فشار زیاد زیرگرمسیری همراه بوده‌اند که سبب ایجاد جوی پایدار و افزایش دما شده است (Nasiri, 2016). این تحلیل‌ها می‌توانند به مدیران شهری و سیاستگذاران کمک کنند تا برنامه‌ریزی بهتری برای کاهش اثرهای گرمایی و بهبود شرایط زیست‌محیطی انجام دهند. تجزیه و تحلیل زمانی و مکانی امواج گرما در سال‌های اخیر به دلیل افزایش فراوانی و شدت این رویدادهای شدید اقلیمی، به‌ویژه در مناطق شهری، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این تجزیه و تحلیل برای درک اثرهای امواج گرما بر سلامت عمومی، برنامه‌ریزی شهری و راهبردهای سازگاری با آب‌وهوا بسیار مهم است.

در سال‌های اخیر، افزایش پیوسته و شدت امواج گرمایی ناشی از تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در بسیاری از نقاط جهان از جمله ایران مشاهده شده است. این روند افزایشی، نیازمند شناخت دقیق‌تر الگوها و ویژگی‌های موج گرما در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف است تا بتوان برنامه‌ریزی مناسبی برای کاهش مخاطرات و سازگاری با تغییر اقلیم انجام داد. با توجه به اهمیت موضوع و نبود داده‌های جامع در برخی مناطق، مطالعه و تحلیل روندهای زمانی و مکانی موج گرما در کلانشهرهایی مانند تهران که به دلیل رشد سریع جمعیت و تغییرات گسترده شهری بیشتر در معرض این مخاطره‌اند ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش ضمن شناسایی امواج گرمایی کلانشهر تهران با هدف شناسایی و بررسی ویژگی‌های فراوانی، شدت و مدت زمان امواج گرمایی، گامی مهم در جهت مدیریت بهتر این پدیده و کاهش اثرهای منفی آن محسوب می‌شود.

روش‌شناسی و داده‌ها

دادهٔ بیشینه دمای روزانهٔ چهار ایستگاه همدید تهران شامل ایستگاه‌های مهرآباد، شمیران، چیتگر^۱ و ژئوفیزیک از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد (جدول ۱). یکی از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های ناپارامتریک برای تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرو متئولوژیکی، آزمون من-کندال است (حجام و همکاران، ۱۳۸۷).

در گام نخست روند تغییرات دمای چهار ایستگاه به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه با آزمون من-کندال بررسی شد. در گام بعد با روش‌های آماری صدک^۲ رخداد موج‌های گرمایی در منطقه و همهٔ سال در دورهٔ پژوهش استخراج شد. بیشتر پژوهش‌ها با شناسایی روزهای امواج گرمایی در ایران از نمایهٔ صدک‌های ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد انجام یافته است (اسدی و مسعودیان، ۱۳۹۳؛ دارند، ۱۳۹۳؛ McGregor et al., 2007). آستانهٔ دمایی برای داده‌های همهٔ روزهای هر سال محاسبه و داده‌های برابر با صدک (۹۵ و ۹۹) با دست‌کم دو روز تداوم استخراج شد (حاتمی زرنه و همکاران، ۱۳۹۸). برای محاسبهٔ صدک‌ها از رابطهٔ ۱ استفاده می‌شود.

۱. به دلیل تأسیس ایستگاه چیتگر در سال ۱۹۹۶، داده‌های این ایستگاه‌ها از این سال لحاظ شده است.

رابطه ۱

$$PR = (c_f + f_i / 2) / n * 100$$

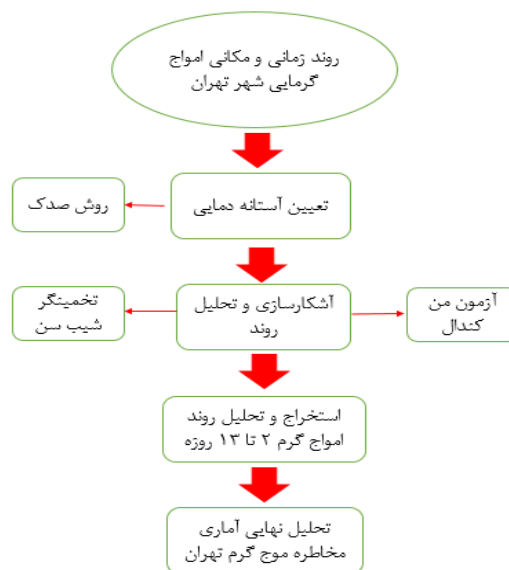
که PR صدک داده مورد نظر؛

C_f فراوانی تراکمی طبقه‌ای که قصد محاسبه آن را داریم؛

F_i فراوانی طبقه‌ای که قصد محاسبه صدک را برای آن داریم؛

n ، تعداد کل داده‌ها در توزیع است.

داده‌های بیشینه دمای روزانه برای ماه‌های میلادی از ژانویه تا دسامبر، تنظیم و شاخص محاسبه و آستانه‌ها در هر ماه مشخص شد (چراکه آستانه موج گرما در فوریه، آوریل، آگوست و نوامبر در نقاط مختلف ایران متفاوت و مهم است). به همین ترتیب برای هر فصل و سال (با داده روزانه) شاخص محاسبه و آستانه‌های دمای فرین هر ایستگاه تعیین شد. برای هر مقیاس زمانی مطالعه (ماه، فصل و سال)، تداوم‌های دو روز و بیشتر دمای روزانه حداکثر مساوی و بیشتر از آستانه دمایی تعیین شده در هر ایستگاه، موج گرما تعریف شد (این فرایند برای هر ایستگاه سینوپتیک طی ۳۰ سال به‌طور جداگانه انجام گرفت). در ادامه در مقیاس فصلی (زمستان، بهار، تابستان و پاییز) و سالانه با استفاده از ویژگی‌های موج گرما در هر ایستگاه مشخص شد. مشخصات موج گرما شامل حداکثر دما، فراوانی، موج فراوانی دمایی، آستانه تداوم و بیشترین موج گرما هستند. همچنین به‌منظور مقایسه تعداد موج‌های گرما، سری‌های زمانی تعداد موج‌ها در هر ایستگاه در دوره پژوهش و فراوانی‌ها در غالب نمودار ترسیم شد تا رفتار امواج گرمایی (تغییرات زمانی) در هر ایستگاه مشخص شود.



شکل ۱. روندنمای گرافیکی روش تحقیق

یافته‌های پژوهش و بحث

جدول ۱، آستانه‌های دمایی بیشینه در دو صدک ۹۵ و ۹۹ را برای چهار ایستگاه (چیتگر، ژئوفیزیک، شمیران و مهرآباد) به تفکیک ماه‌های سال در دوره آماری ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. این آستانه‌ها نشان‌دهنده دمایی هستند که ۵ درصد (صدک ۹۵) و ۱ درصد (صدک ۹۹) مقادیر بالاتر از آن در داده‌های دما مشاهده شده است. در همه ایستگاه‌ها، روند افزایشی دما در ماه‌های گرم سال (از خرداد تا شهریور) کاملاً مشهود است. بیشینه دما در صدک ۹۹ به‌ویژه در ماه‌های تیر و مرداد به بیش از ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که حاکی از شدت زیاد رویدادهای گرمایی در این ماه‌هاست. به‌طور مشخص، ایستگاه مهرآباد با داشتن بیشترین مقادیر آستانه دمایی در اکثر ماه‌ها، به‌ویژه در صدک ۹۹، نشان‌دهنده شرایط اقلیمی گرم‌تر و احتمال وقوع امواج گرمایی شدیدتر نسبت به سایر ایستگاه‌هاست. مقایسه مقادیر صدک ۹۵ و ۹۹ در هر ماه نشان می‌دهد که در صدک ۹۹، افزایش دما نسبت به صدک ۹۵ به‌طور معناداری بیشتر است که نمایانگر رویدادهای گرمایی شدیدتر و نادرتر است که می‌تواند اثرهای مخرب اقلیمی و زیستی

بیشتری داشته باشد. از سوی دیگر، ایستگاه شمیران که در ارتفاع بالاتری واقع شده است، دارای مقادیر دمایی کمتر در هر دو صدک نسبت به ایستگاه مهرآباد است، ولی تفاوت دما در ماه‌های سرد سال (دی تا اسفند) کمتر و در برخی موارد نزدیک به بقیه ایستگاه‌هاست. این امر نشان‌دهنده تأثیر متقابل عوامل ارتفاع و شرایط میکروکلیمایی منطقه در شکل‌دهی الگوی دمایی است. در مجموع، داده‌های جدول ۱ تأیید می‌کنند که امواج گرمایی با توجه به آستانه‌های دمایی متغیر در طول سال و بین ایستگاه‌های مختلف متفاوت است و تحلیل دقیق این آستانه‌ها برای ارزیابی شدت، فراوانی و تداوم امواج گرمایی اهمیت زیادی دارد. همچنین افزایش تدریجی این آستانه‌ها در طول سال‌ها می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات اقلیمی و روند گرمایش منطقه‌ای باشد.

جدول ۱. آستانه‌های دمایی (درجه سانتی‌گراد) ایستگاه‌ها در هر ماه (۲۰۲۳-۱۹۹۴)

ایستگاه	صدک	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
چیتگر	۹۵	۱۴/۹	۱۶/۹	۲۳/۴	۲۸/۶	۳۳/۶	۳۸/۲	۴۰/۳	۳۹/۱	۳۵/۸	۲۹/۹	۲۳/۵	۱۶/۴
	۹۹	۱۶/۲	۱۹/۴	۲۷/۲	۳۱/۵	۳۵/۴	۳۹/۴	۴۱/۴	۴۰/۲	۳۷/۰	۳۱/۴	۲۷/۶	۱۸/۹
ژئوفیزیک	۹۵	۱۵/۰	۱۶/۶	۲۲/۴	۲۷/۴	۳۲/۶	۳۷/۰	۳۹/۰	۳۷/۷	۳۴/۷	۲۹/۰	۲۲/۱	۱۶/۳
	۹۹	۱۶/۰	۱۹/۴	۲۶/۵	۳۰/۳	۳۴/۲	۳۸/۰	۴۰/۲	۳۸/۹	۳۶/۴	۳۰/۶	۲۴/۸	۱۸/۱
شمیران	۹۵	۱۴/۱	۱۵/۱	۲۲/۲	۲۷/۳	۳۳/۰	۳۷/۲	۳۹/۲	۳۸/۰	۳۴/۸	۲۹/۰	۲۲/۰	۱۵/۴
	۹۹	۱۵/۶	۱۸/۵	۲۶/۱	۳۰/۷	۳۴/۲	۳۸/۴	۴۰/۲	۳۹/۱	۳۶/۴	۳۰/۸	۲۵/۶	۱۸/۰
مهرآباد	۹۵	۱۵/۳	۱۷/۱	۲۴/۱	۲۹/۶	۳۴/۴	۳۸/۸	۴۱/۰	۳۹/۶	۳۶/۲	۳۰/۸	۲۳/۶	۱۷/۰
	۹۹	۱۷/۱	۲۰/۰	۲۸/۰	۳۲/۰	۳۶/۰	۴۰/۰	۴۲/۰	۴۰/۸	۳۷/۶	۳۲/۲	۲۵/۹	۱۹/۱

جدول ۲. نتایج روند حداکثر دمای ماهانه در سطوح اطمینان مختلف ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد (به ترتیب *، ** و ***).

ایستگاه	رشد	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ژئوفیزیک	روند	+	+++	++	+	+++	+++	+++	++	+++	+	+++	+
	شیب	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	سن	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
شمیران	روند	++	+++	++	+	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	++
	شیب	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	سن	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
مهرآباد	روند	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
	شیب	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
	سن	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
چیتگر	روند	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+++	+
	شیب	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	سن	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

آزمون من-کندال و شیب سن برای بررسی روند دمای بیشینه در چهار ایستگاه ژئوفیزیک، مهرآباد، شمیران و چیتگر طی یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۴-۲۰۲۳) در مقیاس‌های فصلی و سالانه انجام گرفت. در فصل زمستان (DJF)، همه ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی بودند، به‌گونه‌ای که مقدار آماره کندال در همه ایستگاه‌ها مثبت است و در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴۳ قرار گرفته است. روند افزایشی در ایستگاه‌های ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار ($p\text{-value} < 0/05$) بوده است، اما در ایستگاه مهرآباد ($p\text{-value} = 0/01$) این روند معنادار نبوده است. شیب سن نیز در این فصل برای سه ایستگاه ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر برابر با ۰/۰۹ و برای مهرآباد ۰/۰۴ درجه سانتی‌گراد در هر دهه برآورد شده است. در فصل بهار (MAM)، همه ایستگاه‌ها روند افزایشی نشان دادند که در ایستگاه‌های ژئوفیزیک، مهرآباد و شمیران این روند معنادار است، ولی در ایستگاه چیتگر با وجود مثبت بودن آماره کندال (۰/۲۹)، مقدار p (۰/۱۲) نشان‌دهنده معنادار نبودن آن در سطح ۹۵ درصد است. بیشترین نرخ افزایش دما براساس شیب سن در ایستگاه‌های ژئوفیزیک و شمیران با مقدار ۰/۱۱ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. در فصل تابستان (JJA)، بیشترین شدت روند افزایشی در میان فصول مشاهده می‌شود. آماره کندال در ایستگاه ژئوفیزیک ۰/۶۶ و در ایستگاه شمیران ۰/۶۴ است که هر دو در سطح ۹۹ درصد معنادار هستند ($p\text{-value} < 0/01$). روند افزایشی در ایستگاه‌های مهرآباد و چیتگر نیز با معناداری زیاد همراه بوده است. شیب سن در این فصل برای ایستگاه شمیران بیشترین مقدار (۰/۱۲) را در

میان ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در فصل پاییز (SON) نیز همه ایستگاه‌ها روندی مثبت دارند. این روند در ایستگاه‌های ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر با مقادیر آماره کندانال ۰/۴ تا ۰/۴۹ در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است، اما در مهرآباد با مقدار p برابر ۰/۱۲ از معناداری لازم برخوردار نیست. شیب سن در این فصل نیز در بیشتر ایستگاه‌ها برابر یا نزدیک به ۰/۰۹ گزارش شده است. در مقیاس سالانه نیز روند افزایش دمای بیشینه در همه ایستگاه‌ها مشهود است. آزمون من-کندانال روند افزایشی معنادار را در ایستگاه‌های ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر نشان می‌دهد، در حالی که در ایستگاه مهرآباد، مقدار p معادل ۰/۰۷ است و در مرز معناداری قرار دارد. بیشترین شیب تغییرات سالانه متعلق به ایستگاه شمیران با ۰/۱۰ درجه سانتی‌گراد در دهه است. به‌طور کلی، یافته‌ها بیانگر روند افزایشی دمای بیشینه در همه ایستگاه‌ها و در بیشتر فصل‌های سال هستند که در برخی ایستگاه‌ها با شدت و معناداری بیشتری مشاهده شده است.

جدول‌های ۳ تا ۶، آستانه دمایی موج‌های گرما را براساس صدک‌های ۹۵ و ۹۹ و همچنین تعداد رخداد‌های موج گرمایی با طول‌های مختلف (تداوم ۲ تا ۱۳ روز) را در چهار ایستگاه شمیران، مهرآباد، ژئوفیزیک و چیتگر در چهار فصل سال نشان می‌دهد. در فصل زمستان، آستانه دمایی موج‌های گرما براساس صدک ۹۵ در دامنه ۱۵/۴ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد و براساس صدک ۹۹ در دامنه ۱۷/۶۷ تا ۱۹/۲ درجه سانتی‌گراد است. به‌طور خاص، ایستگاه مهرآباد بیشترین آستانه دمایی را در این فصل دارد که نشان‌دهنده شدت نسبی دمای بیشتر در این ایستگاه است. فراوانی موج‌های گرمایی دوازده در این فصل بین ۸۸ تا ۹۴ رخداد گزارش شده که بیانگر بروز مکرر این نوع موج‌ها حتی در سردترین فصل سال است. با افزایش طول تداوم موج‌های گرمایی، تعداد رخدادها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که موج‌های گرمایی پنج‌روزه و بیشتر تقریباً نادرند و در صدک ۹۹ اغلب ثبت نشده‌اند. این روند نشان می‌دهد که گرچه دمای هوا در زمستان افزایش یافته، طول دوره‌های گرمایی به‌طور معمول کوتاه است. در فصل بهار، آستانه دمایی موج‌های گرما به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و در صدک ۹۵ مقادیر بین ۳۰/۴ تا ۳۲/۹۴ درجه سانتی‌گراد و در صدک ۹۹ بین ۳۲/۸ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. این افزایش آستانه دمایی بیانگر آغاز دوره‌های طولانی‌تر و شدیدتر گرما نسبت به زمستان است. فراوانی موج‌های گرمایی دوازده در این فصل بین ۷۵ تا ۹۴ مورد است که نسبت به زمستان کمی کاهش دارد، اما موج‌های گرمایی با طول تداوم بیشتر، از جمله چهار، پنج و شش‌روزه، به‌وضوح در این فصل افزایش یافته‌اند. به‌خصوص در صدک ۹۹، این طول‌های تداوم بیشتر، نشان‌دهنده وقوع دوره‌های گرمایی پایدارتر و شدیدتر است که می‌تواند تبعات مهمی برای کشاورزی و سلامت داشته باشد. تابستان با بالاترین آستانه دمایی موج‌های گرما مشخص می‌شود؛ به‌طوری که آستانه در صدک ۹۵ بین ۳۸/۴ تا ۴۰/۲ درجه سانتی‌گراد و در صدک ۹۹ بین ۳۹/۷ تا ۴۱/۴ درجه سانتی‌گراد است. این دماها به‌وضوح بیانگر شدت زیاد موج‌های گرمایی در این فصل هستند. فراوانی موج‌های گرمایی دوازده در تابستان بین ۸۱ تا ۹۰ مورد است که تقریباً مشابه بهار است، اما تفاوت اصلی در طول تداوم موج‌های گرمایی است. در تابستان موج‌های گرمایی طولانی‌تر تا ۱۳ روز نیز گزارش شده که در ایستگاه‌هایی مانند چیتگر به تعداد محدود اما معنادار وجود دارند. این موج‌های گرمایی طولانی‌مدت که در صدک ۹۹ نیز مشاهده می‌شوند، نمایانگر پایداری بیشتر شرایط گرمایی شدید و فشار بیشتر بر منابع آب، سلامت انسان و زیرساخت‌هاست. در پاییز، آستانه دمایی موج گرما در صدک ۹۵ بین ۳۳/۲ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و در صدک ۹۹ بین ۳۵ تا ۳۶/۴ درجه سانتی‌گراد قرار دارد که از کاهش نسبی دما نسبت به تابستان خبر می‌دهد. فراوانی موج‌های گرمایی دوازده در این فصل بین ۸۲ تا ۹۴ مورد است که بیانگر استمرار وقوع دوره‌های کوتاه‌مدت گرمایی است. با این حال، رخداد موج‌های گرمایی با طول تداوم بیش از پنج روز در پاییز به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و در صدک ۹۹ اغلب مشاهده نشده‌اند که نشان‌دهنده کوتاه‌تر بودن و کمتر شدن دوره‌های گرمایی پایدار نسبت به تابستان و بهار است. در مجموع می‌توان گفت موج‌های گرمایی با افزایش طول تداوم و شدت، در فصل‌های گرم‌تر سال (بهار و تابستان) بیشتر و پایدارتر بوده‌اند. در تابستان، نه تنها آستانه دمایی بالاتر است، بلکه تعداد موج‌های گرمایی طولانی‌مدت افزایش چشمگیری یافته که این موضوع خطرهای جدی‌تری از نظر زیست‌محیطی و بهداشتی به همراه دارد. در مقابل، فصل‌های سردتر مانند زمستان و پاییز دارای آستانه دمایی پایین‌تر و فراوانی موج‌های گرمایی با تداوم کوتاه‌تر هستند و وقوع موج‌های گرمایی طولانی در این فصل‌ها بسیار نادر است.

جدول ۳. آستانه‌های دمایی و تداوم موج گرمایی ایستگاه‌ها در فصل زمستان (۲۰۲۳-۱۹۹۴)

زمستان (DJF)	صدک	آستانه دمای موج‌های گرما	دو روزه	سه روزه	چهار روزه	پنج روزه	شش روزه	هفت روزه	هشت روزه	نه روزه	ده روزه	یازده روزه
شمیران	۹۵	۱۵/۴	۹۴	۳۹	۲۸	۲۳	۱۵	۱۱	۷	۴	۲	۱
	۹۹	۱۷/۶۷	۹	۳	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مهرآباد	۹۵	۱۷	۸۸	۴۱	۲۶	۱۴	۹	۶	۳	۱	۰	۰
	۹۹	۱۹/۲	۱۳	۵	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ژئوفیزیک	۹۵	۱۶/۱	۹۴	۴۲	۲۸	۲۲	۱۸	۱۱	۷	۴	۱	۰
	۹۹	۱۹	۱۳	۷	۴	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰
چیتگر	۹۵	۱۶	۸۹	۳۹	۲۸	۲۰	۱۰	۶	۳	۱	۰	۰
	۹۹	۱۸/۸	۱۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۴. آستانه‌های دمایی و تداوم موج گرمایی ایستگاه‌ها در فصل بهار (۲۰۲۳-۱۹۹۴)

بهار (MAM)	صدک	آستانه دمای موج‌های گرما	دو روزه	سه روزه	چهار روزه	پنج روزه	شش روزه	هفت روزه	هشت روزه	نه روزه	ده روزه
شمیران	۹۵	۳۰/۴	۹۴	۵۷	۳۳	۲۱	۷	۴	۲	۱	۰
	۹۹	۳۲/۸	۱۴	۹	۶	۴	۳	۲	۱	۰	۰
مهرآباد	۹۵	۳۲/۹۴	۸۴	۵۱	۳۱	۱۸	۸	۴	۲	۱	۰
	۹۹	۳۵	۱۱	۵	۳	۲	۱	۰	۰	۰	۰
ژئوفیزیک	۹۵	۳۰/۶	۹۰	۵۱	۳۰	۱۶	۱۰	۵	۳	۲	۱
	۹۹	۳۳/۱	۱۱	۶	۴	۳	۲	۱	۰	۰	۰
چیتگر	۹۵	۳۱/۸	۷۵	۴۸	۳۰	۲۰	۸	۵	۳	۲	۱
	۹۹	۳۴/۴	۱۱	۷	۵	۴	۳	۲	۱	۰	۰

جدول ۵. آستانه‌های دمایی و تداوم موج گرمایی ایستگاه‌ها در فصل تابستان (۲۰۲۳-۱۹۹۴)

تابستان (JJA)	صدک	آستانه دمای موج‌های گرما	دوروزه	سه روزه	چهار روزه	پنج روزه	شش روزه	هفت روزه	هشت روزه	نه روزه	ده روزه	یازده روزه	دوازده روزه	سیزده روزه
شمیران	۹۵	۳۸/۴	۸۷	۵۰	۲۶	۱۶	۷	۴	۱	۰	۰	۰	۰	
	۹۹	۳۹/۸	۱۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
مهرآباد	۹۵	۴۰/۲	۸۲	۴۱	۲۴	۱۲	۵	۲	۰	۰	۰	۰	۰	
	۹۹	۴۱/۴	۸	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
ژئوفیزیک	۹۵	۳۸/۴	۹۰	۵۱	۳۰	۱۶	۹	۵	۲	۱	۰	۰	۰	
	۹۹	۳۹/۷۰	۱۰	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
چیتگر	۹۵	۳۹/۴	۸۱	۴۱	۲۳	۱۲	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	
	۹۹	۴۰/۹	۱۱	۴	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	

جدول ۶. آستانه‌های دمایی و تداوم موج گرمایی ایستگاه‌ها در فصل پاییز (۲۰۲۳-۱۹۹۴)

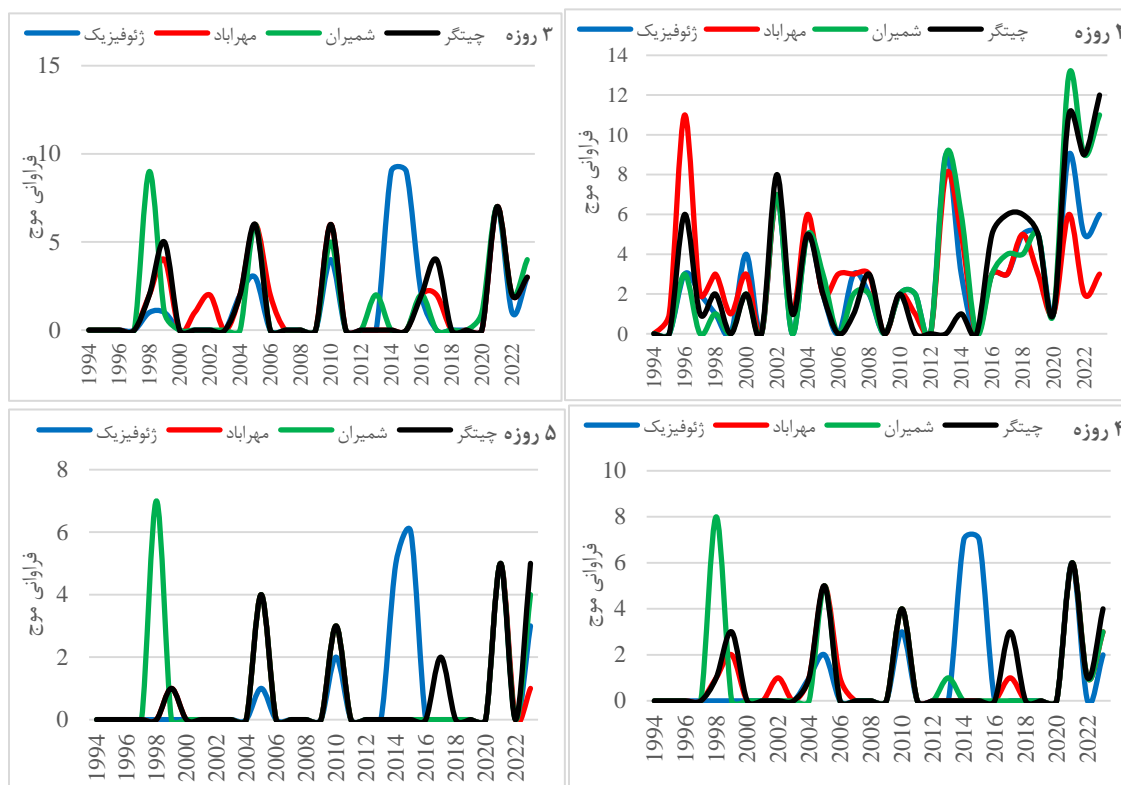
پاییز (SON)	صدک	آستانه دمای موج‌های گرما	دو روزه	سه روزه	چهار روزه	پنج روزه	شش روزه	هفت روزه	هشت روزه	نه روزه	ده روزه
شمیران	۹۵	۳۳/۲	۹۴	۵۹	۴۱	۲۹	۱۵	۹	۵	۳	۱
	۹۹	۳۵	۹	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مهرآباد	۹۵	۳۵	۸۸	۵۵	۳۲	۲۰	۱۳	۸	۴	۲	۰
	۹۹	۳۶/۴۱	۹	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ژئوفیزیک	۹۵	۳۳/۲۴	۸۲	۴۵	۲۶	۱۷	۹	۵	۳	۲	۱
	۹۹	۳۵	۱۰	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
چیتگر	۹۵	۳۴/۲	۸۹	۶۰	۴۲	۳۱	۱۴	۵	۲	۱	۰
	۹۹	۳۶/۲	۱۰	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰

توزیع فصلی و سالانه شدت امواج گرمایی دو تا پنج‌روزه

از آنجا که استمرار زمانی (تداوم) ویژگی اصلی هر موج گرمایی است، در ادامه موج‌های گرمایی در چهار گروه موج‌های دو تا پنج‌روزه براساس فراوانی ماهانه در طی دوره آماری ۱۹۹۴-۲۰۲۳ دسته‌بندی شدند. امواج دو تا پنج‌روزه بیشترین فراوانی را داشته‌اند، از این رو تحلیل‌ها براساس این چهار گروه امواج گرمایی انجام گرفته است. پس منظور از امواج گرمایی در این پژوهش بیشتر این امواج است.

فصل زمستان

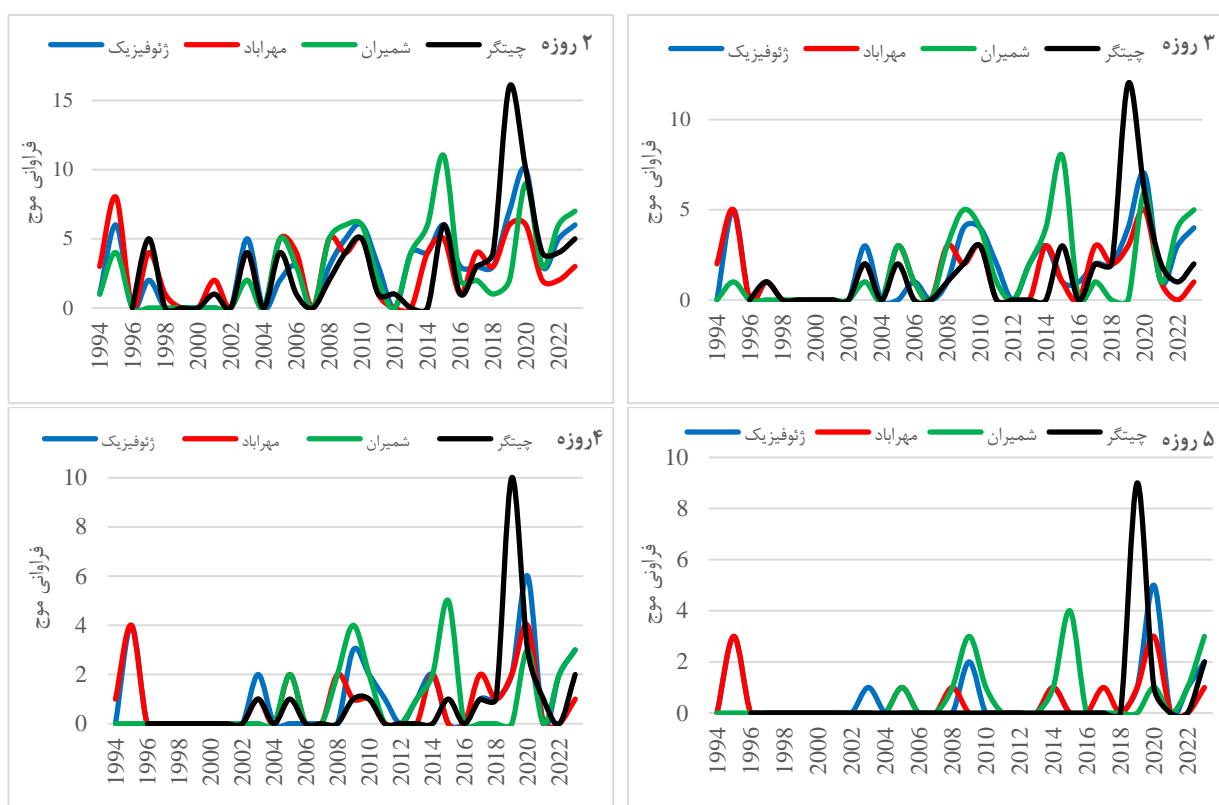
شکل ۲ فراوانی موج‌های گرمایی دو تا پنج‌روزه در فصل زمستان را برای ایستگاه‌های مختلف تهران نشان می‌دهد. در موج‌های گرمایی دوروزه، ایستگاه مهرآباد با ۹۴ مورد، بیشترین فراوانی را داشته که ۵۰ مورد آن در دامنه ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ و ۲۰ مورد در سه سال اخیر رخ داده‌اند. در ایستگاه‌های شمیران و چیتگر نیز به ترتیب ۹۴ و ۸۹ مورد ثبت شده که از این تعداد، ۳۳ و ۳۲ مورد به سه سال اخیر مربوط می‌شود. این آمارها حاکی از افزایش چشمگیر موج‌های گرمایی دوروزه در این ایستگاه‌هاست. برای موج‌های گرمایی سه‌روزه، ایستگاه ژئوفیزیک ۴۲ مورد، مهرآباد ۴۱ مورد و شمیران و چیتگر هر کدام ۳۹ مورد ثبت کرده‌اند. از این تعداد، سهم سه سال اخیر در ایستگاه ژئوفیزیک ۱۱ مورد، مهرآباد ۱۲ مورد، شمیران ۱۳ مورد و چیتگر ۱۲ مورد بوده است. این روند نیز گویای افزایش رخداد این نوع موج‌های گرمایی در سال‌های اخیر است. در مورد موج‌های گرمایی چهارروزه، ایستگاه ژئوفیزیک ۲۸ مورد ثبت کرده که ۲۲ مورد آن در ده سال اخیر رخ داده است. در مهرآباد ۲۶ مورد گزارش شده که ۱۰ مورد در سه سال اخیر بوده است و سال ۲۰۲۱ با شش موج، بیشترین فراوانی را دارد. ایستگاه‌های شمیران و چیتگر نیز هر کدام ۲۸ مورد موج چهارروزه داشته‌اند که به ترتیب ۱۰ و ۱۱ مورد آن در سه سال اخیر رخ داده‌اند. فراوانی موج‌های گرمایی پنج‌روزه نیز افزایش نشان می‌دهد. در ایستگاه ژئوفیزیک ۲۲ موج گرمایی ثبت شده که ۱۹ مورد آن مربوط به ده سال اخیر است. در ایستگاه‌های مهرآباد، شمیران و چیتگر به ترتیب ۱۴، ۲۳ و ۲۰ موج پنج‌روزه رخ داده که از این میان، ۶، ۹ و ۱۰ مورد مربوط به سه سال اخیر بوده است.



شکل ۲. توزیع فصلی (زمستان) و شدت امواج گرمایی دو تا پنج‌روزه در ایستگاه‌های تحت بررسی (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

فصل تابستان

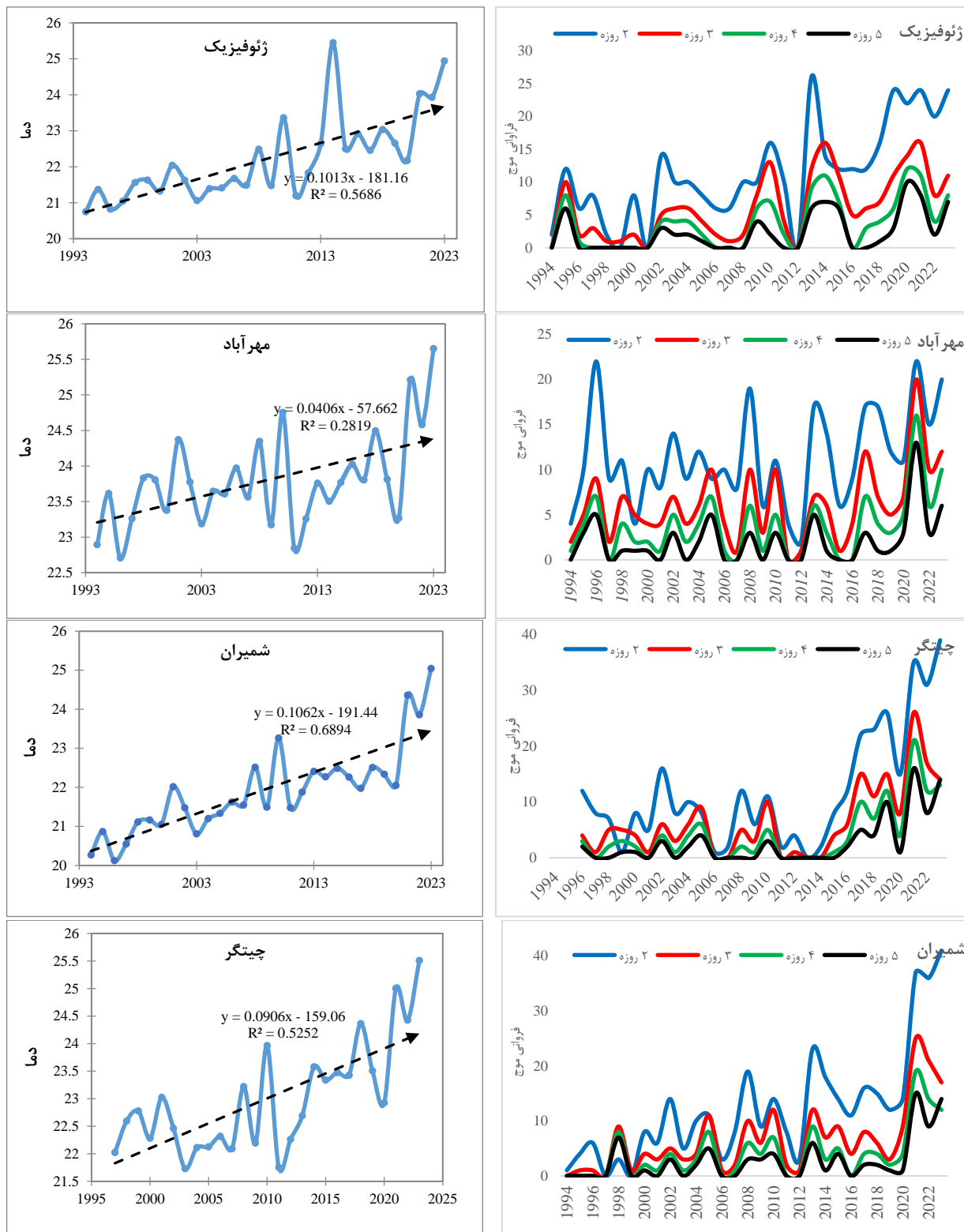
مطابق جدول ۶، آستانه دمایی تعریف شده برای شناسایی موج گرما در ایستگاه‌های شمیران، مهرآباد، ژئوفیزیک و چیتگر به ترتیب $38/4$ ، $40/2$ ، $38/4$ و $39/4$ درجه سانتی‌گراد است. در دوره آماری ۳۰ ساله، تعداد موج‌های گرمایی دوروزه در ایستگاه‌های شمیران، مهرآباد، ژئوفیزیک و چیتگر به ترتیب ۸۷، ۸۲، ۹۰ و ۸۱ مورد گزارش شده است. شایان توجه است که در ایستگاه‌های ژئوفیزیک و چیتگر، بیش از یک سوم این رخدادها تنها در ۵ سال اخیر رخ داده‌اند. همچنین، بیشترین فراوانی موج گرمایی دوروزه در هر ایستگاه به شرح زیر بوده است: شمیران در سال ۲۰۱۵ با ۱۱ مورد، مهرآباد در سال ۱۹۹۵ با ۸ مورد، ژئوفیزیک در سال ۲۰۲۰ با ۱۰ مورد و چیتگر در سال ۲۰۱۹ با ۱۶ مورد. موج‌های گرمایی با تداوم سه‌روزه نیز در این فصل با روند افزایشی همراه بوده‌اند. در ایستگاه‌های مورد بررسی، تعداد این رخدادها در شمیران، مهرآباد، ژئوفیزیک و چیتگر به ترتیب ۵۰، ۴۱، ۵۱ و ۴۱ مورد بوده است (شکل ۶). داده‌ها نشان می‌دهند که بخش بزرگی از این موج‌ها در سال‌های اخیر روی داده‌اند. در مورد موج‌های گرمایی چهارروزه نیز، الگوی افزایشی مشابهی مشاهده می‌شود؛ به طوری که در ایستگاه‌های ژئوفیزیک و چیتگر بیش از نیمی از موج‌های گرمایی چهارروزه طی هفت سال اخیر به وقوع پیوسته‌اند. این امر بیانگر تشدید موج‌های گرمایی بلندمدت در دهه اخیر است. موج‌های گرمایی پنج‌روزه نیز در ایستگاه‌های شمیران، مهرآباد، ژئوفیزیک و چیتگر به ترتیب ۱۶، ۱۲، ۱۶ و ۱۲ مورد گزارش شده‌اند. شایان ذکر است که بیشترین فراوانی موج گرمایی پنج‌روزه در ایستگاه چیتگر در سال ۲۰۱۹ با ثبت ۹ رخداد به وقوع پیوسته است. این آمارها گویای افزایش نگران‌کننده شدت و تداوم موج‌های گرمایی تابستانه در مناطق مختلف تهران طی سال‌های اخیر است.



شکل ۶. توزیع فصلی (تابستان) و شدت امواج گرمایی دو تا پنج‌روزه در ایستگاه‌های تحت بررسی (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

شکل ۱۰، نمایش‌دهنده روند زمانی تغییرات دمای بیشینه (نمودار سمت چپ) و توزیع سالانه فراوانی امواج گرمایی با تداوم دو تا پنج روز (نمودار سمت راست) در ایستگاه‌های چیتگر، ژئوفیزیک، شمیران و مهرآباد طی بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ است. در نمودار سمت چپ، روند دمای بیشینه در همه ایستگاه‌ها طی سه دهه اخیر، به‌ویژه از سال ۲۰۱۰ به بعد، روندی افزایشی را تجربه کرده است. در تحلیل اولیه، از رگرسیون خطی برای نمایش این روند استفاده شده است، اما بررسی‌های تکمیلی نشان می‌دهد که مدل‌های نمایی و توانی در بیشتر ایستگاه‌ها، ضریب تعیین بیشتری دارند و روند تغییرات دما را با دقت بیشتری توصیف می‌کنند. برای نمونه، در

ایستگاه‌های چیتگر و شمیران، مدل نمایی توانسته است الگوی افزایشی پیوسته و تدریجی دمای بیشینه را بهتر نمایش دهد که با واقعیت‌های اقلیمی ناشی از تغییرات جهانی دما نیز همخوانی دارد. در ایستگاه مهرآباد، مقادیر دمای بیشینه در اغلب سال‌ها بیشتر از بقیه ایستگاه‌هاست، در حالی که در ایستگاه شمیران، با وجود ارتفاع بیشتر، روند افزایشی گرما همچنان محسوس است.



شکل ۱۰. سری زمانی دمای بیشینه (چپ) و توزیع فراوانی سالانه امواج گرمایی دو تا پنج روزه (راست) (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

در نمودار سمت راست، روند توزیع فراوانی سالانه موج‌های گرمایی با تداوم دو تا پنج روز به‌وضوح نمایانگر افزایش رخدادها طی سال‌های اخیر است. به‌طور خاص، از سال ۲۰۱۰ به بعد و به‌ویژه طی هفت سال اخیر، امواج گرمایی، به‌ویژه از نوع دوروزه، در همه ایستگاه‌ها افزایش چشمگیری داشته‌اند. در برخی ایستگاه‌ها مانند ژئوفیزیک و چیتگر، فراوانی موج‌های گرمایی با تداوم چهار و پنج روز نیز با روندی صعودی همراه بوده که نشان‌دهنده افزایش مداوم تداوم و شدت گرما در دوره‌های اخیر است. برای مثال در ایستگاه ژئوفیزیک، سال ۲۰۱۳ با ثبت ۲۶ موج گرمایی دوروزه نقطه اوج این رخدادها شناخته می‌شود. با وجود کمتر بودن میانگین دمای بیشینه در ایستگاه شمیران، این ایستگاه بیشترین فراوانی موج‌های گرمایی را ثبت کرده است. این پدیده را می‌توان با پایین‌تر بودن آستانه دمایی تعریف موج گرما در این ایستگاه، شرایط محلی و نیز حساسیت منطقه به نوسان‌های دمایی توضیح داد. این موضوع بر اثر عوامل محلی در کنار عوامل کلان‌مقیاس مانند توده‌های هوایی گرم در شکل‌گیری موج‌های گرمایی دلالت دارد. در مجموع، شکل ۱۰ ارتباط مستقیم بین روند افزایشی دمای بیشینه و شدت‌گیری امواج گرمایی را در سطح شهر تهران در سه دهه اخیر نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

امواج گرمایی یکی از پدیده‌های طبیعی و ذاتی اقلیم در مناطق مختلف جهان است که فراوانی و شدت ظهور آنها به دلیل نوسان‌های اقلیمی زمین، مانند بقیه پدیده‌های حدی اقلیمی، در سال‌های اخیر افزایش یافته است. هدف این پژوهش بررسی رفتار اقلیمی امواج گرمایی، از جمله فراوانی، شدت و تداوم آنها در فصل‌های مختلف سال در ایستگاه‌های منتخب شهر تهران است. نتایج روندهای ماهانه در ایستگاه‌ها نشان داد که در اغلب ماه‌های سال، دمای بیشینه روندی افزایشی و مثبت دارد؛ به‌طوری که در ایستگاه‌های ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر این روند در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد از نظر آماری معنی‌دار است. در مقابل، در ایستگاه مهرآباد تغییرات مثبت دمایی معنادار نبوده و حتی ماه آگوست در این ایستگاه با روند کاهشی همراه بوده است، هرچند این کاهش معنی‌دار نیست. تحلیل روند دمایی فصلی و سالانه نیز بیانگر افزایش دمای بیشینه در ۳۰ سال اخیر است (مطابق با نتایج قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۸). در فصل زمستان، روند افزایشی دمای بیشینه در همه ایستگاه‌ها به‌جز مهرآباد در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد ثبت شده است. در فصل بهار، همه ایستگاه‌ها روند افزایشی مثبت داشته‌اند که این روند در همه ایستگاه‌ها به‌جز چیتگر در سطح ۹۹ درصد معنادار است. همچنین در فصل‌های تابستان و پاییز، همه ایستگاه‌ها با روند افزایشی دما همراه بوده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در تابستان در همه ایستگاه‌ها و در پاییز به‌جز مهرآباد، روند افزایشی در سطح ۹۹ درصد معنادار گزارش شده است. روند دمایی سالانه در هر ایستگاه نیز افزایشی بودن دما را تأیید می‌کند. شیب روند در همه فصل‌ها بیانگر افزایش دمای بیشینه در طول سال است. یافته‌ها نشان می‌دهد که توزیع تعداد امواج گرمایی در طول دوره ۳۰ ساله در هر چهار ایستگاه به‌طور کلی رو به افزایش است (مطابق با نتایج حسین‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). بیشترین فراوانی موج‌های گرمایی مربوط به امواج دو و سه‌روزه بوده که در همه فصل‌های سال شناسایی شده‌اند. امواج گرمایی با تداوم ۴ تا ۱۳ روز نیز مشاهده شده‌اند، اما نسبت به امواج کوتاه‌تر در برخی فصل‌ها کمتر دیده شده‌اند. سهم امواج بلندتر از هفت روز، نسبت به امواج کوتاه‌تر، فراوانی کمتری دارد. همچنین احتمال وقوع روزهایی همراه با امواج گرمایی از فصل تابستان به‌سمت فصل زمستان افزایش چشمگیری دارد. وقوع امواج گرمایی در همه ماه‌های سال امکان‌پذیر است و تفاوت معناداری بین دوره‌های سرد و گرم مشاهده نشده است. این موضوع نشان می‌دهد که وقوع امواج گرمایی تحت تأثیر عوامل محلی و همچنین عوامل بیرونی مانند ورود سامانه‌ها و توده‌های هوا قرار دارد (شاکری، ۱۳۹۵). به بیان دیگر، امواج گرمایی می‌توانند به‌صورت مستقل از مقادیر بیشینه دمای هوا رخ دهند. نکته مهم دیگر این است که امواج گرمایی بلندمدت (با تداوم بیش از پنج روز) در فصل‌های سرد سال فراوانی بیشتری نسبت به فصل‌های گرم دارند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش در گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران انجام گرفت که بدین وسیله از اعضای آن گروه و دانشکده تشکر می‌شود.

حمایت مالی

حامی مالی این اثر با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران (INSF) و در چارچوب طرح پژوهشی با کد شماره ۴۰۳۶۷۴۵ انجام شده است.

منابع

- [۱] اسدی، اشرف؛ و مسعودیان، ابوالفضل (۱۳۹۳). پهنه‌بندی ایران برپایه دماهای فرین بالا، فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۴)، ۱۵۵-۱۵۸. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2014.52426>
- [۲] جهانبخش، سعید؛ قویدل، فاطمه؛ و اشجعی، محمد (۱۳۹۴). شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل هم‌مدیدی امواج گرمایی به‌منظور کاهش مخاطرات انسانی در شمال غرب ایران. مدیریت مخاطرات محیطی، ۲(۴)، ۳۷۷-۳۹۱. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.58265>
- [۳] حاتمی زرنه، داریوش؛ حجازی‌زاده، زهرا؛ و ناصرزاده، محمدحسین (۱۳۹۸). تحلیل نوسان‌های زمانی امواج گرمایی منطقه‌ی شمال غرب ایران و ارتباط آن‌ها با گازه‌های گلخانه‌ای و ناهنجاری‌های دمایی کره‌ی زمین، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹(۵۲)، ۳۵-۵۶. <http://dx.doi.org/10.29252/jgs.19.52.35>
- [۴] حجام، سهراب؛ خوشخو، یونس؛ و شمس‌الدین‌وندی، رضا (۱۳۸۷). تحلیل روند تغییرات بارندگی‌های فصلی و سالانه چند ایستگاه منتخب در حوزه مرکزی ایران با استفاده از روش‌های ناپارامتری، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۳(۶۳)، ۱۴۲-۱۵۱.
- [۵] حسین‌پور، زینب، شمسی‌پور، علی‌اکبر، کریمی، مصطفی و خوش‌اخلاق، فرامرز. (۱۴۰۲). تحلیل آماری امواج گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۳(۶۸)، ۸۱-۹۸. <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.23.68.81>
- [۶] دارند، محمد (۱۳۹۳). شناسایی و تحلیل زمانی - مکانی امواج گرمایی ایران زمین، جغرافیا و توسعه، ۱۲(۳۵)، ۱۶۷-۱۸۰. <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1561>
- [۷] دوستان، رضا؛ اعتمادیان، الهه؛ و زرین، آذر (۱۳۹۹). نواحی امواج گرمایی ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۴۲، ۱۷-۳۰.
- [۸] زارع، مهدی؛ و مقیمی، ابراهیم (۱۴۰۱). گونه‌شناسی مخاطرات در علم مخاطره‌شناسی (آیا علم مخاطره‌شناسی گونه‌های خاصی دارد؟). مدیریت مخاطرات محیطی، ۹(۴)، ۳۸۳-۳۹۰. <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.356665.770>
- [۹] شاکری، فهیمه (۱۳۹۵). تحلیل سینوپتیکی موج‌های گرمایی تابستانه در کلانشهر تهران. اولین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های زیست‌محیطی ایران، راهکارها و چالش‌ها، اردیبهشت. <https://civilica.com/doc/549021>
- [۱۰] قویدل، یوسف؛ فرج‌زاده، منوچهر؛ و قهرمان، بشیر (۱۳۹۸). کاربرد روش تحلیل مقادیر فرین در اقلیم‌شناسی مخاطره‌ی امواج گرمایی نیمه جنوبی ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۶(۲)، ۱-۱۷. <https://civilica.com/doc/1285676>
- [۱۱] مقیمی، ابراهیم (۱۳۹۴). دانش مخاطرات (برای زندگی با کیفیت بهتر و محیط پایدارتر). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [12] Abbasnia, M., Tavousi, T., Khosravi, M., & Toros, H. (2016). Spatial-temporal analysis of heat waves in Iran over the last three decades. *Natural Environment Change*. 2(1), 25-33. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2601-7>.
- [13] Alizadeh-Choobari, O., & Najafi, M. S. (2018). Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Climate Dynamics*. 50(1), 249-260. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3602-4>
- [14] Bumbaco, K. A., Dello, K. D., & Bond, N. A. (2013). History of Pacific Northwest heat waves: Synoptic pattern and trends. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 52(7), 1618-1631. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-094.1>
- [15] De Bont, J., Nori-Sarma, A., Stafoggia, M., Banerjee, T., Ingole, V., Jaganathan, S., ... & Ljungman, P. (2024). Impact of heatwaves on all-cause mortality in India: A comprehensive multi-city study. *Environment International*, 184, 108461. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108461>
- [16] Famooss Paolini, L., Ruggieri, P., Pascale, S., Brattich, E., & Di Sabatino, S. (2024). Hybrid statistical-dynamical seasonal prediction of summer extreme temperatures in Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.4900>
- [17] IPCC. (2021). *Summary for policymakers*. 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.
- [18] Jiao, J., Chen, T., Wang, Q., & Zang, X. (2023). Coupling relationship between heat waves and air pollution: A case study of Central Tianjin. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2468(1), 012127. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120256>
- [19] Joshua, N., Lizundia-Loiola, J., & Pena, J. (2023). Heatwaves characterization derived from reanalysis and climate projections to assess thermal behavior of regions in Europe (1981-2100). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8031482>
- [20] Liu, L., & Qin, X. (2023). Analysis of heatwaves based on the universal thermal climate index and apparent temperature over mainland Southeast Asia. *International Journal of Biometeorology*. 67(12), 2055-2068. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02562-9>
- [21] McGregor, G. R., Felling, M., Wolf, T., & Gosling, S. (2007). The social impacts of heat waves. *Environment Agency*. <https://doi.org/10.1348/000712609X479636>

- [22] Namroodi, M., Hamidianpour, M., & Poodineh, M. (2021). Spatio-temporal analysis of changes in heat and cold waves across Iran over the statistical period 1966–2018. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(10), 857. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07161-9>
- [23] Nasiri, B. (2016). The investigation of summer heat waves in Tehran city. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 7(3), S2. <http://dx.doi.org/10.5901/mjss.2016.v7n3s2p216>
- [24] Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11(1), 3357. <https://www.nature.com/articles/s41467-020-16970-7>
- [25] Rahman, M. M., Mannan, M. A., Sarkar, M. S. K., Mallik, M. A. K., Sultana, A., Islam, M. K., ... & Islam, A. R. M. T. (2024). Are hotspots and frequencies of heat waves changing over time? Exploring causes of heat waves in a tropical country. *PLOS ONE*, 19(5), e0300070. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300070>
- [26] Ren, Y., Liu, J., Zhang, T., Shalamzari, M. J., Arshad, A., Liu, T., ... & 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>
- [27] Rezaei, M., Aalijahan, M., Lupo, A. R., & Zerafati, H. (2023). Trend analysis of widespread heat days in the Middle East and North Africa region between 1871 and 2012. *International Journal of Climatology*, 43(16), 8052–8071. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.8306>
- [28] Shafiei Shiva, J., Chandler, D. G., & Kunkel, K. E. (2019). Localized changes in heat wave properties across the United States. *Earth's Future*, 7, 300–319. <http://dx.doi.org/10.1029/2018EF001085>
- [29] Shi, P., Li, Y., Biswas, A., Wei, K., & Hou, M. (2024). Spatial-temporal evolution and intrinsic drivers of compound drought and heatwave events in Mainland China. *Science of The Total Environment*, 948, 174834. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174834>
- [30] WHO. (2024). *The health impacts of 2024 summer heat-waves*. Briefing note for the delegations of the fifty-third session of the WHO Regional Committee for Europe.
- [31] Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Almazroui, M., Bucchignani, E., Driouech, F., El Rhaz, K., ... & Lelieveld, J. (2021). Business-as-usual will lead to super and ultra-extreme heatwaves in the Middle East and North Africa. *npj Climate and Atmospheric Science*, 4(1), 20. <http://dx.doi.org/10.1038/s41612-021-00178-7>