

Entropy-Based Analysis of Summer Heatwave Intensity Percentiles Using Parametric Functions across Iran

Shokouhi, M.¹  | Mesrizadeh, M.¹  | Asadi Oskoue, E.¹ 

1. Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: mojtabashokohi@gmail.com

(Received: 20 June 2025, Revised: 8 Oct 2025, Accepted: 18 Oct 2025, Published online: 16 Dec 2025)

Summery

Global warming has contributed to an increase in both the intensity and frequency of extreme climatic events, including heat waves. The impacts of heatwaves are influenced by various parameters such as duration, frequency, intensity, magnitude and the spatial extent of the affected area. In this study, a nonlinear index was developed to quantify heatwave intensity, based on the probability distribution of daily temperatures in each region. The proposed Heatwave Intensity Index (HII) is derived using the concept of entropy and is proportional to the deviation from a temperature threshold. This threshold is determined from a parametric probability distribution function fitted to daily average temperature data for each region of Iran during the period 2011–2021. The index was evaluated in terms of intensity, duration, and spatial extent.

Daily average temperature data at a 2-meter height were employed over the entire area of Iran, with each grid cell treated as an individual study unit. A heatwave event was defined as a period of at least three consecutive days with daily average temperatures exceeding the 95th percentile of the warm-season (June–September) temperature distribution. The 95th percentile threshold for each region was derived from the best-fitting continuous parametric probability distribution function. Four distribution types were tested: normal, log-normal, Weibull, and gamma, and the one that best represented the observed data in each selected region.

The Weibull distribution provided the best fit for more than 85% of Iran's territory. In contrast, less than 10% of the areas, primarily along the northern and southern coasts, as well as Ardabil and large parts of East Azerbaijan provinces, were best described by normal or log-normal distributions. The highest temperature thresholds, exceeding 43°C, were observed in southwestern Iran, particularly in Khuzestan, southern Ilam, and central regions of the Lut Desert. Given the geographical diversity and varying climatic conditions across Iran, applying a single, fixed temperature threshold for the entire country is not appropriate. Instead, region-specific thresholds should be used to accurately identify heatwave events. In areas with historically low heatwave frequency, return periods are estimated to range from 4 to 5 years, whereas regions with higher frequencies may experience heatwaves at least three times every two years. Except for southeastern Iran, the highest frequency and broadest spatial extent of heatwaves were observed in July. Except for one central region, the average heatwave duration in most areas did not exceed four days. In the years 2019 and 2021, the intensity and frequency of heatwave events were higher compared to other years. The results show that during the heatwave days in 2021, the heatwaves were more intense, and a larger area was affected by it than that in 2019. It can be said that, given the rising temperature trend in the later years of the study period, the magnitude of heatwave intensity has also increased. The geometric mean of the HII varied significantly across Iran, with the highest values exceeding 80 units recorded along the southern coastline. In recent years, both the spatial extent and the intensity of heatwave events have increased. The most expansive heatwaves primarily affected the central and eastern border regions of the country.

Keywords: Geometric mean, Global warming, Heatwave Intensity Index, Weibull distribution function.

Cite this article: Shokouhi, M., Mesrizadeh, M., & Asadi Oskoue, E. (2025). Entropy-Based Analysis of Summer Heatwave Intensity Percentiles Using Parametric Functions across Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(3), 635-647. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396221.1007697>

E-mail: (1) mehdi.mesrizadeh1983@yahoo.com | e.asadi.o@gmail.com



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396221.1007697>

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

تحلیل آنتروپی شدت صدکی امواج گرمایی تابستانه با استفاده از توابع پارامتریک در ایران

مجتبی شکوهی^۱ ✉ | مهدی مصری زاده^۱ | ابراهیم اسعدی اسکویی^۱

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

رایانامه نویسنده مسئول: mojtabashokohi@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۳/۳۰، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۷/۲۶، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۹/۲۵)

چکیده

گرمایش زمین، سبب افزایش شدت و فراوانی پدیده‌های حدی از جمله امواج گرمایی شده است. میزان تأثیرات امواج گرمایی وابسته به پارامترهای تداوم، فراوانی، شدت و وسعت منطقه درگیر پدیده است. در این پژوهش شاخص شدت موج گرمایی با استفاده از مفهوم آنتروپی، متناسب با انحراف از آستانه دمایی و احتمال وقوع آن در هر منطقه از ایران تعریف شد. برای محاسبه این شاخص، از توابع پارامتریک توزیع احتمال دمای متوسط روزانه، در ماه‌های گرم سال متناسب با هر منطقه استفاده شد. از یک شبکه منظم برای متوسط دمای طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۲۱ استفاده شد. توابع توزیع احتمال مختلفی مورد آزمون قرار گرفت و نتایج نشان داد در اغلب مناطق ایران تابع توزیع احتمال ویبول مناسب است. احتمال وقوع این پدیده در اغلب مناطق ایران یکبار در سال است. به غیر از مناطق جنوب شرقی ایران، بیشترین فراوانی و گسترده‌ترین امواج گرمایی در ماه جولای رخ داده است. به غیر از یک ناحیه مرکزی، در اکثر نواحی ایران میانگین تداوم امواج گرمایی حداکثر ۴ روز است. میانگین هندسی اندازه شدت موج گرمایی نشان داد، مقدار شدت در مناطق مختلف کشور متفاوت و بیشترین مقادیر آن در سواحل جنوبی به بیش از ۸۰ درصد می‌رسد. وسعت مناطق درگیر رخداد پدیده موج گرمایی در سال‌های اخیر علاوه بر افزایش، با شدت بزرگ‌تری همراه بوده است. بیشترین وسعت مناطق در برگیرنده پدیده‌های امواج گرمایی، اکثراً مناطق مرکزی و نوار شرقی کشور را در برمی‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: تابع توزیع ویبول، تداوم موج گرمایی، گرمایش زمین، میانگین هندسی.

۱. مقدمه

سازمان جهانی بهداشت (World Health Organization) (WHO, 2023) در گزارش خود اعلام کرده است که امواج گرمایی و شرایط گرمایی مفرط به دلیل تغییرات اقلیمی در حال افزایش هستند و این افزایش در فراوانی، مدت‌زمان، شدت و وسعت این پدیده‌ها مشاهده می‌شود. به گزارش هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change) افزایش دمای ناشی از گرمایش جهانی نسبت به دوره پیشا صنعتی، بیش از یک درجه سلسیوس بوده است (لی و همکاران، ۲۰۲۳). افزایش فراوانی، شدت و تأثیرات مخرب پدیده موج گرمایی در جوامع بشری و محیط‌زیست دلیلی بر تمرکز مطالعاتی بر این پدیده بوده است (رویه، ۲۰۲۰؛ لیز و همکاران، ۲۰۱۷). گزارش‌های اخیر سازمان هواشناسی جهانی (WMO World Meteorological Organization) نشان‌دهنده افزایش نرخ دمای جهانی بیش از نیم درجه سلسیوس در هر دهه برای منطقه خاورمیانه می‌باشد و بیشترین تبعات منفی این افزایش دما بر مناطق سوریه، عراق و ایران خواهد بود. چنانچه ناهنجاری‌های دمایی در منطقه وسیعی برای روزهای متوالی رخ دهند به‌عنوان موج گرمایی شناخته می‌شوند (IPCC, 2023). امواج گرمایی معمولاً با چهار مشخصه اصلی: (۱) طول دوره (۲) فراوانی رخداد (۳) شدت و (۴) وسعت منطقه درگیر بیان می‌شوند (رایی و همکاران، ۲۰۱۸). امواج گرمایی مانند بسیاری از پدیده‌های حاصل از تغییرات اقلیمی، اثرات پیچیده‌ای بر اقتصاد و سلامت انسان دارند و سبب کاهش بهره‌وری نیروی کار، اخلاف در فرایندهای کشاورزی و صنعتی می‌شوند (دوستان و همکاران، ۱۳۹۹؛ لگاریا-لئون

سازمان جهانی بهداشت (World Health Organization) (WHO, 2023) در گزارش خود اعلام کرده است که امواج گرمایی و شرایط گرمایی مفرط به دلیل تغییرات اقلیمی در حال افزایش هستند و این افزایش در فراوانی، مدت‌زمان، شدت و وسعت این پدیده‌ها مشاهده می‌شود. به گزارش هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change) افزایش دمای ناشی از گرمایش جهانی نسبت به دوره پیشا صنعتی، بیش از یک درجه سلسیوس بوده است (لی و همکاران، ۲۰۲۳). افزایش فراوانی، شدت و تأثیرات مخرب پدیده موج گرمایی در جوامع بشری و محیط‌زیست دلیلی بر تمرکز مطالعاتی بر این پدیده بوده است (رویه، ۲۰۲۰؛ لیز و همکاران، ۲۰۱۷). گزارش‌های اخیر سازمان هواشناسی جهانی (WMO World Meteorological Organization) نشان‌دهنده افزایش نرخ دمای جهانی بیش از نیم درجه سلسیوس در هر دهه برای منطقه خاورمیانه می‌باشد و بیشترین تبعات منفی این افزایش دما بر مناطق سوریه، عراق و ایران خواهد بود. چنانچه ناهنجاری‌های دمایی در منطقه وسیعی برای روزهای متوالی رخ دهند به‌عنوان موج گرمایی شناخته می‌شوند (IPCC, 2023). امواج گرمایی معمولاً با چهار مشخصه اصلی: (۱) طول دوره (۲) فراوانی رخداد (۳) شدت و (۴) وسعت منطقه درگیر بیان می‌شوند (رایی و همکاران، ۲۰۱۸). امواج گرمایی مانند بسیاری از پدیده‌های حاصل از تغییرات اقلیمی، اثرات پیچیده‌ای بر اقتصاد و سلامت انسان دارند و سبب کاهش بهره‌وری نیروی کار، اخلاف در فرایندهای کشاورزی و صنعتی می‌شوند (دوستان و همکاران، ۱۳۹۹؛ لگاریا-لئون

استناد: شکوهی، مجتبی؛ مصری زاده، مهدی و اسعدی اسکویی، ابراهیم (۱۴۰۴). تحلیل آنتروپی شدت صدکی امواج گرمایی تابستانه با استفاده از توابع پارامتریک در ایران. مجله فیزیک

زمین و فضا، ۵۱(۳)، ۶۳۵-۶۴۷. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396221.1007697>

رایانامه: (۱) asadi.o@gmail.com | mehdi.mesrizadeh1983@yahoo.com



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396221.1007697>

سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۹ نسبت به دوره ۱۹۸۰-۱۹۹۹ افزایش یافته است (معمولاً ۱/۵ تا ۲ برابر). به‌طور کلی دو دسته شاخص جهت شناسایی موج گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دسته اول شامل شاخص‌هایی است که تبدلات گرمایی بدن انسان با محیط پیرامونش را در نظر می‌گیرند، مانند شاخص دمای مبادله‌ای فیزیولوژیک PET (Physiologic Equivalent Temperature) (روشن و همکاران، ۲۰۱۸)، شاخص جهانی دمای اقلیم (Universal Thermal Climate Index) (بلازیسیچ و همکاران، ۲۰۱۳) و شاخص موج گرمایی (هونگ و همکاران، ۲۰۲۲) را می‌توان نام برد. دسته دوم شاخص‌هایی هستند که در آنها تحلیل‌های آماری مکان-زمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این گونه شاخص‌ها معمولاً از پارامترهای دمایی، رطوبت نسبی و سرعت وزش باد در بیان مشخصه‌های موج گرمایی استفاده می‌شود. از جمله شاخص‌های دسته دوم می‌توان به شاخص‌های آستانه‌های مطلق یا نسبی (صدکی) دمای ظاهری (مزدیستانی و همکاران، ۲۰۱۹)، شاخص رطوبتی (Humidex) (اسپانگلر و همکاران، ۲۰۲۲)، شاخص گرمایی (Heat index) (آواثی و همکاران، ۲۰۲۲)، شاخص طول موج گرمایی HWDI (Heat Wave Duration Index) (رادوکویچ و کوریچ، ۲۰۱۲) و شاخص روزانه بزرگی موج گرما HWMID (Heat Wave Measure Index) (بهاروندی و همکاران، ۱۳۹۹) و اخیراً شاخص فاکتور افزونگی گرمایی EHF (Excess, Heat Factor) (دiaz پوزو و همکاران، ۲۰۲۳) اشاره کرد.

روشن و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده سه آستانه متفاوت و شاخص PET امواج گرمایی و سرمایی ایران را بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ در ۱۵۵ نقطه ایستگاهی مورد تحلیل قرار دادند. نتایج آنها نشان داد امواج گرمایی در سراسر کشور رخ می‌دهند. آنها بیان کردند اگرچه بیشترین آستانه‌های وقوع موج گرما در ساحل جنوبی ایران دیده شده است، اما بیشترین فراوانی یا تعداد وقوع امواج گرما در مناطق مرزی شرقی ایران بوده است. دارند (۱۳۹۳) با استفاده از داده‌های روزانه دمای بیشینه و کمینه که با درونیابی به‌صورت شبکه‌ای تبدیل شده بودند با بهره‌گیری از شاخص‌های صدکی امواج گرمایی در

و همکاران، ۲۰۲۱). شدت امواج گرمایی نقش نسبتاً مهم‌تری به نسبت تداوم این پدیده در وقوع مرگ‌ومیر دارند (ژوو و همکاران، ۲۰۱۶).

به‌دلیل تأثیرات پیچیده، ناشناخته و متفاوت پدیده‌های جوی از جمله امواج گرمایی بر سلامت انسان و دیگر فرایندهای زیست‌محیطی، تعریف جهانی واحد و مشترکی برای بیان شاخص موج گرمایی (Heat Wave Index) وجود نداشته و از این رو شاخص‌های مختلفی برای توصیف موج گرمایی در منابع مختلف ذکر می‌شوند (دiaz پوزو و همکاران، ۲۰۲۳). محمد و ونگ (۲۰۲۴) شش شاخص مختلف موج گرمایی که مبتنی بر ترکیب دما و رطوبت بودند را در شناسایی شرایط مخاطره‌آمیز گرمایی برای فعالیت‌های انسانی مورد مقایسه قرار دادند. آنها با استفاده از داده‌های دمای هوا و رطوبت نسبی شاخص‌هایی مانند شاخص گرمای محسوس (Heat Index) و سایر شاخص‌های ترکیبی را محاسبه کنند. نتایج آنها نشان داد شاخص‌هایی که ترکیبی از دما و رطوبت را در نظر می‌گیرند در برخی شرایط بهتر از شاخص‌های صرفاً دما می‌توانند شرایط مخاطره‌آمیز برای سلامتی انسان را تشخیص دهند. سریدوی و همکاران (۲۰۲۴) امکان‌سنجی و دقت استفاده از داده‌های RTMA (Regional Temperature Mesoscale Analysis) با وضوح ۲/۵ کیلومتر را برای تشخیص موج گرما در هند مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از ترکیب داده‌های دمایی و رطوبت منطقه‌ای RTMA پدیده‌های موج گرمایی را شناسایی کردند. نتایج آنها نشان داد استفاده از داده‌های با وضوح مکانی و زمانی بالا می‌تواند در شناسایی سریع موج گرما کمک کند و امکان واکنش زود هنگام را فراهم آورد. اسکینر و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از داده‌های شبکه‌ای روزانه بیشینه و کمینه دما در سطح جهان پدیده‌های موج گرمایی را مورد تحلیل قرار دادند. آنها تغییرات زمانی در اندازه گستره مکانی موج گرما را بررسی کردند. آنها با استفاده از تعریف یک آستانه صدکی برای داده‌های دمای، امواج گرمایی را شناسایی کردند. نتایج آنها نشان دادند که متوسط اندازه موج گرمایی در اغلب مناطق خشکی در دهه‌های اخیر افزایش یافته است به‌طوری‌که گستره مکانی امواج گرمایی در اغلب مناطق خشکی در

ایران را تحلیل کرد. نتایج نشان داد فراوانی، مدت و شدت امواج گرمایی در بسیاری از مناطق کشور افزایش داشته است، به طوری که این افزایش‌ها در مناطق کم‌ارتفاع نسبت به ارتفاعات برجسته‌تر بوده است. بهاروندی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از دمای پیشینه روزانه ایستگاه‌های کشور با بهره‌گیری از شاخص‌های صدکی امواج گرمایی در ایران را تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد بیشترین تعداد امواج گرما در منطقه غرب رشته کوه زاگرس و پس از آن دشت کویر رخ داده است و بیشینه بزرگی امواج گرما در مناطق جنوب شرقی و مرکزی کشور رخ داده است. دوستان و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده داده‌های دمای حداکثر روزانه ۴۹ ایستگاه و معیار صدک نود و پنجم و تداوم سه روز و بیشتر امواج گرمایی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد مناطقی با ارتفاع متوسط بیش از ۱۰۰۰ متر (کوهستانی و کوهپایه‌ای) در امتداد رشته کوه‌های البرز و زاگرس، بیشترین فراوانی وقوع موج گرما را دارند. در مقابل، نواحی ساحلی (شمال و جنوب ایران) که ارتفاع کمتری دارند (کمتر از ۵۰۰ متر)، کمترین تعداد امواج گرما را تجربه می‌کنند.

شاخص‌های اندازه‌گیری میزان شدت موج گرمایی که به آنها اشاره شد، نرخ انحراف از آستانه دمایی متناسب با فاصله دمایی با آستانه و احتمال وقوع آن نیست. انتظار می‌رود با افزایش انحراف از دمای آستانه و نزدیک شدن به دماهای حدی بسیار بالا، میزان شدت موج گرمایی افزایش غیرخطی داشته باشد. به عبارتی انتظار می‌رود میزان شدت موج گرمایی برای دماهای که احتمال وقوع آن بسیار کم است (دماهای بسیار بالا) نسبت به دماهایی که احتمال وقوع آن بیشتر است بسیار بالاتر باشد. همچنین نرخ تغییرات این شاخص‌ها، هرگز بزرگی نسبی پدیده‌های رخ داده در هر منطقه را نشان نمی‌دهند. به عنوان مثال اگر در دو منطقه یک پدیده موج گرمایی با تداوم و انحراف دمایی یکسان رخ دهد، شدت موج گرمایی برای هر دو منطقه یکسان بیان می‌شود، اما در واقعیت به دلیل توزیع احتمال دمایی متفاوت هر منطقه، انتظار می‌رود تأثیر و میزان شدت موج گرمایی در هر منطقه‌ای متفاوت باشد. می‌توان گفت در مطالعات انجام شده پیشین در کشور، شدت موج گرمایی متناسب با انحراف از آستانه

دمایی و احتمال وقوع آن در هر منطقه نبوده است. علاوه بر این در مطالعات پیشین سه ویژگی شدت، مدت (ماندگاری) و فراوانی امواج گرمایی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند و گستره مکانی کمتر مورد تحلیل قرار گرفته است. از این رو در این مطالعه برای بیان مقدار شدت موج گرمایی، شاخصی غیر خطی بر مبنای احتمال وقوع دماهای رخ داده در هر منطقه طی پدیده موج گرمایی ارائه می‌شود. در این پژوهش شاخص شدت موج گرمایی با استفاده از مفهوم آنتروپی (شانون، ۱۹۴۸)، متناسب با انحراف از آستانه دمایی بر اساس تابع توزیع احتمالی پارامتریک داده‌های روزانه دمای متوسط در هر منطقه از ایران تعریف و از لحاظ فراوانی، شدت، مدت و گستره مکانی تحلیل شد.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور شناسایی و تحلیل امواج گرمایی در ایران از یک شبکه منظم برای متوسط دمای روزانه (ارتفاع ۲ متری) بر روی ایران استفاده شد. این شبکه منظم با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی توسط اسعدی اسکویی و همکاران (۲۰۲۴) توسعه داده شد. در این الگوریتم با استفاده از داده‌های مشاهده شده دمایی روزانه، نرخ افتاهنگ دما که بر اساس داده‌های ماهواره‌ای MODIS محاسبه شده و داده‌های روزانه دمایی ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)، MERRA2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) و CFS (Forecast System) که ریز مقیاس شده با بهره‌گیری از الگوریتم یادگیری ماشین، شبکه یک کیلومتری دمای روزانه بر روی ایران را برای دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۱ ایجاد کردند.

نتایج اسعدی اسکویی و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد میانگین RMSE در سراسر کشور برای شبکه داده‌های دمای متوسط روزانه تقریباً $1/6^{\circ}\text{C}$ است، این در حالی است که متوسط RMSE در مناطق مرکزی و شرقی ایران که شامل: کویر مرکزی، خراسان جنوبی، یزد و کرمان، سواحل جنوبی (به ویژه بوشهر و هرمزگان) می‌باشد کمتر از $1/5^{\circ}\text{C}$ است. این نتایج حاکی از دقت بسیار خوب شبکه داده بوده است. در این مطالعه هر یاخته از شبکه از سال ۲۰۱۱-۲۰۲۱ برای

سلامت انسان داشته باشد (ژوو و همکاران، ۲۰۱۶).
برای مقایسه بین شدت پدیده‌های امواج گرمایی، شاخص اندازه شدت موج گرمایی صدکی استاندارد شده (HWPMIs) به صورت زیر تعریف شد:

$$HWPMIs = 100 \times \left(1 - \frac{20}{f}\right) \quad (2)$$

که مقدار f از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$f \ln f = \frac{1}{d} HWPMI \quad (3)$$

که در آن d تداوم زمانی پدیده موج گرمایی (برحسب روز) است. هر چه اندازه صدکی استاندارد شده شدت موج گرمایی بزرگ‌تر باشد، شدت موج گرمایی نیز بیشتر خواهد بود. به منظور تحلیل‌های آماری پدیده‌های موج گرمایی از پارامتر میانگین هندسی اندازه شدت موج گرمایی صدکی استاندارد شده استفاده شد. میانگین هندسی اندازه شدت موج گرمایی صدکی استاندارد شده $\bar{h}$ ، n پدیده موج گرمایی به صورت زیر تعریف شد:

$$\bar{h} = \sqrt[n]{HWPMIs_1 \times HWPMIs_2 \times \dots \times HWPMIs_n} \quad (4)$$

همان‌طور که بیان شد بر اساس تعریف موج گرمایی، برای شناسایی روزهایی که ناهنجاری دمایی رخ داده و پدیده موج گرمایی آغاز شده نیاز به محاسبه آستانه دمایی بر اساس تابع توزیع احتمال دمایی در هر منطقه است. اما استفاده از تابع توزیع احتمال تجربی در هر منطقه ممکن است باعث شود که حداقل یکی از مشاهدات برابر صدک ۱۰۰-ام شده و باعث ایجاد مقدار تعریف نشده در رابطه (۱) شود. برای جلوگیری از این مشکل، از توابع توزیع احتمالاتی پیوسته پارامتریک که بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی در هر منطقه داشته باشند استفاده شد. برای این منظور چهار دسته تابع توزیع احتمال نرمال، لوگ نرمال، ویبول و گاما جهت توابع توزیع احتمالاتی داده‌های دمایی روزانه در فصول گرم (ماه‌های جون الی سپتامبر) در هر منطقه آزمون و بهترین تابع برازش داده شده انتخاب شد. از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov test) (ماسی، ۱۹۵۱) برای رد یا قبول هر یک از توابع توزیع احتمالاتی در هر منطقه استفاده شد. برای انتخاب بهترین برازش بر داده‌های دمایی در هر منطقه از معیار آکائیکه (Akaike information criterion)

ماه‌های گرم سال (جون الی سپتامبر) به عنوان یک منطقه در نظر گرفته شد. به عبارتی هر یاخته یک کیلومتر در یک کیلومتر به عنوان یک منطقه مطالعاتی لحاظ و تمام تحلیل‌های مربوط به امواج گرمایی برای آن صورت پذیرفت.

در این مطالعه امواج گرمایی تابستانه به صورت تداوم حداقل سه روز، با دمای بالاتر از آستانه صدک ۹۵-ام میانگین دمای روزانه در ماه‌های گرم سال (جون الی سپتامبر) برای دوره مورد مطالعه (۲۰۱۱-۲۰۲۱) به عنوان یک پدیده موج گرمایی تعریف شد. موج گرمایی یک پدیده حدی است که آستانه دمایی برای شناسایی آن در هر منطقه (هر یاخته از شبکه دمایی)، با توجه به توزیع احتمالی دمای روزانه در آن منطقه به دست می‌آید. لذا برای هر منطقه توزیع احتمالی مناسب با داده‌های دمای متوسط روزانه در ماه‌های گرم سال (جون الی سپتامبر) در دوره ۲۰۱۱ الی ۲۰۲۱ کاوش شد. به عبارتی آستانه صدک ۹۵-ام میانگین دمای روزانه در ماه‌های گرم سال با استفاده از بهترین برازش بر توابع توزیع احتمال پارامتریک در هر منطقه به دست آمد. با استفاده از این تعریف یک شاخص اندازه‌گیری موج گرمایی توسعه داده و بزرگی بین امواج گرمایی مقایسه شد.

برای مقایسه بین بزرگی شدت امواج گرمایی، اندازه صدکی شدت موج گرمایی (HWPMI Heat Wave Percentile Measurement Index) به صورت زیر توسعه داده شد. فرض کنید موج گرمایی با تداوم زمانی d روز با دنباله میانگین دمای روزانه $T = \{T_1, T_2, \dots, T_d\}$ رخ دهد. در این صورت اندازه صدکی شدت موج گرمایی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$HWPMI = - \sum_{i=1}^d \frac{\ln(1-P(T_i))}{1-P(T_i)} \quad (1)$$

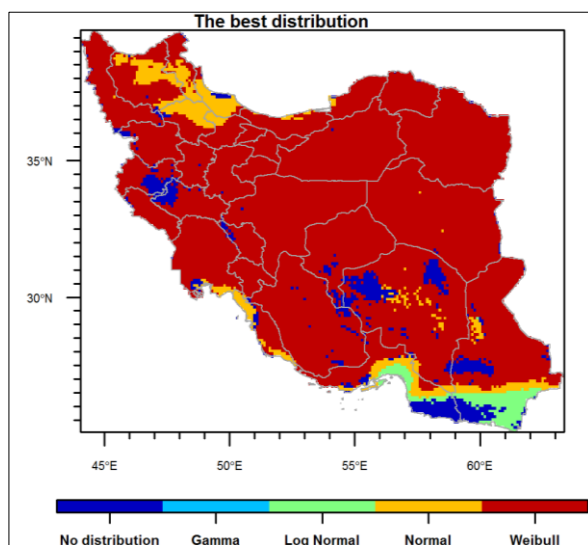
که در آن T_i دمای روز i ام طی دوره موج گرمایی و P تابع توزیع احتمال پارامتریک دمای روزانه است. هرچقدر اندازه صدکی شدت موج گرمایی (HWPMI) برای یک پدیده بزرگ‌تر باشد به معنی تأثیرات شدید و احتمال وقوع نادرتر است. اگر دو موج گرمایی با شدت‌های متفاوت به وقوع بپیوندند انتظار می‌رود موج گرمایی با اندازه شدت بزرگ‌تر، نسبت به موج گرمایی با شدت کمتر اثرات مهلک‌تری بر

(آکائیکه، ۲۰۱۱) استفاده شد. پس از انتخاب بهترین تابع توزیع احتمالاتی در هر منطقه، پارامترهای آن با استفاده از روش حداکثر درست نمایی (Maximum likelihood) (پن و همکاران، ۲۰۰۲) برآورد شد. هرگاه با استفاده از فرایند مذکور در یک منطقه مدل احتمالی انتخاب نشود با در نظر گرفتن توزیع احتمال با کمترین آکائیکه در آن منطقه به شناسایی امواج گرمایی طی دوره مورد مطالعه پرداخته شد.

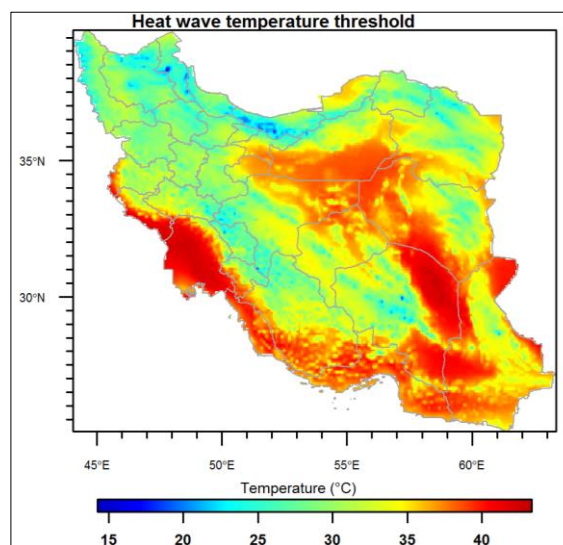
۳. بحث و نتایج

بهترین تابع توزیع احتمال برازش داده شده به داده‌های متوسط روزانه دمایی در فصول گرم برای هر منطقه (هر یاخته از شبکه دمایی) در شکل ۱ نشان داده شده است. بهترین برازش بر داده‌های دمایی برای بیش از ۸۵ درصد از پهنه جغرافیایی ایران تابع توزیع ویبول می‌باشد. کمتر از ۱۰ درصد مناطق که عمدتاً شامل سواحل شمالی و جنوبی ایران و استان‌های اردبیل، قسمت عمده آذربایجان شرقی دارای توزیع احتمال نرمال و لوگ نرمال بوده‌اند (شکل ۱). در امتداد سواحل مکران و چابهار تا کوه‌پایه‌های مناطق جنوب شرقی هر چه از سواحل به سمت کوهپایه‌ها دور شویم توزیع احتمال از لوگ نرمال به نرمال تغییر می‌کند. آستانه‌های دمایی (صدک ۹۵-

ام) شروع موج گرمایی هر منطقه با توجه به تابع توزیع احتمال آن نشان داده شده است (شکل ۱). ملاحظه می‌شود، سواحل جنوبی کشور و کویرهای مرکزی فلات ایران دارای آستانه دمایی بیش از ۴۰ درجه سلسیوس هستند. بیشترین آستانه دمایی تا بیشتر از ۴۳ درجه سلسیوس در نواحی جنوب غربی ایران شامل قسمت عمده استان خوزستان، جنوب ایلام و نواحی مرکزی دشت لوت می‌باشد (شکل ۱). ارتفاعات مرکزی البرز، قسمت‌هایی از اردبیل و آذربایجان شرقی با کمترین آستانه دمایی تا کمتر از حدود ۲۰ درجه سلسیوس و کمتر هستند (شکل ۱). برای سایر نقاط کشور محدوده آستانه دمایی در محدوده ۳۰ الی ۳۵ درجه قرار می‌گیرد (شکل ۱). می‌توان گفت با توجه به گستره ایران و وجود اقلیم‌ها و شرایط متفاوت برای هر منطقه به کاربردن یک آستانه دمایی ثابت چندان معقول نمی‌باشد و لازم است برای شناسایی موج گرمایی هر منطقه بر اساس آستانه دمایی مختص به خود تحلیل شود. یک توده هوایی گرم ممکن است تأثیرات متفاوتی را از لحاظ ایجاد شرایط موج گرمایی در مناطق مجاور هم ایجاد کند. این موضوع در توزیع آستانه دمایی کشور مشهود است به طور مثال در استان کرمان طیف متنوعی از آستانه‌های دمایی در مجاورت هم دیده می‌شود.

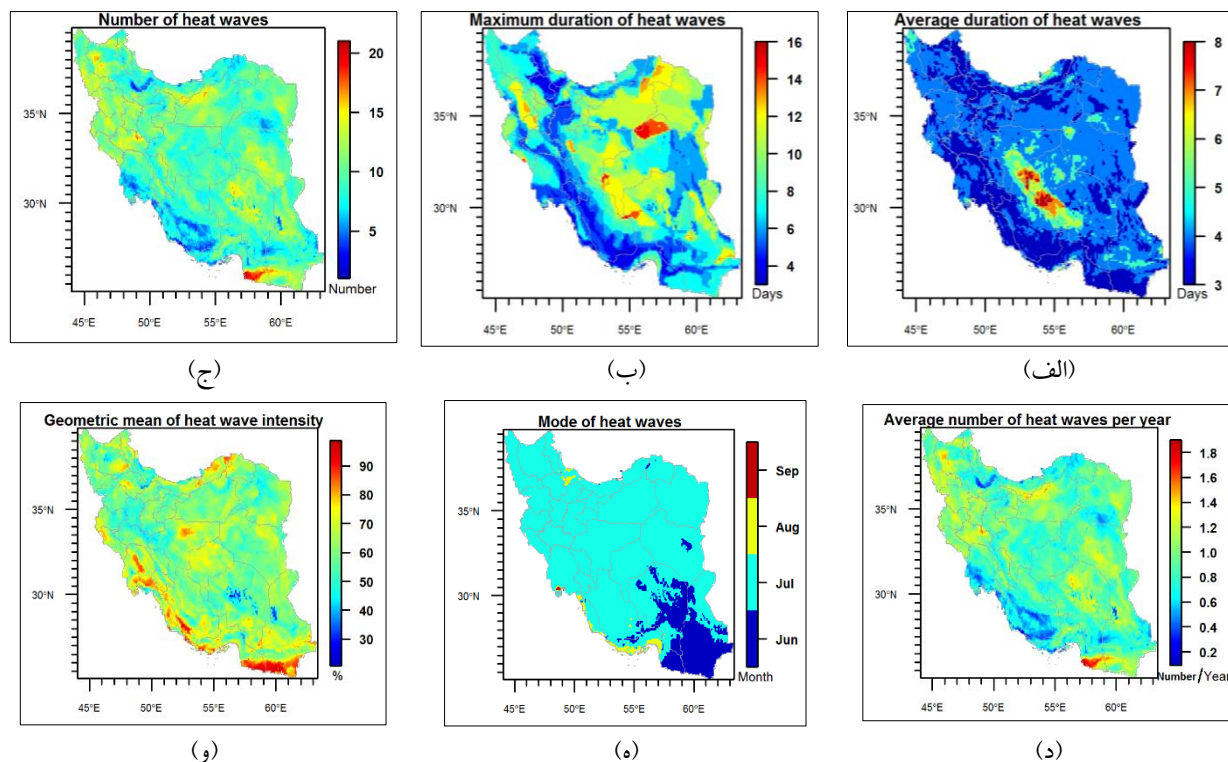


(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) آستانه‌های دمایی شروع موج گرمایی هر ناحیه با توجه به توزیع احتمال آن، ب) پهنه‌بندی بهترین تابع توزیع احتمال برازشی.



شکل ۲. تحلیل داده‌های موج گرمایی طی دوره مورد مطالعه (الف) میانگین مدت (تداوم) موج گرمایی (روز)، (ب) بیشینه مدت موج گرمایی (روز)، (ج) تعداد موج گرمایی هر منطقه (د) میانگین تعداد موج گرمایی هر منطقه (تعداد در سال)، (ه) ماهی که بیشترین فراوانی موج گرما رخ داده است، (و) میانگین هندسی اندازه شدت موج گرمایی استاندارد شده (درصد).

۴ روز همراه است (شکل الف-۲). این نشان‌دهنده تداوم کم موج گرمایی در غالب مناطق کشور است. یک جهش غیرمنتظره در تداوم موج گرمایی تا متوسط تداوم هشت روز نسبت به سایر مناطق ایران در ناحیه مستطیل مرکزی رخ می‌دهد (شکل الف-۲). بیشینه تداوم موج‌های گرمایی با مدت ۱۴ تا ۱۶ روز در مناطق جنوب‌شرقی استان سمنان و شمال‌غربی استان خراسان جنوبی رخ داده است (شکل ب-۲).

تعداد کل و میانگین سالانه رخداد پدیده موج گرمایی طی دوره مورد مطالعه در شکل (۲-ج و د) نشان داده شده است. بیشترین رخداد پدیده موج گرمایی بیش از ۲۰ بار در سواحل جنوب‌شرقی استان هرمزگان و کمترین رخداد این پدیده در نواحی جنوبی و غربی استان فارس بوده است (شکل ۲-ج). در برخی مناطق مانند شرق زنجان و شمال‌غربی استان قزوین به‌طور متوسط هر ۵ سال یک رخداد موج گرمایی رخ می‌دهد این در حالی است که برای برخی مناطق جنوب‌شرقی کشور هر ۵ سال تا ۹ مرتبه این پدیده رخ می‌دهد (شکل ۲-د).

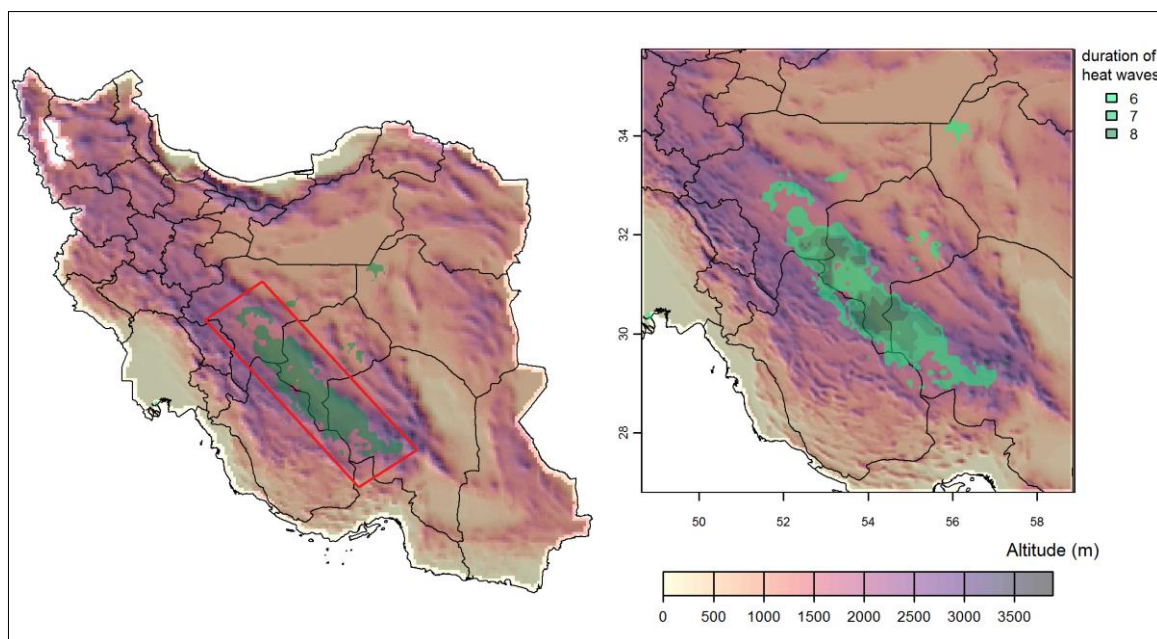
تداوم موج گرمایی طی دوره مورد مطالعه در قسمت‌های الف و ب از شکل ۲ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود کانون‌هایی که بیشترین تداوم موج گرمایی دارند شامل منطقه‌ای در جنوب غربی استان خراسان رضوی و شمال‌غربی استان خراسان جنوبی، منطقه نوار باریکی از زمین‌های کم‌ارتفاع در امتداد شمال‌غرب به جنوب شرقی محصور بین ارتفاعات زاگرس جنوبی و کوه‌های در امتداد شمال‌غربی به جنوب شرقی ممتد بین قزل‌هزار و کرکس شامل غرب استان کرمان، جنوب استان اصفهان، جنوب استان یزد و شمال شرق استان فارس (در این نوشته با نام مستطیل مرکزی از آن یاد می‌کنیم)، منطقه نوار باریکی از استان‌های آذربایجان غربی، کردستان و کرمانشاه و منطقه شرق گلستان، شمال شرق سمنان و غرب خراسان‌های شمالی و رضوی طی دوره زمانی مورد مطالعه به‌وقوع پیوسته است (شکل ب-۲). پراکندگی میانگین تداوم پدیده موج گرمایی نشان می‌دهد که به جز منطقه مستطیل مرکزی و برخی از مناطق پراکنده کم‌وسعت، در اکثر مناطق ایران پدیده موج گرمایی با تداوم ۴ و کمتر از

به‌طور کلی اگر سرزمین‌های هموار در مجاورت مناطق کوهپایه‌ای با شیب به جنوب باشند بیشتر در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد و احتمال فراوانی و شدت پدیده موج گرمایی بیشتر می‌شود، مانند مناطق البرز جنوبی، قسمت‌های شرقی دریاچه خشک ارومیه، شمال شرقی استان لرستان و مناطق کوهپایه‌ای لاله زار و هزار. انتظار می‌رود در مناطقی با کمترین میانگین فراوانی وقوع پدیده امواج گرمایی (تقریباً ۰/۲ در هر سال) این پدیده به‌طور متوسط تقریباً هر ۵ الی ۶ سال در آن مناطق رخ دهند (شکل ۲-د). در حالی که در مناطقی که فراوانی بیشتری دارند (تقریباً ۱/۸ در هر سال) انتظار می‌رود هر ۲ سال لااقل ۳ بار پدیده موج گرمایی به‌وقوع پیوندد (شکل ۲-د).

الگوی توزیع ماهانه طی دوره نشان‌دهنده وقوع رخداد موج گرمایی در ماه جولای (اواسط تیر تا اوسط مرداد) در پهنه وسیعی از ایران است (شکل ۲-ه). این نتایج با مطالعات بهاروندی و همکاران (۱۳۹۹)، دوستان و همکاران (۱۳۹۹)، دارند (۱۳۹۳)، هماهنگ می‌باشد. در نوار باریکی از سواحل غربی هرمزگان و مناطق ساحلی بوشهر، با تأخیر یک ماهه در ماه آگوست و در سواحل جنوب شرقی و شرق کرمان یک ماه زودتر و در ماه جون اتفاق می‌افتد (شکل ۲-ه). به‌دلیل هم‌زمانی کم‌فشار گرمایی پاکستان، بادهای ۱۲۰ روزه و کم‌فشار حرارتی دشت لوت، تعجیلی را در وقوع موج گرمایی در این مناطق شاهد هستیم (بهاروندی و همکاران، ۱۳۹۹). میانگین هندسی اندازه شدت موج گرمایی صدکی استاندارد شده در شکل ۲-و نشان داده شده است. بیشینه اندازه میانگین هندسی شدت‌های صدکی شامل مناطقی از کویر مرکزی، شرق گلستان، نوار ساحلی جنوبی ایران به‌خصوص نوار جنوب شرقی سواحل مکران، به‌وقوع می‌پیوندد (شکل ۲-و) مجاورت سواحل جنوبی به آب‌های گرم از جنوب و نزدیکی امتداد ارتفاعات زاگرس جنوبی از شمال (سمت جنوبی کوهپایه‌ای) در مناطق مذکور و فرایند اختلال دمایی حاصل از اختلاف ارتفاع با مناطق مرتفع

مجاورتی، سبب گستره دامنه تغییرات دمایی این مناطق نسبت به سایر مناطق ایران بوده است. این نتایج با نتایج دوستان و همکاران، (۱۳۹۹) و دارند (۱۳۹۳) سازگار است در سایر پهنه جغرافیایی ایران میانگین هندسی اندازه شدت موج گرمایی صدکی استاندارد شده بین دامنه ۴۰ الی ۸۰ درصد در نوسان است (شکل ۲-و).

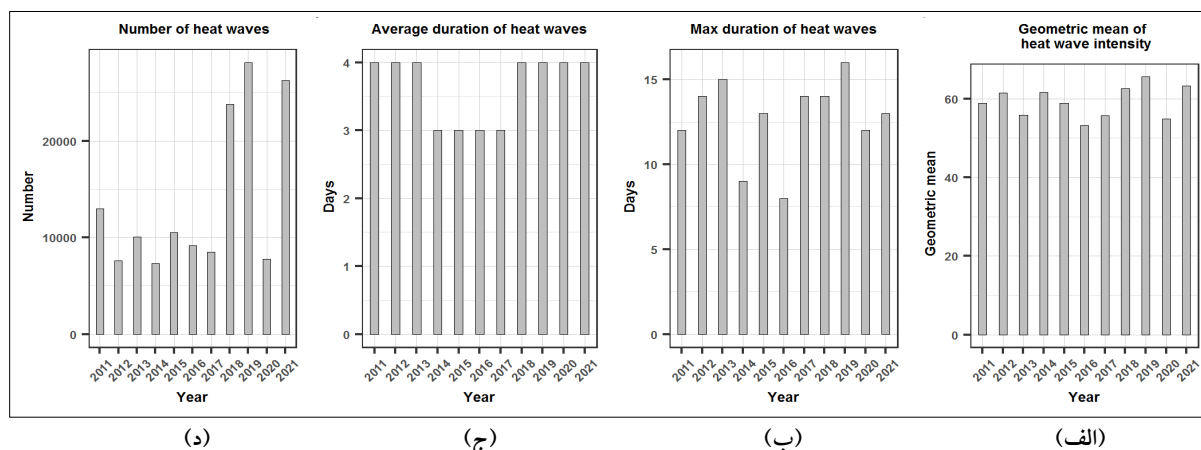
شکل ۳ نشان می‌دهد که مناطق پست‌تر ناحیه مستطیل شکل مرکزی ایران از سمت غرب به‌وسیله رشته‌کوه زاگرس با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی و از سمت شرق به‌وسیله رشته‌کوه‌های مرکزی ایران محصور شده‌اند. رشته‌کوه‌های نزدیک‌تر به سواحل جنوبی ارتفاع بیشتری نسبت به رشته‌کوه‌های هم‌امتداد شمالی‌تر دارند. ارتفاعات نوار شمالی این ناحیه در مجاورت دشت‌های کم‌ارتفاع و کویری واقع شده‌اند، در حالی که ارتفاعات جنوبی در همسایگی مناطق گرم و خشک جنوب ایران قرار دارند. چنین آرایش توپوگرافیکی موجب کاهش تهویه افقی و عمودی در لایه‌های زیرین جو شده و در نتیجه شرایط واماندگی یا رکود دینامیکی جریان‌های سطحی (Atmospheric Stagnation) را در این ناحیه پدید می‌آورد. کاهش اختلاط و تبادل حرارتی در اثر این پایداری دینامیکی، موجب انباشت گرما در لایه‌های نزدیک سطح زمین و افزایش ماندگاری توده‌های هوای گرم می‌شود. از این‌رو، به‌دلیل ویژگی‌های محصورکننده ناهمواری‌ها و محدودیت انتقال افقی انرژی، تداوم امواج گرمایی در ناحیه مستطیل مرکزی ایران به‌طور متوسط بیش از سایر نواحی کشور است (شکل ۳ و ۲-الف). به غیر سواحل شرقی تنگه هرمز، در تمام مناطق ایران بین اندازه شدت صدکی و فراوانی پدیده طی دوره مورد مطالعه رابطه معکوس برقرار است. در واقع فراوانی رخداد موج گرمایی با اندازه شدت صدکی بزرگ‌تر نسبت به موج گرمایی با اندازه شدت کوچک‌تر، کمتر بوده است. نتایج مذکور با نتایج دوستان و همکاران، (۱۳۹۹) و دارند (۱۳۹۳) سازگار است.



شکل ۳. نقشه سمت چپ گستره منطقه‌ای با متوسط بیشینه تداوم موج گرمایی (ناحیه مستطیل مرکزی)، شکل سمت راست نمای نزدیک‌تر منطقه مدنظر، تداوم موج گرمایی (حسب روز) با طیف رنگی سبز از ۶ روز کم رنگ تا ۸ روز پرنگ مشخص شده است.

الی ۲۰۱۷ که کاهش ۱ روزه داشته است، ۴ روز بوده است (شکل ۴-ج). با توجه به شکل ۴-ب، بیشینه طول دوره رخداد پدیده در هر سال نموداری پر نوسان است. در سال ۲۰۱۹ موج گرمایی با تداوم ۱۷ روزه نسبت به سایر سال‌ها بیشتر بوده است (شکل ۴-ب). در شکل ۴-الف، نوسانات میانگین هندسی اندازه شدت موج گرمایی صدکی بین دامنه ۵۰ الی ۷۰ است و بیشترین مقدار مربوط به سال ۲۰۱۹ و کمترین مقدار در سال ۲۰۱۶ رخ داده است. در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ شدت و تعداد رخداد پدیده‌های موج گرمایی نسبت به سایر سال‌ها بیشتر بوده است (شکل ۴-د و الف).

شکل ۴، تغییرات سالانه تغییرات فراوانی، میانگین مدت، بیشینه مدت و میانگین شدت صدکی موج گرمایی سالانه برای کل کشور را نشان می‌دهد. شکل ۴-د مجموع سالانه تعداد رخداد پدیده موج گرمایی را طی دوره مطالعه نشان می‌دهد. شمارش رخداد مورد نظر بر اساس تعداد یاخته‌ای که موج گرمایی در آن اتفاق افتاده صورت گرفته و هر ناحیه ممکن است چندین بار شمارش شده باشد. کمترین تعداد سالانه رخداد پدیده موج گرمایی مربوط به سال ۲۰۱۴ و بیشینه مقدار مربوط به سال ۲۰۱۹ است (شکل ۴-د). میانگین سالانه تداوم دوره موج گرمایی، به غیر از سال‌های بین ۲۰۱۴



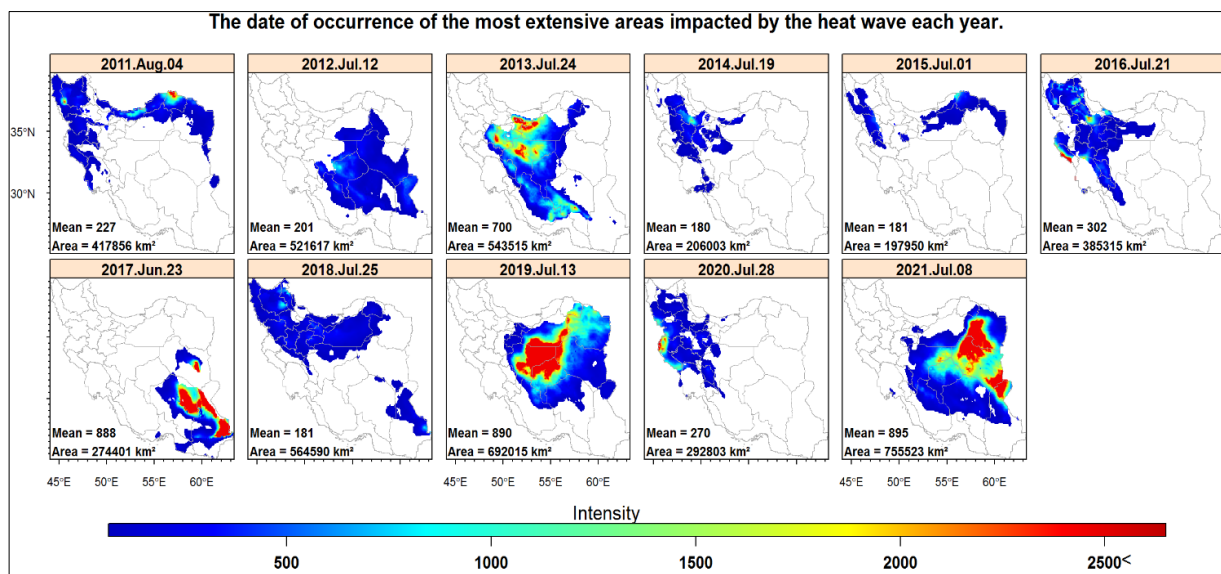
شکل ۴. بررسی تغییرات سالانه تغییرات فراوانی، میانگین مدت، بیشینه مدت و میانگین شدت صدکی موج گرمایی سالانه برای کل کشور.

پدیده امواج گرمایی با بیشترین وسعت مناطق درگیر رخداد پدیده در هر سال به همراه تاریخ شروع آن در شکل ۵ آورده شده است. پدیده امواج گرمایی رخ داده در سال‌های به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۳ بیشترین و سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۴ کمترین مساحت مناطق درگیر رخداد پدیده را در بین سال‌های دوره مطالعه به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵). امواج گرمایی رخ داده در تاریخ ۸ جولای سال ۲۰۲۱ تمام مناطق شرقی، شمال شرقی و مرکزی کشور را در بر گرفته است (شکل ۵). می‌توان گفت پدیده‌های امواج گرمایی با بیشترین وسعت مناطق درگیر، اکثراً مناطق مرکزی و نوار شرقی کشور را در برمی‌گیرند. نکته قابل توجه این است که تاریخ وقوع امواج گرمایی با بیشترین وسعت مناطق درگیر در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ از ۲۴ جولای در سال ۲۰۱۳ به ۱۳ جولای در سال ۲۰۱۹ و به ۸ جولای در سال ۲۰۲۱ رسیده است (شکل ۵). به نظر می‌رسد تاریخ گسترده‌ترین امواج گرمایی از اوایل مرداد ماه به نیمه‌های تیر ماه رسیده است به عبارتی در سال‌های اخیر گسترده‌ترین و شدیدترین امواج گرمایی زودتر رخ داده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است در بین سال‌های با بیشترین وسعت مناطق درگیر (۲۰۲۱، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۳) شدت امواج گرمایی افزایش یافته است. به عبارتی متوسط شدت موج گرمایی در سال ۲۰۲۱ برای پدیده‌های با بیشترین مساحت نسبت به سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ بیشتر شده است. (شکل ۵). به نظر می‌رسد برای سال‌های با بیشترین وسعت مناطق درگیر (۲۰۲۱، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۳)، وسعت مناطق درگیر رخداد پدیده موج گرمایی برای سال‌های اخیر علاوه بر افزایش مساحت نواحی، با شدت بیشتری رخ داده و تاریخ وقوع آن نیز زودتر شده است (شکل ۵، سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۳).

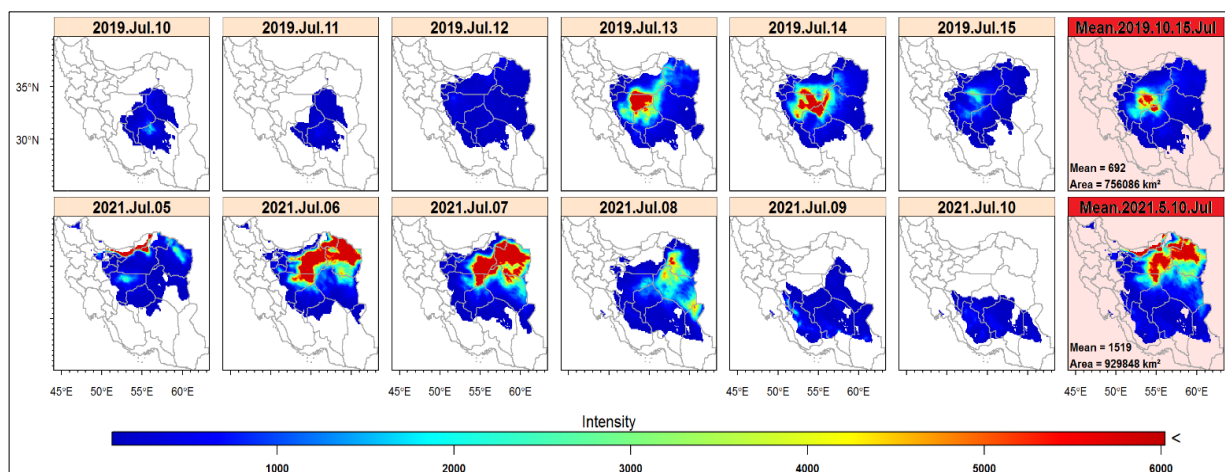
همان‌طور که بیان شد در بین سال‌های مورد مطالعه، امواج گرمایی رخ داده در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ دارای بیشترین

مساحت مناطق درگیر پدیده موج گرمایی هستند. تغییرات مکانی، زمانی و اندازه شدت، برای این امواج گرمایی در این دو سال در شکل ۶ نشان داده شده است.

با مقایسه روزهای با وسیع‌ترین امواج گرمایی رخ داده در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ می‌توان گفت در سال ۲۰۲۱ تعداد روزهای که در آن مساحت و شدت امواج گرمایی نسبت به سال ۲۰۱۹ بالاتر بوده، بیشتر است، به طوری که از ۶ روز دخیل در وسیع‌ترین امواج گرمایی رخ داده برای سال ۲۰۲۱، ۴ روز با مساحت و شدت بیشتری نسبت به سال ۲۰۱۹ همراه بوده است (شکل ۶). مقادیر متوسط شدت موج گرمایی و مجموع مساحت نواحی، طی روزهای با وسیع‌ترین امواج گرمایی رخ داده نیز مؤید این نکته است. به طوری که برای سال ۲۰۱۹ مجموع مساحت نواحی درگیر پدیده برابر ۷۵۶۰۸۶ کیلومتر مربع بوده و برای سال ۲۰۲۱، ۹۲۹۸۴۸ کیلومتر مربع و متوسط شدت موج گرمایی در روزهای درگیر پدیده در سال ۲۰۱۹ برابر ۶۹۲ واحد و سال ۲۰۲۱، ۱۵۹۲ واحد بوده است (شکل ۶). می‌توان گفت با توجه به روند افزایشی دما در سال‌های انتهایی دوره مورد مطالعه اندازه شدت موج گرمایی نیز افزایش داشته است. می‌توان گفت عوامل فراوانی، تداوم، وسعت مناطق درگیر و اندازه شدت موج گرمایی عوامل تأثیرگذار بر میزان بزرگی شدت موج گرمایی هستند. ممکن است یک موج گرمایی با اندازه شدت بسیار بالا در یک منطقه رخ دهد اما مساحت اندکی را در برگیرد یا این که تداوم کوتاهی داشته باشد. از طرف دیگر ممکن است یک موج گرمایی با اندازه شدت پایین‌تر مناطق گسترده‌ای را با تداوم طولانی‌تر درگیر کند. همه این عوامل می‌تواند مؤلفه‌های بزرگی شدت موج گرمایی را تعریف کند. این که میزان کمی تأثیر این عوامل بر بزرگی شدت موج گرمایی چقدر باشد یک مسئله پیچیده است که به اهداف، تعاریف و کارکرد مسئله بر می‌گردد.



شکل ۵. تغییرات مکانی، شدت و تاریخ وقوع پدیده امواج گرمایی با بیشترین وسعت مناطق درگیر رخداد پدیده در هر سال، در گوشه هر نقشه متوسط شدت موج گرمایی و مساحت ناحیه دربرگیرنده پدیده موج گرمایی (Km^2) درج شده است.



شکل ۶. تغییرات مکانی، زمانی و اندازه شدت، وسیع‌ترین امواج گرمایی رخ داده (سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱) طی دوره مورد مطالعه، ستون اول از سمت راست نشان‌دهنده متوسط شدت پدیده‌ها و تمامی نواحی دارای پدیده، طی روزهای وسیع‌ترین امواج گرمایی رخ داده.

۴. نتیجه‌گیری

آستانه دمایی بر اساس تابع توزیع احتمال پارامتریک برای هر منطقه تعیین شد و برای روزهای با تداوم سه روز و بیشتر برای شناسایی موج گرمایی در نظر گرفته شد. بهترین برازش تابع توزیع احتمال بر داده‌های دمایی برای بیش از ۸۵ درصد از پهنه جغرافیایی ایران تابع توزیع ویبول تعیین شد. چهار ویژگی موج گرمایی فراوانی، وسعت، تداوم، شدت و توزیع ماهانه پدیده طی دوره مذکور در ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. ویژگی‌های موج گرمایی وابستگی شدیدی به مشخصه‌های جغرافیایی هر منطقه داشته‌اند. فراوانی وقوع ماهانه پدیده نشان می‌دهد به غیر از مساحت ناچیزی از نوار

انتظار می‌رود در اثر گرمایش جهانی، فراوانی و تداوم امواج گرمایی افزایش یابند (مارتینز-ویلالوبوس و همکاران، ۲۰۲۵). هرچند یک تعریف مشخص و جهانی برای موج گرمایی وجود ندارد اما اکثر محققین بر اساس شاخص آستانه نسبی دمایی سعی داشته‌اند این پدیده را برای هر منطقه تعریف کنند. با توجه به گستره ایران و وجود اقلیم‌ها و شرایط متفاوت برای هر منطقه به کار بردن یک آستانه دمایی ثابت چندان معقول نمی‌باشد و لازم است برای شناسایی موج گرمایی در هر منطقه آستانه دمایی مختص به آن مشخص شود. یک

موج گرمایی در حوضه‌های مختلف، این که میزان کمی تأثیر عوامل فراوانی، تداوم، وسعت مناطق درگیر و اندازه شدت موج گرمایی بر بزرگی شدت موج گرمایی چقدر باشد یک مسئله پیچیده است.

مراجع

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

دارند، م. (۱۳۹۳). شناسایی و تحلیل زمانی- مکانی امواج گرمایی ایران زمین. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۲(۳۵)، ۱۶۷-۱۸۰.

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

ساحلی و مناطقی از جنوب شرقی، در سایر مناطق ایران، پدیده موج گرمایی در ماه جولای رخ می‌دهد. موج گرمایی در مناطق جنوب شرقی ایران با یک ماه تعجیل و در ماه جون رخ می‌دهد. توزیع شدت موج گرمایی در مناطق هموار داخلی ایران به غیر از برخی از مناطق پراکنده تقریباً یکنواخت است. در اکثر مناطق ایران پدیده موج گرمایی با تداوم ۴ و کمتر از ۴ روز همراه است. امواج گرمایی از نقطه نظر بزرگی اندازه شدت بیشتر در مناطق جنوب شرقی کشور رخ داده است. در حالی که از نظر تداوم پدیده، بیشتر در نواحی مرکزی کشور محصور بین رشته‌های کوه زاگرس و مرکزی با تداوم ۵ تا ۸ روز اتفاق افتاده است. پدیده‌های امواج گرمایی با بیشترین وسعت مناطق درگیر، اکثراً مناطق مرکزی و نوار شرقی کشور را در برمی‌گیرند. به نظر می‌رسد گسترده‌ترین امواج گرمایی در سال‌های اخیر علاوه بر افزایش مساحت نواحی، با اندازه شدت بزرگ‌تری رخ داده و تاریخ وقوع آن نیز زودتر شده است. با توجه به اهداف، برنامه‌ها و میزان تأثیر گذاری پدیده

Akaike, H. (2011). *Akaike's Information Criterion. BT-International Encyclopedia of Statistical Science* (p. 25). https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_110.

Asadi Oskoue, E., Pakdaman, M., Falamarzi, Y., & Javanshiri, Z. (2024). A hybrid approach for generating daily 2m temperature of 1km spatial resolution over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(8), 7109-7119. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05042-1>

Awasthi, A., Vishwakarma, K., & Pattanayak, K. C. (2022). Retrospection of heatwave and heat index. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1), 589-604.

Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5-10.

Díaz-Poso, A., Lorenzo, N., & Royé, D. (2023). Spatio-temporal evolution of heat waves severity and expansion across the Iberian Peninsula and Balearic islands. *Environmental Research*, 217, 114864.

García-León, D., Casanueva, A., Standardi, G., Burgstall, A., Flouris, A. D., & Nybo, L. (2021). Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe. *Nature Communications*, 12(1), 5807. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26050-z>

Huang, H., Jie, P., Yang, Y., & Mi, S. (2022). Spatial

and temporal characteristics of high-temperature heat wave disasters in Chongqing. *Atmosphere*, 13(9), 1396.

IPCC, I. P. on C. C. (2023). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/DOI: 10.1017/9781009325844>

Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinmer, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., & Barret, K. (2023). *Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Longer report. IPCC*.

Liss, A., Wu, R., Chui, K. K. H., & Naumova, E. N. (2017). Heat-related hospitalizations in older adults: An amplified effect of the first seasonal heatwave. *Scientific Reports*, 7(1), 39581.

Martinez-Villalobos, C., Fu, D., Loikith, P. C., & Neelin, J. D. (2025). Accelerating increase in the duration of heatwaves under global warming. *Nature Geoscience*, 18(8), 716-723.

Massey Jr, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46(253), 68-78.

Mazdiyasn, O., Sadegh, M., Chiang, F., & AghaKouchak, A. (2019). Heat wave intensity duration frequency curve: A multivariate approach for hazard and attribution analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 14117.

Mohammad, P., & Weng, Q. (2024). Comparing existing heat wave indices in identifying

- dangerous heat wave outdoor conditions. *Nexus*, 1(3), 100027.
- Pan, J.-X., Fang, K.-T., Pan, J.-X., & Fang, K.-T. (2002). Maximum likelihood estimation. *Growth Curve Models and Statistical Diagnostics*, 77–158.
- Radinović, D., & Ćurić, M. (2012). Criteria for heat and cold wave duration indexes. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 505–510.
- Raei, E., Nikoo, M. R., AghaKouchak, A., Mazdiyasni, O., & Sadegh, M. (2018). GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox. *Scientific Data*, 5(1), 1–15.
- Roshan, G., Ghanghermeh, A., & Kong, Q. (2018). Spatial and temporal analysis of outdoor human thermal comfort during heat and cold waves in Iran. *Weather and Climate Extremes*, 19, 58–67.
- Royé, D., Codesido, R., Tobías, A., & Taracido, M. (2020). Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain. *Environmental Research*, 182, 109027.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- Skinner, C. B., Touma, D., Barlow, M., Singh, D., & King, T. (2025). The spatial extent of heat waves has changed over the past four decades. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 662.
- Spangler, K. R., Liang, S., & Wellenius, G. A. (2022). Wet-bulb globe temperature, universal thermal climate index, and other heat metrics for US Counties, 2000–2020. *Scientific Data*, 9(1), 326.
- Sridevi, C., Routray, A., Ramarao, M. V. S., Dutta, S., Prasad, K. H., Colón, E., Gibbs, A., Pondeva, M., & Prasad, V. S. (2024). Study of Heat Wave Using High-Resolution Real Time Meso-Scale Analysis Over India. *Geophysical Research Letters*, 51(17), e2024GL109310.
- World Health Organization. (2023). Climate change and health: Heat and health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>
- Xu, Z., FitzGerald, G., Guo, Y., Jalaludin, B., & Tong, S. (2016). Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: a systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 89, 193–203.