



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

فصلنامه‌ی علمی فضای جغرافیایی

دوره بیست و پنجم، شماره‌ی ۹۲

زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۱۶۲-۱۳۶

مهران اکبرزاده^۱

ثمر مرتضوی^{۲*}

حمید نوری^۳

بهناز عطائیان^۴

تجزیه و تحلیل سینوپتیکی امواج گرمایی در سطح یازده استان غربی کشور

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

چکیده

امواج گرمایی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی به شمار می‌روند که می‌توانند جنبه‌های مختلف حیات انسانی، زیرساخت‌ها و محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار دهند. از این رو، شناسایی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی آینده‌نگر این پدیده، نقش مهمی در مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی‌های اقلیمی دارد. در پژوهش حاضر، با هدف تحلیل ویژگی‌های امواج گرمایی در یازده استان واقع در ناحیه غرب کشور طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، از شاخص‌های مبتنی بر دما و رطوبت برای شناسایی رخداد امواج گرمایی استفاده شد. پس از تعیین اپیزودهای گرمایی، دوره بازگشت آن‌ها با بهره‌گیری از توزیع گمبل محاسبه گردید و الگوهای هم‌مدید مؤثر نیز شناسایی شد. داده‌های آماری و محاسبات مرتبط در محیط نرم‌افزار MATLAB تحلیل شد. نتایج حاصل نشان داد که رخداد امواج گرمایی کوتاه‌مدت در استان‌های غربی کشور احتمال بیشتری دارد، در حالی که امواج گرمایی بلندمدت با ماندگاری بالا از بسامد کمتری برخوردارند.

^۱ دانشجوی دکتری محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

^۲ گروه منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

^۳ گروه منابع طبیعی و آب‌خیزداری، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

^۴ گروه منابع طبیعی و آب‌خیزداری، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

بررسی توزیع زمانی امواج گرمایی نشان داد که در فصول سرد سال، شامل پاییز و زمستان، فراوانی وقوع امواج گرمایی نسبت به فصول گرم (بهار و تابستان) بیشتر است. تحلیل مکانی نیز حاکی از آن است که شدت و تعداد رخداد امواج گرمایی در غرب استان کرمانشاه و جنوب استان زنجان بالاتر بوده و در مقابل، در استان‌های آذربایجان غربی و فارس مقادیر کمتری مشاهده شده است. افزون بر این، روند تغییرات امواج گرمایی طی بازه مورد مطالعه نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار در فراوانی، تداوم و دامنه رخداد آن‌هاست که از تشدید مخاطرات گرمایی در آینده نزدیک حکایت دارد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، غرب کشور، امواج گرمایی، سینوپتیک

مقدمه

یکی از مهم‌ترین بلاهای اقلیمی، امواج گرمایی است که هر سال پیامدهای زیست‌محیطی مخربی ایجاد می‌کند (Rezaei Banafsheh and Maleki Marsht, 2022; Ding et al, 2010). امواج گرمایی به‌عنوان دوره‌های غیرمعمول و طولانی افزایش دما تعریف می‌شوند (Alamasi et al, 2016). اگر امواج گرمایی بیش از ۵ درجه بالاتر از حد نرمال به مدت ۵ روز ادامه یابد، می‌تواند برای محیط‌زیست و انسان‌ها بحران‌زا باشد (Mojarrad et al, 2018). مطابق تعریف ارائه‌شده توسط (IPCC, 2021)، موج گرمایی عبارت است از دوره‌ای کوتاه‌مدت یا چندروزه از افزایش غیرمعمول دما که از آستانه اقلیمی منطقه فراتر می‌رود و می‌تواند حتی یک روز نیز به طول انجامد. همچنین Perkins and Alexander (2013)، موج گرمایی را دوره‌ای می‌دانند که در آن دما حداقل یک روز از آستانه صدکی (مانند صدک ۹۰ یا ۹۵) بالاتر رود؛ تعریفی که امکان شناسایی موج‌های کوتاه‌مدت، یک‌روزه و چندروزه را فراهم می‌کند. تداوم و تکرار این امواج موجب تلفات و تخریب شدید محیط‌زیست می‌شود. همچنین تأثیر آن بر زیرساخت‌ها و خدمات عمومی می‌تواند سبب اختلال در شبکه برق، نقص سیستم حمل‌ونقل و توقف خدمات بهداشتی و اورژانسی و سایر خدمات حیاتی شود (NOAA, 2007).

از طرفی، امواج گرمایی می‌تواند شرایط پایدار و راکد اتمسفری ایجاد کند و در نتیجه آلاینده‌های سمی، به‌ویژه در مناطق شهری و صنعتی، در جو محبوس شوند. این وضعیت یک مشکل زیست‌محیطی گسترده به‌وجود می‌آورد (Almusaed, 2011). امواج گرمایی می‌تواند خسارت‌های جانی و مالی فراوانی به همراه داشته باشد. ایران نیز مشابه دیگر مناطق جهان از این پدیده در امان نیست و بررسی دقیق آن در سطح کشور ضروری است (Shademan, 2012). در واقع امواج گرمایی یکی از مهم‌ترین فجایع اقلیمی است که پیش‌بینی به موقع و مناسب آن می‌تواند یک سیستم هشدار دهنده‌ی بسیار کارآمد و مطلوب به منظور ارائه راهکار کاهش پیامدها باشد (Baldi, 2004). راهکارهای کاهش پیامدهای امواج گرمایی شامل بهره‌گیری از سامانه‌های پیش‌بینی هواشناسی، شناخت سازوکار امواج گرمایی و توسعه روش‌های مؤثر برای مقابله و کاهش اثرات آن است (Kovats, 2006). شناخت این پیامدها از ضرورت‌های اولیه برای شناسایی محیط و برنامه‌ریزی مبتنی بر این آگاهی است (Hamidianpour et al, 2023).

تحقیقات متعددی در سطح کشور و جهان در زمینه بررسی امواج گرمایی و اثرات آن انجام شده است. در پژوهشی توسط، Founda and Santamouris (2017) رابطه میان امواج گرمایی و جزایر حرارتی شهری در شهر آتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی مثبت بین امواج گرمایی و جزایر حرارتی وجود دارد، که این امر باعث افزایش چشم‌گیر خطر گرما و آسیب‌پذیری جوامع شهری شده است. در همین راستا، Maleki Marsht et al, (2022)، به بررسی رابطه امواج گرمایی و جزایر حرارتی در شهر اهواز پرداختند. نتایج نشان داد که امواج گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی در ماه‌های گرم و سرد تأثیر داشته است، هرچند میزان تأثیر در ماه‌های گرم بیشتر از ماه‌های سرد بوده است. در تحقیقی دیگر، Karimpour et al, (2017) سینوپتیک امواج گرمایی در چهار استان غربی کشور را مورد تحلیل قرار دادند. بررسی‌های ماهانه امواج گرمایی نشان داد که بیشترین زمان وقوع این امواج در فروردین ماه است. بررسی فصلی نشان داد که زبانه‌های کم‌فشار گاهی تا نواحی مرکزی ایران و حتی شمال‌شرق کشور کشیده می‌شوند و نفوذ هوای گرم در فصل سرد سبب افزایش دما در این مناطق شده است.

Hosseinpour et al, (2023)، در دامنه جنوبی البرز بالاترین فراوانی سالانه رخداد امواج گرمایی را در سال ۲۰۱۵ گزارش کردند. تحلیل روند نشان داد که افزایش رخداد امواج گرمایی در دوره سرد سال مشهود بوده است، در حالی که در دیگر فصل‌ها تغییر معنی‌داری مشاهده نشد. تحقیقات بین‌المللی نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. Croitoru et al, (2016)، طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۵ در رومانی نشان دادند که امواج گرمایی می‌تواند آثار زیانباری بر محیط‌زیست و جوامع انسانی داشته باشد. Thompson et al, (2022)، نیز امواج گرمایی سال ۲۰۲۱ در غرب آمریکای شمالی را بررسی کردند و مشاهده نمودند که این امواج توزیع گسترده‌ای دارند. پیش‌بینی می‌شود که شدت و گستره آن‌ها در آینده افزایش یابد، شرایطی که می‌تواند مناطق کم‌تجربه در مواجهه با امواج شدید را در معرض خطر قرار دهد. Rohini et al, (2019)، نیز در بخشی از کشور هند نشان دادند که این کشور طی دهه‌های آینده با افزایش طولانی‌مدت امواج گرمایی مواجه خواهد شد و Moises et al, (2018) افزایش امواج گرمایی را در مناطق مرکزی ایالات متحده برای اواخر قرن بیست‌ویکم پیش‌بینی کردن. در تحقیقات داخلی دیگر، Maleki Marsht and Sabahani, (2023) به بررسی و تجزیه و تحلیل امواج گرمایی در شهرهای تبریز و اردبیل پرداختند. نتایج نشان داد که این امواج کوتاه‌مدت بوده و در دوره‌های ۴-۵ روزه رخ داده‌اند. بیشترین فراوانی در فصل بهار مشاهده شد و پیش‌بینی می‌شود که در آینده بیشتر در بهار و پاییز رخ دهند. Hosseini and Khormabad, (2023) نیز به بررسی امواج گرمایی مخاطره‌آمیز در استان آذربایجان شرقی پرداختند و گزارش کردند که شدت امواج گرمایی در تمامی شهرستان‌های این استان افزایش یافته است. آن‌ها همچنین بیان کردند که با گرم‌تر شدن کره زمین ناشی از تغییر اقلیم، امواج گرمایی کوچک‌تر به هم می‌پیوندند. در نتیجه، امواج شدیدتر، بزرگ‌تر و ماندگارتر شکل می‌گیرند. افزون بر این، با کاهش عرض جغرافیایی، بسامد و شدت وقوع امواج گرمایی در منطقه افزایش خواهد یافت. در همین راستا، Hosseinpour et al, (2023) به بررسی و تعیین نقطه تغییر آستانه دمایی امواج گرمایی و سرمایگی در ایران زمین پرداختند. نتایج بیانگر آن است که آستانه‌های روند افزایشی دمای کمینه در نواحی شمال غرب، زاگرس و جنوب شرق ایران مشهود است و جهش و تغییر در امواج گرمایی رخ داده است. Hosseini and Khormabad گزارش کردند که شدت امواج گرمایی در تمامی شهرستان‌های استان آذربایجان شرقی

افزایش یافته است. آن‌ها اشاره کردند که با گرم‌تر شدن کره زمین، امواج گرمایی کوچک‌تر به هم می‌پیوندند و در نتیجه امواج شدیدتر، بزرگ‌تر و ماندگارتر شکل می‌گیرند.

به طور کلی، پیشینه تحقیقات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که امواج گرمایی با ویژگی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، از پیامدهای تغییر اقلیم در جهان هستند. این امواج، تحت تأثیر استقرار سامانه‌های کم‌فشار و پرفشار در سطح منطقه و جریانات هوا، بر شدت و فراوانی خود اثر می‌گذارند و می‌توانند موجب افزایش دما و گسترش جزایر حرارتی شهری شوند. مطالعات در ایران نشان داده‌اند که امواج گرمایی علاوه بر افزایش دما، با شدت و ماندگاری متفاوت در مناطق مختلف رخ می‌دهند. این امواج با تأثیر بر زیرساخت‌ها، جوامع انسانی، پوشش گیاهی و الگوهای محیطی، می‌توانند پیامدهای قابل توجهی برای محیط‌زیست و کشاورزی داشته باشند. یافته‌ها همچنین حاکی از آن است که روند وقوع و شدت امواج گرمایی در آینده افزایش خواهد یافت و نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر در سطح ملی و مقایسه‌ای بین مناطق است. با توجه به روند افزایشی شدت، فراوانی و ماندگاری امواج گرمایی در سطح جهان و ایران، اثرات آن‌ها بر محیط‌زیست، جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و کشاورزی قابل توجه است. مطالعات داخلی نشان داده‌اند که امواج گرمایی در مناطق مختلف ایران دارای الگوهای مکانی و زمانی متفاوت هستند. این امواج می‌توانند موجب افزایش خطر جزایر حرارتی شهری، تغییر در پوشش گیاهی، کاهش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی و اختلال در سیستم‌های زیرساختی شوند. با این حال، تحلیل یکپارچه و مقایسه‌ای امواج گرمایی در مناطق غرب ایران و شناسایی الگوهای بلندمدت آن‌ها تاکنون به صورت جامع انجام نشده است. انجام این پژوهش ضروری است تا الگوهای مکانی و زمانی امواج گرمایی در غرب ایران شناسایی شوند و شدت، مدت و تکرار آن‌ها تحلیل گردد. یافته‌ها می‌توانند به پیش‌بینی، مدیریت و کاهش اثرات مخرب این پدیده در سطح منطقه کمک کنند. هدف این پژوهش، شناسایی و تحلیل الگوهای مکانی و زمانی امواج گرمایی در مناطق غرب ایران و بررسی شدت، مدت و تکرار این پدیده در سطح ایستگاه‌های اقلیمی مختلف است. این مطالعه تلاش می‌کند اثرات امواج گرمایی بر محیط‌زیست، کشاورزی و جوامع انسانی را بهتر درک کند و زمینه لازم برای پیش‌بینی، مدیریت و کاهش پیامدهای مخرب آن را فراهم سازد.

روش کار

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل ۱۱ استان غربی کشور، از جمله آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان، زنجان، کرمانشاه، لرستان، ایلام، همدان، فارس، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویر احمد است (شکل ۱). جمعیت منطقه مورد مطالعه این پژوهش بر اساس سرشماری رسمی کشور در سال ۱۳۹۵ برابر است با ۲۲/۹۸ میلیون نفر است که ۲۸/۷۵ درصد از جمعیت کشور را در بر می‌گیرد. مساحت منطقه مورد مطالعه نیز ۳۸۳۵۵۵ کیلومتر مربع است که ۲۳/۲۷ درصد از سطح کشور را تشکیل می‌دهد (جدول ۱). منطقه از لحاظ اقلیمی بسیار متنوع است و چند نوع اقلیم را در بر می‌گیرد. این اقلیم‌ها شامل مناطق نیمه‌خشک با اقلیم مدیترانه‌ای مانند سنندج، مناطق نیمه‌مرطوب از جمله مریوان، و مناطق گرم و خشک مانند مهران و گله‌دار هستند. از نظر دمایی،

زیرینه در استان کردستان یکی از سردترین شهرهای کشور و مهران در استان ایلام یکی از گرم‌ترین شهرها به شمار می‌رود.

در این پژوهش برای شناسایی امواج گرمایی، از داده‌های دمای بیشینه ایستگاه‌های اقلیمی و هم دید در بازه زمانی حداقل ۳۰ سال و داده‌های محیطی بهره گرفته شد (Perkins-Kirkpatrick and Lewis, 2020). داده‌های دمای این ایستگاه‌ها از سازمان هواشناسی ایران دریافت گردید. برای بررسی امواج گرمایی از روش میانبایی استفاده شد. میانبایی در مطالعات پهنه‌ای مکانی اقلیمی ضروری است، زیرا تأسیس ایستگاه‌های سنجش عناصر اقلیمی محدود است. کمبود ایستگاه‌هایی که به طور کامل حاوی چنین مشخصه‌هایی باشند اقلیم شناسان را ملزم به رعایت اصولی معین در میانبایی می‌سازد (Asakareh, 2008). با اعمال پیش‌فرض‌های میانبایی، دمای بیشینه روزانه ایستگاه‌های ایران بر روی یک شبکه بر اساس بهترین روش میانبایی برآورد شد. پس از میانبایی، پایگاه داده‌ای فراهم شد که بر روی سطرها روزها و بر روی ستون‌ها یاخته‌ها قرار گرفت. داده‌های روزانه همدمای بیشینه منطقه مورد مطالعه که بدین طریق فراهم شده‌اند، دارای اعتبار بوده و صحت آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت. به دلیل تعداد زیاد ایستگاه‌های هواشناسی، از روش خوشه‌بندی K-means برای شناسایی ایستگاه‌های هم‌پوشان استفاده شد. ابتدا اطلاعات ۱۰۵ ایستگاه با حداقل ۱۵ سال داده استخراج شد، سپس داده‌ها در ۱۵ کلاس طبقه‌بندی شدند و نهایتاً ۲۳ ایستگاه با خوشه‌بندی K-means انتخاب شدند. برای شناسایی امواج گرمایی یازده استان غربی کشور، داده‌های حداکثر دمای روزانه ۲۳ ایستگاه هم‌دید در بازه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ به مدت ۳۰ سال بر روی شبکه ۱۸×۱۸ کیلومتر با روش کریجینگ میانبایی شد (پیوست ۱).

جدول ۱- مساحت و جمعیت منطقه مورد مطالعه

Table 1- Area and population of the studied area

ردیف	نام استان	مساحت (کیلومتر مربع)	جمعیت (نفر)
۱	آذربایجان غربی	۳۷۰۵۹	۳۲۶۵۲۱۹
۲	آذربایجان شرقی	۴۵۴۹۱	۴۰۴۰۴۰۰
۳	کردستان	۲۹۳۴۹	۱۶۴۸۱۹۵
۴	زنجان	۲۱۷۷۳	۱۲۶۴۳۲۴
۵	کرمانشاه	۲۵۰۰۹	۱۹۵۲۴۳۴
۶	لرستان	۲۹۳۰۸	۱۷۶۰۶۴۹
۷	ایلام	۲۰۱۰۰	۵۸۰۱۵۸
۸	همدان	۲۰۱۷۳	۱۷۵۸۳۶۸
۹	فارس	۱۲۲۶۰۸	۵۰۵۴۷۰۰
۱۰	چهار محال و بختیاری	۱۶۴۲۱	۹۴۷۷۶۳
۱۱	کهگیلویه و بویر احمد	۱۶۲۶۴	۷۱۳۰۵۲
	جمع	۳۸۳۵۵۵	۲۲۹۸۵۱۶۲

گرمایی منطقه، داده‌های حاصل از همین فرایند میان یابی است که در هر روز بر روی پهنه‌ی منطقه، وضعیت دمای بیشینه را روشن می‌سازد.

اطلاعات میان یابی شده دمای بیشینه ایستگاه‌ها، امکان برآورد اطلاعاتی را فراهم می‌سازد که برای شناسایی موج‌های گرمایی منطقه، رفتارهای زمانی- مکانی و ویژگی‌های آن‌ها مهم است. در این تحقیق جهت بررسی امواج گرمایی از روش نمایه دوام دوره گرم (CSDI) بهره گرفته شد که در آن موج گرما تعداد روزهایی از سال است که دست کم ۶ روز پیاپی دمای روزانه بیشتر از صدک ۹۰ ام باشد؛ هدف اصلی این نمایه ارزیابی جنبه‌های تغییر اقلیم از جمله تغییر در شدت، فراوانی و مدت رخداد‌های دماست (Frich et al, 2002). در این مطالعه برای شناسایی دماهای فرین گرم از نمایه‌ی انحراف بهنجار شده‌ی دما استفاده شده است (Fujibe et al, 2007; Masoudian and Darand, 2011). برای محاسبه‌ی این نمایه نخست میانگین بلندمدت دما برای هر یک از روزهای سال محاسبه شده تا انحراف دمای هر روز خاص نسبت به میانگین بلندمدت مبنای داوری درباره‌ی گرمی آن روز قرار گیرد. میانگین بلندمدت دماهای هر روز با رابطه زیر بدست آمده است.

$$T(i, j) = \frac{\sum_{\text{تاریخ}} T(i, j, n)}{N} \quad \text{معادله (۳)}$$

در این رابطه i دمای روز i ام، ماه j ام و سال N ام است. در این پژوهش از داده‌های میان‌یابی شده قابل دسترس استفاده شد. به همین دلیل، میانگین بلندمدت دمای هر روز سال محاسبه گردید و بر مبنای همان روز تعیین شد. جهت حذف نوفه‌های موجود در میانگین بلندمدت، فیلتر میانگین متحرک ۹ روزه سه بار بر روی داده‌ها اعمال شد. به این ترتیب، میانگین بلندمدت دمای هر روز بر اساس دمای همان روز و ۲۶ روز همسایه‌ی آن محاسبه شد. به بیان دیگر، دمای هر روز نماینده‌ی وضعیت کلی دما در همان روز و دمای دو هفته قبل و دو هفته بعد آن است. در نتیجه، اثرات عوامل زودگذر محلی که موجب نوسان دما می‌شوند حذف شده و اثرات سامانه‌های هم‌دید که تغییرات کلان دما را تعیین می‌کنند، تقویت می‌شوند. سپس، به کمک رابطه زیر، انحراف دمای هر یک از داده‌های مورد بررسی نسبت به میانگین بلندمدت محاسبه گردید.

$$\Delta T = (i, j, n) = T(i, j, n) - T(i, j) \quad \text{معادله (۴)}$$

در اینجا $\Delta T = (i, j, n)$ انحراف دمای روز i ام، ماه j ام سال n ام نسبت به میانگین بلند مدت دمای همان روز تقویمی است. شدت انحراف دما یا ΔT بستگی به تغییرات روز به روز دما دارد و بر حسب فصل و منطقه متفاوت بوده است. از آنجا که بر روی هر نقطه‌ی جغرافیایی معین دامنه‌ی تغییرات دما در روزهای مختلف سال می‌تواند بسیار متفاوت باشد، بنابراین مقادیر مطلق انحراف دما از میانگین بلند مدت هر سال می‌تواند بسیار متفاوت باشد، بنابراین مقادیر مطلق انحراف دما از میانگین بلند مدت هر روز $\Delta T = (i, j, n)$ نمی‌تواند نماینده‌ی شدت انحراف

دمای آن روز نسبت به دیگر روزهای سال باشد. برای نمونه در دوره‌ی گرم سال که دما از ثبات بیشتری برخوردار است یک درجه سلسیوس انحراف از دمای بلندمدت رویداد بزرگتری به شمار می‌آید تا همین مقدار انحراف دما در دوره‌ی سرد سال که دما بی‌ثبات‌تر و دامنه‌ی تغییرات آن زیادتر است. در ادامه جهت بررسی و مقایسه مقادیر انحراف دمای زمان‌های مختلف در یک نقطه‌ی جغرافیایی و مکان‌های مختلف در یک زمان معین، مقادیر مطلق انحراف دما به کمک پراش دما استانداردسازی شد، سپس همانند تغییرات روز به روز، پراش T در ۳۱ روز برای هر روز تقویمی طبق رابطه ۵ به دست آمد. سپس میانگین متحرک ۹ روزه سه بار انجام شد (Masoudian and Darand, 2011).

$$\sigma^2(i, j) = \sum_{n=1340}^{1397} \sum_{j'=j-16}^{j+16} [\Delta T(i, j', n) - \Delta T(i, j)]^2 \div 31N \quad \text{معادله (۵)}$$

مقدار $\Delta T(i, j)$ میانگین انحراف دما از رابطه (۶) بدست می‌آید:

معادله (۶)

$$\Delta T(i, j) = \sum_{n=1340}^{1397} \sum_{j'=j-16}^{j+16} T(i, j', n) \div 31N$$

سرانجام نمایه‌ی فومیکی^۵ یا انحراف دمای نرمال شده (NTD) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$x(i, j, n) = \Delta T(i, j, n) \div \sigma(i, j) \quad \text{معادله (۷)}$$

که $\sigma(i, j) = \sqrt{\sigma^2 * (i, j)}$ هست (Masoudian and Darand, 2011). برای هر یک از یاخته‌های مختلف مقدار نمایه‌ی انحراف دمای نرمال شده به همین روش محاسبه شد، سپس میانگین این نمایه بر روی کل منطقه برای هر یک از داده‌ها در روز به دست آمد. در ادامه پس از برنامه نویسی در نرم‌افزار Matlab روزهایی که ضریب NTD آن‌ها بالاتر از ۲ بود و حداقل ۲ روز تداوم داشت توسط این برنامه از ماتریس NTD جدا شد و بنام امواج گرمایی ایران معرفی گردید. در این برنامه روزها از توالی ۲ روز تا ۲۵ روز و انحراف ۲ تعریف گردید. همچنین این برنامه درصد گستره هر موج گرما در غرب ایران را نیز محاسبه می‌کند. برای شناسایی دوره‌های مورد نظر، شرط زیر اعمال شد: اگر مقدار NTD در p نمونه متوالی (از $i+1$ تا $i+p-1$) بزرگ‌تر یا مساوی ۲ باشد و مقدار NTD در نمونه بعدی ($i+p$) کمتر یا مساوی ۲ باشد، آن دوره به عنوان یک موج گرمایی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش آستانه $NTD \geq 2$ بر اساس مبانی آماری و ادبیات موضوع انتخاب شده است. مقدار ۲ نشان‌دهنده دو انحراف معیار بالاتر از میانگین بلندمدت دما بوده و مطابق تعریف رویدادهای حدی، بیانگر وقوع دماهای «غیرعادی و شدید» است. این آستانه در مطالعه (Masoudian & Darand, 2011) و سایر پژوهش‌های مرتبط با ناهنجاری‌های حرارتی

⁵ Fumiaki

ایران نیز به کار رفته و با معیارهای مورد استفاده در سازمان هواشناسی ایران برای تعریف رخداد‌های حدی همخوانی دارد.

نتایج و بحث پژوهش

نحوه بررسی و شناسایی امواج گرمایی با دیگر ارزیابی‌های مخاطرات محیطی کاملاً متفاوت است. تنوع و تغییرپذیری آب و هوا، دماهای حدی گوناگونی را در زمان و مکان‌های مختلف تعیین می‌نماید و این موضوع فهم و درک ما را نسبت به امواج گرمایی پیچیده می‌سازد. به همین دلیل در ابتدا با توجه به ماندگاری امواج گرمایی و افزایش تأثیر امواج گرمایی بر منطقه با توجه به طولانی شدن دوره، مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی تداوم دوره‌های ماندگاری امواج گرمایی

دوره‌های امواج گرمایی برای ۲۳ ایستگاه در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ بررسی شد. نتایج نشان داد که ایستگاه‌های غربی و شمال‌غربی، مانند گیلان غرب، بیشترین فراوانی امواج کوتاه‌مدت (یک روزه) را داشتند، در حالی که ایستگاه‌هایی مانند لار کمترین فراوانی را نشان دادند. همچنین مشاهده شد که با افزایش مدت زمان امواج، فراوانی و تکرار آن‌ها کاهش می‌یابد؛ به طوری که امواج با تداوم بیش از ۱۰ روز بسیار نادر بوده و تنها در پنج ایستگاه رخ داده است. بیشترین فراوانی کلی امواج کوتاه‌مدت (یک روزه) در سطح منطقه ۳۵۵۶ بار ثبت شده است (جزئیات در جدول ۲). این الگو نشان می‌دهد که امواج کوتاه‌مدت و یک تا دو روزه بخش عمده‌ای از وقوع امواج گرمایی در غرب کشور را تشکیل می‌دهند.

بررسی نقشه‌های امواج گرمایی (شکل ۲) نشان می‌دهد که غرب استان کرمانشاه به طور مداوم بیشترین تأثیر را از امواج گرمایی در تمامی دوره‌های تداوم و ماندگاری داشته است. برای امواج کوتاه‌مدت یک تا دو روزه، استان‌های کرمانشاه، ایلام، زنجان و لرستان بیشترین تحت تأثیر را داشته‌اند، در حالی که استان‌های جنوب غربی مانند فارس کمترین میزان رخداد را نشان داده‌اند. با افزایش مدت تداوم امواج (سه روزه و بیشتر)، الگوهای مشابهی مشاهده شد؛ بیشترین رخداد در استان‌های کرمانشاه، ایلام، همدان، لرستان و مناطق غربی استان‌های کردستان و آذربایجان شرقی ثبت شده و کمترین رخداد در شمال شرق فارس و مناطق شمال غربی آذربایجان غربی رخ داده است. این الگوها نشان می‌دهند که با افزایش طول دوره امواج، تمرکز وقوع آن‌ها در مناطق غربی و شمال‌غربی کشور بیشتر می‌شود، در حالی که بخش‌های جنوبی و شمالی با فراوانی کمتر مواجه هستند (شکل ۲).

در پژوهش حاضر، بررسی امواج گرمایی در سطح یازده استان غربی کشور نشان داد که امواج گرمایی یک روزه نسبت به امواج با تداوم بیش از یک روز، بیشترین فراوانی را دارند. این یافته با مطالعات پیشین همسو است؛ به طور مثال، Esmaeili Nejad et al, (2013) نشان دادند که امواج گرمایی کوتاه‌مدت (۱-۳ روز) نسبت به امواج بلندمدت (۱۰ روزه یا بیشتر) تکرار بیشتری دارند. این روند نشان می‌دهد که فراوانی وقوع امواج گرمایی با افزایش مدت زمان ماندگاری آن‌ها کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، بین ماندگاری و تکرار امواج گرمایی رابطه‌ای معکوس وجود دارد. این الگو در مطالعات بین‌المللی نیز مشاهده شده است. برای نمونه، Thompson et al, (2022) در بررسی

امواج گرمایی سال ۲۰۲۱ در غرب آمریکای شمالی گزارش کردند که امواج کوتاه‌مدت با توزیع گسترده در سطح منطقه، بیشترین فراوانی را دارند و هر چه مدت زمان ماندگاری افزایش یابد، فراوانی وقوع کاهش می‌یابد. این شواهد نشان می‌دهد که امواج کوتاه‌مدت، به‌ویژه در مناطق با ساختار جوی پویا، نقش اصلی در افزایش خطر گرمایی دارند و می‌توانند فشار فوری بر زیرساخت‌ها و جوامع انسانی وارد کنند. با توجه به نتایج این پژوهش، در غرب ایران نیز روند مشابهی مشاهده شد؛ امواج یک روزه با بیشترین تکرار در ایستگاه‌هایی مانند گیلان غرب، کرمانشاه و ایلام رخ داده‌اند، در حالی که امواج بلندمدت (۱۰ روز یا بیشتر) بسیار نادر بوده و تنها در پنج ایستگاه مشاهده شدند. این تفاوت فراوانی می‌تواند ناشی از ویژگی‌های اقلیمی منطقه، توپوگرافی و الگوهای جریانات هوایی محلی و منطقه‌ای باشد. به‌ویژه قرارگیری برخی مناطق تحت تأثیر سامانه‌های کم‌فشار و پرفشار موقت، موجب افزایش احتمال وقوع امواج کوتاه‌مدت می‌شود، در حالی که شرایط لازم برای ایجاد امواج بلندمدت کمتر رخ می‌دهد. این یافته‌ها اهمیت شناسایی و پایش امواج کوتاه‌مدت را برجسته می‌سازند، چرا که علی‌رغم مدت زمان کوتاه، تعداد تکرار بالای آن‌ها می‌تواند اثرات قابل توجهی بر سلامت انسانی، کشاورزی و زیرساخت‌ها ایجاد کند. بنابراین، توسعه سیستم‌های هشدار سریع و برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات این امواج، به‌ویژه در مناطق حساس، ضروری به نظر می‌رسد.

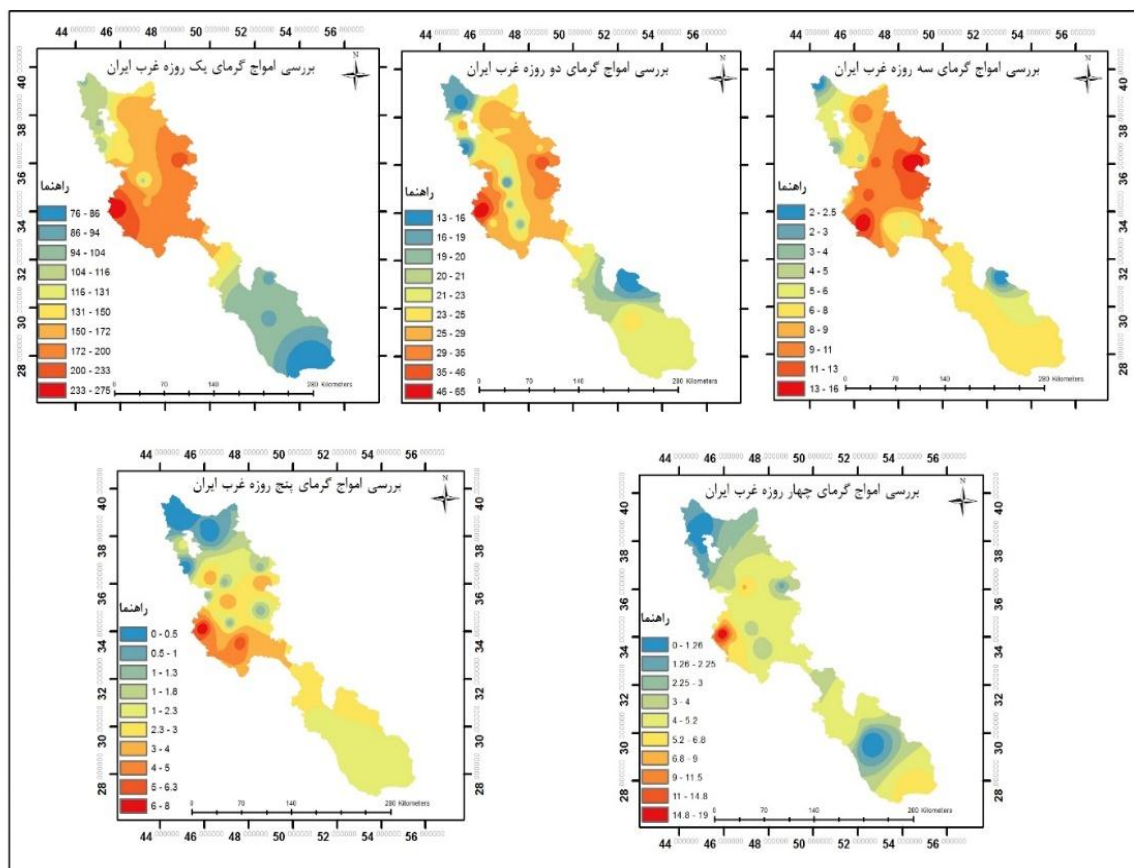
جدول ۲- تعداد امواج گرمایی طی دوره‌های مختلف در بازه ۳۰ سال (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

Table 2- Number of heat waves during different periods in 30 years (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

ردیف	نام ایستگاه	یک روزه	دو روزه	سه روزه	چهار روزه	پنج روزه	شش روزه	هفت روزه	هشت روزه	نه روزه	ده روزه	بیش از ده روز
۱	ارومیه	۱۰۲	۲۶	۶	۱	۲	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۲	تبریز	۱۷۰	۲۸	۱۰	۳	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۳	همدان	۱۸۰	۳۰	۱۲	۵	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	مریوان	۱۷۴	۳۲	۱۰	۵	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۵	نورآباد ممسنی	۹۴	۲۰	۸	۵	۲	۰	۱	۰	۲	۳	۰
۶	لار	۷۶	۲۲	۶	۶	۲	۱	۰	۱	۰	۰	۱
۷	شیراز	۹۳	۲۴	۶	۰	۲	۰	۱	۲	۰	۱	۰
۸	ایلام	۲۲۰	۲۳	۱۶	۶	۴	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۹	خرم آباد	۱۷۸	۲۷	۵	۴	۳	۱	۱	۰	۱	۰	۰
۱۰	ماکو	۱۰۳	۱۶	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	خوی	۱۰۵	۱۴	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	خدابنده	۲۱۲	۴۰	۱۶	۲	۴	۳	۳	۰	۰	۱	۱
۱۳	زرینه	۱۶۲	۲۱	۱۲	۷	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	سنندج	۱۱۰	۱۶	۱۰	۴	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	سقز	۱۳۶	۲۴	۴	۳	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	زنجان	۱۹۵	۲۴	۱۰	۵	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	کرمانشاه	۱۶۸	۱۹	۱۰	۳	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۱۸	آباده	۹۳	۱۳	۲	۵	۳	۰	۲	۱	۰	۰	۰
۱۹	روانسر	۱۹۸	۳۰	۱۲	۴	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۲۰	پیرانشهر	۱۰۵	۱۴	۳	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

۲۱	قصر شیرین	۲۳۵	۳۷	۶	۴	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۲
۲۲	گیلان غرب	۲۷۵	۶۴	۱۰	۱۹	۸	۰	۲	۲	۰	۰	۴
۲۳	کوهدهشت	۱۷۲	۱۹	۶	۳	۶	۳	۰	۱	۰	۱	۳
	جمع	۳۵۵۶	۵۸۳	۱۸۷	۹۸	۵۵	۱۷	۱۳	۸	۴	۶	۱۱

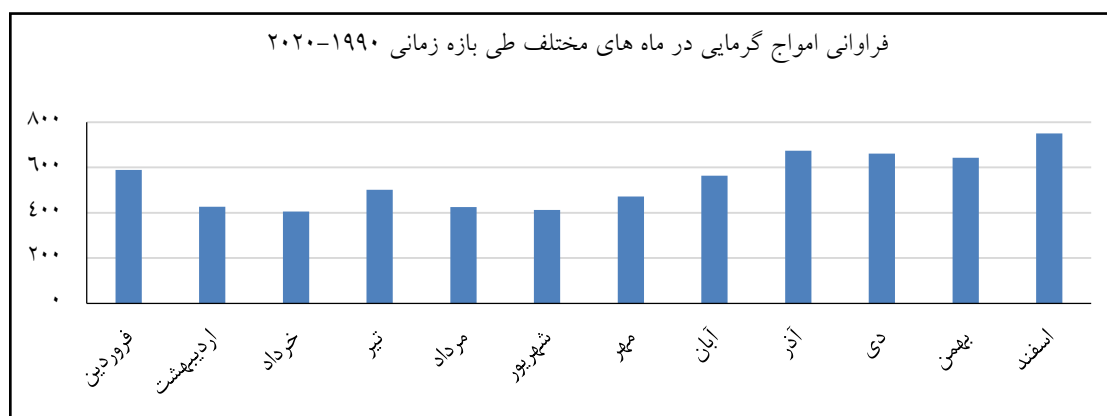
بررسی نقشه‌های امواج گرمایی در یازده استان غربی کشور طی بازه زمانی ۳۰ ساله نشان داد که الگوی مکانی این امواج در ماه‌های مختلف متفاوت است. در فروردین ماه، بیشترین رخداد امواج گرمایی در غرب استان کرمانشاه مشاهده شد، در حالی که استان فارس، جنوب استان کهگیلویه و بویر احمد و استان آذربایجان غربی کمترین میزان رخداد را داشتند. در اردیبهشت ماه، بیشترین رخداد امواج گرمایی مربوط به نوار غربی استان کردستان، غرب استان کرمانشاه، شمال غرب استان لرستان و استان ایلام بود. کمترین رخداد در شمال غرب استان آذربایجان غربی، شمال شرق استان زنجان، جنوب استان کهگیلویه و بویر احمد و شمال و مرکز استان فارس ثبت شد. در خرداد ماه، بیشترین رخداد امواج گرمایی در جنوب غرب استان همدان، استان کرمانشاه، استان ایلام و غرب استان لرستان رخ داد، در حالی که شمال شرق استان آذربایجان شرقی، شمال شرق استان زنجان و شمال شرق استان فارس کمترین رخداد را داشتند.



بررسی نقشه‌های امواج گرمایی در یازده استان غربی کشور طی بازه زمانی ۳۰ ساله نشان داد که الگوی مکانی و زمانی این امواج در طول سال متفاوت است. بیشترین رخداد امواج گرمایی در ماه‌های تابستان (تیر، مرداد و

شهریور) در استان‌های کرمانشاه، ایلام، لرستان، همدان و جنوب استان فارس ثبت شد، در حالی که کمترین رخداد در شمال غرب آذربایجان غربی، شمال شرق آذربایجان شرقی و شمال استان فارس مشاهده شد. در فصول پاییز و زمستان (مهر تا بهمن)، بیشترین رخداد امواج گرمایی در استان‌های زنجان، همدان، لرستان، کرمانشاه و ایلام رخ داد و کمترین میزان آن در استان‌های آذربایجان غربی، شمال غرب آذربایجان شرقی و جنوب استان فارس ثبت شد. به طور کلی، غرب استان کرمانشاه و استان ایلام به عنوان نواحی با بیشترین شدت و فراوانی امواج گرمایی شناسایی شدند و استان‌های آذربایجان غربی و فارس کمترین تأثیر را تجربه کردند (شکل ۴).

بررسی ماهانه امواج گرمایی در سطح یازده استان غربی کشور نشان داد که اسفندماه بیشترین وقوع امواج گرمایی را داشته است. این نتیجه نشان می‌دهد که حتی در فصل سرد، شرایط اقلیمی و استقرار سامانه‌های جوی می‌توانند موج‌های کوتاه‌مدت اما شدید گرمایی ایجاد کنند. یافته‌های مشابه در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است؛ به طور مثال، (Esmaeili Nejad et al, 2013) نشان دادند که برخی مناطق ایران با وجود کاهش میانگین دما در اسفند، همچنان شاهد وقوع این امواج هستند. همچنین (Hamidianpour et al, 2023) و (Maleki Marsht et al, 2022) بیشترین رخداد موج‌های گرمایی را در انتهای سال زمستانی گزارش کرده‌اند، که نقش نفوذ هوای گرم از مناطق جنوبی و غربی و عبور سامانه‌های کم‌فشار را برجسته می‌کند. از منظر دینامیک جوی، افزایش رخداد امواج گرمایی در اسفندماه می‌تواند ناشی از استقرار موقت پرفشارهای ساکن و عبور نواحی کم‌فشار از غرب و شمال غرب کشور باشد، که موجب افزایش کوتاه‌مدت دما در برخی ایستگاه‌ها می‌شود. این الگو با نتایج بین‌المللی نیز همخوانی دارد؛ (Thompson et al, 2022) نشان دادند که حتی در ماه‌های سرد، مناطق تحت تأثیر سامانه‌های جوی خاص می‌توانند با موج‌های گرمایی شدید مواجه شوند. بنابراین، تحلیل فصلی و ماهانه امواج گرمایی باید تمام ماه‌های سال را پوشش دهد و اهمیت شناسایی و پیش‌بینی این امواج کوتاه‌مدت در تمامی فصول برای کاهش اثرات بر محیط‌زیست، کشاورزی و جوامع انسانی تأکید می‌شود. همبستگی این نتایج با تحقیقات داخلی و بین‌المللی، اعتبار یافته‌های حاضر را افزایش داده و ضرورت توسعه سیستم‌های هشدار سریع را تقویت می‌کند.



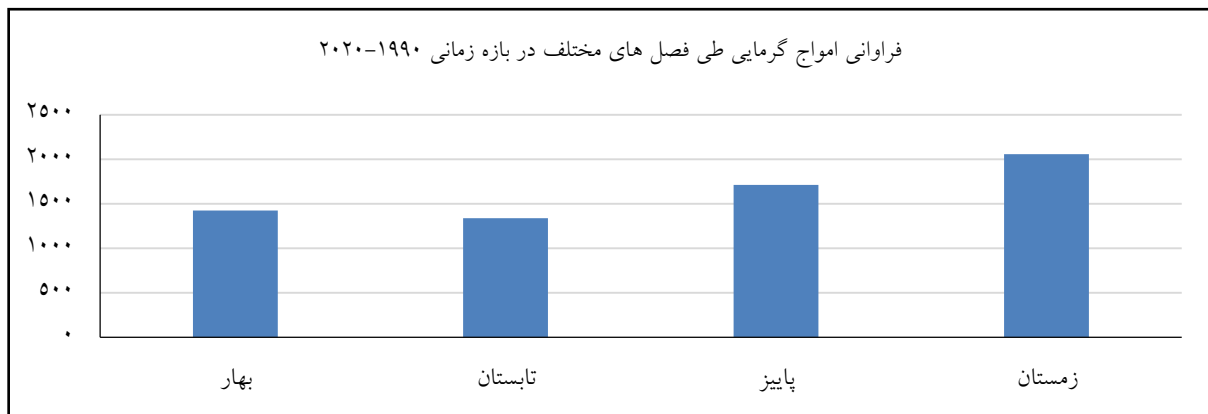
شکل ۳- فراوانی امواج گرمایی در ماه‌های مختلف طی بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰

Figure 3- The frequency of heat waves in different months during the period of 1990-2020

جدول ۳- بررسی ماهانه امواج گرمایی در بازه ۳۰ سال (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

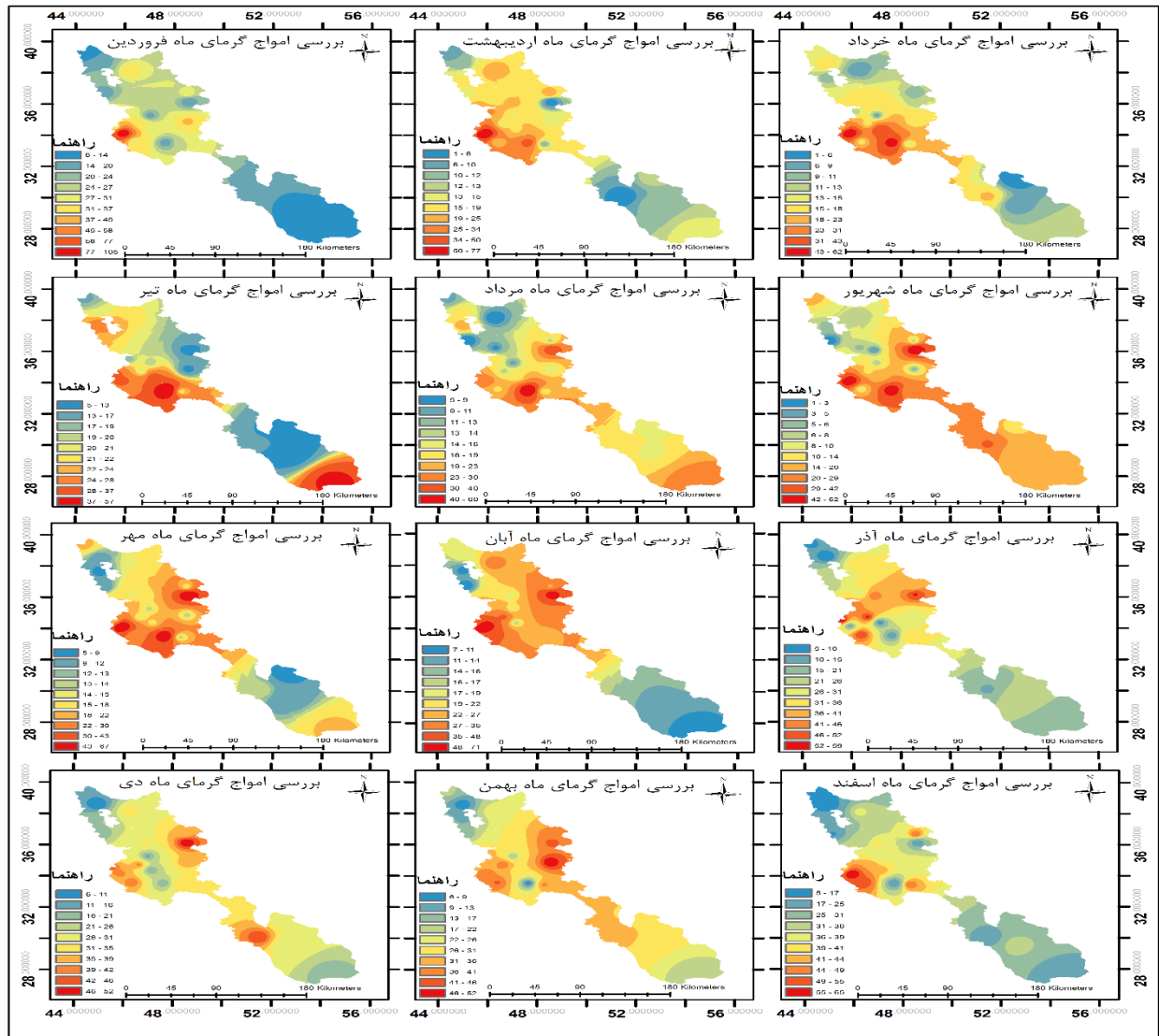
Table 3- Monthly review of heat waves in the period of 30 years (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

ردیف	نام ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱	ارومیه	۲۴	۱۵	۹	۲۸	۲۳	۵	۷	۹	۲۲	۲۱	۱۱	۱۹
۲	تبریز	۳۵	۲۳	۶	۲۲	۶	۶	۱۵	۳۱	۳۶	۳۴	۲۶	۳۸
۳	همدان	۳۹	۱۳	۱۵	۱۱	۱۴	۵	۱۳	۳۰	۲۷	۳۷	۵۱	۳۸
۴	مریوان	۳۰	۲۶	۱۱	۱۸	۱۹	۹	۲۰	۲۲	۴۵	۲۸	۳۲	۳۹
۵	نورآباد ممسنی	۱۶	۲	۱۹	۱۴	۱۷	۳۰	۱۴	۱۶	۱۴	۴۵	۳۴	۲۱
۶	لار	۸	۱۴	۱۲	۴۲	۲۸	۱۶	۱۹	۸	۱۵	۱۷	۱۷	۲۰
۷	شیراز	۱۲	۱۲	۷	۵	۱۵	۱۶	۹	۱۲	۲۶	۲۷	۲۶	۳۴
۸	ایلام	۲۹	۲۰	۱۵	۲۷	۱۸	۹	۲۳	۳۶	۵۲	۴۲	۴۲	۵۴
۹	خرم آباد	۲۷	۱۰	۱۳	۲۱	۱۶	۲۱	۱۳	۲۳	۳۶	۳۵	۳۷	۴۷
۱۰	ماکو	۶	۶	۱۳	۱۶	۱۰	۱۸	۲۰	۱۷	۹	۱۱	۱۸	۵
۱۱	خوی	۱۶	۱۰	۱۸	۲۰	۱۷	۹	۱۱	۱۸	۵	۶	۶	۱۳
۱۲	خدابنده	۱۴	۱	۱۱	۸	۴۰	۶۲	۶۲	۵۷	۵۳	۵۱	۴۳	۱۹
۱۳	زرینه	۲۵	۲۰	۱۷	۱۹	۱۳	۳	۱۶	۱۷	۴۴	۳۲	۲۷	۴۰
۱۴	سنندج	۱۷	۱۴	۸	۱۹	۱۰	۶	۱۳	۱۸	۴۰	۱۵	۱۸	۳۶
۱۵	سقز	۲۴	۱۵	۱۷	۲۱	۸	۵	۱۴	۲۰	۲۷	۲۷	۲۵	۳۱
۱۶	زنجان	۳۰	۲۳	۹	۱۷	۱۳	۷	۱۵	۲۶	۳۷	۳۶	۳۸	۴۷
۱۷	کرمانشاه	۲۷	۱۷	۴۳	۳۱	۱۶	۱۵	۱۶	۱۶	۹	۱۶	۲۹	۴۲
۱۸	آباده	۱۵	۱۳	۱	۵	۱۴	۱۱	۵	۱۴	۲۱	۲۶	۲۹	۲۸
۱۹	روانسر	۳۲	۱۳	۱۵	۲۰	۱۳	۱۲	۱۴	۳۷	۵۳	۴۰	۴۰	۴۳
۲۰	پیرانشهر	۱۴	۱۳	۱۳	۲۲	۵	۱	۹	۷	۲۱	۱۶	۱۳	۱۶
۲۱	قصر شیرین	۲۹	۳۰	۲۰	۳۰	۲۴	۲۸	۱۸	۳۵	۵۸	۴۳	۳۶	۴۰
۲۲	گیلان غرب	۱۰۴	۷۷	۶۱	۲۹	۲۸	۶۲	۶۶	۷۰	۱۴	۴۰	۳۸	۶۴
۲۳	کوهدشت	۱۶	۴۰	۵۳	۵۶	۵۸	۵۷	۶۰	۲۵	۱۰	۱۷	۷	۱۷
	جمع	۵۸۹	۴۲۷	۴۰۶	۵۰۱	۴۲۵	۴۱۳	۴۷۲	۵۶۴	۶۷۴	۶۶۲	۶۴۳	۷۵۱



شکل ۵- فراوانی امواج گرمایی در فصل‌های مختلف طی بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰

Figure 5- The frequency of heat waves in different seasons during the period of 1990-2020



شکل ۴- فراوانی امواج گرمایی در ماه‌های مختلف در سطح استان‌های غربی

Figure 4- The frequency of heat waves in different months in the western provinces

بررسی فصلی امواج گرمایی در سطح استان‌های غربی کشور

بررسی فصلی امواج گرمایی در سطح ۲۳ ایستگاه مطالعاتی در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ نشان داد که گیلان غرب با ۲۴۲ روز بیشترین فراوانی رخداد امواج گرمایی در فصل بهار را داشته است. همچنین ایستگاه خدابنده با ۱۷۲ روز در فصل پاییز، بیشترین فراوانی رخداد امواج گرمایی را در بین ایستگاه‌های مطالعاتی به خود اختصاص داده است. کمترین رخداد امواج گرمایی نیز در دو ایستگاه ماکو در فصل بهار و خوی در فصل زمستان با ۲۵ روز طی بازه زمانی مذکور ثبت شد (جدول ۴).

بررسی کلی‌تر در سطح یازده استان غربی کشور نشان داد که فصل زمستان پررخدادترین فصل موج‌های گرمایی در منطقه بوده و پس از آن فصل پاییز قرار دارد. تمرکز بالای امواج گرمایی در فصل‌های سرد سال نسبت به فصل‌های گرم (بهار و تابستان) مشهود است؛ کمترین رخداد امواج گرمایی در تابستان با ۱۳۳۹ روز طی بازه زمانی مورد مطالعه ثبت شد (شکل ۵).

بررسی نقشه‌های فصلی امواج گرمایی در سطح یازده استان غربی کشور نشان داد که بیشترین رخداد در اکثر فصل‌ها مربوط به غرب استان کرمانشاه و استان ایلام بوده و کمترین رخداد عمدتاً در شمال غرب آذربایجان غربی و شمال شرق فارس مشاهده شده است (شکل ۵). این نتایج روندهای کلی مکانی امواج گرمایی را در طول سال نشان می‌دهد و جزئیات کامل‌تر فراوانی و تداوم امواج گرمایی در جداول و نقشه‌ها ارائه شده است.

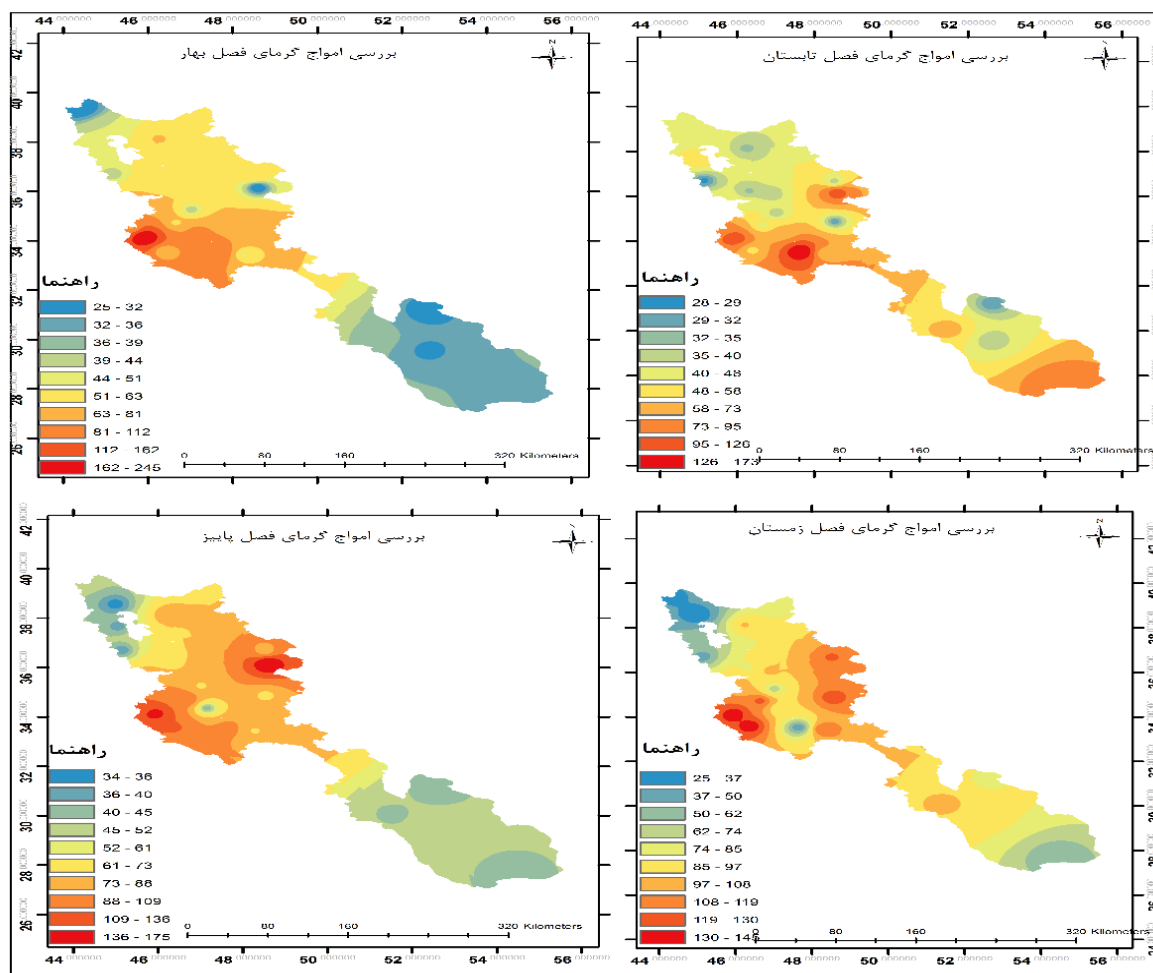
جدول ۴. بررسی فصلی امواج گرمایی در بازه ۳۰ سال (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

Table 4. Seasonal survey of heat waves in the period of 30 years (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

ردیف	نام ایستگاه	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
۱	ارومیه	۴۸	۵۶	۳۸	۵۱
۲	تبریز	۶۴	۳۴	۸۲	۹۸
۳	همدان	۶۷	۳۰	۷۰	۱۲۶
۴	مریوان	۶۷	۴۶	۸۷	۹۹
۵	نورآباد ممسنی	۳۷	۶۱	۴۴	۱۰۰
۶	لار	۳۴	۸۶	۴۲	۵۴
۷	شیراز	۳۱	۳۶	۴۷	۸۷
۸	ایلام	۶۴	۵۴	۱۱۱	۱۳۸
۹	خرم آباد	۵۰	۵۸	۷۲	۱۱۹
۱۰	ماکو	۲۵	۴۴	۴۶	۳۴
۱۱	خوی	۴۴	۴۶	۳۴	۲۵
۱۲	خدابنده	۲۶	۱۱۰	۱۷۲	۱۱۳
۱۳	زرینه	۶۲	۳۵	۷۷	۹۹
۱۴	سندج	۳۹	۳۵	۷۱	۶۹
۱۵	سقز	۵۶	۳۴	۶۱	۸۳
۱۶	زنجان	۶۲	۳۷	۷۸	۱۲۱
۱۷	کرمانشاه	۸۷	۶۲	۴۱	۸۷
۱۸	آباده	۲۹	۳۰	۴۰	۸۳
۱۹	روانسر	۶۰	۴۵	۱۰۴	۱۲۳
۲۰	پیرانشهر	۴۰	۲۸	۳۷	۴۵
۲۱	قصر شیرین	۷۹	۸۲	۱۱۱	۱۱۹
۲۲	گیلان غرب	۲۴۲	۱۱۹	۱۵۰	۱۴۲
۲۳	کوهدشت	۱۰۹	۱۷۱	۹۵	۴۱
	جمع	۱۴۲۲	۱۳۳۹	۱۷۱۰	۲۰۵۶

بررسی نقشه‌های فصلی امواج گرمایی نشان داد که بیشترین رخداد در فصل‌های پاییز و زمستان، به‌ویژه زمستان، متمرکز بوده و کمترین رخداد در استان‌های آذربایجان غربی و جنوب فارس مشاهده شده است (شکل ۶). این نتایج نشان می‌دهد که در مناطق غرب ایران، حتی در فصول سرد، شرایط اقلیمی و استقرار سامانه‌های جوی

می‌توانند موج‌های گرمایی قابل توجهی ایجاد کنند. این یافته با نتایج تحقیق Hosseinpour et al, (2023) و Maleki Marsht et al, (2022) همخوانی دارد که بیشترین رخداد امواج گرمایی را در اواخر زمستان گزارش کرده‌اند. در مقابل، نتایج مطالعه Maleki Marsht and Sabahani, (2023) در شهرهای تبریز و اردبیل حاکی از بیشترین فراوانی امواج گرمایی در فصل بهار بوده است؛ این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت‌های اقلیمی منطقه‌ای و ویژگی‌های مکانی سامانه‌های جوی باشد.



شکل ۶- فراوانی امواج گرمایی در فصل‌های مختلف در سطح استان‌های غربی

Figure 6- The frequency of heat waves in different seasons in the western provinces

بررسی سالانه امواج گرمایی در سطح استان‌های غربی کشور

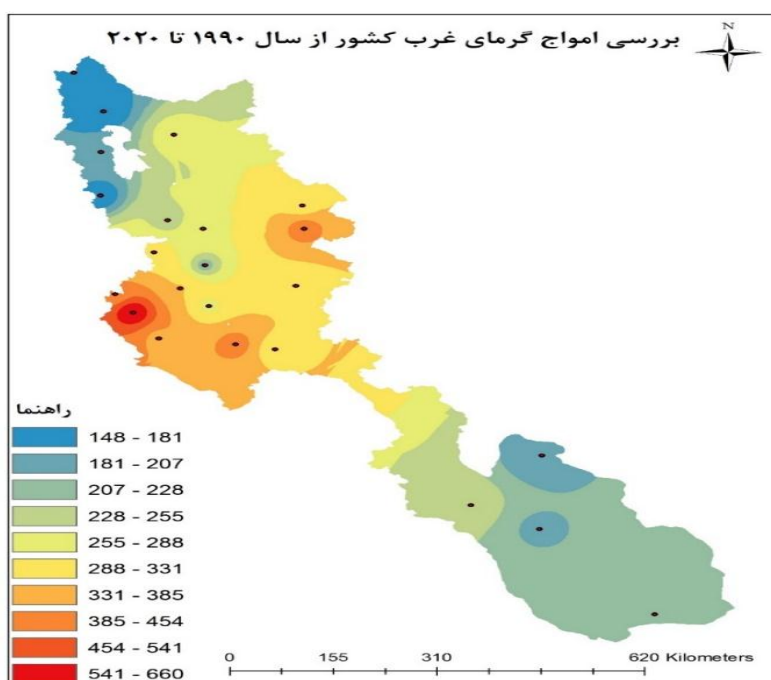
بررسی سالانه امواج گرمایی در ۲۳ ایستگاه مطالعاتی طی بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ نشان داد که بیشترین فراوانی وقوع امواج گرمایی مربوط به ایستگاه گیلان غرب و ایستگاه خدابنده بوده است، در حالی که ایستگاه‌های خوی و ماکو کمترین تعداد رخداد را داشته‌اند (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که غرب استان کرمانشاه و شمال غرب ایران بیشترین حساسیت به امواج گرمایی سالانه را دارند.

جدول ۵. بررسی سالانه امواج گرمایی در بازه ۳۰ سال (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

Table 5. Annual survey of heat waves in the period of 30 years (1990-2020)

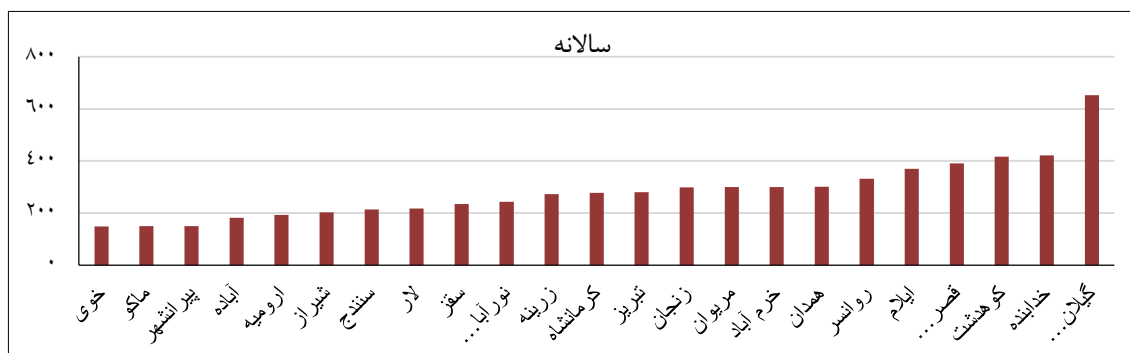
سالانه	نام ایستگاه	ردیف	سالانه	نام ایستگاه	ردیف	سالانه	نام ایستگاه	ردیف	سالانه	نام ایستگاه	ردیف
۳۳۲	روانسر	۱۹	۲۷۳	زرینه	۱۳	۲۰۲	شیراز	۷	۱۹۳	ارومیه	۱
۱۵۰	پیرانشهر	۲۰	۲۱۴	سنندج	۱۴	۳۷۰	ایلام	۸	۲۸۰	تبریز	۲
۳۹۱	قصر شیرین	۲۱	۲۳۴	سقز	۱۵	۳۰۰	خرم آباد	۹	۳۰۱	همدان	۳
۶۵۳	گیلان غرب	۲۲	۲۹۸	زنجان	۱۶	۱۴۹	ماکو	۱۰	۲۹۹	مریوان	۴
۴۱۶	کوهدشت	۲۳	۲۷۷	کرمانشاه	۱۷	۱۴۸	خوی	۱۱	۲۴۳	نورآباد ممسنی	۵
۱۹۳	جمع		۱۸۲	آباده	۱۸	۴۲۱	خداآباد	۱۲	۲۱۷	لار	۶

بررسی نقشه‌های امواج گرمایی برای بازه زمانی ۳۰ ساله (برای ایستگاه‌های مورد مطالعه) در سطح یازده استان غربی کشور نشان داد که استان آذربایجان غربی و شمال شرق استان فارس کمترین رخ داد امواج گرمایی را داشته است و بیشترین رخ داد در این فصل مربوط به غرب استان کرمانشاه و جنوب شرق استان زنجان است (شکل ۷ و ۸).



شکل ۷- فراوانی امواج گرمایی در سال‌های مختلف در سطح استان‌های غربی

Figure 7- The frequency of heat waves in different years in the western provinces



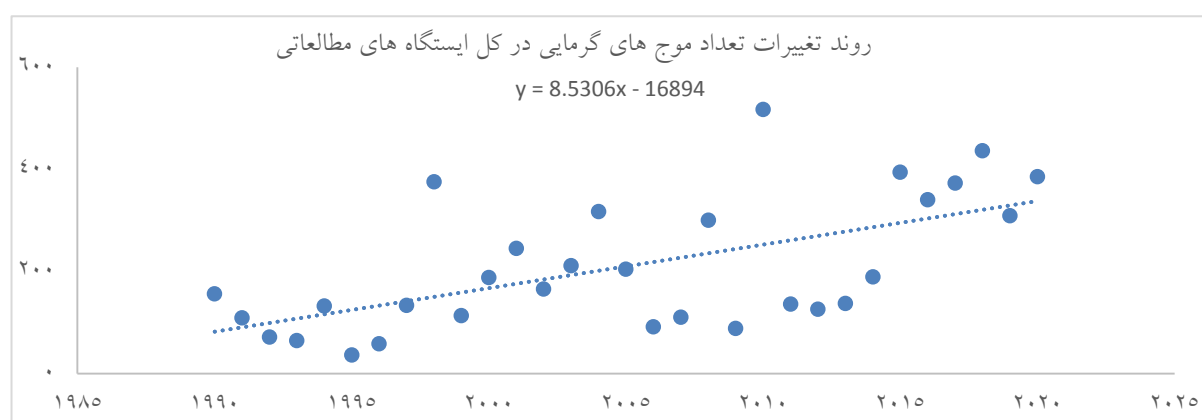
شکل ۸. فراوانی امواج گرمایی در فصل‌های مختلف طی بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰

Figure 8. Frequency of heat waves in different seasons during the period of 1990-2020

بررسی روند وقوع امواج گرمایی در سطح استان‌های غربی کشور

نمودار زیر روند تغییرات امواج گرمایی را از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ در غرب کشور را نشان می‌دهد، بررسی این تغییرات در سطح ۲۳ ایستگاه مطالعاتی نشان داد که روند وقوع امواج گرمایی دارای یک‌روند مثبت است و این نشان می‌دهد در سطح ایستگاه مورد مطالعه سالانه تعداد امواج گرمایی که رخ داده، افزایش یافته است؛ با توجه به شیب خط رگرسیون نمودار این موضوع روشن است که در سال‌های آتی نیز تعداد وقوع امواج گرمایی در منطقه غرب کشور افزایش خواهد بود (شکل ۹).

بالاترین فراوانی سالانه رخداد امواج گرمایی در سطح تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ به ترتیب با فراوانی ۵۱۷ و ۴۳۶ رخ داده است (شکل ۹).



شکل ۹. فراوانی وقوع امواج گرمایی در کل ایستگاه‌های مطالعاتی طی بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰

Figure 9. Frequency of occurrence of heat waves in all study stations during the period of 1990-2020

افزایش وقوع امواج گرمایی در فصل سرد سال می‌تواند با شرایط سینوپتیکی جوی مرتبط باشد. در زمستان، استقرار سامانه‌های پرفشار بلندمدت یا بلوک‌های سینوپتیکی در منطقه غرب ایران مانع از نفوذ هوای سرد و نوسانات مرطوب می‌شود و باعث افزایش دما نسبت به میانگین بلندمدت می‌گردد. تثبیت پرفشار و ماندگاری آن در تراز میانی جو، همراه با آسمان صاف و کاهش رطوبت هوا، زمینه بروز امواج گرمایی زمستانی را فراهم می‌آورد. این پدیده با مشاهدات مشابه در عرض‌های میانی دیگر نقاط جهان همخوانی دارد، جایی که امواج گرمایی شدیداً غالباً با تله‌کانکشن‌های پایدار و الگوهای بلوک‌جویی پرفشار همبسته هستند (Miloshevich et al., 2023; Robson et al., 2022). نتایج فصلی نشان داد که زمستان و پاییز به ترتیب بحرانی‌ترین فصل‌ها از نظر فراوانی امواج گرمایی هستند و تابستان، با وجود انتظار گرما در آن فصل، کمترین رخداد موج گرما را داشته است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییرات سینوپتیکی و شرایط جوی پایدار در فصل‌های سرد می‌تواند اثراتی فراتر از الگوهای معمول اقلیمی ایجاد کند و موجب بروز موج گرمایی شود. علاوه بر این، روند صعودی وقوع امواج گرمایی در بازه ۳۰ ساله مورد مطالعه، بیانگر این است که تغییر اقلیم و تغییرات در الگوهای کلان جوی احتمالاً نقش مؤثری در افزایش تعداد و تداوم این امواج داشته‌اند.

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که امواج گرمایی در غرب ایران، به ویژه در استان‌های کرمانشاه، ایلام، لرستان و زنجان، الگوهای فضایی و زمانی مشخص دارند و بیشترین رخدادها مربوط به امواج کوتاه مدت یک روزه است. علاوه بر این، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که فصل‌های پاییز و زمستان بیشترین فراوانی و شدت امواج گرمایی را دارند. این یافته‌ها می‌تواند به دلیل گسترش پرفشار جنب حاره‌ای عربستان و تشکیل ریج در تراز میانی جو باشد (نجفی و احمدی (۱۳۹۹) و (Mansouri & Mohammadi (2021)). روند افزایشی تعداد و شدت امواج گرمایی طی بازه ۱۹۹۰-۲۰۲۰، به ویژه در مناطق کوهستانی زاگرس، نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی و شرایط سینوپتیکی پایدار نقش کلیدی در افزایش مخاطرات گرمایی دارند (عساکره و رضایی ۱۴۰۱). بنابراین، تحلیل سینوپتیکی همراه با بررسی مکانی و زمانی، ابزار ضروری برای پیش‌بینی، مدیریت و کاهش خطرات امواج گرمایی در استان‌های غرب و شمال غرب کشور است.

نتیجه‌گیری

نتایج و تحلیل‌های این پژوهش نشان داد که امواج گرمایی در یازده استان غربی کشور دارای الگوهای مکانی، زمانی و فصلی مشخصی هستند و روند افزایشی قابل توجهی را طی بازه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهند. بررسی ماندگاری امواج گرمایی نشان داد که امواج کوتاه مدت یک روزه بیشترین فراوانی را دارند و با افزایش طول دوره تداوم، تعداد رخدادها کاهش می‌یابد؛ به طوری که امواج با تداوم بیش از ده روز تنها در پنج ایستگاه محدود رخ داده‌اند. این یافته با نتایج Esmaili Nejad et al, (2013) و Thompson et al, (2022) همخوانی دارد و نشان می‌دهد فراوانی امواج گرمایی با طول مدت کوتاه بیشتر و با افزایش مدت زمان تداوم کاهش می‌یابد. از منظر مکانی، استان‌های غرب کرمانشاه، ایلام، لرستان و زنجان بیشترین میزان رخداد امواج گرمایی را تجربه کرده‌اند، در حالی که استان‌های شمال شرق فارس، شمال استان آذربایجان غربی و برخی مناطق مرکزی کمتر تحت تأثیر این امواج قرار داشته‌اند. این الگوها نشان می‌دهد که مناطق غرب کشور به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خود، آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به امواج گرمایی دارند و نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی شهری، کشاورزی و محیط‌زیستی هستند. بررسی ماهانه امواج گرمایی نشان داد که اسفند، آذر و دی پررخدادترین ماه‌ها هستند و خرداد کمترین رخداد را دارد. این الگو نشان‌دهنده تمرکز موج‌های گرمایی در سه ماهه آخر سال و اوایل فصل سرد است و اهمیت پایش و مدیریت مخاطرات گرمایی حتی در فصل سرد را برجسته می‌کند. همچنین، تحلیل فصلی نشان داد که بیشترین فراوانی امواج گرمایی در زمستان و پاییز رخ می‌دهد، در حالی که تابستان کمترین رخدادها را دارد، که این نتیجه با شرایط سینوپتیکی و استقرار پرفشارهای بلندمدت در فصل سرد توجیه می‌شود. این یافته‌ها با مشاهدات مشابه در دیگر نقاط جهان همسو است (Miloshevich et al., 2023; Robson et al., 2022).

تحلیل سالانه نیز روندی صعودی را از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان داد، به طوری که بیشترین رخدادها در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ ثبت شده‌اند و شیب مثبت روند رگرسیون بیانگر ادامه این روند در سال‌های آینده است. این افزایش مستمر فراوانی و تداوم امواج گرمایی، به ویژه در فصل‌های سرد و مناطق غربی، نشان‌دهنده تأثیر تغییرات اقلیمی و تغییر الگوهای کلان جوی بر وقوع امواج گرمایی است و ضرورت اتخاذ راهبردهای مدیریتی برای کاهش

آسیب‌های انسانی، اقتصادی و محیط‌زیستی را تقویت می‌کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که امواج گرمایی در غرب کشور با ویژگی‌های متمایزی از نظر مدت زمان تداوم، فراوانی، الگوهای فضایی و فصلی رخ می‌دهند. افزایش رخدادها در استان‌های آسیب‌پذیر مانند غرب کرمانشاه، تمرکز امواج در فصل‌های سرد سال و روند صعودی سالانه، ضرورت توجه ویژه به مدیریت بحران، پیش‌بینی مخاطرات گرمایی و برنامه‌ریزی برای کاهش خسارت‌ها را آشکار می‌سازد. این نتایج می‌تواند به توسعه سیستم‌های هشدار سریع، برنامه‌ریزی شهری و کشاورزی و سیاست‌گذاری محیط‌زیستی کمک کند و اهمیت پایش مستمر و پیش‌بینی امواج گرمایی در تمامی فصول سال را تأکید نماید.

Reference

1. Abbasnia, M., Tavousi, T., Khosravi, M., & Toros, H. (2016). Spatial-temporal analysis of heat waves in Iran over the last three decades. **Natural Environment Change**, 2(1), 25-33.
2. Alamasi, G., Taavosi, T., and Hosseinabadi, N. (2016). Exploring the Behavior and Frequency Changes of Heat Waves in Ahvaz City. **Spatial Geography Planning**, 6(19), 137-150. [In Persian]
3. Almusaed, A. (2011). The Urban Heat Island Phenomenon upon Urban Components. **Biophilic and Bioclimatic Architecture**, Vol. 10: p. 139-150.
4. Asakareh, H. (2008). Application of Kriging Method in Precipitation Interpolation: A Case Study of Precipitation Interpolation on 17/03/1998 in Iran. **Geography and Development**, No. 12, 25-42. [In Persian].
5. Baldi, Massimiliano, Francesco, Giovanna De, Marina, Pasqui, Cesar One, Chiara. (2004): Heat Wave In The Mediterranean Region Analysis and Model Results, Institute of Biometeorology, **CNR.ROM.ITALY** *(۵).
6. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC.
7. Croitoru, A. Piticar, A. Ciupertea, A. and Roşca, C. (2016). "Changes in heat waves indices in Romania over the period 1961–2015". **Global and Planetary Change**. Volume 146. pp. 109-121.
8. Ding, T. Qian, W., and Yan, Z. (2010). Changes in hot days and heat waves in China during 1926–2007. **International Journal of Climatology**, Vol. 68: p. 9220-9260.
9. Esmaeili Nejad, M., Khosravi, M., Alizadehiani, B., and Masoudian, S. A. (2013). Identification of Iranian Heat Waves. **Geography and Development**, 33(1), 29-54. [In Persian]
10. Founda, D and Santamouris M (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012), **Scientific Reports** 7: 1-16.
11. Frich, P. A. L. V., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A. K., and Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate research**, 19(3), 193-212.
12. Fujibe, F., Yamazaki, N., Kobayashi, K., and Nakamigawa, H. (2007). Longterm changes of temperature extremes and day-to-day variability in Japan. Papers in **Meteorology and Geophysics**, 58, 63-72.
13. Hamidianpour, M., Nazaripour, H., Khazaei Feizabad, E., Farzaneh, M., and Firoozi, S. (2023). Determining the Turning Point of Thermal Thresholds for Heat and Cold Waves in Iran during the statistical period 2018-1966. **Journal of Environmental Hazards**, 37(12), 132-147. [In Persian]
14. Hosseini, S. M., and Khormabad, F. (2023). Predicting Hazardous Heat Waves in East Azerbaijan by Modeling the Sixth IPCC Climate Change Report. **Geography and Environmental Hazards**, 12(2), 125-145. [In Persian]
15. Hosseinpour, Z., Shamsipour, A. A., Karimi, M., and Khoshakhlagh, F. (2023). Statistical Analysis of Heat Waves in the Southern Slopes of Alborz. **Applied Research in Geography**, 23(68), 81-98. [In Persian]
16. Karimpour, M., Rafiei, J., and Jafari, A. (2017). Identification and Synoptic Analysis of Heat Waves in Western Iran (Ilam, Khuzestan, Lorestan, Kermanshah). **Environmental Risk Management**, 4(3), 263-279. [In Persian]
17. Kovats SR, Ebi LK (2006). Heat waves and public health in Europe. **Eur J Public Health** 16.

18. Maleki Marsht, R., and Sabahani, B. (2023). Identification and Analysis of Heat Waves in Tabriz and Ardabil Cities and Prediction under CanEsm2 Climate Model Scenarios. **Environmental Science Studies**, 8(3), 7053-7063. [In Persian]
19. Maleki Marsht, R., Sabahani, B., and Moradi, M. (2022). Exploration of the Relationship between Heat Waves and Urban Heat Islands: A Case Study of Ahvaz Metropolitan Area. **Geography and Development Journal**, 20(67), 121-141. [In Persian]
20. Masoudian, A., and Darand, M. (2011). Climatology of Iran. **Isfahan University Press**. [In Persian].
21. Moises, A., Jorge, E., Nazario, R., and Malaspina, González-Cruz, B.(2018). Projections of eat Waves Events in the Intra-Americas Region Using Multimodel Ensemble. **Advances in Meteorology**.
22. Mojarrad, F., Naseriyeh, M., and Hashemi, S. (2018). Investigation of Diurnal and Seasonal Changes of Urban Heat Island in Kermanshah City Using Satellite Images. **Earth and Space Physics**, 44(2), 479-494. [In Persian]
23. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2007). **Natural Hazard Statistics**, National Oceanic and Atmospheric Administration.
24. Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517.
25. Perkins-Kirkpatrick, S. E., and S. C. Lewis. "Increasing trends in regional heatwaves." **Nature communications** 11.1 (2020): 3357.
26. Rezaei Banafsheh, M., and Maleki Marsht, R. (2022). Analysis and Prediction of Heat Waves in Selected Cities of Northwest Iran Using the SDSM Downscaling Model and the Baldi Index. **Applied Geography Sciences**, 18(40), 76-89. [In Persian]
27. Rohini, P., Pajeevan, m. and Mukhopahay, P. (2019). Future projections of heat waves over India from CMIP5 models, **Climate Dynamics**, Vol. 53. p. 975–988.
28. Shademan, H. (2012). Analysis of Widespread Heat Waves in Iran. Master's Thesis, Department of Physical Geography, Faculty of **Humanities, University of Zanjan**.
29. Thompson, V., Kennedy-Asser, A T, Vosper, E., Eunice Lo, Y. T. Huntingford, Ch., Oliver Andrews, M, Hegerl, G., and Mitchell, D.)2022(. The 2021 western North America heat wave mongthe most extreme events ever recorded globally, **Science Advances**. Pp. 1-10.Top of Form
30. Thompson, V., Kennedy-Asser, A. T., Vosper, E., Lo, Y. E., Huntingford, C., Andrews, O., ... & Mitchell, D. (2022). The 2021 western North America heat wave among the most extreme events ever recorded globally. **Science advances**, 8(18), eabm6860.

Synopsis Analysis of Heatwaves in Western Iran

Mehran Akbarzadeh, Ph.D. student of environment, Malayer University, Malayer, Iran

Samar Mortazavi, Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran

Hamid Nouri, Associate Professor, Department of Natural Resources and Watershed Management, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran

Behnaz attaeian, Assistant Professor, Department of Natural Resources and Watershed Management, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran

Introduction

Heatwaves represent one of the most complex and destructive climatic hazards globally, exerting severe pressures on public health, food security, water resources, and energy infrastructure. The inherent variability of regional climates combined with the exacerbating effects of global climate change necessitates precise monitoring and spatiotemporal analysis of these events. This study aims to provide a comprehensive analysis of the frequency, duration, intensity, and spatial distribution of heatwaves across eleven provinces in the western half of Iran over a 31-year period (1990-2020).

Data and Methodology

The study area encompasses the provinces of East Azerbaijan, West Azerbaijan, Zanjan, Kurdistan, Kermanshah, Hamedan, Ilam, Lorestan, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad, Chaharmahal and Bakhtiari, and Fars. Daily maximum temperature and relative humidity data were retrieved from 23 reliable synoptic stations. To accurately identify heatwave episodes while accounting for local climatic thresholds and the combined effect of temperature and humidity, composite percentile-based indices (exceeding the 95th percentile) were employed. Identified heatwave events were categorized into five duration classes: 1-day, 2-day, 3-day, 4-10 day, and >10-day events. Extreme value analysis was conducted using the Gumbel Type I distribution to estimate return periods. Long-term temporal trends in heatwave frequency were assessed using linear regression analysis and slope estimation. All statistical computations, spatial interpolation, and hazard mapping were performed using MATLAB software.

Key Findings and Discussion

The analysis of heatwave persistence revealed a strong inverse relationship between duration and frequency. Short-duration events (1-2 days) overwhelmingly dominated the recorded occurrences, with single-day heatwaves accounting for over 3,500 events across the region. In stark contrast, long-lasting heatwaves exceeding ten days were exceptionally rare, observed at only five stations, primarily in the foothills of the

central Zagros Mountains. This pattern aligns with the dynamic and transient nature of synoptic systems in the mid-latitudes.

Spatial distribution maps indicated significant heterogeneity in heatwave exposure across the western provinces. The primary hotspots of high frequency and intensity were identified in the western parts of Kermanshah Province (specifically Gilan-e Gharb station), Ilam Province, southern Zanzan Province, and parts of Lorestan. These areas, due to their specific topography and orientation relative to prevailing westerly flows, exhibited the highest cumulative heatwave days. Conversely, West Azerbaijan Province (particularly the Maku region) and northeastern Fars Province experienced the lowest frequency and intensity of heatwaves.

A notable and counter-intuitive finding pertains to the seasonal analysis. Contrary to the common perception that heatwaves peak in summer, the results demonstrated that cold seasons (autumn and winter) recorded significantly higher frequencies. The months of March, December, and January were identified as the peak months for heatwave occurrence over the 31-year study period. Synoptic climatology investigations suggest that this wintertime warming anomaly is driven by the persistent establishment of the Arabian Subtropical High and deep mid-tropospheric ridges, which effectively block the southward penetration of cold polar air masses into the Iranian Plateau, thereby inducing positive temperature anomalies.

Finally, the annual trend analysis revealed a statistically significant positive slope in heatwave frequency from 1990 to 2020. The highest cumulative annual frequencies were recorded in 2010 and 2018, indicating an intensification of thermal hazards in recent decades consistent with global warming patterns.

Conclusion

This research demonstrates that heatwaves in western Iran are not exclusively a summer phenomenon but rather a critical and escalating threat during the cold seasons. The provinces of Kermanshah, Ilam, and Zanzan have been identified as critical hotspots requiring the urgent development of comprehensive crisis management plans, revision of agricultural calendars, and implementation of early warning systems. The observed upward trend in both the frequency and intensity of these events over the past three decades serves as a clear warning for policymakers to adopt climate adaptation strategies in this vulnerable region.

Keywords: Heatwave, Western Iran, Spatiotemporal Analysis, Climate Trend, Synoptic Patterns.