

آشکارسازی روند تغییرات ویژگی‌های امواج گرمایی مرتبط با تغییر اقلیم در مناطق خشک (مطالعه موردی: شهرستان یزد)

کمال امیدوار^{۱*}، مهدیه زارع شحنه^۲، فروغ محمدی راوری^۳، عاطفه ابراهیمی^۴

^۱ استاد اقلیم شناسی و عضو هیات علمی دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد اقلیم شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ دانشجوی دکتری تخصصی اقلیم شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۴ دانشجوی دکتر اقلیم شناسی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸

چکیده

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر پویایی اقلیمی مناطق خشک بر جای گذاشته است. این پژوهش با هدف آشکارسازی روند تغییرات امواج گرمایی و بررسی ارتباط آن با ناهنجاری دما در شهرستان یزد انجام شد. بدین منظور، داده‌های روزانه دمای هوا در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۷ مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های مرتبط با امواج گرما شامل تعداد رخداد، فراوانی روزهای همراه، تداوم، بزرگی، شدت و میانگین دمای گرم‌ترین روز هر موج با بهره‌گیری از نرم‌افزار ClimPACT در محیط برنامه‌نویسی R نسخه ۲.۱۰ محاسبه شدند. به منظور بررسی همبستگی، ناهنجاری دمای ایستگاه یزد استخراج و با ناهنجاری دمای خشکی‌های کره زمین مقایسه گردید. یافته‌ها نشان داد بیشترین تعداد رخداد امواج گرمایی در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ ثبت شده است. همچنین فراوانی روزهای همراه با موج گرما روندی افزایشی و معنادار داشته و در سال‌های مذکور به ترتیب ۴۷ و ۴۲ روز گزارش شد. نتایج بیانگر افزایش چشمگیر تداوم و شدت امواج گرما نیز بود؛ به طوری که طولانی‌ترین تداوم در سال ۲۰۱۳ به مدت ۱۳ روز و بیشینه بزرگی موج گرما در دو دهه اخیر بیش از ۳۱ درجه سلسیوس ثبت شد. تحلیل همبستگی نشان داد که شاخص‌های امواج گرما ارتباط قابل توجهی با ناهنجاری دمای یزد دارند، به ویژه فراوانی روزهای همراه با موج گرم که بیشترین ضریب تعیین ($R^2=0.6108$) را نشان داد.

کلمات کلیدی: امواج گرما، تغییر اقلیم، ناهنجاری دما، شدت و تداوم گرما، یزد.

مقدمه

امواج گرما آسیب‌های شدیدی را به جوامع مختلف گیاهی، جانوری و انسانی وارد می‌کنند. بر اساس مدل‌های اقلیمی مشخص شده که فراوانی، شدت و مدت زمان موج گرما در قرن اخیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. (زو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). تشدید امواج گرمایی شدید در بسیاری از مناطق جهان از جمله بالکان (۲۰۰۷) ، فرانسه (۲۰۰۳) و روسیه (۲۰۱۰)، با افزایش مرگ و میر، ناراحتی انسانی و کاهش بهره‌وری کار همراه بوده است. نتایج پیش‌بینی یک مدل جهانی اقلیمی نشان داده است که با افزایش دمای هوا به اندازه‌ی ۱.۵ درجه سلسیوس، افزایش قابل توجهی در بزرگی موج گرما در آفریقا، آمریکای جنوبی و آسیای جنوب شرقی رخ خواهد داد. ۱۳/۸ درصد از جمعیت جهان حداقل طی مدت ۵ سال در معرض امواج گرمای شدید قرار خواهند گرفت. با افزایش دمای هوا به میزان ۲ درجه سلسیوس، این رقم به ۳۶/۹٪ افزایش خواهد یافت (دوسیو^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین بر اساس مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی شده است که شدت امواج گرما در آینده‌ی نزدیک (۲۰۴۹-۲۰۲۰) به بیش از دو برابر دوره‌ی تاریخی (پایه) خواهد رسید. (لوتکا^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). افزایش فراوانی روزهای توام با موج گرمای شدید به میزان ۴ تا ۳۴ روز در هر فصل با افزایش یک درجه سلسیوس دمای هوا در کره زمین نیز پیش‌بینی شده است (پرکینز^۴ و گیبسون^۵ ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر رخداد امواج گرما در بسیاری از مناطق کشور یکی از پدیده‌های مخاطره‌آمیز محیط طبیعی بوده است. بررسی شبیه‌سازی آستانه دمای منجر به رخداد موج گرما در مناطق مختلف کشور نشان داده که براساس سناریوی مختلف طی سال‌های آتی، حد پایین آستانه دمایی در فصل بهار نسبت به وضع موجود تقریباً ۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. علاوه بر

این مرز پهنه‌های آستانه دمایی نیز به طور محسوس تغییر خواهد کرد. در شرایط حاضر در تابستان قسمت زیادی از کشور دارای آستانه بین ۳۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس است ولی در ۳۰ ساله آینده با توجه به افزایش دما، این مقدار به ۴۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس خواهد رسید و تقریباً ۷۰ درصد کشور آستانه بالای ۴۰ درجه را تجربه خواهند کرد. (رضایی و همکاران، ۱۳۹۸).

تعداد امواج گرما و ویژگی‌های آن در محیط‌های شهری و روستایی از ویژگی‌های متفاوتی برخوردار است. اولسون^۶ و همکاران، (۲۰۱۸) فراوانی امواج گرما را برای مناطق شهری و روستایی ایالات متحده براساس سناریوهای مختلف اقلیمی بررسی و نشان دادند که تعداد روزهای موج گرمای شهری بیشتر از مناطق روستایی و در سال از ۶ موج در دوره ۱۹۸۱-۲۰۰۵ به ۹۲ موج در دوره ۲۰۶۱ تا ۲۰۸۰ در سناریوی ۸.۵ افزایش می‌یابد. امواج گرما به خشکی‌ها محدود نمی‌شوند و محیط‌های اقیانوسی را نیز دربرمی‌گیرند. ویژگی امواج گرما در محیط‌های آبی از جمله اقیانوس‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌تواند آب و هوای نواحی وسیعی را متاثر کند. یک موج گرمای دریایی معمولاً به عنوان یک منطقه منسجم از دمای شدید درجه حرارت گرم دریایی تعریف می‌شود که برای چند روز تا یک ماه ادامه دارد. امواج گرمایی در دهه گذشته در کلیه حوضه‌های اصلی اقیانوس مشاهده شده است، اما تنها چند موج گرما به ثبت رسیده و مورد تجزیه و تحلیل گسترده قرار گرفته است. یکی از اولین موج‌های گرما که ثبت شده است در سال ۲۰۰۳ در شمال غربی دریای مدیترانه رخ داده است و دمای سطح آب را به ۵ درجه سلسیوس بالاتر از دوره زمانی ۱۹۸۲-۲۰۱۶ رسانده است. (فرولیچر^۷ و لوفتر^۸،

⁵ Gibson

⁶ Oleson

⁷ Frölicher

⁸ Laufkötter

¹ Zhao

² Dosio

³ Lhotka

⁴ Perkins

۲۰۱۸). به منظور تعیین موج گرما از معیارها و شاخص‌های متعددی استفاده می‌شود. در برخی روش‌ها به منظور تعیین امواج گرما پارامترهای دما و رطوبت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس این شاخص امواج گرمایی برای ایستگاه‌های ساحلی و دریای جنوب ایران مطالعه شده است (درگاهیان و رضایی، ۲۰۱۶). در سرتاسر هند، امواج گرما در ماه‌های تابستان از آوریل تا ژوئن رخ می‌دهد. با استفاده از مجموعه داده‌های دمای روزانه تنوع و روند امواج گرما در هند تجزیه و تحلیل شده است. برای شناسایی امواج گرما از فاکتور گرمای بیش از حد و صدک ۹۰ دمای حداکثر استفاده شد است. نتایج کار آنها نشان داد گرم شدن اقیانوس گرمسیری هند و وقایع مکرر در النینو در آینده ممکن است بیشتر منجر به موج‌های گرمای مکرر و طولانی‌تر در سراسر هند شود (روهینی و همکاران ۲۰۱۶). به منظور واکاوی موج‌های گرمایی شهر اهواز با استفاده از دمای بیشینه روزانه ایستگاه سینوپتیک اهواز در سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۴۰، بر اساس ماتریس استاندارد شده داده‌ها و به کمک نمایه فومیاکی، ماتریس انحراف دمای بهنجار شده روزهایی را که گرما حداقل ۳ روز تداوم داشته و دمای آن ۲+ انحراف معیار بالاتر از میانگین بوده است را به عنوان موج گرما در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد میانگین تعداد روزهای امواج گرمایی اهواز ۹ روز بوده و بالاترین تعداد روزهای امواج گرما با ۳۸ روز در سال ۱۳۷۷ مشاهده شده است (الماسی و همکاران، ۱۳۹۵). در بررسی تحلیل فضایی-زمانی امواج گرمایی خراسان رضوی به منظور تعیین امواج گرمایی از شاخص صدک ۹۵ استفاده شده و علاوه بر تعیین آستانه دمایی، روزهای با تداوم ۳ روز و بالاتر به عنوان موج گرما تعیین گردیده است (صانعی و همکاران، ۲۰۱۵). به منظور شناسایی موج‌های گرمایی ایران و ویژگی‌هایی مانند تداوم، شدت و فراوانی آن از آمار روزانه حداکثر دما مربوط به ۶۶۳ ایستگاه همدید و

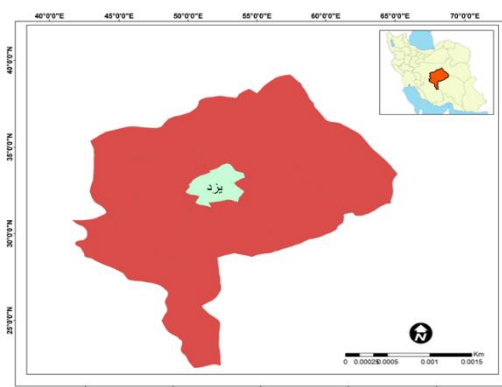
اقلیمی طی دوره آماری ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۲ استفاده شد و روزهایی را که دست کم ۲ روز تداوم داشته و دمای آن ۲+ انحراف معیار بالاتر از میانگین بوده، به عنوان موج گرما لحاظ شده است. (اسماعیل نژاد و همکاران، ۱۳۹۲). در طبقه‌بندی امواج گرمایی کرمان ابتدا داده‌های دما استاندارد شده و بر اساس آن، ناهنجاری‌های ۰ تا ۰/۷۵ به عنوان موج گرم، ۰/۷۵ تا ۱/۵ موج گرم شدید و بالاتر از ۱/۵ به عنوان موج ابر گرم تعیین شدند (قویدل و رضایی، ۱۳۹۴). قاسمی فر و ناصرپور (۱۳۹۶) در مطالعه شناسایی رخداد‌های حدی سرد (گرم) در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از داده‌های دمای حداقل و حداکثر در پنج ایستگاه طی دوره مطالعاتی ۱۹۶۱-۲۰۱۰، امواج سرد با صدک ۰/۲ ام و امواج گرم با صدک ۰/۹۸ ام شناسایی شد. با هدف شناسایی امواج گرما و واکاوی زمانی - مکانی آن‌ها بر روی گستره ایران زمین از شش نمایه بر پایه صدک‌های ۹۰، ۹۵ و ۹۹ ام استفاده شد که شدت، دوام و بسامد رخداد امواج گرمایی را نمایان می‌کنند (دارند، ۱۳۹۳). برای تعیین الگوی مکانی امواج گرمایی ایران، دمای حداکثر روزانه ۴۹ ایستگاه سینوپتیک در دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۰ استفاده گردید. با استفاده از شاخص صدک ۹۵ ام، آستانه‌های دمایی ماهانه، تعیین، و تداوم سه روز و بیشتر در هر ماه میلادی از ایستگاه، موج گرما تعریف شد (اعتمادیان و دوستان، ۱۳۹۶). در بررسی و مطالعه امواج گرما علاوه بر تعیین و تعریف شاخص مشخص جهت استخراج آماری رخداد امواج به الگوی سینوپتیک غالب در زمان رخداد آنها نیز پرداخته شده است در بیشتر این مطالعات نقش کم‌فشار با منشأ کم‌فشارهای حرارتی گنگ و شبه جزیره‌ی عربستان در سطح زمین و پراارتفاع جنب‌حاره در سطوح بالای جو اشاره شده است. ثنایی و همکاران (۱۳۹۴)؛ مجرد و همکاران (۱۳۹۴)؛ قویدل و همکاران (۱۳۹۵)؛ خورشید

دوست و همکاران، (۱۳۹۶)؛ کرم پور و همکاران، (۱۳۹۶).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شهرستان یزد است که با وسعتی معادل ۲۳۹۷ کیلومتر مربع در مرکز ایران واقع شده است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن، گرم و خشک می باشد. متوسط بارش و متوسط دمای شهر یزد برای بازه ی زمانی مورد بررسی (۲۰۱۷-۱۹۶۰) به ترتیب ۵۴.۷ میلی متر و ۱۹.۳ درجه سانتی گراد می باشد. میانگین سرعت باد غالب در یزد، ۲۱ متر بر ثانیه و جهت وزش بادهای فرساینده در این منطقه از سمت شمال غرب می باشد (ابراهیمی خوسفی و درگاهیان، ۱۳۹۷). موقعیت منطقه مطالعاتی در شکل (۱) نشان داده شده است.

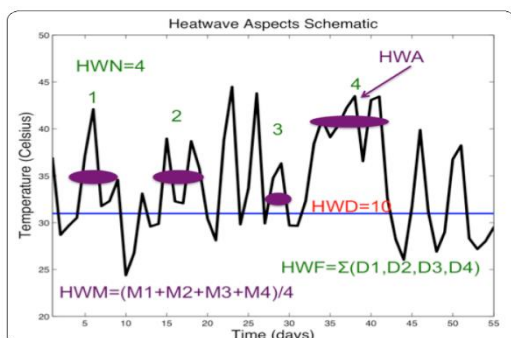


شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده ها

در پژوهش حاضر، ابتدا داده‌های مربوط به دمای روزانه جهت ورود به مدل ClimPACT بررسی شد. به منظور بررسی روند نمایه‌های حدی اقلیمی امواج گرمایشی از پنج معیار تعداد رخداد امواج گرما ۱۰،

فراوانی روزهای همراه با امواج گرما ۱۱، تداوم امواج گرم ۱۲، گرمترین روز از گرمترین موج گرم ۱۳ و میانگین موج گرم ۱۴، که توسط تیم کارشناسی ETCCDMI تعریف شده، استفاده گردید (شکل ۲).



شکل ۲: وضعیت شاخص‌های گرمایی تعریف شده در قالب یک نمودار (Lisa Alexander 2015)

این معیارها با استفاده از نرم افزار ClimPACT محاسبه شدند. نرم افزار ClimPACT مبتنی بر نرم افزار RclimDEX است که توسط سازمان‌های WMO/CCI و CLIVAR / JCOMM / تیم متخصص در زمینه شناسایی شاخص‌های تغییر آب و هوا (ETCCDI) تهیه شده است. این نرم افزار در محیط نرم افزار R2.10 اجرا شده است. یکی از مزایای این نرم افزار آن است که قبل از محاسبه معیارها، کیفیت داده ها را بررسی و اطلاعات نادرست و داده‌های پرت را مشخص می کند. پس از آن، شاخص‌های اقلیمی براساس داده‌های روزانه محاسبه می-شوند. هدف ETCCDMI تعیین مجموعه استاندارد از شاخص‌هایی است که بتوان توسط آن ویژگی‌های تغییر اقلیم در مناطق مختلف را بررسی و مقایسه نمود. براساس شاخص‌های تعریف شده توسط تیم کارشناسی ETCCDMI شاخص امواج گرمایی بر پایه روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$HWN_{TX90} > TXib90p \quad (1)$$

13 - Hottest day of hottest event (anomaly against seasonal mean)- (HWA)

14 - average magnitude of all events (anomaly against seasonal mean)-(HWM)

10- frequency of events (HWN)

11- sum of days participating in an event(HWF)

12 - length of longest event(HWD)

$$HWN_{TN90} > TNib90p \quad (2)$$

$$EHF > 0 \quad (3)$$

$$\text{where } EHF = \max [1, EHIaccl] \times EHI\text{sig} \quad (4)$$

$$\text{and } EHIaccl = (T_{Mi} + T_{Mi-1} + T_{Mi-2})/3 - (T_{Mi-3} + \dots + T_{Mi-32})/30 \quad (5)$$

$$\text{and } EHI\text{sig} = (T_{Mi} + T_{Mi-1} + T_{Mi-2})/3 - T_{Mij} \quad (6)$$

در این رابطه T_{Mi} میانگین دما، T_{X} دمای حداکثر و T_{N} دمای حداقل می‌باشد.

در نهایت پنج ویژگی امواج گرمایی در طول یک سری زمانی استخراج و خروجی آن به صورت نمودار همراه با میزان شیب خط و معنی‌داری آن در سطح ۹۹ درصد اطمینان برآورد و تحلیل می‌گردد. ناهنجاری دمای بلندمدت ایستگاه با استفاده از داده‌های متوسط ایستگاه سینوپتیک یزد استخراج و محاسبه شد. داده‌های مربوط به ناهنجاری خشکی‌های کره زمین از سایت نوا استخراج گردید و نمودار ناهنجاری دما در یزد با ناهنجاری دمای خشکی‌های کره زمین ترسیم و مقایسه گردید. همبستگی بین ناهنجاری دمای ایستگاه سینوپتیک یزد و شاخص‌های مربوط به امواج گرما به روش پیرسون محاسبه و ضریب تبیین هر کدام از شاخص‌ها توسط ناهنجاری دما محاسبه و به شکل نمودار نشان داده شد.

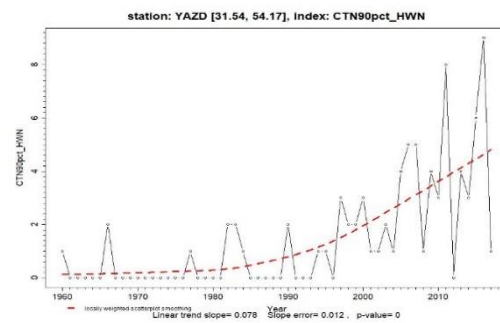
بحث و نتایج

در این پژوهش، هر رخداد موج گرما به عنوان یک بازه زمانی با حداقل سه روز متوالی تعریف شد و برای طول دوره آن سقفی در نظر گرفته نشد. نتایج نشان داد که روند تغییرات تعداد رخداد‌های امواج گرما طی دوره

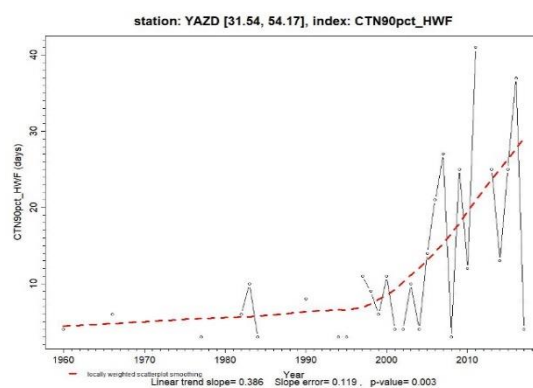
آماري مورد مطالعه، افزایشی و معنادار بوده است (شکل ۳). شیب خط روند برابر با ۰.۰۷۸ و مقدار $P\text{-value}=0$ محاسبه شد که بیانگر معنی‌داری این روند افزایشی است. بررسی‌ها نشان داد تا پیش از سال ۱۹۹۸ تعداد رخداد‌های موج گرما کمتر از سه مورد در سال بوده و در بسیاری از سال‌ها هیچ رخدادی ثبت نشده است. با این حال، در سال ۲۰۱۰ که ایستگاه با کاهش بارش سالانه (کمتر از ۱۰ میلی‌متر) و افزایش میانگین دما (۲۱.۶ درجه سلسیوس) مواجهه بوده، تعداد رخداد‌ها افزایش چشمگیری یافته و به ۸ موج رسیده است. بیشترین تعداد رخداد موج گرما نیز در سال ۲۰۱۶ با ۹ مورد ثبت شد. این سال از نظر دما پس از سال ۲۰۱۰ در رتبه دوم قرار گرفت (۲۱.۴ درجه سلسیوس) و میزان بارش آن ۲۵.۶ میلی‌متر گزارش شد. همچنین بررسی فراوانی روزهای همراه با امواج گرما نشان داد که این شاخص نیز روندی افزایشی و معنادار داشته است (شکل ۴). مقدار شیب خط روند برابر با ۰.۱۱۹ و سطح معنی‌داری آن $P\text{-value}=0.003$ به دست آمد. نتایج نشان داد که تا قبل از سال ۱۹۹۸، تعداد روزهای همراه با موج گرما کمتر از ۱۰ روز در سال بوده است. در حالی که در دو دهه اخیر، این شاخص افزایش چشمگیری داشته است؛ به گونه‌ای که در سال ۲۰۱۰ به عنوان گرم‌ترین سال ایستگاه سینوپتیک یزد، ۴۷ روز همراه با موج گرما ثبت شد و در سال ۲۰۱۶ نیز این تعداد به ۴۲ روز رسید.

نمودارها علاوه بر نمایش تغییرات سالانه، تغییرات آماری شاخص‌ها را نیز نشان می‌دهند که بیانگر وجود روند افزایشی یا کاهششی معنادار در ویژگی‌های امواج گرما در شهرستان یزد طی دوره‌ی مورد مطالعه است.

در این پژوهش شرط حداقل تداوم سه روزه برای شناسایی و مطالعه امواج گرما در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، روند تغییرات تداوم امواج گرما طی دوره آماری مورد مطالعه افزایشی و معنادار بوده است. نخستین رخداد با تداوم شش روزه در سال ۱۹۸۳ ثبت شد، در حالی که طولانی‌ترین رخداد موج گرما با تداوم ۱۳ روزه در سال ۲۰۱۳ به وقوع پیوست. بزرگی یا شدت موج گرما بر اساس بالاترین دمای ثبت شده در گرم‌ترین روز هر رخداد تعریف شد. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل (۷)، روند تغییرات شدت امواج گرما در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۷ با شیب مثبت بسیار کم (۰.۰۰۷) همراه بوده است، اما این روند در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار تشخیص داده نشد. ($p > 0.05$) بیشینه شدت امواج گرما در سال ۲۰۱۱ با ثبت دمای ۳۲.۶ درجه سلسیوس مشاهده شد. به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که در دو دهه اخیر بزرگی امواج گرما به بیش از ۳۱ درجه سلسیوس رسیده است (شکل ۵). این در حالی است که میانگین بلندمدت دما در ایستگاه یزد ۱۹.۵ درجه سلسیوس و میانگین حداکثر دمای آن ۲۹ درجه سلسیوس گزارش شده است.

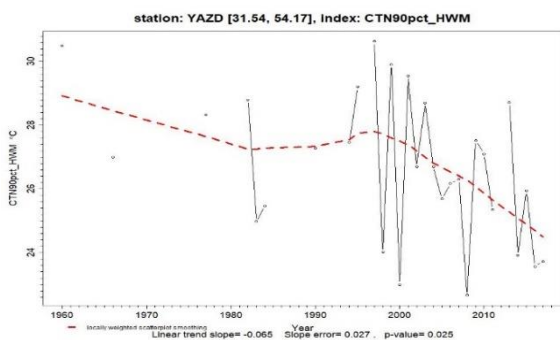


شکل ۳. روند شیب و معنی‌داری تغییرات تعداد رخداد امواج گرما در یزد (۱۹۶۰-۲۰۱۷).

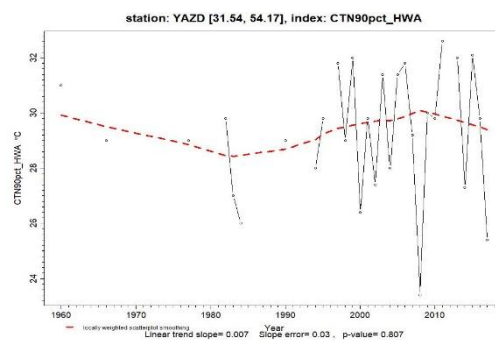


شکل ۴. روند شیب و معنی‌داری تغییرات فراوانی روزهای همراه با امواج گرما در یزد (۱۹۶۰-۲۰۱۷).

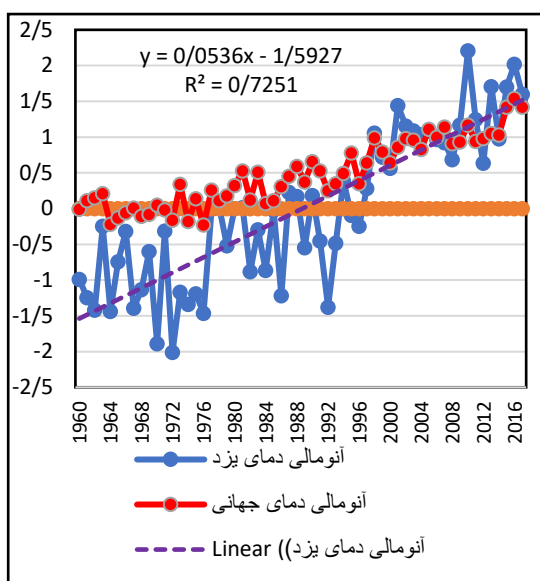
منظور از عبارت‌های روند شیب و معنی‌داری در شکل‌های ۳ تا ۷، نتایج حاصل از تحلیل آماری سری زمانی شاخص‌های امواج گرما در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۷ است. در این پژوهش، روند تغییرات هر شاخص با استفاده از داده‌های خروجی نرم‌افزار R و ابزار ClimPACT محاسبه شده است. در این تحلیل، شیب خط روند بیانگر نرخ تغییر شاخص‌ها در طول زمان و مقدار p-value نشان‌دهنده‌ی سطح معنی‌داری آماری روند در سطح اطمینان ۹۵ تا ۹۹ درصد می‌باشد. خطی که در نمودارها ترسیم شده، همان خط روند برازش شده بر داده‌های سالانه است که جهت آن (مثبت یا منفی) نمایانگر افزایش یا کاهش شاخص‌ها در دوره‌ی مورد بررسی است. بنابراین، این



شکل ۶. روند شیب و معنی‌داری تغییرات میانگین موج گرم در یزد (۱۹۶۰-۲۰۱۷).



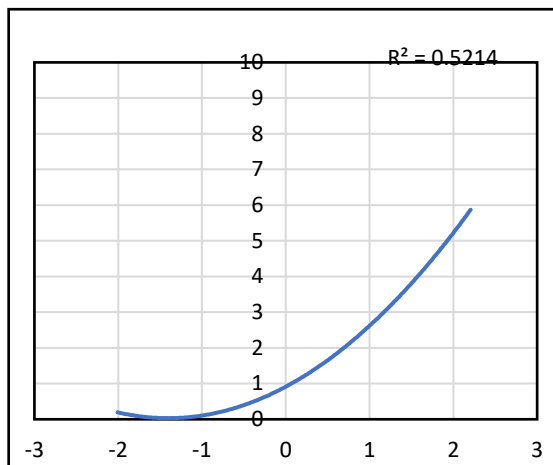
شکل ۵. روند شیب و معنی‌داری تغییرات شدت امواج گرما در یزد (۱۹۶۰-۲۰۱۷).



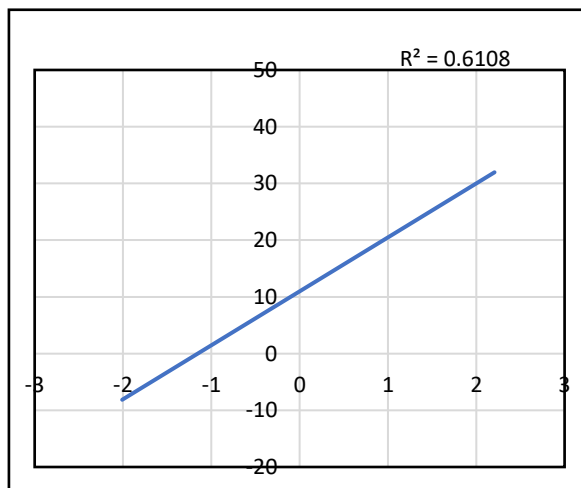
شکل ۷. روند تغییرات ناهنجاری دما در ایستگاه سینوپتیک یزد و مقایسه آن با ناهنجاری در خشکی‌های کره زمین

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، میانگین دمای امواج گرما در دهه گذشته بالاتر از میانگین آن در دهه‌های پیشین بوده است. در دو دهه اخیر، بزرگی امواج گرما به بیش از ۳۱ درجه سلسیوس رسیده و بیشینه آن در سال ۲۰۱۱ با ثبت ۳۲.۶ درجه سلسیوس برآورد گردید. بررسی ناهنجاری دما در ایستگاه سینوپتیک یزد و مقایسه آن با ناهنجاری دمای خشکی‌های کره زمین (شکل ۷) نشان داد که در دو دهه اخیر، در اغلب سال‌ها میزان ناهنجاری دما در ایستگاه یزد بیش از میانگین جهانی خشکی‌ها بوده است. تا پیش از سال ۱۹۹۸، تغییرات ناهنجاری در این ایستگاه چندان قابل توجه نبوده و تنها در برخی سال‌ها کمتر از ۰.۵ درجه سلسیوس ثبت شده است. اما از سال ۱۹۹۸ به بعد روند افزایشی محسوسی مشاهده شد، به طوری که در سال ۲۰۱۰ مقدار ناهنجاری دما به ۲.۲ درجه سلسیوس و در سال ۲۰۱۶ به ۲ درجه سلسیوس رسید.

بررسی رابطه بین ناهنجاری دما و شاخص تعداد رخداد‌های امواج گرما با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که بین این دو متغیر همبستگی قابل توجهی وجود دارد. مقدار ضریب همبستگی حدود ۰.۷ و ضریب تعیین $R^2=0.5214$ به دست آمد که بیانگر آن است بیش از ۵۰ درصد تغییرات تعداد رخداد‌های امواج گرما توسط تغییرات ناهنجاری دما تبیین می‌شود و مابقی تغییرات ناشی از سایر عوامل اقلیمی و محیطی



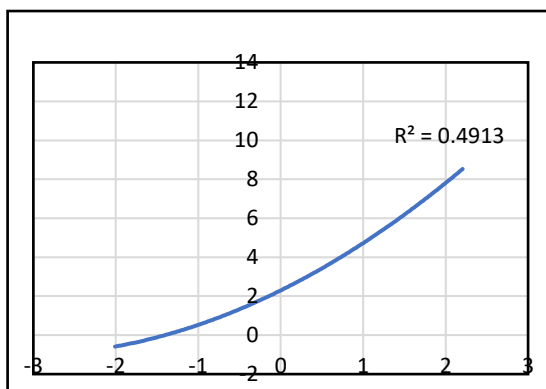
شکل ۸. ارتباط بین ناهنجاری دما و تعداد رخداد های امواج گرما (۱۹۶۰-۲۰۱۷)



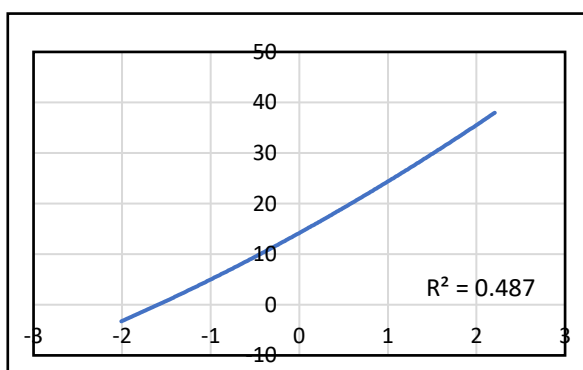
شکل ۹. ارتباط بین ناهنجاری دما و فراوانی روزهای همراه با موج گرما (۱۹۶۰-۲۰۱۷)

تحلیل رابطه بین ناهنجاری دما و شاخص تداوم امواج گرما با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که بین این دو متغیر همبستگی مثبت و قابل توجهی وجود دارد. مقدار ضریب همبستگی حدود ۰.۷ و ضریب تعیین $R^2=0.4913$ محاسبه شد، که نشان می دهد نزدیک به ۵۰ درصد تغییرات تداوم امواج گرما توسط تغییرات ناهنجاری دما توضیح داده می شود و مابقی تغییرات ناشی از سایر عوامل محیطی است (شکل ۱۰). علاوه بر این، بررسی رابطه بین ناهنجاری دما و شدت امواج گرما نیز

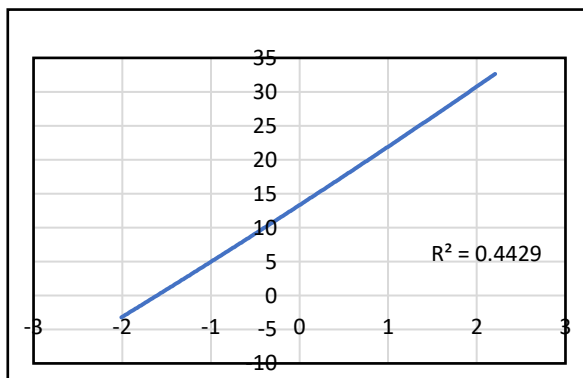
است (شکل ۸). همچنین، تحلیل رابطه بین ناهنجاری دما و شاخص فراوانی روزهای همراه با موج گرما نیز نشان دهنده همبستگی مثبت و معنی دار با ضریب حدود ۰.۷ بود. ضریب تعیین در این حالت $R^2=0.6108$ محاسبه شد که حاکی از آن است بیش از ۶۰ درصد تغییرات در فراوانی روزهای همراه با موج گرما توسط ناهنجاری دما توضیح داده می شود، در حالی که بخش باقیمانده تغییرات ناشی از سایر عوامل می باشد (شکل ۹). از دیدگاه هواشناسی نیز، افزایش ناهنجاری های دمایی به معنای گرم تر شدن سطح زمین و جو می باشد که موجب تثبیت شرایط جوی پایدار، افزایش دفعات و شدت امواج گرما و کاهش تبادل حرارتی با مناطق اطراف می شود. این فرآیند همچنین موجب تقویت جریان های گرمایی و افزایش ظرفیت ذخیره انرژی در جو می شود، که به تشدید رخداد و فراوانی امواج گرما کمک می کند. یافته ها با روندهای بلندمدت تغییر اقلیم، شامل افزایش میانگین دمای سالانه و تکرر ناهنجاری های مثبت دما، همخوانی دارد. بنابراین، نتایج حاصل بیانگر تأثیر مستقیم تغییرات دمایی ناشی از تغییر اقلیم بر وقوع و فراوانی امواج گرما است و نشان می دهد که پیش بینی روندهای آتی امواج گرما نیازمند توجه جدی به تغییرات دما و الگوهای بلندمدت اقلیمی می باشد (شکل های ۸ و ۹).



شکل ۱۰. ارتباط بین ناهنجاری دما و تداوم موج گرما (۱۹۶۰-۲۰۱۷)



شکل ۱۱. رابطه بین ناهنجاری دما و شدت امواج گرما در ایستگاه یزد (۱۹۶۰-۲۰۱۷)



شکل ۱۲. رابطه بین ناهنجاری دما و میانگین دمای امواج گرما در ایستگاه یزد (۱۹۶۰-۲۰۱۷)

همبستگی مثبت و معنی‌داری با ضریب حدود ۰.۷ و ضریب تعیین $R^2=0.4813$ نشان داد، که بیانگر تبیین نزدیک به ۵۰ درصد تغییرات شدت امواج گرما توسط ناهنجاری دما است (شکل ۱۱). در نهایت، تحلیل رابطه بین ناهنجاری دما و میانگین دمای امواج گرما نشان داد که ضریب همبستگی تقریباً ۰.۷ و ضریب تعیین $R^2=0.4429$ است، که تقریباً نیمی از تغییرات میانگین دمای امواج گرما توسط ناهنجاری دما توضیح داده می‌شود و بخش باقیمانده ناشی از سایر عوامل می‌باشد (شکل ۱۲). افزایش ناهنجاری‌های دمایی می‌تواند منجر به افزایش انسداد حرارتی و کاهش جابه‌جایی هوای خنک شود، که به تثبیت سیستم‌های پرفشار و افزایش تداوم امواج گرما کمک می‌کند. همچنین، ناهنجاری‌های مثبت دما باعث تشدید گرادیان دمایی سطح زمین و جو فوقانی می‌شوند، که شدت موج گرما را افزایش داده و میانگین دمای آن‌ها را بالا می‌برد. علاوه بر این، این ناهنجاری‌ها موجب تغییر در الگوهای همرفت و رطوبت محلی شده و ظرفیت جو برای ذخیره انرژی حرارتی را افزایش می‌دهند. این مکانیسم‌ها با روندهای بلندمدت تغییر اقلیم همخوانی دارند و نشان می‌دهند که تغییرات ناهنجاری دما نقش تعیین‌کننده‌ای در تداوم، شدت و میانگین دمای امواج گرما دارد و تحلیل دقیق آن‌ها برای پیش‌بینی روندهای آینده امواج گرما ضروری است.

نتیجه گیری

تأثیرات امواج گرما گسترده است و هیچ روش جهانی یکسانی برای اندازه گیری آنها وجود ندارد بسیاری از این روش‌ها از شاخص‌های مختلفی برای اندازه گیری موج گرما استفاده می‌کنند اما آنچه باعث می‌شود یک روش، معیار اندازه گیری خوبی برای امواج گرما ارائه دهد این است که آن شاخص دارای آستانه نسبی با توجه به شرایط اقلیمی در هر منطقه باشد، توالی روزهای گرم در آن مدنظر قرار گرفته باشد، براساس پارامتر دما باشد و تمام جنبه‌ها و ویژگی‌های امواج گرما از قبیل شدت، فرکانس، مدت زمان و وسعت مکانی را دربرگیرد و ساده، کاربر پسند و تاثیرگذار باشد (Alexander ۲۰۱۵). بررسی رخدادهای موج گرم در ایستگاه سینوپتیک یزد نشان داد که روند تغییرات تعداد رخدادهای فراوانی روزهای همراه با موج گرما در طول دوره آماری ۵۹ ساله افزایشی و معنی دار بوده است. تا قبل از سال ۱۹۹۸، تعداد رخدادهای موج گرم کمتر از ۳ مورد بوده و در بسیاری از سال‌ها هیچ رخداد موج گرمی ثبت نشده است، اما پس از این سال، با افزایش ناهنجاری‌های دمایی، تعداد رخدادهای ۸ و ۹ موج در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ رسید و فراوانی روزهای همراه با موج گرم تا ۴۷ روز افزایش یافت. روند تداوم امواج گرما نیز افزایشی بود، به گونه‌ای که طولانی‌ترین تداوم یک رخداد در سال ۲۰۱۳ با ۱۳ روز ثبت شد. با وجود آن که روند شدت امواج گرما به لحاظ آماری غیر معنی دار بود، بزرگی موج‌ها در دو دهه اخیر افزایش یافته و در سال ۲۰۱۱ به ۳۲.۶ درجه سلسیوس رسید. تحلیل ناهنجاری دما نشان داد

که از سال ۱۹۹۸ به بعد، ناهنجاری‌های دمایی ایستگاه یزد به طور مداوم افزایش یافته و در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ به حدود ۲-۲.۲ درجه سلسیوس رسید. این روند با تغییرات بلندمدت دما در خشکی‌های کره زمین و روندهای جهانی گرمایش همخوانی دارد و نشان دهنده تأثیر قابل توجه تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های امواج گرما در این منطقه است. تحلیل ارتباط آماری بین ناهنجاری دما و شاخص‌های امواج گرما نشان داد که ناهنجاری دما نقش تعیین کننده‌ای در تغییرات فراوانی، تداوم و شدت امواج گرما دارد، به طوری که تا ۶۰ درصد تغییرات فراوانی روزهای همراه با موج گرما توسط ناهنجاری دما تبیین می‌شود. از دیدگاه هواشناسی، افزایش ناهنجاری‌های دمایی باعث تثبیت شرایط جوی پایدار، کاهش تبادل حرارتی با مناطق اطراف و تقویت جریان‌های گرمایی می‌شود، که منجر به افزایش تداوم و شدت امواج گرما و بالا رفتن میانگین دمای آن‌ها می‌گردد. به طور دقیق‌تر، افزایش ناهنجاری دما موجب ایجاد انسداد حرارتی و کاهش نفوذ جریان‌های هوای خنک از مناطق مجاور می‌شود که شرایط را برای طولانی‌تر شدن و شدیدتر شدن امواج گرما مهیا می‌کند. همچنین، افزایش ناهنجاری‌های دما باعث تشدید گرادیان حرارتی سطح زمین و جو فوقانی، افزایش ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی در جو و تغییر الگوهای همرفت و رطوبت محلی می‌شود، که این مکانیسم‌ها به تشدید شدت و میانگین دمای امواج گرما کمک می‌کنند. این فرآیندها با روندهای بلندمدت تغییر اقلیم، شامل افزایش میانگین دمای سالانه و تکرار ناهنجاری‌های مثبت دما، همخوانی دارند و نشان می‌دهند که

ناهنجاری دما نقش مستقیم و تعیین کننده‌ای در تداوم، شدت و میانگین دمای امواج گرما دارد. نقطه عطف تغییرات دما در سال ۱۹۹۸ با جهش محسوس ناهنجاری دما همزمان است و از آن سال به بعد، ویژگی‌های امواج گرما از این جهش تبعیت می‌کنند. افزایش تعداد، تداوم و شدت امواج گرما در دو دهه اخیر می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از تغییر اقلیم محلی تحت تأثیر روندهای گرم شدن جهانی در ایستگاه یزد قلمداد شود. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تحلیل و پیش‌بینی روندهای آینده امواج گرما مستلزم توجه دقیق به تغییرات بلندمدت دما، شاخص‌های اقلیمی و مکانیسم‌های هواشناختی مرتبط است، تا اثرات آن بر سیستم‌های زیست محیطی و انسانی به طور جامع و علمی ارزیابی شود.

منابع

۱. ابراهیمی خوسفی، ز.، درگاهیان، ف.، ۱۳۹۷، بررسی اثر پارامترهای اقلیمی بر تغییر غلظت ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرومتر و ارتباط آن با رخداد فرسایش بادی در مناطق خشک، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۹، شماره ۳۴، ص ۷۶-۹۲.
۲. الماسی، ف.، طاووسی، ت.، حسین آبادی، ن.، (۱۳۹۵)، واکاوی رفتار و تغییرات بسامد رخداد امواج گرمایی شهر اهواز، مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۶ شماره ۱۹، ص ۱۳۷-۱۵۰.
۳. اسمعیل نژاد، م.، خسروی، م.، علیجانی، ب. و مسعودیان، س. ا.، ۱۳۹۲. شناسایی امواج گرمایی ایران، فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۳۳، ص ۳۹-۵۴.
۴. اعتمادیان، ا.، دوستان، ر.، ۱۳۹۶، تحلیل فضایی امواج گرمایی ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۴، شماره ۱، ص ۱۷-۳۲.
۵. ثنائی، م.، خان محمدی، م.، محمدی، ح.، ۱۳۹۴، تحلیل اثر الگوی سینوپتیکی رخداد مخاطره آمیز موج گرمای تابستان ۱۳۹۲ و فوت ناشی از آلودگی شهر تهران. مجله مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۲ شماره ۱ ص ۸۳-۶۷.
۶. رضایی، ف.، احمدی، م.، شکیبا، ع.، ۱۳۹۸، شبیه سازی آستانه دمایی موج گرما طی دوره گرم سال در ایران براساس سناریوهای RCP (در بازه زمانی) ۲۰۴۵-۲۰۱۶، مجله پژوهش-های دانش زمین، سال دهم، شماره ۳۹، صفحات ۲۳۱-۲۴۷.
۷. دارند، م.، ۱۳۹۳، شناسایی و تحلیل زمانی-مکانی امواج گرمایی ایران زمین. مجله جغرافیا و توسعه روره ۱۲ شماره ۳۵ ص ۱۸۰-۱۶۷.
۸. درگاهیان، ف.، رضایی، غ.، ۲۰۱۶، بررسی شرایط سینوپتیکی و بیوکلیماتولوژی شاخص گرما در ایستگاه‌های ساحلی و دریایی جنوب و اثرات آن بر روی سلامت انسان. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای، دوره ۶ شماره ۲ ص ۱۶۰-۱۴۷).
۹. حاتمی زرنه، د.، حجازی زاده، ز.، ناصرزاده، م. ح.، ۱۳۹۸، تحلیل نوسانات زمانی امواج گرمایی منطقه ی شمالغرب ایران و ارتباط آنها با گازهای گلخانه ای و ناهنجاری های دمایی کره ی زمین. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی) دوره ۱۹ شماره ۵۲ ص ۵۶-۳۵.
۱۰. خورشیددوست، ع م.، زنگنه شهرکی، س. و زارعی، ی، محمودی، س.، ۱۳۹۶، تحلیل همدیدی مخاطره امواج گرما در شمال غرب ایران. جغرافیای طبیعی دوره ۱۰ شماره ۳ ص ۱-۱۴.
۱۱. صانعی، م.، صادقی، س.، دوستان، ر.، ۱۳۹۴، تحلیل فضایی-زمانی امواج گرمایی خراسان رضوی. فصلنامه جغرافیایی سرزمین، دوره ۱۲ شماره ۴۷ ص ۳۲-۱۷.
۱۲. قاسمی فره ا.، ناصرپور، س.، ۱۳۹۶، تحلیل سینوپتیکی امواج گرما و سرما در سواحل جنوبی دریای خزر. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، دوره ۲۶ شماره ۱۰۳ ص ۱۳۷-۱۴۶.
۱۳. قویدل رحیمی، ی.، رضایی، م.، ۱۳۹۴، جستاری پیرامون شناسایی، طبقه بندی و تحلیل سینوپتیک امواج گرمایی استان کرمان. نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ۵۴ ص ۲۵۳-۲۷۷.
۱۴. قویدل رحیمی، ی.، ۲۰۱۵، تحلیلی از مخاطره اقلیمی امواج ابر گرم سال ۱۳۸۹ استان خوزستان. نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، دوره ۱۹ شماره ۵۱، ص ۲۸۹-۳۰۹.
۱۵. قویدل رحیمی، ی.، ظرافتی، ه.، فرح زاده‌ی اصل، م.، ۱۳۹۴، کاربرد مدل RegCM4 در تحلیل ساختار سینوپتیک موج گرمای جولای ۲۰۰۰ استان خوزستان. برنامه ریزی و آمایش فضا، دوره ۲۰ شماره ۳، ص ۲۶۹-۲۸۶.
۱۶. کرم پور، م.، رفیعی، ج.، جعفری، ا.، ۱۳۹۶، شناسایی و تحلیل سینوپتیکی امواج گرمایی غرب ایران (ایلام، خوزستان، لرستان، کرمانشاه). مدیریت مخاطرات محیطی دوره ۴ شماره ۳، ص ۲۶۳-۲۷۹.

۱۷. مجرد، ف، معصوم پور، ج، رستمی، ط. ۱۳۹۴، تحلیل آماری
همدیدی امواج گرمایی بالای ۴۰ درجه سلسیوس در غرب ایران،
جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۴ شماره ۱۳، ص ۴۱-۵۷.
18. Dosio, A., Mentaschi, L., Fischer, E. M., & Wyser, K. 2018. Extreme heat waves under 1.5 C and 2 C global warming. *Environmental research letters*, 13(5), 054006.
19. Frölicher, T. L., & Laufkötter, C. 2018. Emerging risks from marine heat waves. *Nature communications*, 9(1), 650.
20. Lhotka, O., Kysely, J., & Farda, A. 2018. Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and applied climatology*, 131(3-4), 1043-1054.
21. Lisa Alexander Chair, WMO CCI Expert Team on Sector-specific Climate Indices (ET SCI) Workshop, Nadi, Fiji 7th – 11th Dec 2015.
22. Oleson, K. W., Anderson, G. B., Jones, B., McGinnis, S. A., & Sanderson, B. 2018. Avoided climate impacts of urban and rural heat and cold waves over the US using large climate model ensembles for RCP8.5 and RCP4. 5. *Climatic change*, 146(3-4), 377-392.
23. Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Gibson, P. B. 2017. Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Scientific reports*, 7(1), 12256.
24. Rohini, P., Rajeevan, M., & Srivastava, A. K. 2016. On the variability and increasing trends of heat waves over India. *Scientific reports*, 6, 26153.
25. Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., & Liu, X. 2018. Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental research letters*, 13(3), 034003.

Detection of Heat Wave Characteristics Trends Associated with Climate Change in Arid Regions (Case Study: Yazd County)

Omidvar, K.^{1*}, Zare Shehneh, M.², Mohammadi Ravari, F.³, Ebrahimi, A.⁴

¹ professor of climatology and faculty member of the Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran.

² graduate students in applied meteorology, Yazd University, Yazd, Iran.

³ Ph.D. student of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran.

⁴ PhD student in synoptic climatology, University of Isfahan.

*Corresponding Author Email: Komidvar@yazd.ac.ir

Received: 18 August 2025, Accepted: 30 October 2025

ABSTRACT

Global warming and climate change are among the most critical environmental challenges of the present era, exerting profound impacts on the climatic dynamics of arid regions. This study aims to identify trends in heat wave characteristics and their relationship with temperature anomalies in Yazd, Iran. For this purpose, daily temperature data from 1960 to 2017 were employed. Heat wave indices, including the number of events, frequency of heat wave days, duration, magnitude, intensity, and the mean temperature of the hottest day within each wave, were calculated using the ClimPACT software in the R (version 2.10) environment to investigate correlations, temperature anomalies at the Yazd station were extracted and compared with global land surface temperature anomalies. The results indicated that the highest number of heat wave events occurred in 2010 and 2016. The frequency of heat wave days showed a statistically significant increasing trend, reaching 47 and 42 days in 2010 and 2016, respectively. A considerable increase in the duration and intensity of heat waves was also observed; the longest duration was recorded in 2013 with 13 consecutive days, while the maximum magnitude of heat waves exceeded 31 °C during the last two decades. Correlation analysis revealed a strong association between all heat wave indices and temperature anomalies, with the frequency of heat wave days showing the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.6108$). Overall, the findings highlight the intensification, persistence, and severity of heat waves in Yazd over recent decades, providing clear evidence of ongoing climate change in this arid region. Understanding future trends of heat waves can significantly contribute to risk management strategies, climate adaptation planning, and efficient energy consumption.

Keywords: Heat waves, Climate change, Temperature anomalies, Heat intensity and duration, Yazd

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Omidvar, K. , Zare Shehneh, M. , Mohammadi Ravari, F. , Ebrahimi, A. (2025). Detection of Heat Wave Characteristics Trends Associated with Climate Change in Arid Regions (Case Study: Yazd County). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science.*, 7(2): 33-45. Doi: 10.22034/jmas.2025.541936.1249

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

