

The spatial distribution of summer heat wave characteristics in Tehran Province from 1981 to 2020

Kouhi, M.¹  | Asadi Oskoue, E.¹  | Rahnama, M.²  | Abbasi, F.¹ 

1. Climate Research Institute, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Mashhad, Iran.

2. Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: ma.kouhi@alumni.um.ac.ir

(Received: 27 Jan 2025, Revised: 6 April 2025, Accepted: 29 July 2025, Published online: 20 Sep 2025)

Summary

Temperature has undeniable effects on human activities and natural processes. In particular, an increase in temperature in the form of heatwaves affects all aspects of human life, including architecture, comfort, transportation, agriculture, and industry. Recently, both the frequency and intensity of heatwaves have increased globally, making them a major cause of weather-related deaths in many countries. The characteristics and intensity of heatwaves vary across locations. A heatwave is typically defined as positive fluctuations or peaks above the average daily maximum temperature that persist for several days or even weeks in specific geographical areas.

Several studies have analyzed long-term extreme warm events in Tehran Province, mostly at weather stations. However, no studies have focused on assessing the different aspects of heatwaves (HWs) using percentile indices (EHF, TX90, and TN90) as well as interpreting their climatological and spatiotemporal variations. Therefore, this study aims to (i) assess the decadal changes in the different HW aspects over Tehran Province during the last four decades, from 1981 to 2020, and (ii) interpret the spatiotemporal patterns and anomalies in the different HW aspects over the study area. The daily minimum and maximum temperatures (°C) from the ERA5-Land dataset have been used to calculate the aspects of heatwaves over Tehran province (Muñoz-Sabater et al., 2021).

Heat waves can be calculated based on three definitions (indices). These definitions are 1- based on the 90th percentile of TN (daily minimum temperature), which is called Tn90 heatwaves; 2- the 90th percentile of TX (daily maximum temperature), which is called Tx90 heatwaves; and 3- EHF, which are heatwaves calculated based on the Excess Heat Factor EHF. The number of heatwaves is calculated for the summer season (May to September). On days (at least three consecutive days) when one of the following conditions is observed, the heat wave has occurred: TN greater than the 90th percentile of the minimum temperature (TN90), TX greater than the 90th percentile of maximum temperature (TX90), the positivity of EHF (EHF). EHF is calculated daily and is a combination of two Excess Heat Indices (EHI) that indicate the potential for heat adaptation and the climatic significance of heat on a specific day.

In this study, the decadal trends, regional distribution, and anomalies in the heatwave aspects (HW) in Tehran Province over the past 40 years (1981-2020) were calculated. Across all indices, the decadal sum and standard deviation of the five HW characteristics in Tehran Province gradually increased from the first decade (1981–1990) to the highest values in the last decade (2011–2020). The results indicated that the decadal total number of summer heat waves based on the EHF index in the fourth decade (2011–2020) ranged from a maximum of 39 events to a minimum of 19 events across Tehran Province, whereas this characteristic in the first decade ranged between 8 and 16 events. In the last decade, 65.8%, 85.5%, and 44% of the province's area experienced 25-35 events according to the three indices EHF, TX90, and TN90, respectively. The magnitude and amplitude (highest recorded temperature during the most intense heat wave) have also increased in the later decades according to all three indices, reflecting hotter heat waves with increased duration and frequency. Using the EHF index, higher values were obtained for most characteristics (including HWN, HWD, and HWF) compared to the other two indices, indicating its greater sensitivity in detecting heat waves. The lowest values for HW characteristics were derived from the TN90 index.

The analysis of heatwave characteristics in Tehran Province over four decades (1981–2020) showed that not only the frequency but also the intensity, duration, and spatial extent of heatwaves have significantly increased over the four decades. A significant increase in the frequency and duration of heatwaves in the southern and southwestern regions of Tehran Province was observed in the recent decade (2011–2020). On the whole, ERA5-Land data, despite some limitations in high-altitude areas, are considered an effective tool for analyzing climatic trends and especially for assessing the spatiotemporal patterns of heatwaves on a regional scale, as mentioned in previous studies. Examining the spatial distribution, frequency, intensity, and duration of heatwaves and identifying the more vulnerable areas to these events is crucial for informing public health policies, agricultural planning, and crisis management strategies. The results of this study emphasize the need for special attention to the vulnerable areas of Tehran Province (the southern and southwestern regions) regarding heatwaves under global warming conditions.

Keywords: ERA5-land, Reanalysis, Tehran, Heat wave.

Cite this article: Kouhi, M., Asadi Oskoue, E., Rahnama, M., & Abbasi, F. (2025). The spatial distribution of summer heat wave characteristics in Tehran Province from 1981 to 2020. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 409-429. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.389443.1007665>

E-mail: (1) e.asadi.o@gmail.com | abbasi9999@yahoo.com (2) meh.rahnam@gmail.com



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.389443.1007665>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

توزیع مکانی ویژگی‌های موج‌های گرمایی تابستانی در استان تهران طی ۱۹۸۱-۲۰۲۰

منصوره کوهی^۱ ✉ | ابراهیم اسعدی اسکویی^۱ | مهدی رهنما^۲ | فاطمه عباسی^۱

۱. پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.

۲. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: ma.kouhi@alumni.um.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۸، بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۱۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۵/۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۶/۲۹)

چکیده

در این پژوهش، تغییرات دهه‌ای مکانی و زمانی ویژگی‌های موج‌های گرمایی تابستانی (Heat Waves) شامل تعداد، فراوانی، مدت، بزرگی و دامنه طی چهار دهه دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ بر اساس سه نمایه آستانه‌ای عامل گرمای بیش از حد (Excess Heat Factor) EHF، صدک نودم دمای بیشینه TX (TX90) و صدک نودم دمای کمینه TN (TN90) بررسی شد. امواج گرمایی با استفاده از داده‌های دمای شبکه‌ای پایگاه داد بازتحلیل (ERA5-Land (The fifth generation of European ReAnalysis)) شناسایی شدند. نتایج نشان داد مجموع و انحراف معیار ده‌ساله پنج ویژگی HWs در استان تهران، از دهه اول تا بالاترین مقادیر در دهه آخر از نظر زمانی و از نظر مکانی با ناهنجاری مثبت بالاتر در نواحی جنوبی و جنوب غربی افزایش یافت. در دهه آخر به ترتیب ۶۵/۸، ۸۵/۵ و ۴۴ درصد از مساحت استان در هر سه نمایه EHF، TX90 و TN90 شاهد تعداد ۲۵-۳۵ رخداد بودند. شهرستان‌های پاکدشت، پیشوا، قرچک و ورامین طی دهه ۱۹۸۱-۱۹۹۰ نسبت به میانگین ۴۰ ساله این نمایه، به ترتیب ۱۷/۸، ۱۸ و ۱۷ تعداد کمتر امواج گرمایی بر اساس نمایه‌های EHF، TX90 و TN90 تجربه کرده‌اند. در مقابل، برای دهه آخر، نمایه EHF با مقدار بیشینه ۲۵/۶ رخداد (۲۰/۸ برای TN90 و ۲۴ رخداد برای TX90)، بیشترین تفاوت را با میانگین ۴۰ ساله این ویژگی نشان داد. افزایش بزرگی و دامنه موج‌های گرمایی در دهه‌های پایانی، نشان‌دهنده داغ‌تر شدن موج‌های گرمایی در کنار افزایش مدت و فراوانی آنهاست. با توجه به روند افزایشی مشاهده شده، نیاز به برنامه‌ریزی شهری و کشاورزی برای سازگاری با این رخداد وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: داده بازتحلیل، تهران، ERA5-Land، موج گرمایی.

۱. مقدمه

سازمان موج گرمایی را به‌عنوان دوره‌ای از هوای بسیار گرم غیرمعمول تعریف کرده که حداقل ۲ تا ۳ روز ادامه دارد و دمای هوا به‌طور مداوم بالاتر از میانگین فصلی یا آستانه مشخصی باشد (مثلاً در بسیاری کشورها، دما بالای ۳۵ یا ۴۰ درجه سلسیوس). این پدیده اغلب همراه با رطوبت پایین یا بالا است که اثرات گرما را تشدید می‌کند. هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change) موج گرمایی را رویدادی می‌داند که در آن دما برای چندین روز متوالی به‌طور معناداری بالاتر از مقادیر نرمال در یک منطقه خاص باشد. این پدیده یکی از شاخص‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم محسوب می‌شود (پرکینز

دما اثرات انکارناپذیری بر فعالیت‌های انسانی و فرایندهای طبیعی دارد. به‌ویژه افزایش دما در قالب موج‌های گرمایی تمام ابعاد زندگی انسان از جمله معماری، آسایش، حمل و نقل، کشاورزی و صنعت را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. در سالیان اخیر بر تعداد و شدت موج‌های گرمایی در جهان افزوده شده و این مخاطره، یکی از دلایل عمده مرگ و میر با منشاء جوی در بسیاری از کشورها به‌شمار می‌رود (مجرد و همکاران، ۱۳۹۴). سازمان جهانی هواشناسی نتوانسته است تعریف جامعی از موج‌های گرمایی (Heat Waves) ارائه دهد، زیرا ویژگی‌ها و تأثیرات آنها حتی در یک منطقه خاص نیز متفاوت است (کوئو و همکاران، ۲۰۱۰). این

استناد: کوهی، منصوره؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ رهنما، مهدی و عباسی، فاطمه (۱۴۰۴). توزیع مکانی ویژگی‌های موج‌های گرمایی تابستانی در استان تهران طی ۱۹۸۱-۲۰۲۰.

مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱(۲)، ۴۰۹-۴۲۹. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.389443.1007665>

رایانامه: (۱) e.asadi.o@gmail.com | abbasi9999@yahoo.com (۲) meh.rahnam@gmail.com

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.389443.1007665>



و الکساندر، ۲۰۱۳).

اگرچه شبکه‌های ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های دیدبانی قابل اعتمادتر از سایر مجموعه داده‌های اقلیمی بوده و استفاده از آنها در هر کاربردی ضروری است اما این داده‌ها دارای پوشش مکانی کم (تراکم پایین شبکه ایستگاه‌های هواشناسی)، سهم زیاد داده‌های مفقود، دوره کوتاه آماری (ایستگاه‌های تازه تاسیس) و کیفیت پایین (در برخی ایستگاه‌ها) هستند. لذا استفاده از آنها در بررسی توزیع مکانی مخاطرات جوی و اقلیمی و تهیه نقشه‌های این مخاطرات بسیار محدود بوده و نیاز به ترکیب با سایر اطلاعات نظیر داده‌های ماهواره و بازتحلیل دارند (آرسه و یوریبه، ۲۰۱۵). ERA5-Land (Fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate) یک مجموعه داده بازتحلیل جهانی پیشرفته برای کاربردهای زمینی است (مونیز ساباتر و همکاران، ۲۰۲۱). این مجموعه داده توسط مرکز پیش‌بینی میان‌مدت آب‌وهوای اروپا (ECMWF The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) تولید شده است و جزء مکمل نسل پنجم بازتحلیل اروپایی (ERA5) است. بسیاری از پژوهشگران اقدام به اعتبارسنجی این پایگاه داده (لابان و همکاران، ۲۰۲۳؛ سام خانیانی و محمدی، ۱۴۰۱؛ یلماز، ۲۰۲۳) و یا مقایسه آن با سایر پایگاه‌های داده‌های شبکه‌ای اقلیمی کرده‌اند. عنوان نمونه، وانگ و همکاران (۲۰۲۴) در مقایسه عملکرد پایگاه داده ERA5-land با Harv2 (The High Asia Refined analysis)، ERA5 با Merra2 (Modern-Era Retrospective analysis for Applications Research and The Japanese 55-year Reanalysis) در بررسی رویدادهای فرین دما و بارش نشان دادند اگرچه هر ۵ پایگاه داده بارش را کم برآورد و دما را بیش برآورد کردند اما پایگاه داده ERA5-land دارای بهترین عملکرد در بین این ۵ پایگاه بود. از این داده‌ها در مطالعات مختلف از قبیل برآورد ضرایب خشکسالی (ژو و همکاران، ۲۰۱۹) و بررسی روند دمای سطح زمین (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲)، بارش (چن و همکاران، ۲۰۲۱)، تحلیل روند متغیرهای اصلی اقلیمی در

کشور یونان (لاگواردوز و همکاران، ۲۰۲۴) و موج‌های گرمایی (اسپینوزا و همکاران، ۲۰۲۳، چکرینی و همکاران، ۲۰۱۷) استفاده شده است. طی سالیان اخیر، داده‌های ERA5-Land به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی رویدادهای فرین جوی و اقلیمی، از جمله امواج گرمایی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این ارتباط، ین و همکاران (۲۰۲۲) تغییرات طولانی‌مدت موج‌های گرمایی را با استفاده از داده‌های بازتحلیل بررسی و اثرات اجتماعی-اقتصادی آن را تحلیل کرده و دریافتند که فراوانی، مدت و شدت موج گرما به‌طور قابل توجهی در ۵۰ سال گذشته افزایش یافته است و ممکن است در ادامه قرن بیست و یکم افزایش یابد. بکر و همکاران (۲۰۲۲) شدت موج‌های گرمایی اروپا را طی ۲۰۱۹-۱۹۷۹ ارزیابی و نشان دادند که موج گرمایی سال ۲۰۱۰ روسیه شدیدترین رویداد از نظر مدت‌زمان و شدت در بین تمام رویدادها است. جیراروجو و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 با وضوح $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ برای دوره جولای تا اکتبر ۱۹۷۹-۲۰۱۹، امواج گرمایی در آمریکای جنوبی را بررسی کردند. در کل، ۱۹۱ مورد موج گرما شناسایی شد. نتایج نشان داد تعداد موج‌های گرما به‌ویژه در منطقه ۱ (مناطق حاره‌ای) افزایش یافته و در ماه اوت در بیشتر مناطق بیشترین فراوانی را داشتند. لابان و همکاران (۲۰۲۳) نیز با استفاده از از دمای بیشینه و کمینه روزانه شبکه‌ای ERA5 اقدام به بررسی ویژگی‌های موج‌های گرمایی در شبه‌جزیره عربستان کردند. نتایج نشان داد که مجموع و ناهنجاری‌های ویژگی‌های موج گرما به‌تدریج طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ افزایش یافته‌اند (به‌ویژه در دهه اخیر). سیمولای و اگولار (۲۰۲۴) با استفاده از داده‌های بیشینه و کمینه دمای روزانه از ERA5-Land برای سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۲ اقدام به بررسی موج‌های گرمایی کشور آرژانتین کردند. موج‌های گرما به‌عنوان دوره‌هایی از حداقل ۵ روز متوالی با دماهایی که از صدک نودم دوره مرجع ۱۹۶۱-۱۹۹۰ فراتر می‌روند، تعریف شدند. نتایج نشان داد برای امواج گرمایی محاسبه‌شده بر اساس دمای کمینه روزانه (T_n)، تعداد و مدت این مخاطره دارای روندهای افزایشی، به‌ویژه در

مناطق شمال غرب و لیتورال بودند. شدت‌ها (هم بیشینه و هم میانگین) در مناطق پاتاگونیا جنوبی، لیتورال و آندز روندهای قابل توجهی را نشان دادند. برای امواج گرمایی محاسبه شده با استفاده از دمای بیشینه روزانه (Tx)، تعداد و مدت زمان رویدادهای موج گرما نیز در بیشتر نقاط کشور روند افزایشی نشان دادند.

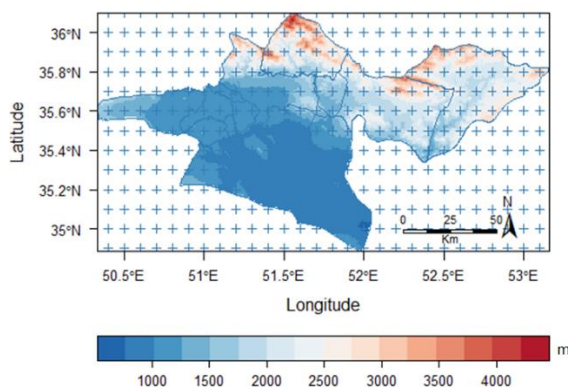
در ایران، پژوهش‌هایی در زمینه شناسایی موج‌های گرمایی با استفاده از داده‌های ایستگاهی انجام شده است. اسماعیل‌نژاد و همکاران (۱۳۹۲) از آمار روزانه بیشینه دما مربوط به ۶۶۳ ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور طی دوره ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۲ استفاده کردند و با استفاده از شاخص فومیایی، استاندارد سازی و ماتریس انحراف دمای بهنجار ایران (Normal Temperature Deviation) NTD تشکیل شد. یافته‌ها نشان داد موج‌های گرمایی در ایران، کوتاه، مستمر و پررخداد ولی در گستره کمتری از ایران اتفاق افتاده و تعداد موج‌های گرمایی پرتداوم کمتر رخ داده ولی درصد بیشتری از مساحت ایران را دربر گرفته‌اند. شدت، تداوم و فراوانی موج‌های گرمایی ایران در سال‌های پایانی دوره مورد بررسی، روند افزایشی داشته و رخداد آنها به‌خصوص در دوره سرد بیشتر مشاهده شده است. اعتمادیان و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از آمار ۹۵ ایستگاه همدید ایران در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ با روش تحلیل مؤلفه اصلی PCA دریافتند ناحیه کوهستانی و کوهپایه‌ای در راستای رشته کوه البرز و زاگرس، بیشترین و نواحی ساحلی (اعم از شمال و جنوب ایران)، کمترین موج گرما را تجربه کرده‌اند. اسمعیل‌نژاد و همکاران (۱۳۹۲) نشان دادند در ایران، موج‌های گرمایی کوتاه (طولانی)، با فراوانی بالاتری (کمتری) رخ داده‌اند و موج‌های گرمایی در روزهای نخستین پاییز و پایان زمستان فراوان‌تر رخ می‌دهند. بهاروندی و همکاران (۱۳۹۹) دریافتند بیشترین تعداد موج‌های گرمایی کشور برای دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۵، در غرب رشته کوه زاگرس و سپس دشت کویر در حالی که بیشینه بزرگی، متعلق به مناطق جنوب شرقی و مرکزی کشور است. خسروی و اسمعیل‌نژاد (۱۳۹۹) اقدام به استخراج موج‌های

گسترده گرمایی ۴ روزه برای دوره ۱۳۶۰-۱۳۹۰ کردند. در مجموع ۳۵ موج ۴ روزه شناسایی شد (مجموع ۱۴۰ روز). تحلیل همدید این نوع موج‌های نشان داد در هنگام رخداد موج‌های گرمایی دوره گرم در ایران، الگوی فشار در سطح زمین کم فشار می‌باشد. این کم فشارها عبارت‌اند از: کم فشار ایران مرکزی، جنوب شرق و کم فشار گنگ که تا روی خلیج فارس نفوذ کرده و گاهی به سمت عرض‌های بالا نیز حرکت می‌کند. یکی دیگر از الگوهای همدید، کم فشار عربستان است که نقش بسزایی در ورود هوای گرم از جنوب به ایران دارد. در تراز میانی جو نیز علاوه بر شاخه‌ای از پرفشار آزور، پرفشار ایران نیز منجر به شرایط پایدار می‌شود. کم فشار پاکستان نیز در شرق ایران تشکیل شده و جنوب شرق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان داد تعداد روزهای گرم و همچنین شدت گرماهای رخ داده طی این دوره افزایش یافته است. بیرانوند و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی تغییرات زمانی-مکانی نمایه حدی موج‌های گرمایشی و سرمایشی در ایران نشان دادند که آستانه موج‌های گرمایشی و سرمایشی در بیشتر نواحی کشور رو به افزایش بوده است.

در زمینه بررسی ویژگی‌های امواج گرمایی، برای منطقه مورد مطالعه (استان تهران)، حسین‌پور و همکاران (۱۴۰۲) با تحلیل آماری موج‌های گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز با استفاده از داده‌های دمای بیشینه روزانه ایستگاه‌های همدیدی تهران (مهرآباد)، قزوین و سمنان طی دوره ۳۰ ساله دریافتند که تعداد موج‌های گرمایی در هر سه ایستگاه روبه افزایش و فراوانی موج‌های گرمایی کوتاه مدت بیشتر بوده است. بیشترین فراوانی رخداد سالانه ایستگاه تهران ۱۱ موج در سال ۲۰۱۰ شناسایی شد.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد مطالعات مربوط به تحلیل رویدادهای گرم شدید بلندمدت در استان تهران، عمدتاً در ایستگاه‌ها، انجام شده است. با این حال، پژوهشی در راستای ارزیابی ویژگی‌های مختلف موج‌های گرما با استفاده از نمایه‌های رایج برای این مخاطره (TX90، EHF) و TN90 و بررسی تغییرات میانگین‌های اقلیمی و توزیع

بازتحلیل ERA5 با نام ERA5-Land طی ماه مارس ۲۰۱۷ و به عنوان پیشرفته‌ترین محصول بازتحلیل ارائه کرده است. ERA5 نسبت به مشابه قدیمی تر خود (ERA-Interim) از سامانه داده گواهی چهار بعدی پیشرفته‌تر و منابع داده بیشتری بهره گرفته و دارای قدرت تفکیک مکانی حدود ۳۰ کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی ۱ ساعته است و متغیرهای جوی را در ۱۳۷ تراز فشاری متفاوت در اختیار کاربران قرار می‌دهد (ترک و همکاران، ۲۰۲۰). دوره آماری این محصول از سال ۱۹۵۰ تاکنون می‌باشد (مونیز ساباتر و همکاران، ۲۰۲۱). کیفیت چنین مجموعه داده‌هایی حاصل توسعه ابزار محاسباتی، روش‌های داده‌گواهی، مدل‌های NWP و بهبود (کمی و کیفی) داده‌های مشاهداتی برداشت‌شده از جو و سطح زمین به کمک روش‌های سنجنش از دور می‌باشد. ERA5-Land محصول مقیاس کاهی شده ERA5، دارای قدرت تفکیک مکانی km ۹ است و در سال ۲۰۱۹ منتشر شده است (بیکر و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۱. نقاط شبکه ERA5-land پوشش‌دهنده محدوده استان تهران و نقشه ارتفاع رقومی استان

به منظور محاسبه موج‌های گرمایی، متغیر دمای دو متری سطح زمین به صورت ساعتی از سایت پایگاه داده‌های اقلیمی کوپرنیک به آدرس <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/rean-ncdf-analysis-era5-land?tab=overview> در فرمت NCDf بارگذاری و دو متغیر دمای کمینه (°C) و دمای بیشینه (°C) با کدنویسی در نرم‌افزار R برای استان تهران برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ استخراج و برش داده شد (شکل ۱). به منظور

مکانی آنها با استفاده از داده‌های بازتحلیل موجود انجام نشده است. بنابراین، اهداف این پژوهش عبارت‌اند از الف) برآورد و ارزیابی تغییرات دهه‌ای در ویژگی‌های مختلف موج گرما (HW) در استان تهران را در چهار دهه ۲۰۲۰-۱۹۸۱ (ب) بررسی الگوها و ناهنجاری‌های فضایی-زمانی در ویژگی‌های مختلف موج گرما در منطقه مورد مطالعه و ج) مقایسه سه نمایه محاسبه موج‌های گرمایی در نمایش ویژگی‌های این مخاطره.

۲. روش پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

استان تهران با وسعتی حدود ۱۸۸۱۴ کیلومتر مربع بین ۳۴ تا ۳۶/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی واقع شده است. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب غرب به استان مرکزی، از غرب به استان البرز و از شرق به استان سمنان محدود است. استان تهران، از شهرهای تهران، شهریار، اسلامشهر، ری، پاکدشت، دماوند، شمیران، ورامین و فیروزکوه تشکیل شده است. پرجمعیت‌ترین شهر و پایتخت ایران، مرکز استان تهران و شهرستان تهران است. این شهر در برآورد سال ۱۴۰۱ بالغ بر ۹'۰۳۹'۰۰۰ تن جمعیت داشته است و بر اساس برآورد سال ۲۰۱۸ سازمان ملل متحد، سی و چهارمین شهر پرجمعیت جهان و پرجمعیت‌ترین شهر غرب آسیا است. کلان‌شهر تهران نیز دومین کلان‌شهر پرجمعیت خاورمیانه است. از دید ناهموازی‌های طبیعی، تهران به دو ناحیه دشتی و کوهپایه‌ای البرز تقسیم می‌شود و گستره کنونی آن از ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متری از سطح دریا امتداد یافته است.

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

۳-۱. داده‌های شبکه‌ای و ایستگاهی

در این مقاله، از داده‌های دمای کمینه و بیشینه روزانه پایگاه داده بازتحلیل ERA5-land استفاده شده است. مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا، ۵۰ متغیر اقلیمی و محیطی را به عنوان متغیرهای پنجمین نسل از داده‌های

ارزیابی توانمندی این پایگاه داده، از داده‌های روزانه دمای کمینه و بیشینه روزانه ($^{\circ}\text{C}$) ایستگاه‌های منتخب همدید شامل مهرآباد (کامل‌ترین سری داده)، فیروزکوه (مرتفع)، ورامین (کم‌ارتفاع‌ترین) و آبدلی (مرتفع‌ترین) طی دوره آماری هر ایستگاه استفاده شد.

۳-۲. محاسبه موج‌های گرمایی تابستانی

موج‌های گرمایی با استفاده از سه تعریف (نمایه) محاسبه می‌شوند که شامل: ۱- بر اساس صدک ۹۰ام دمای کمینه روزانه (TN) است که موج‌های گرمایی TN90 نامیده می‌شود، ۲- بر اساس صدک ۹۰ام دمای بیشینه روزانه (TX) که به صورت اختصاری به صورت TX90 نشان داده شده‌اند و ۳- نمایه گرمای بیش از حد (EHF) که موج‌های گرمایی با ترکیب شدت و تداوم بر اساس روابط ۱ تا ۳ محاسبه می‌شوند.

EHF به صورت روزانه محاسبه می‌شود و ترکیبی از دو نمایه گرمای بیش از حد (EHI) که نشان‌دهنده پتانسیل سازگاری با گرما و اهمیت اقلیمی گرما در یک روز خاص است:

$$\text{EHI}(\text{sig.}) = [(T_{M_i} + T_{M_{i-1}} + T_{M_{i-2}})/3] - T_{M_{95}} \quad (1)$$

$$\text{EHI}(\text{accl}) = [(T_{M_i} + T_{M_{i-1}} + T_{M_{i-2}})/3] - [(T_{M_{i-3}} + \dots + T_{M_{i-32}})/30] \quad (2)$$

در این رابطه، T_{M_i} میانگین دمای روزانه برای روز i و $T_{M_{95}}$ صدک ۹۵ام T_M در کل روز تقویمی i طی دوره آماری با پنجره متحرک ۱۵ روزه است. T_M به صورت $T_M = (TX + TN)/2$ محاسبه می‌شود که در آن TX دمای بیشینه و TN دمای کمینه روزانه بر حسب درجه سلسیوس است. $\text{EHI}(\text{sig})$ که به آن نمایه اهمیت گفته می‌شود، میانگین سه روزه T_{M_i} است که مستقیماً با صدک ۹۵ T_{M_i} مقایسه می‌شود. اگر $\text{EHI}(\text{sig})$ مثبت باشد، در این صورت دمای سه روزه نسبت به اقلیم سالانه محل مورد بررسی به طور غیرعادی گرم برعکس، اگر $\text{EHI}(\text{sig})$ منفی یا صفر باشد، دمای سه روزه به عنوان داغ غیرعادی در نظر گرفته نمی‌شود و بنابراین برای وجود یک موج گرما، به

$\text{EHI}(\text{sig})$ مثبت نیاز است. در مؤلفه دوم، که به آن نمایه سازگاری می‌گویند، میانگین T_M سه روزه با میانگین T_M در گذشته نزدیک مقایسه می‌شود (پرکینز و الکساندر، ۲۰۱۳):

$$\text{EHF} = \text{EHI}(\text{sig} \times \max[1, \text{EHI}(\text{accl.})]) \quad (3)$$

اگر EHF مثبت باشد ممکن است یک موج گرمایی در جریان باشد. اگر EHF به طور پیوسته مثبت باقی بماند (برای ۳ و بیشتر از ۳ روز)، آن دوره به عنوان موج گرما شناسایی می‌شود. نیرن و همکاران (۲۰۰۹) این نمایه را برای پیش‌بینی‌های عملیاتی تعریف کردند و از آن برای بررسی تأثیرات رویدادهای گرمای شدید بر سلامت انسان و میزان مرگ و میر استفاده شده است. به دلیل ضرب دو نمایه $\text{EHI}(\text{accl.})$ و $\text{EHI}(\text{sig.})$ ، واحد EHF برابر با درجه سلسیوس به توان دو ($^{\circ}\text{C}^2$) است. مراحل متوالی برای محاسبه EHF به تفصیل در این مطالعات مذکور و همچنین سایر مطالعات اخیر (میلر و همکاران، ۲۰۲۱، نیرن و همکاران (۲۰۱۸)، مورسی و ال افندی، (۲۰۲۱) و کالپن و همکاران (۲۰۲۲)) آورده شده است. در این پژوهش، تعداد موج‌های گرمایی برای فصل تابستان (می تا سپتامبر) محاسبه می‌شوند. بنابراین در روزهایی (حداقل سه روز متوالی) یکی از شرایط ذیل در آن دیده شود، پدیده موج‌های گرمایی رخ داده است:

TN بزرگ‌تر از صدک ۹۰ام دمای کمینه (T_{n90})

TX بزرگ‌تر از صدک ۹۰ام دمای بیشینه (T_{x90})

مثبت بودن EHF (EHF)

هر نمایه بر ویژگی‌های مختلف موج گرما تمرکز دارد و با ترکیب آنها می‌توان وقوع، توسعه و تأثیر موج گرما را از ابعاد مختلف تحلیل کرد. نمایه TN90 به دمای شبانه توجه دارد. دماهای بالای شبانه می‌توانند بر تبادل حرارتی بدن تأثیر بگذارند، کیفیت خواب را کاهش دهند و خطرات برای سلامتی را افزایش دهند (راگاتوا و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، دمای بالای شبانه دارای تأثیرات منفی بر تولیدات کشاورزی است. نمایه TX90 به دمای بالای

روزانه توجه دارد. گرمای روزانه مستقیماً بر آسایش بدن انسان تأثیر می‌گذارد و خطراتی مانند گرم‌زدگی و کم‌آبی را افزایش می‌دهد (آدیگون و همکاران، ۲۰۲۴). در عین حال، گرمای روزانه باعث افزایش بار مصرف برق می‌شود و چالشی برای زیرساخت‌های شهری ایجاد می‌کند. بنابراین این نمایه، برای مطالعه تأثیرات دمای بالای روزانه بر سلامت انسان و تأمین انرژی مناسب جهت سرمایه‌گذاری در شهر مناسب است. موج گرمایی بر اساس نمایه EHF، تغییرات دما در کوتاه‌مدت و اثرات تجمعی دما در بلندمدت را به‌طور جامع در نظر می‌گیرد و می‌تواند شدت و تأثیر موج گرما را به‌طور دقیق‌تری منعکس کند (ساکسنا و همکاران، ۲۰۲۴). این نمایه، نه تنها به مقدار مطلق دما توجه دارد، بلکه پایداری و اثر تجمعی دما را نیز در نظر می‌گیرد و می‌تواند بهتر از همه، سازگاری بدن انسان با موج گرما را منعکس کند. در واقع، نمایه موج گرما EHF برای ارزیابی جامع تأثیرات بالقوه موج گرما بر سلامت انسان، اقتصاد اجتماعی و محیط‌زیست مناسب است (ورقزه و همکاران، ۲۰۱۹). در ادامه تعریف ویژگی‌های امواج گرمایی در جدول ۱ آورده شده است (فیشر و شر، ۲۰۱۰، پرکینز و الکساندر، ۲۰۱۳).

در این مطالعه، بررسی موج گرما در استان تهران، بر اساس پنج ویژگی محاسبه‌شده موج گرما (HWN، HMF، HWD، HWM، HWA) انجام شد (جدول ۱). این ویژگی‌ها HW با استفاده از نرم‌افزار Climpack در محیط R برای دوره اقلیمی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ با استفاده از سه نمایه HW یعنی عامل گرمای بیش از حد (EHF)، صدک نودم دمای بیشینه روزانه (TX90)، و صدک نودم دمای کمینه روزانه (TN90) برای تمامی ۵۹۴ نقطه شبکه پایگاه داده ERA5-Land پوشش‌دهنده استان تهران محاسبه شدند. در این مقاله، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، یک موج گرمایی تابستانی (مه تا سپتامبر در نیمکره شمالی) عبارت است از ۳ یا بیش از ۳ روز که EHF مثبت، دمای بیشینه بیش از صدک ۹۰ام دمای بیشینه (TX90) یا دمای کمینه بیشتر از صدک ۹۰ام دما کمینه (TN90) باشد. پس از محاسبه ویژگی‌های موج‌های گرمایی، به‌منظور بررسی تغییرات زمانی این متغیرها، دوره آماری به ۴ دهه (۱۹۹۹-۱۹۸۱، ۱۹۹۱-۲۰۰۰ و ۲۰۱۰-۲۰۰۱ و ۲۰۲۰-۲۰۱۱) تقسیم و مجموع دهه‌ای پنج ویژگی HW به‌دست آمد و ناهنجاری‌های دهه‌ای برای هر ویژگی HW به‌صورت کسر ویژگی هر دهه از میانگین دوره آماری همان نمایه HW، محاسبه شد.

جدول ۱. ویژگی‌های موج‌های گرمایی محاسبه‌شده بر مبنای نمایه‌های TX90، TN90 و EHF (پرکینز و الکساندر، ۲۰۱۳)

ویژگی	نام کامل	تعریف	واحد
HWN	تعداد سالانه موج‌های گرمایی	تعداد موج گرمایی	رویداد
HWF	مجموع سالانه روزهای مشارکت‌کننده در موج‌های گرمایی	فراوانی موج گرمایی	روز
HWD	مدت (تعداد روز) طولانی‌ترین موج گرمایی سالانه	مدت موج گرمایی	روز
HWM	میانگین دمای موج‌های گرمایی رخداد داده در یک سال	بزرگی موج گرمایی	$^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{C}^2$ for EHF)
HWA	بالاترین دمای روزانه ثبت‌شده از داغ‌ترین موج گرمایی سالانه	دامنه موج گرمایی	$^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{C}^2$ for EHF)

۴. بحث

۱-۴. ارزیابی دمای کمینه روزانه (TN) و دمای بیشینه

روزانه (TX) از مجموعه داده‌های بازتحلیل ERA5-

Land

به منظور ارزیابی توانمندی پایگاه داده ERA5-Land در برآورد دو متغیر دمای کمینه و دمای بیشینه روزانه، مقادیر مربوط به نقاط شبکه‌ای متناظر با ایستگاه‌های هم‌دید منتخب (مهرآباد، ورامین و فیروزکوه) از لایه‌های رستری ERA5-land استخراج و همراه با معیارهای آماری اعتبارسنجی محاسبه شد.

در جدول ۲، مقایسه‌ای بین داده‌های دمای کمینه (TN) و بیشینه (TX) پایگاه داده ERA5-land و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های مهرآباد، فیروزکوه و ورامین ارائه شده است. معیارهای آماری مورد استفاده شامل MAE، RMSE، R^2 ، d ، r ، KGE هستند که هر کدام جنبه‌های مختلفی از دقت و انطباق داده‌های بازتحلیل را ارزیابی می‌کنند.

MAE و RMSE میزان انحراف داده‌های بازتحلیل دمای کمینه و بیشینه روزانه پایگاه ERA5-land را از مشاهدات نشان می‌دهند. هرچه مقدار این دو کمتر باشد، دقت داده‌های بازتحلیل بالاتر خواهد بود. بر اساس این دو معیار، در ایستگاه مهرآباد، این پایگاه داده در تخمین دمای بیشینه دقیق‌تر عمل کرده است. در ایستگاه فیروزکوه، دمای بیشینه با خطای بیشتری نسبت به دمای کمینه برآورد شده است. کمترین میزان خطا برای هر دو متغیر در ایستگاه ورامین به دست آمد. مقادیر MAE و RMSE به دست آمده نشان‌دهنده بهترین تطابق و کمترین خطا در این ایستگاه است (MAE: TN=1.9°C, TX=1.4 °C; RMSE: TN=2.3 °C, TX=1.6 °C). درصد اریبی (PBIAS) نشان می‌دهد که داده‌های دمای کمینه و بیشینه بازتحلیلی

بیش‌برآورد (مثبت) یا کم‌برآورد (منفی) شده‌اند. در ایستگاه مهرآباد مقدار به دست آمده برای دمای کمینه نشان‌دهنده برآورد بی نقص این متغیر و برای دمای بیشینه، مقدار ۸٪- نشان‌دهنده کم برآورد جزئی است. در ایستگاه فیروزکوه، هر دو متغیر دارای مقدار بالای بیش‌برآورد دمای کمینه (TN) و کم برآورد دمای بیشینه (TX) هستند که نشان‌دهنده دقت پایین این پایگاه داده در برآورد این دو متغیر است. در ایستگاه ورامین نیز بیش برآورد جزئی برای دمای کمینه و کم برآورد متوسط برای دمای بیشینه به دست آمد. بر اساس ضریب نش-ساتکلیف (NSE) که نشان‌دهنده کیفیت برآورد دما در پایگاه ERA5-land است ($1 = \text{تطابق کامل}$) در ایستگاه مهرآباد با مقدار بیش از ۰/۹۰، نشان‌دهنده دقت بالای این پایگاه داده است. بهترین عملکرد بر اساس این معیار، در ایستگاه ورامین به دست آمد (با مقدار بیش از ۰/۹۴). دقت کمتر نسبت به سایر ایستگاه‌ها در ایستگاه فیروزکوه با کمترین مقدار NSE مشاهده شد. مقادیر بالای ۰/۹۷ شاخص ویلموت (d) در سه ایستگاه مورد بررسی نشان‌دهنده تطابق کامل بین دو سری داده مشاهداتی و بازتحلیل می‌باشند. ضریب همبستگی خطی (r) با مقدار بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۹ در سه ایستگاه و دو متغیر نیز نشان‌دهنده رابطه خطی قوی بین دو سری مشاهداتی و بازتحلیل می‌باشد. بر اساس ضریب تعیین محاسبه شده (R^2)، داده‌های دمای کمینه و بیشینه بازتحلیل ERA5-land در ایستگاه فیروزکوه عملکرد ضعیف‌تری نسبت به ایستگاه مهرآباد و ورامین نشان دادند. بر اساس شاخص کارایی KGE که ترکیبی از همبستگی، اریبی و تغییرپذیری است و بازه ۰ تا ۱ را شامل می‌شود (مقدار ۱ نشان‌دهنده بهترین عملکرد)، هر دو متغیر در ایستگاه مهرآباد و ورامین دارای عملکرد مطلوب و در ایستگاه فیروزکوه دارای عملکرد پایین برای دمای بیشینه می‌باشد (کمتر از ۰/۷۷).

جدول ۲. آمارهای اعتبارسنجی مقادیر روزانه دمای کمینه و بیشینه در سه ایستگاه.

مهرآباد		فیروزکوه		ورامین		معیار ارزیابی
TX	TN	TX	TN	TX	TN	
۲	۲/۸	۳/۴	۲/۴	۱/۴	۱/۹	MAE
۲/۴	۲/۷	۳/۹	۳/۱	۱/۶	۲/۳	RMSE
-۸	-۰/۱۱	-۱۸/۵	۱۹	-۷/۳	۴/۶	PBIAS%
۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۹۸	۰/۹۴	NSE
۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۸	d
۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۹	۰/۹۷	r
۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۸۸	۰/۹۸	۰/۹۵	R ²
۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۹۶	۰/۸۸	KGE

همکاران، ۲۰۲۳؛ سیمولای و آگیلار، ۲۰۲۴؛ رافی و وان در والت، ۲۰۲۳). بر این اساس، در این مطالعه نیز از این داده‌ها به منظور بررسی توزیع مکانی و زمانی ویژگی‌های موج‌های گرمایی با استفاده از سه نمایه موج گرمایی بهره گرفته شد.

۲-۴. توزیع مکانی ویژگی‌های امواج گرمایی

۱-۲-۴. HWN

در شکل ۲، توزیع مکانی ویژگی HWN بر اساس سه نمایه موج گرمایی آورده شده است. هر ردیف نمایانگر یکی از نمایه‌هاست و هر ستون یک دهه را نمایش می‌دهد. از نظر توزیع زمانی، همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر سه نمایه، دهه اول (۱۹۹۰-۱۹۸۱) کمترین تعداد رخداد HW به دست آمد. اما تفاوت‌هایی بین سه نمایه مشاهده شد به عنوان مثال، برای دهه اول، بر اساس EHF و TN90 به ترتیب حدود ۲۱ و ۲۹ درصد استان کمتر از ۵ رویداد را تجربه کردند (شهرستان‌های جنوبی و غربی استان شامل پاکدشت، ورامین، ری، قرچک و پیشوا) درحالی‌که بر اساس نمایه TX90 کمینه مجموع دهه‌ای این ویژگی HW طی این دهه، ۷ مورد به دست آمد. برای این دهه، در هر سه نمایه، بالاترین درصد مساحت استان بین ۵ تا ۱۵ رویداد را تجربه کردند (به ترتیب

در کل می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های بازتحلیل ERA5-land در تخمین دمای کمینه و بیشینه در ایستگاه ورامین بهترین عملکرد را نشان دادند. در ایستگاه مهرآباد نیز داده‌های بازتحلیل دقیق هستند، اما برای TX کمی تمایل به کم‌برآوردی وجود دارد. در ایستگاه فیروزکوه دمای بیشینه و کمینه بیشترین انحراف را نشان دادند به‌ویژه برای دمای بیشینه که ممکن است ناشی از تأثیرات توپوگرافی یا خطای مشاهداتی باشد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که عملکرد ERA5-land در برآورد دما به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر ارتفاع قرار می‌گیرد (چن و همکاران، ۲۰۲۱). ژائو و هی (۲۰۲۳) با ارزیابی ERA5-land در کوه‌های کیلیان دریافتند که این مجموعه داده در مناطق کم‌ارتفاع عملکرد مطلوبی دارد، اما در ارتفاعات بالا به دلیل اختلاف بین نقاط شبکه‌ای و ارتفاع ایستگاه‌ها، ارزیابی قابل توجهی نشان می‌دهد که با نتیجه به دست آمده در این پژوهش همسو می‌باشد. جیراروجو و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود نتیجه‌گیری کردند که داده‌های بازتحلیل ERA5 مجموعه داده‌ای مفید برای شناسایی موج‌های گرما می‌باشند اما عدم قطعیت‌ها در مقادیر دمای بیشینه نیاز به بررسی بیشتری دارد. با وجود این محدودیت‌ها طی سال‌های اخیر، از داده‌های دمایی ERA5-land در تحلیل موج‌های گرمایی و نمایه‌های آستانه دمایی استفاده شده است (اسپینوزا و

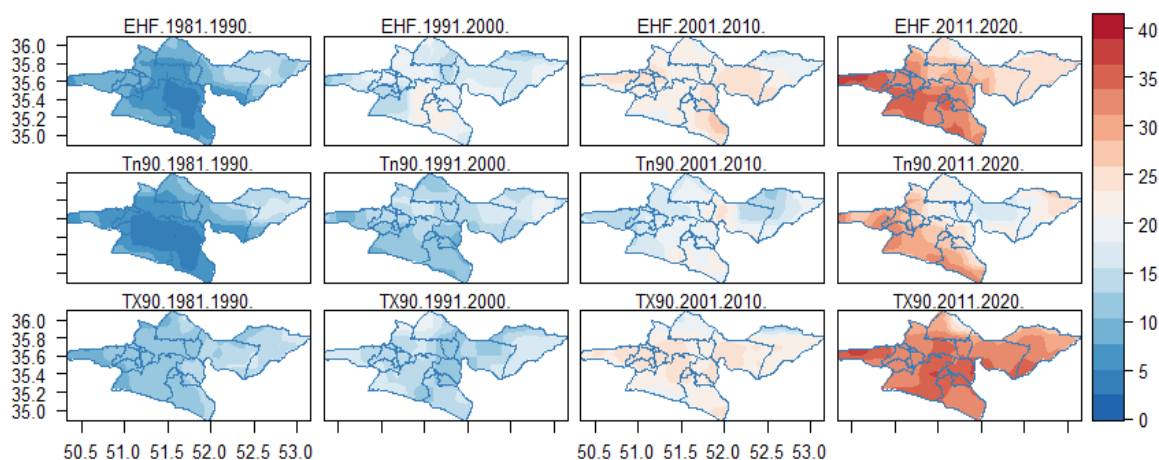
به منظور مقایسه دامنه مقادیر و ناهنجاری های HWN به دست آمده از سه روش EHF، TX90 و TN90، در جدول ۲، دامنه مقادیر مربوط به این ویژگی و ناهنجاری به دست آمده از آن نسبت به دوره آماری بلندمدت محاسبه شده برای ۵۹۴ نقطه شبکه ERA5-land پوشش دهنده استان تهران آورده شده است.

افزایش تعداد رخداد موج های گرمایی در پژوهش های مشابه برای مناطق خاورمیانه و مدیترانه نیز گزارش شده است (دریوج و همکاران، ۲۰۲۰؛ زیتیس و همکاران، ۲۰۲۲؛ اسماعیل نژاد و همکاران، ۱۳۹۲؛ خسروی و اسمعیل نژاد، ۱۳۹۹ و بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۲). در کل، بر اساس سه نمایه، نواحی جنوبی و جنوب غربی استان تهران شاهد بیشترین تغییرات افزایشی در HWN در دهه های اخیر بوده اند.

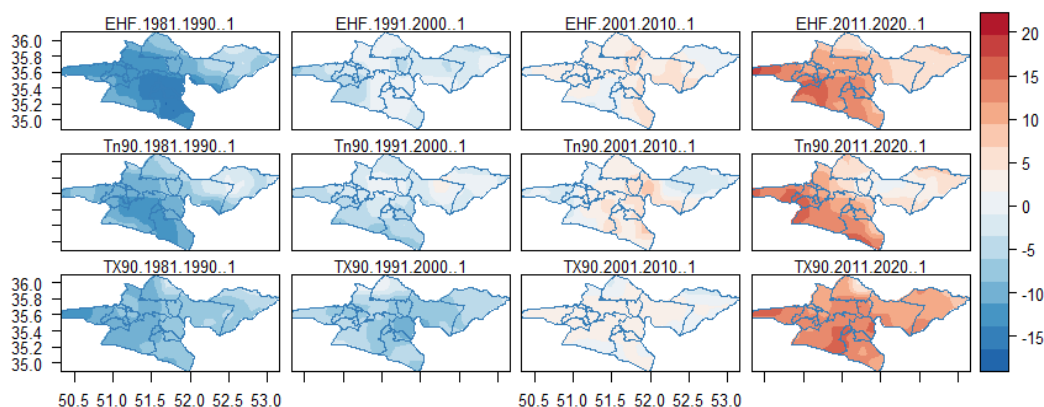
برای EHF، TN90 و TX90، ۷۵/۸٪، ۶۱٪ و ۸۹/۹٪ در کل، دو نمایه EHF و TN90 توزیع مکانی و دامنه مشابهی از مقادیر مجموع دهه ای را برای این ویژگی برای دهه ۱۹۸۱-۱۹۹۰ نشان دادند. برای دهه اخیر (۲۰۱۱-۲۰۲۰)، تعداد رخداد موج های گرمایی تا بیشینه ۳۹ و ۳۷ رویداد در برخی نقاط شبکه استان (جنوب غربی و غرب استان) بر اساس دو نمایه EHF و TX90 مشاهده شد. درصد مساحت استان که بیش از ۳۵ رویداد را در این دهه تجربه کردند به ترتیب ۵/۶ و ۱۲/۶ درصد به دست آمد. در این دهه، بیشترین مساحت استان در هر سه نمایه EHF، TX90 و TN90 شاهد تعداد ۲۵-۳۵ رخداد بودند (به ترتیب ۶۵/۸، ۸۵/۵ و ۴۴ درصد). تعداد رویدادهای برآورده شده امواج گرمایی برای این دهه توسط نمایه TN90 کمتر از ۳۴ رویداد به دست آمد.

جدول ۲. دامنه مجموع دهه ای و ناهنجاری تعداد موج های گرمایی (HWN) (روز) به دست آمده از نمایه های TX90، TN90 و EHF

آماره	نمایه	۱۹۸۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۰۰	۲۰۰۱-۲۰۱۰	۲۰۱۱-۲۰۲۰
مجموع دهه ای (تعداد)	EHF	۴-۱۶	۱۱-۲۲	۱۵-۲۸	۱۹-۳۹
	TN90	۲-۱۸	۷-۲۰	۱۲-۲۴	۱۶-۳۴
	TX90	۷-۱۶	۱۰-۲۰	۱۲-۲۵	۲۲-۳۷
ناهنجاری نسبت به میانگین (۱۹۸۱-۲۰۲۰) (تعداد)	EHF	-۱۶- -۲	۱/۴- -۸	۶/۷- -۱/۲	۱۶/۷- -۲
	TN90	-۱۳/۲- -۰/۳	۲/۶- -۸/۴	۷/۴- -۳/۱	۱۶/۶- -۰/۴
	TX90	-۱- -۱۴/۱	۰/۸- -۱۰/۵	۳/۶- -۴/۲	۱۶- ۳/۸



شکل ۲. توزیع مکانی مجموع دهه ای ویژگی HWN (تعداد رخداد) با استفاده از سه نمایه EHF، TN90 و TX90 برای استان تهران.



شکل ۳. توزیع مکانی مقادیر ناهنجاری HWN نسبت به میانگین چهار دهه هر سه نمایه محاسبه HW.

سالانه (HWD) آورده شده است که از ۵۹۴ نقطه شبکه پوشش‌دهنده استان به‌دست آمد. بررسی این ویژگی در هر دهه نشان داد مقدار بیشینه این نمایه در کل استان طی دهه اول تا دهه چهارم در دو نمایه EHF و TX90 بیش از دوبرابر و مقدار کمینه در روش EHF بیش از ۳ برابر شده است.

توزیع مکانی HWD برای هر دهه و بر اساس سه نمایه HW در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمایش توزیع مکانی این ویژگی (HWD)، دو نمایه EHF و TX90 پهنه‌های مشابهی را برای ۴ دهه نشان می‌دهند. کمترین مقادیر با نمایه TN90 به‌دست آمد که برای برای دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰، بیشینه ۶۲ روز و برای دوره ۱۹۸۱-۱۹۹۰ بیشینه ۳۹ روز را نشان داد. دو نمایه EHF و TX90 مقادیر مشابهی با بیشینه ۷۹ روز برای دهه انتهایی (در مقابل بیشینه ۳۵ روز دهه اول) نشان دادند. از نظر مکانی، در آخرین دهه، مناطق جنوبی و مرکزی استان بر اساس این دو نمایه شاهد طولانی‌ترین موج‌های گرمایی بوده‌اند (بخش‌هایی از شهرستان‌های ورامین، ری، پیشوا، پاکدشت و قرچک).

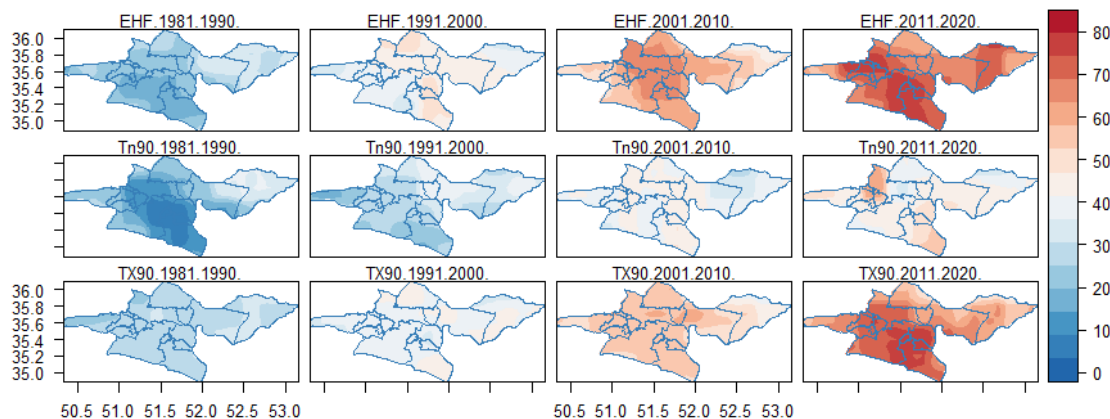
در شکل ۳، توزیع مکانی ناهنجاری مقادیر مجموع دهه‌ای HWN نسبت به میانگین ۴ دهه نشان داده شده است. در تمامی نمایه‌ها، دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰ دارای بیشترین ناهنجاری مثبت در کل استان است، که نشان‌دهنده تشدید بی‌سابقه فراوانی رخداد‌های موج گرما در مقایسه با میانگین دوره بلندمدت (۱۹۸۱-۲۰۲۰) می‌باشد. ناهنجاری منفی برای دو دهه اول برای سه نمایه به‌دست آمد. تنها نمایه TN90 برای دهه ۱۹۹۱-۲۰۰۰ ناهنجاری مثبت برای شهرستان دماوند (ناحیه شمالی) استان (۳ رویداد بیش از میانگین ۴۰ ساله) را نشان داد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد دهه ۱۹۸۱-۱۹۹۰ و ۱۹۹۱-۲۰۰۰ به‌عنوان دوره‌های سردتر یا دارای موج‌های گرمایی کمتر شناخته می‌شوند. بیشترین مقادیر ناهنجاری مثبت (تا ۱۷ رویداد) برای دهه آخر (۲۰۲۰-۲۰۱۱) در هر سه نمایه، برای شهرستان‌های جنوبی و غربی استان شامل پاکدشت، ورامین، ری، ملارد به‌دست آمد.

۴-۲-۲-۴ HWD

در جدول ۳، دامنه مجموع دهه‌ای و ناهنجاری مجموع تعداد روزهای متعلق به طولانی‌ترین موج‌های گرمایی

جدول ۳. دامنه مجموع دهه‌ای و ناهنجاری HWD (روز) به‌دست آمده از نمایه‌های TX90، TN90 و EHF.

آماره	نمایه	۱۹۸۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۰۰	۲۰۰۱-۲۰۱۰	۲۰۱۱-۲۰۲۰
مجموع دهه‌ای (روز)	EHF	۱۴/۸ - ۳۵/۸	۳۱ - ۵۲	۴۰ - ۶۷/۶	۵۶/۱ - ۷۹/۷
	TN90	۳ - ۳۸/۶	۱۷/۲ - ۳۹/۷	۲۷/۴ - ۴۷/۶	۳۱/۱ - ۶۲/۵
	TX90	۱۹/۳ - ۳۵/۴	۳۰/۳ - ۴۵/۱	۳۶/۱ - ۵۸/۹	۴۳/۲ - ۷۹
ناهنجاری نسبت به میانگین (۱۹۸۱-۲۰۲۰) (روز)	EHF	-۳۴ - -۱۰	-۱۴/۵ - ۱/۱	-۵/۵ - ۱۷/۲	۱۰/۴ - ۳۰/۱
	TN90	۶/۴ - -۲۶/۶	۴/۹ - -۱۶	۱۵/۹ - -۴	۲۶/۹ - -۱/۱
	TX90	-۱/۷ - -۲۵/۶	۰/۹ - -۱۴/۱	۱۲/۸ - -۲/۴	۲۹/۴ - ۶/۱



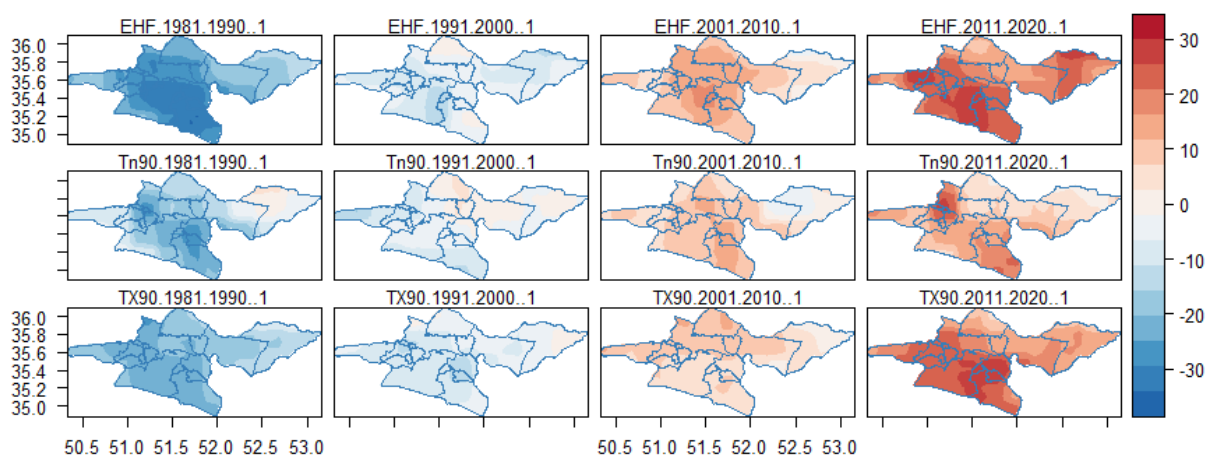
شکل ۴. توزیع مکانی مجموع دهه‌ای ویژگی HWD (مدت طول موج گرمایی) با استفاده از سه نمایه EHF، Tn90 و TX90 برای استان تهران.

گرمایی رخ داده در هر سال (HWF) طی ۴ دهه و با سه نمایه برآورد و در شکل ۶ توزیع مکانی آن آورده شده است. بزرگ‌ترین مقادیر این ویژگی بر اساس نمایه EHF و برای دهه چهارم ۲۰۱۱-۲۰۲۰ برای مناطق جنوبی و غربی استان تهران تا ۱۸۸ روز به‌دست آمد. در دهه اول بیشینه مقدار این ویژگی ۶۲ روز برآورد شد. توزیع مکانی مشابه با این نمایه، با نمایه TX90 قابل مشاهده است. کمترین مقدار این ویژگی با نمایه TN90 به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده برای دهه‌های مورد بررسی مبنی بر تغییرات افزایشی در این ویژگی، همسو با پژوهش‌های انجام‌شده توسط موری و افندی (۲۰۲۱) و لابان و همکاران (۲۰۲۳) می‌باشد.

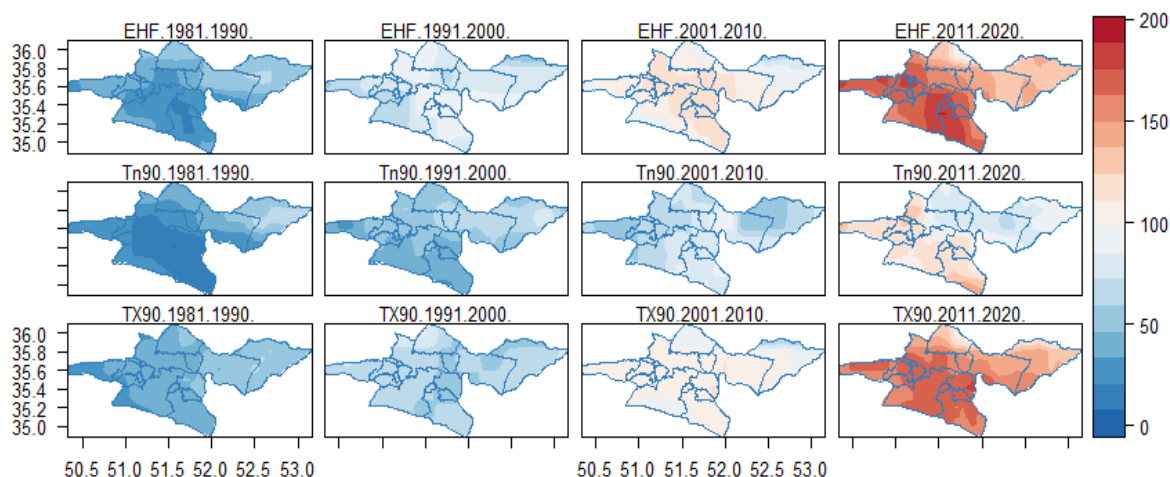
در شکل ۵، توزیع مکانی ناهنجاری این ویژگی در هر دهه نسبت به میانگین ۴ دهه نشان داده شده است. ناهنجاری منفی در دهه اول و دوم به‌دست آمد با ناهنجاری منفی‌تر برای دوره ۱۹۹۰-۱۹۸۱ به‌ویژه با نمایه EHF (به میزان ۳۴ روز کمتر از میانگین ۴۰ ساله این ویژگی). بیشترین مقدار عددی ناهنجاری منفی برای شهرستان‌های ورامین، پاکدشت، پیشوا و ری با نمایه EHF محاسبه شد. نمایه EHF نسبت به دور نمایه دیگر، بازه عددی بزرگ‌تری را برای ناهنجاری‌های ۴ دهه نسبت به میانگین ۴۰ ساله این ویژگی نشان داد (۳۴- تا ۳۰+).

۳-۲-۴. HWF

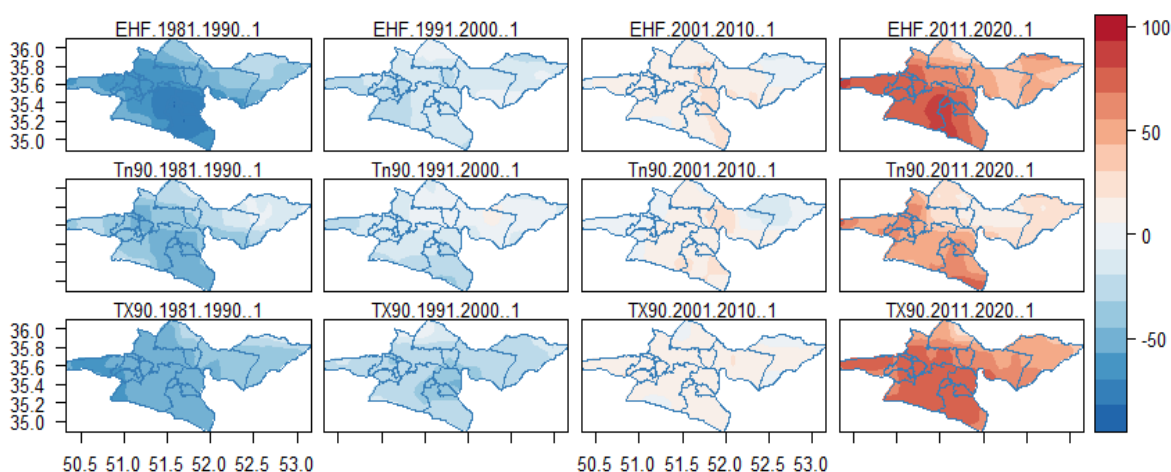
مجموع تعداد کل روزهای مشارکت کننده در موج‌های



شکل ۵. توزیع مکانی مقادیر ناهنجاری HWD نسبت به میانگین چهار دهه هر سه نمایه EHF، Tn90 و TX90.



شکل ۶. توزیع مکانی مجموع دهه‌ای ویژگی HWF با استفاده از سه نمایه EHF, Tn90 و TX90 برای استان تهران.



شکل ۷. توزیع مکانی مقادیر ناهنجاری HWF نسبت به میانگین چهار دهه هر سه نمایه EHF, Tn90 و TX90.

می باشد. به‌طوری‌که به‌عنوان مثال، شهرستان‌های ورامین، پیشوا، قرچک و پاکدشت که با نمایه EHF (TX90) دارای بالاترین بی‌هنجاری منفی با حدود ۸۲ (۶۶) روز کمتر از میانگین بلند مدت HWF بوده‌اند با روندی صعودی در بین سه دهه بعدی، به مقدار ۹۲ (۷۹) روز بیش از این میانگین رسیده‌اند که نشان می‌دهد تغییرات مکانی این ویژگی از شدت متفاوتی در استان برخوردار بوده است. در دهه آخر در کل نمایه Tn90، مقادیر کوچک‌تری را نسبت به دو نمایه دیگر نشان می‌دهد (جدول ۴).

توزیع مکانی مقادیر ناهنجاری این ویژگی نسبت به میانگین ۴ دهه هر نمایه در شکل ۷ آورده شده است. هر سه نمایه، در نمایش مکانی ناهنجاری HWF مشابه عمل کرده‌اند. گستره مکانی و شدت ناهنجاری‌های مثبت در دو نمایه EHF و TX90 طی دهه ۲۰۲۰-۲۰۱۱ بیشتر می‌باشد. این مورد برای دامنه ناهنجاری منفی در دهه ۱۹۹۰-۱۹۸۱ نیز صادق می‌باشد. بالاترین مقادیر منفی و مثبت در هر سه نمایه در مناطق جنوب و جنوب غربی استان قابل مشاهده است که نشان از تغییرات شدید در این نمایه در این نواحی طی ۴ دهه

جدول ۴. دامنه مجموع دهه‌ای و ناهنجاری تعداد موج‌های گرمایی (HWF) به‌دست آمده از نمایه‌های TX90، TN90 و EHF.

آماره	نمایه	۱۹۸۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۰۰	۲۰۰۱-۲۰۱۰	۲۰۱۱-۲۰۲۰
مجموع دهه‌ای (روز)	EHF	۱۸/۲ - ۶۱/۸	۴۶ - ۹۳	۶۱ - ۱۲۱/۳	۹۷/۶ - ۱۸۸/۳
	TN90	۷ - ۶۸	۲۸/۶ - ۷۴/۷	۴۶/۲ - ۹۲	۶۸/۲ - ۱۴۱/۸
	TX90	۲۵/۱ - ۶۲	۴۴ - ۸۵/۸	۵۸/۹ - ۱۱۱/۶	۹۶/۶ - ۱۷۶/۶
ناهنجاری نسبت به میانگین ۱۹۸۱-۲۰۲۰ (روز)	EHF	-۸۲/۶ - -۱۹/۳	-۳۳/۳ - ۶/۰	-۱۴/۳ - ۲۲/۷	۲۱/۴ - ۹۲/۹
	TN90	-۵۳/۴ - -۴/۵	-۳۸/۹ - ۸/۸	-۱۴/۲ - ۲۵/۴	۸/۲ - ۷۳
	TX90	-۶۶/۷ - -۸/۲	-۴۵ - ۰/۱	-۸/۵ - ۱۸/۳	۲۵/۶ - ۷۹/۹

۴-۲-۴. HWM

میانگین دمای روزانه محاسبه‌شده از تمامی موج‌های گرمایی (HWN) رخداد داده در یک سال با HWM نشان داده می‌شود. در جدول ۵ دامنه و ناهنجاری این ویژگی نسبت به دوره بلندمدت آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای نمایه (EHF)، دهه ۲۰۰۱-۲۰۱۰ بزرگ‌ترین دامنه را ($18/2(^\circ\text{C}^2)$ تا $48/6$) نشان می‌دهد که نشان‌دهنده شدیدترین نوسانات در امواج گرمایی در ۴ دهه مورد بررسی بوده است. کاهش نسبی در این ویژگی در دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰ مشاهده می‌شود ولیکن همچنان این دهه بالاتر از دو دهه اول می‌باشد. امواج گرمایی خفیف‌تر در دهه اول همانند دو نمایه دیگر به‌دست آمد. بر اساس نمایه TN90، دو دهه آخر دارای دامنه‌ی مشابهی هستند که در مقایسه با دو دهه اول بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند. شب‌های خنک‌تر در دهه اول ثبت شده‌اند. بر اساس TX90 که با روزهای گرم مرتبط است بزرگ‌ترین

دامنه برای دهه آخر (۲۰۱۱-۲۰۲۰) با مقدار مجموع دهه‌ای ۱۶۱/۴ تا ۴۰۹/۸ درجه سلسیوس ثبت شده است که نشان‌دهنده رکوردشکنی در تعداد روزهای گرم در این دهه می‌باشد و به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت از دهه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰، روند افزایش در گرمای روزانه وجود داشته و تشدید شده است.

بررسی ناهنجاری‌های به‌دست آمده برای سه نمایه نشان می‌دهد برای نمایه EHF، در دهه سوم بیشترین ناهنجاری مثبت را با بیشینه $22/5^\circ\text{C}^2$ داشته که نشان‌دهنده رخداد بیشترین موج‌های گرمایی غیرعادی (گرم‌تر) است. دو دهه ابتدای این دوره آماری دارای ناهنجاری عمدتاً منفی هستند که نشان می‌دهد این میانگین دمای روزانه موج‌های گرمایی، کمتر از حد میانگین دوره آماری بلندمدت بوده است. در دهه سوم، دو نمایه EHF و TN90 بالاترین مقادیر ناهنجاری مثبت را نشان دادند که نشان‌دهنده رخداد امواج گرمایی داغ‌تر طی این دهه بر اساس این دو نمایه بوده است.

جدول ۵. دامنه مجموع دهه‌ای و ناهنجاری میانگین دمای روزانه محاسبه‌شده از تمامی موج‌های گرمایی (HWM) نمایه‌های TX90، TN90 و

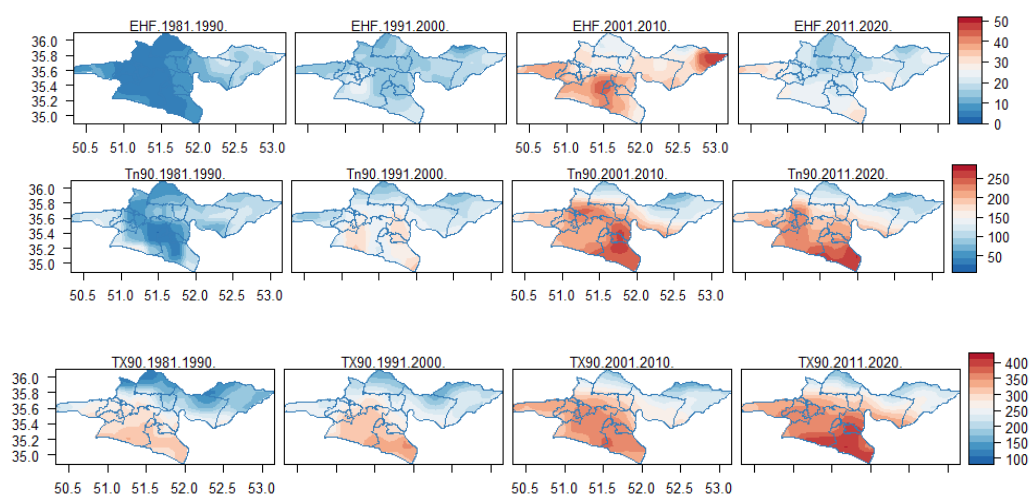
EHF

آماره	نمایه	۱۹۸۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۰۰	۲۰۰۱-۲۰۱۰	۲۰۱۱-۲۰۲۰
مجموع دهه‌ای ($^\circ\text{C}^2$ for EHF)	EHF	۲/۹ - ۲۵/۷	۷/۱ - ۲۳/۹	۱۸/۲ - ۴۸/۶	۱۲/۵ - ۳۳/۴
	TN90	۲۵/۳ - ۱۵۵/۶	۶۶ - ۱۸۵/۶	۶۴/۱ - ۲۶۵/۱	۶۵/۴ - ۲۶۸/۸
	TX90	۱۰۳/۱ - ۳۲۳/۴	۱۴۴/۷ - ۳۵۱	۱۴۵/۸ - ۳۶۷	۱۶۱/۴ - ۴۰۹/۸
ناهنجاری نسبت به میانگین ۱۹۸۱-۲۰۲۰ ($^\circ\text{C}^2$ for EHF)	EHF	-۱۸/۱ - ۳/۷	-۹/۲ - ۲/۴	۴/۳ - ۲۲/۵	-۴/۹ - ۱۰/۸
	TN90	-۱۳۴/۸ - ۱۴/۵	-۶/۸ - ۹/۵	-۹/۵ - ۹۱/۱	-۹/۹ - ۸۳/۷
	TX90	-۷۳/۶ - ۱۰/۱	-۶۴/۵ - ۱۲/۳	-۲۹/۹ - ۶۷/۳	۱/۲ - ۷۲/۱

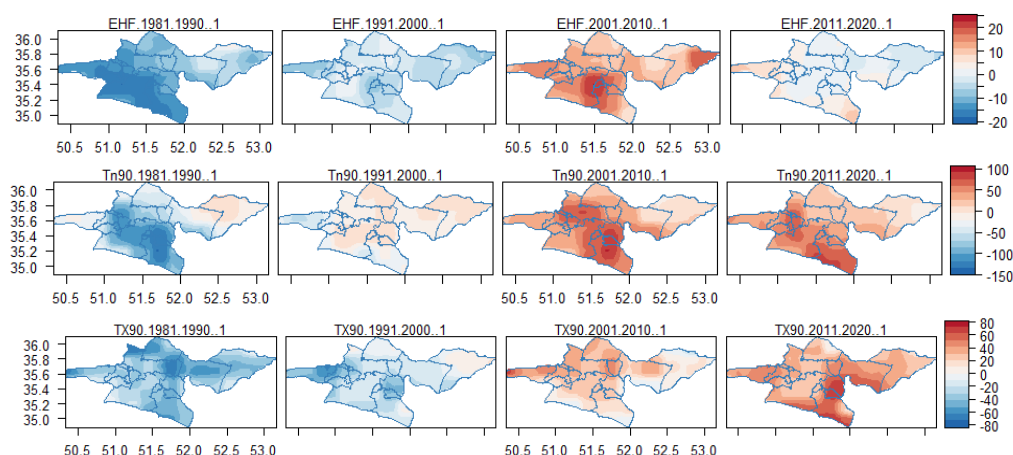
ویژگی را در بین سال‌های مورد بررسی دارا هستند که منجر به برآورد بیشتر آن در دهه سوم نسبت به دهه آخر شده است.

در شکل ۹، توزیع مکانی ناهنجاری این ویژگی در هر دهه نسبت به میانگین بلندمدت برای نقطه شبکه‌های موجود محاسبه و توزیع مکانی آن ترسیم شد. بر خلاف سایر ویژگی‌هایی که تاکنون بررسی شده، ناهنجاری مربوط به این ویژگی (HWM) در نمایه TN90 بازه بزرگ‌تری را نشان داد که شامل ناهنجاری منفی دوره اول (۱۹۸۱-۱۹۹۰) برای مناطق جنوب و مرکز استان تا مقدار 15°C - با ناهنجاری مثبت دهه سوم و چهارم تا میزان 10°C درجه سلسیوس است. این نمایه، ناهنجاری‌های مثبت را برای ۴ دهه برای مناطق شمال شرقی استان برای دو دهه اول نشان داد که در دو نمایه دیگر مشاهده نشد.

در شکل ۸، توزیع مکانی مجموع دهه‌ای این ویژگی نشان داده شده است. در دو نمایه مبتنی بر دمای کمینه و بیشینه، همانند سه ویژگی قبلی HW، بیشترین مقادیر مجموع دهه ای HWM در دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰ و برای مناطق جنوبی و غربی استان (شهرستان‌های پاکدشت، ورامین، ری، قرچک، شهریار، رباط کریم، اسلامشهر و نواحی غربی ملارد) به دست آمد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در نمایه EHF، بر خلاف ویژگی‌های قبلی بررسی شده، بیشترین مقادیر (C^2HWM) در دهه ۲۰۰۱-۲۰۱۰ به دست آمد. از نظر توزیع مکانی، بیشترین تغییرات این ویژگی در دهه سوم نسبت به دهه اول، در مناطق مرکزی و غربی استان به دست آمد (از 4°C^2 در دهه اول تا 40°C^2 در دهه سوم). بررسی مقادیر HWM سالانه این ویژگی در دهه سوم نشان داد سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ بالاترین مقادیر این



شکل ۸. توزیع مکانی مجموع دهه‌ای ویژگی HWM با استفاده از سه نمایه EHF، TN90 و TX90 برای استان تهران.



شکل ۹. ناهنجاری HWM در هر دهه نسبت به میانگین ۴۰ ساله آن با استفاده از سه نمایه EHF، TN90 و TX90.

۴-۲-۵. HWA

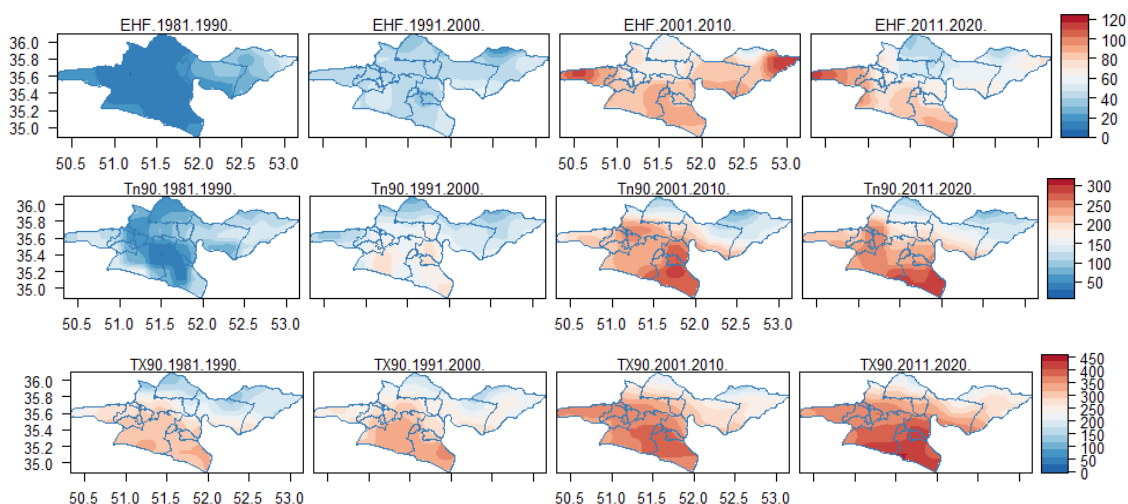
در جدول ۶، دامنه مجموع دهه‌ای و همچنین دامنه ناهنجاری‌های HWA که نشان‌دهنده بالاترین دمای روزانه ثبت‌شده طی داغ‌ترین موج گرمایی است و از نقاط شبکه‌ای پوشش‌دهنده استان تهران به‌دست آمده، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای نمایه EHF، کمینه و بیشینه مقادیر این ویژگی همانند HWM، برای دهه سوم (۲۰۱۰-۲۰۱۱) بالاترین مقادیر و مقدار ناهنجاری محاسبه‌شده برای تمام نقاط شبکه استان مثبت به‌دست آمد. در شکل ۱۰، توزیع مکانی مجموع دهه‌ای HWA نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از نظر الگوی مکانی این ویژگی مشابه با HWM می‌باشد. کمترین مجموع دهه‌ای این ویژگی با بالاترین ناهنجاری منفی برای اولین دهه با استفاده از سه نمایه به‌دست آمد. این الگو به‌ویژه برای جنوب و جنوب غربی و غرب استان برای دو نمایه EHF و TN90 منطبق‌تر می‌باشد. دو نمایه اخیر، توزیع مکانی مشابهی را برای این ویژگی طی ۴ دهه ارائه دادند. توزیع مکانی این ویژگی بر اساس نمایه EHF متفاوت از سایر ویژگی‌ها به‌دست آمد به‌طوری‌که در دهه اول، شهرستان‌های فیروزکوه و دماوند بالاترین مقادیر HWM را در این دهه تا از 60°C^2 نشان دادند. این الگو طی دو دهه بعدی حذف شد ولیکن در دهه چهارم، مجدداً نواحی

جنوبی و غربی بالاترین مقادیر این ویژگی را نشان دادند. در سایر شهرستان‌های استان، مجموع دهه‌ای بالاترین دمای روزانه ثبت‌شده طی داغ‌ترین موج گرمایی شناسایی شده سالانه طی دهه اول کمتر از 30°C^2 به‌دست آمد در حالی که در دهه سوم این مقدار در کل استان به بیش از 40°C^2 تا بیشینه 120°C^2 تغییر یافت. با توجه به شکل ۱۰، شهرستان فیروزکوه و ملارد طی دهه ۲۰۱۰-۲۰۱۱ شاهد داغ‌ترین امواج گرمایی خود طی دوره ۴۰ ساله بوده‌اند. روند تغییرات افزایشی و توزیع مکانی در نمایه TX90 همانند ویژگی‌های قبلی HW بوده و بیشترین تغییرات در قسمت‌های مرکز و جنوب استان مشاهده شد.

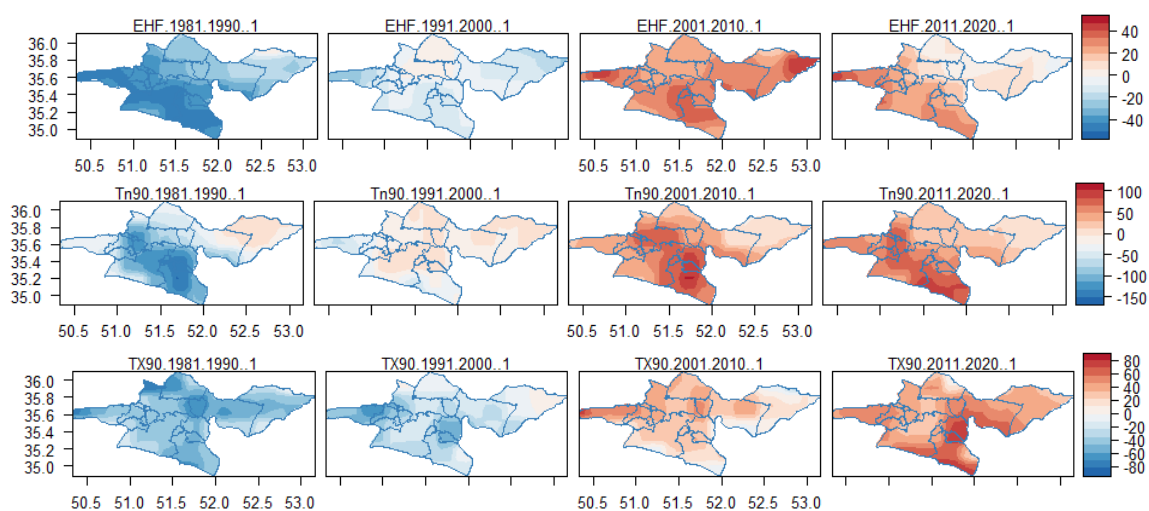
توزیع مکانی ناهنجاری‌های ویژگی HWA نسبت به میانگین دوره ۴۰ ساله، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قوی‌ترین ناهنجاری منفی برای دهه اول (۱۹۸۱-۱۹۹۰) با سه نمایه به‌دست آمده است. با نمایه TN90 برای مناطق جنوبی استان شامل شهرستان‌های وارمین، پیشوا و پاکدشت و برای نمایه EHF علاوه بر مناطق جنوبی برای مناطق غربی استان نیز شناسایی شده است. بزرگ‌ترین بازه ناهنجاری‌ها برای نمایه TN90 به‌دست آمد. از نظر الگوی مکانی روش TX90 متفاوت از دو روش دیگر عمل کرده و قوی‌ترین ناهنجاری منفی را برای مناطق شمالی استان نشان داد.

جدول ۶. دامنه مجموع دهه‌ای و ناهنجاری دامنه موج گرمایی (HWA) به‌دست آمده از نمایه‌های TX90، TN90 و EHF.

آماره	نمایه	۱۹۸۱-۱۹۹۰	۱۹۹۱-۲۰۰۰	۲۰۰۱-۲۰۱۰	۲۰۱۱-۲۰۲۰
مجموع دهه‌ای (روز)	EHF	۷/۵ - ۵۹/۳	۱۵/۹ - ۵۶/۵	۴۴/۵ - ۱۱۶/۵	۳۵/۸ - ۱۱۵/۹
	TN90	۴ - ۲۷/۱	۷۳/۷ - ۱۹۷/۶	۷۵/۳ - ۲۹۳/۲	۷۹/۹ - ۲۹۹/۷
	TX90	۱۱۳/۳ - ۳۳۱/۷	۱۵۴/۴ - ۳۶۲/۷	۱۵۶/۷ - ۳۸۷/۹	۱۷۹/۳ - ۴۳۳
ناهنجاری نسبت به میانگین (روز) ۱۹۸۱-۲۰۲۰	EHF	-۵۱/۴ - ۴/۶	-۲۷/۹ - ۳	۱۰/۹ - ۴۴/۳	-۳ - ۴۷
	TN90	-۱۵۲ - ۱۳	-۶۵ - ۶/۶	-۸/۹ - ۱۰۰/۷	-۶/۹ - ۹۴/۹
	TX90	-۸۲/۷ - ۹/۳	-۶۹/۴ - ۹/۸	-۳۳/۳ - ۷۴/۲	۴/۲ - ۷۹/۹



شکل ۱۰. توزیع مکانی مجموع دهه‌ای ویژگی HWA با استفاده از سه نمایه EHF، Tn90 و TX90 برای استان تهران.



شکل ۱۱. ناهنجاری HWA در هر دهه نسبت به میانگین ۴۰ ساله آن با استفاده از سه نمایه EHF، Tn90 و TX90.

بر اساس نتایج حاصل از سه نمایه، مجموع و انحراف معیار دهه‌ساله ۵ ویژگی HW (به‌جز روش EHF برای دو ویژگی HWM و HWA) در استان تهران به تدریج از دهه اول (۱۹۸۱-۱۹۹۰) تا بالاترین مقادیر در دهه آخر (۲۰۲۰-۲۰۱۱) افزایش می‌یابد که با نتیجه به‌دست آمده از پژوهش‌های انجام‌شده توسط حسین‌پور و همکاران (۱۴۰۲)، اعتمادیان و همکاران (۱۳۹۹) و بهاروندی و همکاران (۱۳۹۹) بکر و همکاران (۲۰۲۲) همسو می‌باشد. قوی‌ترین ناهنجاری مثبت ویژگی‌های HW عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب غرب یافت می‌شوند، به‌ویژه در نواحی جنوبی (ورامین و ری). در بین سه نمایه، بیشینه مجموع دهه‌ای سه ویژگی HWN (با ۳۹ رویداد)، HWF

(با ۱۸۸/۳ روز) و HWD (با ۷۹/۷ روز) با نمایه EHF برای دهه پایانی دوره به‌دست آمده است. بیشینه ناهنجاری‌های مثبت برای تمام ویژگی‌های HW در ۲۰۱۱-۲۰۲۰ (به‌جز HWA و HWM با نمایه EHF) به‌دست آمد در حالی که بالاترین مقادیر ناهنجاری‌های منفی برای دوره ۱۹۹۰-۱۹۸۱ محاسبه شد و در بین سه نمایه، مقادیر کوچک‌تر ویژگی‌های HWF، HWN و HWD با نمایه Tn90 به‌دست آمد.

در کل، تحلیل ویژگی‌های مختلف موج‌های گرمایی با استفاده از سه نمایه EHF، Tn90 و TX90 در استان تهران طی چهار دهه گذشته (۱۹۸۱-۲۰۲۰)، روندی معنادار افزایشی را در بزرگی، مدت و فراوانی این پدیده نشان داد.

در مقایسه دهه‌های مورد بررسی، تمامی ویژگی‌ها در دهه پایانی (۲۰۱۱-۲۰۲۰) افزایش قابل توجهی را نشان داد. این روند افزایشی هم در مقدار مطلق ویژگی‌ها (مانند تعداد رویدادها یا مدت موج‌های گرمایی) و هم در ناهنجاری نسبت به میانگین ۴ دهه مشهود است. افزایش بازه تعداد موج‌های گرمایی در سطح استان تهران از بیشینه (کمینه) حدود ۱۶ (۸) رویداد در دهه اول به حدود ۳۹ (۱۹) رویداد در دهه اخیر (بر اساس نمایه EHF)، به‌وضوح دلالت بر افزایش فراوانی این پدیده دارد. همچنین این یافته‌ها با مطالعات پیشین در مناطق خاورمیانه و مدیترانه نیز همراستا هستند و تأییدی بر تأثیرات تغییر اقلیم در سطح منطقه‌ای به‌شمار می‌روند (زیتس و همکاران، ۲۰۲۲، ودلر و همکاران، ۲۰۲۳، کریستیدیس و همکاران، ۲۰۲۳). بزرگی موج‌های گرمایی (HWM) و بیشینه دمای ثبت‌شده در گرم‌ترین موج (HWA) نیز بر اساس سه نمایه در دهه‌های پایانی افزایش یافته‌اند، که نشان‌دهنده داغ‌تر شدن موج‌های گرمایی در کنار طولانی‌تر شدن و افزایش تعداد آنهاست. افزایش به‌دست آمده در ویژگی‌های موج‌های گرمایی همسو با افزایش دما در منطقه مورد مطالعه است که در پژوهش‌های انجام‌شده به آن اشاره شده است مانند عباسی و همکاران (۱۳۹۹).

از نظر مکانی، شهرستان‌های جنوبی و جنوب‌غربی استان تهران شامل پاکدشت، ورامین، ری، شهریار و رباط‌کریم بیشترین تأثیر را از نظر بزرگی، مدت و تعداد موج‌های گرمایی تجربه کرده‌اند. این تمرکز مکانی می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی همچون کاربری زمین، فاصله از مراکز صنعتی و شهری، توپوگرافی و الگوهای چرخش جو باشد. در مقابل، نواحی شمالی و شمال‌شرقی استان (مانند دماوند و فیروزکوه) در برخی ویژگی‌ها، نرخ تغییرات افزایشی کمتری را نشان داده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که داده‌های بازتحلیل ERA5-Land از توانمندی قابل قبولی در برآورد متغیرهای دمای کمینه و بیشینه روزانه برخوردار هستند. با این حال،

دقت در برآورد متغیرهای دمایی بستگی زیادی به موقعیت و شرایط مکانی ایستگاه‌ها (ارتفاع و شرایط توپوگرافی) دارد. بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی‌های آماری انجام شده، کمترین تطابق به‌ویژه برای دمای بیشینه در ایستگاه فیروزکوه به‌دست آمد. در حالی که متغیرهای دمای بیشینه و کمینه ایستگاه ورامین بهترین همخوانی را با داده‌های بازتحلیل نشان دادند. این نتایج همسو با مطالعات پیشین هستند که ضمن تأکید بر توانمندی بالای این پایگاه داده بازتحلیل در برآورد دمای کمینه و بیشینه، به نقش تعیین‌کننده ارتفاع در میزان دقت داده‌های این پایگاه اشاره داشته‌اند.

در بخش دوم مقاله، تحلیل ویژگی‌های موج‌های گرمایی در استان تهران طی چهار دهه (۲۰۲۰-۱۹۸۱) با استفاده از سه نمایه EHF، TN90 و TX90 انجام شد که نتایج نشان داد نه تنها فراوانی، بلکه شدت، مدت و گستره مکانی موج‌های گرمایی طی ۴ دهه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌اند. افزایش قابل ملاحظه در فراوانی و مدت موج‌های گرمایی در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی استان در دهه اخیر (۲۰۲۰-۲۰۱۱) مشاهده شد. این روند افزایشی، با مقادیر بالای ناهنجاری‌های مثبت نسبت به میانگین بلندمدت در سه نمایه به‌ویژه برای مناطق مذکور، به‌دست آمد.

در مجموع، داده‌های ERA5-Land با وجود برخی محدودیت‌ها در نواحی مرتفع، ابزار کارآمدی برای تحلیل روندهای اقلیمی و به‌ویژه ارزیابی الگوهای زمانی-مکانی امواج گرمایی در مقیاس منطقه‌ای محسوب می‌شوند که در پژوهش‌های پیشین به آن اشاره شده است. بررسی توزیع مکانی، فراوانی، شدت و مدت امواج گرمایی و شناسایی مناطق آسیب‌پذیرتر در برابر این رخدادها، به‌منظور اطلاع‌رسانی سیاست‌های بهداشت عمومی، برنامه‌ریزی کشاورزی و استراتژی‌های مدیریت بحران حیاتی است. نتایج این مطالعه بر ضرورت توجه ویژه به نواحی آسیب‌پذیر استان تهران (نواحی جنوب و جنوب غربی) نسبت به امواج گرمایی در شرایط گرمایش جهانی تأکید دارد. نتایج به‌دست آمده می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های آتی در زمینه مدیریت بحران‌های مرتبط

جغرافیایی فضا، (۱۳)، ۱۰۵-۱۲۱.

حسین پور، ز.؛ شمسی پور، ع.؛ کریمی، م. و خوش اخلاق، ف. (۱۴۰۲). تحلیل آماری موج‌های گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۳ (۶۸)، ۸۱-۹۸.

خسروی، م. و اسمعیل نژاد، م. (۱۳۹۹). بررسی آماری همدیدی موج‌های گرمایی کام تداوم ایران، *فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی*، ۲ (۲)، ۱۹-۲۳.

سام خانیانی، ع. و محمدی، ع. (۱۴۰۱). مقایسه داده‌های بازتحلیل ERA5-Land با مشاهدات زمینی در ایران. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۶ (۱)، ۲۱۲-۱۹۵.

مجرد، ف.؛ معصوم پور، ج. و رستمی، ط. (۱۳۹۴). تحلیل آماری - همدیدی موج‌های گرمایی بالای ۴۰ درجه سلسیوس در غرب ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳ (۱)، ۵۸-۴۱.

عباسی، ف.؛ کوهی، م.؛ جوانشیری، ز.؛ ملبوسی، ش.؛ حبیبی نوخندان، م.؛ بابائیان، ا. و فلامرزی، ی. (۱۳۹۹). آشکارسازی و به روز رسانی تغییر اقلیم در ایستگاه‌های کشور (دوره ۲۰۱۷-۱۹۵۸). *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۳۹۹ (۴۲)، ۱۵۳-۱۳۷.

با این مخاطره و اتخاذ راهکارهای سازگاری در شرایط تغییر اقلیم مد نظر قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزی شهری، سامانه‌های هشدار سریع و استراتژی‌های مقابله با تنش‌های گرمای به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیرتر تقویت شوند.

مراجع

اسمعیل نژاد، م.؛ خسروی، م.؛ علیجانی، ب. و مسعودیان، ا. (۱۳۹۲). شناسایی موج‌های گرمایی ایران. *جغرافیا و توسعه*، ۱۱ (۳۳)، ۵۴-۳۹.

اعتمادیان، ا.؛ دوستان، ر. و زرین، آ. (۱۳۹۹). نواحی گرمایی ایران. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۱ (۴۲)، ۳۰-۱۷.

بهاروندی، ن.؛ مجرد، ف. و معصوم پور، ج. (۱۳۹۹). شناسایی موج‌های گرمایی و تحلیل تغییرات زمانی- مکانی آنها در ایران. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)*، ۲۰ (۵۹)، ۳۹-۵۸.

بیرانوند، آ.؛ دوستکامیان، م.؛ حیدری، س. و گودرزی، م. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات زمانی- مکانی نمایه حدی موج‌های گرمایشی و سرمایشی در ایران. *مجله آمایش*

Adigun, P., Abah, E. O., & Ajileye, O. D. (2024). Intensifying human-driven heatwaves characteristics and heat related mortality over Africa. *Environmental Research: Climate*, 3(1), 015007.

Arce, C., & Uribe, E. (2015). Managing Vulnerability and Boosting Productivity in Agriculture through Weather Risk Mapping.

Becker, F. N., Fink, A. H., Bissolli, P., & Pinto, J. G. (2022). Towards a more comprehensive assessment of the intensity of historical European heat waves (1979–2019). *Atmospheric Science Letters*, 23(11), e1120.

Ceccherini, G., Russo, S., Ameztoy, I., Marchese, A. F., & Carmona-Moreno, C. (2017). Heat waves in Africa 1981–2015, observations and reanalysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(1), 115-125.

Chen, Y., Sharma, S., Zhou, X., Yang, K., Li, X., Niu, X., & Khadka, N. (2021). Spatial performance of multiple reanalysis precipitation datasets on the southern slope of central Himalaya: *Atmospheric Research*, 250, 105365, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105365>

Christidis, N., Mitchell, D., & Stott, P. A. (2023). Rapidly increasing likelihood of exceeding 50° C in parts of the Mediterranean and the Middle East due to human influence. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 45.

Cimolai, C., & Aguilar, E. (2024). Assessing Argentina's heatwave dynamics (1950–2022): a comprehensive analysis of temporal and spatial variability using ERA5-LAND. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(6), 4925-4940.

Çulpan, H. C., Şahin, Ü., & Can, G. (2022). A step to develop heat-health action plan: assessing heat waves' impacts on mortality. *Atmosphere*, 13(12), 2126.

de Araújo, G. R. G., Frassoni, A., Sapucci, L. F., Bitencourt, D., & de Brito Neto, F. A. (2022). Climatology of heatwaves in South America identified through ERA5 reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 42(16), 9430-9448.

Driouech, F., ElRhaz, K., Moufouma-Okia, W., Arjdal, K., & Balhane, S. (2020). Assessing future changes of climate extreme events in the CORDEX-MENA region using regional

- climate model ALADIN-climate. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 477-492.
- Espinosa, L. A., Portela, M. M., & Matos, J. P. (2023). ERA5-Land Reanalysis Temperature Data Addressing Heatwaves in Portugal. In *International Congress on Engineering and Sustainability in the XXI Century* (pp. 81-94). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Fischer, E. M., & S. Schär, 2010: Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nat. Geosci.*, 3, 398-403.
- Labban, A., Morsy, M., Abdeldym, A., Abdel Basset, H., & Al-Mutairi, M. (2023). Assessment of changes in heatwave aspects over Saudi Arabia during the last four decades. *Atmosphere*, 14(11), 1667.
- Lagouvardos, K., Dafis, S., Kotroni, V., Kyros, G., & Giannaros, C. (2024). Exploring Recent (1991-2020) Trends of Essential Climate Variables in Greece. *Atmosphere*, 15(9), 1104. <https://doi.org/10.3390/atmos15091104>
- Miller, S., Chua, K., Coggins, J., & Mohtadi, H. (2021). Heat waves, climate change, and economic output. *Journal of the European Economic Association*, 19(5), 2658-2694.
- Morsy, M., & El Afandi, G. (2021). Decadal changes of heatwave aspects and heat index over Egypt. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1), 71-90.
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., & Martens, B. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 13(9), 4349-4383.
- Nairn, J., Fawcett, R., & Ray, D. (2009). Defining and predicting excessive heat events, a national system. In *Modelling and understanding high impact weather: extended abstracts of the third CAWCR Modelling Workshop*, 30, 83-86.
- Nairn, J., Ostendorf, B., & Bi, P. (2018). Performance of excess heat factor severity as a global heatwave health impact index. *International journal of environmental research and public health*, 15(11), 2494.
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of climate*, 26(13), 4500-4517.
- PwC. (2011). Protecting human health and safety during severe and extreme heat events, a national framework. Report for the Commonwealth Government, PricewaterhouseCoopers Australia, 84 pp. [Available online at <http://www.pwc.com.au/industry/government/publications/extreme-heat-events.htm>.]
- Cueto, R. O. G., Martínez, A. T., & Ostos, E. J. (2010). Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of Mexico: current trends and in climate change scenarios. *International journal of biometeorology*, 54(4), 335-345.
- Ragatoa, D. S., Ogunjobi, K. O., Klutse, N. A. B., Okhimamhe, A. A., & Eichie, J. O. (2019). A change comparison of heat wave aspects in climatic zones of Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-16.
- Russo, S., Marchese, A. F., Sillmann, J., & Imme, G., (2016). When Will Unusual Heat Waves Become Normal in A Warming Africa?. *Environmental Research Letters*, 11, 1-10.
- Saxena, S., Agrawal, S., & Basu, D. (2024). EHF based Heatwave Identification and its Impact on Urban Heat Island Intensity: A Case Study of an Indian City. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 377-382.
- Tarek, M., Brisette, F. P., & Arsenaault, R. (2020). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2527-2544.
- Varghese, B. M., Hansen, A., Nitschke, M., Nairn, J., Hanson-Easey, S., Bi, P., & Pisaniello, D. (2019). Heatwave and work-related injuries and illnesses in Adelaide, Australia: a case-crossover analysis using the Excess Heat Factor (EHF) as a universal heatwave index. *International archives of occupational and environmental health*, 92, 263-272.
- Wang, Y. R., Hessen, D. O., Samset, B. H., & Stordal, F. (2022). Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113181>.
- Wang, Y., Sun, W., Huai, B., Wang, Y., Ji, K., Yang, X., Du, W., Qin, X., & Wang, L. (2024). Comparison and evaluation of the performance of reanalysis datasets for compound extreme temperature and precipitation events in the Qilian Mountains. *Atmospheric Research*, 304, 107375. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107375>
- Wedler, M., Pinto, J. G., & Hochman, A. (2023). More frequent, persistent, and deadly heat waves in the 21st century over the Eastern Mediterranean. *Science of the Total Environment*, 870, 161883.
- Xue, C., Wu, H., & Jiang, X. (2019.), Temporal and spatial change monitoring of drought grade based on ERA5 analysis data and BFAST method in the belt and road area during 1989-2017: Advances in Meteorology, <https://doi.org/10.1155/2019/4053718>.
- Yilmaz, M. (2023). Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-

- Land. *Science of The Total Environment*, 856(2), 159182.
- Yin, C., Yang, Y., Chen, X., Yue, X., Liu, Y., & Xin, Y. (2022). Changes in global heat waves and its socioeconomic exposure in a warmer future. *Climate Risk Management*, 38, 100459.
- Zhao, P., He, Z., Ma, D., & Wang, W. (2023). Evaluation of ERA5-Land reanalysis datasets for extreme temperatures in the Qilian Mountains of China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1135895.
- Zittis G, Almazroui M, Alpert P, Ciais P, Cramer W, Dahdal Y, Fnais M, Francis D, Hadjinicolaou P, Howari F, & Jrrar A. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of geophysics*, 60(3), e2021RG000762.