

واکاوی شدیدترین امواج گرمایی زمستانه در استان یزد (مقاله پژوهشی)

۱- کمال امیدوار*، استاد گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

Komidvar@yazd.ac.ir

۲- مهدیه زارع‌شحنه، دانش آموخته ارشد، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۳- فروغ محمدی‌راوری، دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

چکیده

امواج گرمایی زمستانه از پدیده‌های نادر اما اثرگذار در مناطق خشک ایران هستند که با توجه به پیامدهای زیست‌محیطی و کشاورزی اهمیت زیادی دارند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های روزانه دمای بیشینه طی یک دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۶) در ۷ ایستگاه سینوپتیک استان یزد (یزد، میبد، بافق، عقدا، مروست، گاریز و رباط پشت بادام)، فراوانی، روند و ویژگی‌های آماری امواج گرمایی بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین تعداد موج‌های گرمایی در ایستگاه بافق در سال ۱۳۹۶ با ۱۷ موج، و در ایستگاه یزد در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۹۶ با ۱۴ موج ثبت شد. طولانی‌ترین موج گرما در ایستگاه یزد در پاییز ۱۳۸۶ به مدت ۲۸ روز تداوم داشت، در حالی که در مروست در سال ۱۳۹۵ طولانی‌ترین رخداد ۲۳ روز به ثبت رسید. تفکیک فصلی داده‌ها نشان داد که در ایستگاه‌های میبد، بافق، عقدا و رباط پشت بادام بیشترین رخداد موج گرما در پاییز (بیش از ۵۱٪ کل رخدادهای) بوده، در حالی که در یزد، گاریز و مروست بیشترین امواج گرمایی در زمستان (بیش از ۵۲٪ کل رخدادهای) رخ داده است. آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال و شیب سنس بیانگر روند افزایشی در تمامی ایستگاه‌ها به جز رباط پشت بادام بود؛ به طوری که بیشترین شیب مثبت در ایستگاه بافق با $Z=1.01$ و $Q=0.182$ مشاهده شد. تحلیل همبندی طولانی‌ترین موج گرمایی فراگیر (۱۰ روزه در دسامبر ۲۰۰۵) نیز نشان داد که استقرار پشته پرفشار آزور در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و فرارفت گرما از عربستان در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نقش اصلی در شکل‌گیری این رخداد داشت. این نتایج بیانگر افزایش احتمال تداوم و شدت امواج گرمایی زمستانه در اقلیم خشک یزد تحت تأثیر تغییر اقلیم است.

واژگان کلیدی: امواج گرمایی زمستانه، تغییر اقلیم، روند آماری، آزمون من-کندال، استان یزد.

مقدمه

ویژه‌ای را در مطالعات اقلیم‌شناسی به خود جلب کرده است. کاهش رطوبت خاک و تشدید شرایط پایداری جو نیز در برخی مناطق، نقش غیرمستقیمی در افزایش بسامد و شدت این رخدادهای ایفا می‌کند. بررسی‌های همبندی نشان می‌دهد که امواج گرمایی، به‌ویژه در دوره سرد سال، اغلب در نتیجه استقرار الگوهای پایدار جوی، تقویت گردش‌های واچرخندی و تضعیف سامانه‌های ناپایدار رخ می‌دهند (کامپتلا و روستی‌کیوسی، ۱۹۹۸). کولاسینو و کونته (۱۹۹۵) با بررسی موج‌های گرمایی در حوضه مدیترانه، این پدیده را به دو دسته موج‌های کوتاه‌مدت و

امواج گرمایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جلوه‌های تغییر اقلیم، طی دهه‌های اخیر از نظر فراوانی، شدت و گسترش زمانی دچار تغییرات معناداری شده‌اند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد افزایش گازهای گلخانه‌ای نقش مستقیمی در تشدید و طولانی‌تر شدن امواج گرمایی دارد و این پدیده نه‌تنها در فصل گرم، بلکه در فصل سرد سال نیز نمود فزاینده‌ای یافته است (فریش و همکاران، ۲۰۰۲؛ فولاند و همکاران، ۲۰۰۱). بالوک و همکاران (۲۰۰۹) امواج گرمایی را از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی معاصر دانسته‌اند که به دلیل آثار گسترده جانی، اقتصادی و زیست‌محیطی، توجه

بلندمدت تقسیم کردند که هر یک دارای سازوکارهای متفاوتی هستند. همچنین بررسی موج گرمای شدید ۱۹۸۰ آرژانتین نشان داد که وجود گردش و اچرخندی در سطوح مختلف جو و پایداری شدید، عامل اصلی شکل‌گیری این رخداد بوده است (کامپتلا و روستی کیوسی، ۱۹۹۸). در مقیاس نیمکره شمالی، مطالعات نشان می‌دهد که روند گرمایش در عرض‌های بالا و نواحی درونی خشکی‌ها، به‌ویژه در فصل زمستان، شدت بیشتری دارد و دماهای ثبت‌شده در قرن بیستم احتمالاً بیشترین مقدار در حدود هزار سال اخیر بوده است (راگاساکی و ساندارول، ۲۰۰۳؛ کریستین کوپه و همکاران، ۲۰۰۴). دگاتانو و آلن (۲۰۰۲) نیز نشان دادند که تغییرات دماهای فرین روزانه به‌شدت تحت تأثیر توسعه شهرنشینی قرار دارد. فوجیبه و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی داده‌های دمایی ایستگاه‌های ژاپن به این نتیجه رسیدند که دماهای بیشینه و کمینه روزانه، همسو با دماهای میانگین ماهانه، روند افزایشی معناداری را نشان می‌دهند که در دهه‌های اخیر تشدید شده است. مطالعات متعددی در سطح جهانی به بررسی آثار و پیامدهای امواج گرمایی پرداخته‌اند. تئوهاراتوس و همکاران (۲۰۱۰) شرایط سینوپتیکی و اثرات زیست‌اقلیم‌شناسی موج گرمای ۲۰۰۷ آن را بررسی کردند. کو آن و همکاران (۲۰۱۴) با تحلیل امواج گرمایی استرالیا نشان دادند که بیشترین افزایش فراوانی و تداوم امواج گرمایی در قرن ۲۱ در مناطق گرمسیری شمال این قاره رخ داده است. نیسان و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان دادند که وقوع امواج گرمایی در بنگلادش منجر به افزایش قابل توجه مرگومیر می‌شود. سوپارتا و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی روند موج گرما در مالزی شرقی به این نتیجه رسیدند که روند امواج گرمایی در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایشی است. در ایران، پژوهش‌های متعددی به شناسایی و تحلیل امواج گرمایی پرداخته‌اند. احمدآبادی و احمدی (۱۳۸۴) نشان دادند که امواج گرمایی ایران عمدتاً تحت تأثیر تقویت پرفشار جنب‌حاره‌ای و یا توسعه کم‌فشار حرارتی فلات ایران و عربستان شکل می‌گیرند. اسماعیل‌نژاد و همکاران (۱۳۹۲) دریافتند که امواج گرمایی کوتاه‌مدت فراوانی بیشتری دارند، اما گستره مکانی محدودتری را پوشش می‌دهند. عساکره و همکاران

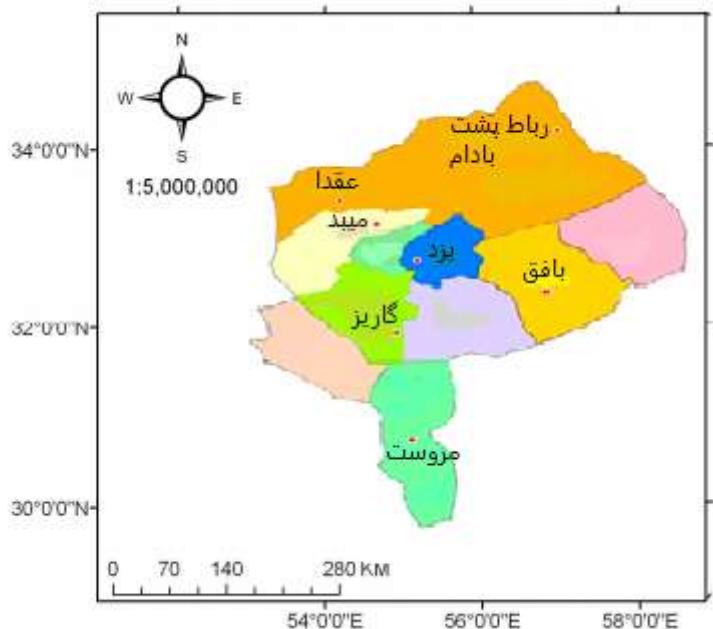
(۱۳۹۲) و علیجانی و همکاران (۱۳۹۳) نیز با تحلیل‌های همدیدی نشان دادند که حضور ناهه‌ها و الگوهای پرفشار جنب‌حاره‌ای نقش کلیدی در تشدید امواج گرمایی فراگیر ایران دارد. در مقیاس محلی، مطالعات انجام‌شده در استان یزد حاکی از روند افزایشی معنادار دما و کاهش رطوبت نسبی در اغلب ماه‌های سال است که این تغییرات می‌تواند متأثر از گرمایش جهانی باشد (خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۸۹). ابراهیمی و فلاح‌زاده (۱۳۹۴) نیز افزایش فراوانی امواج گرمایی و روزهای داغ را در شهر یزد گزارش کرده‌اند. برزگری و ملکی‌نژاد (۱۳۹۵) نشان دادند که افزایش دمای بیشینه در دوره‌های آتی می‌تواند منجر به تشدید نیاز آبی بخش کشاورزی شود. بر این اساس، واکاوی شدیدترین امواج گرمایی زمستانه در استان یزد، به‌منظور شناخت سازوکارهای حاکم بر این رخدادها، حدی و ارزیابی پیامدهای اقلیمی آن‌ها، ضرورتی علمی و کاربردی دارد.

منطقه مورد مطالعه

استان یزد با مساحت تقریبی ۷۴'۶۵۰ کیلومتر مربع در بخش مرکزی فلات ایران واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۲۹°۵۲' تا ۳۳°۲۷' عرض شمالی و ۵۲°۵۵' تا ۵۶°۳۷' طول شرقی گسترده است. این استان از شمال به اصفهان، از جنوب به کرمان و فارس و از شرق به خراسان جنوبی محدود می‌شود. یزد به‌دلیل قرارگیری در کمربند خشک جهانی و فاصله زیاد از منابع رطوبتی، دارای اقلیم خشک و فراخشک است. میانگین بارش سالانه در بخش‌های مرکزی استان کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و در نواحی کوهستانی تا حدود ۲۵۰ میلی‌متر متغیر است، و میانگین دمای سالانه بین ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۹). نوسانات دمای روزانه و فصلی بالا بوده و تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های سرد، مشخصه بارز اقلیم این منطقه است. ناهمواری‌های مهم استان شامل کوه شیرکوه با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر در جنوب‌غرب و دشت‌های وسیع آبرفتی مانند دشت یزد-اردکان و دشت ابرکوه می‌باشد. این توپوگرافی و شرایط اقلیمی سبب شده است که استان یزد یکی از مناطق مستعد مطالعه پدیده‌های

پراکندگی مناسبی از شرایط دشت و کوهپایه‌ای استان را پوشش می‌دهند. (سالنامه آماری استان یزد، ۱۳۹۴؛ سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۹) (شکل ۱).

حدی دما از جمله امواج گرمایی زمستانه باشد. ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش شامل یزد، میبد، بافق، عقدا، مروست، گاریز و رباط پشت بادام هستند که



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های استان یزد

مواد و روش‌ها

به‌منظور واکاوی شدیدترین امواج گرمایی زمستانه در استان یزد، از داده‌های روزانه دمای بیشینه ثبت‌شده در ایستگاه‌های سینوپتیک این استان استفاده شد. در گام نخست، پس از بررسی کیفیت داده‌ها و میزان پیوستگی سری‌های زمانی، ایستگاه‌هایی انتخاب شدند که دارای بیشترین طول دوره آماری و حداقل داده‌های مفقود بودند. بر این اساس، هفت ایستگاه یزد، میبد، بافق، عقدا، مروست، گاریز و رباط‌پشت‌بادام به‌عنوان ایستگاه‌های منتخب در نظر گرفته شد (جدول ۱). به‌دلیل ناهمگونی طول دوره آماری ایستگاه‌ها، یک دوره مشترک ۱۵ ساله (۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶) به‌عنوان مبنای تحلیل انتخاب گردید. با توجه به تمرکز پژوهش بر امواج گرمایی زمستانه، داده‌های مربوط به شش‌ماهه دوم سال (از ابتدای مهر تا پایان اسفند) استخراج و مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، داده‌ها از تقویم میلادی به شمسی تبدیل و پس از کنترل نهایی، برای تحلیل‌های آماری و همدیدی آماده‌سازی شدند.

یکی از چالش‌های اصلی در مطالعات مرتبط با امواج گرمایی، تعریف آستانه مناسب برای شناسایی این پدیده است؛ چراکه تاکنون تعریف واحد و جهان‌شمولی برای موج گرما ارائه نشده است. (Meehl & Tebaldi, 2004) با این حال، در بسیاری از پژوهش‌ها، تداوم چندروزه دماهای بالاتر از شرایط نرمال به‌عنوان معیار شناسایی موج گرما به‌کار رفته است. (Perkins & Alexander, 2012) در پژوهش حاضر، موج گرمای زمستانه به رخدادی اطلاق می‌شود که طی آن دمای بیشینه روزانه به مدت حداقل سه روز متوالی بالاتر از میانگین بلندمدت همان روز قرار گیرد. به‌این منظور، ابتدا میانگین بلندمدت (LTM) دمای بیشینه برای هر روز از شش‌ماهه دوم سال، براساس دوره آماری ۱۵ ساله محاسبه شد. این فرآیند برای تمامی روزهای مورد بررسی انجام گرفت. سپس اختلاف میان دمای بیشینه مشاهده‌شده هر روز و میانگین بلندمدت متناظر آن محاسبه گردید. با استفاده از فیلترگذاری داده‌ها در محیط Excel، روزهایی که دمای بیشینه آن‌ها از میانگین بلندمدت همان روز فراتر رفته و این وضعیت به

در گام نهایی، برای تحلیل سازوکارهای همیدی مؤثر بر شکل‌گیری امواج گرمایی، فراگیرترین موج گرمای زمستانه طی دوره آماری انتخاب شد. داده‌های فشار و دما در ترازهای ۱۰۰۰، ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال از پایگاه NCEP/NCAR استخراج گردید. نقشه‌های دما، رطوبت نسبی، امگا و میدان باد با استفاده از نرم‌افزار GrADS ترسیم و تحلیل شد تا شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر رخداد این موج گرمایی به صورت جامع بررسی گردد.

مدت سه روز یا بیشتر تداوم داشت، به عنوان رخداد موج گرمای زمستانه شناسایی شدند. پس از شناسایی امواج گرمایی، تعداد رخدادها به تفکیک سال و ایستگاه محاسبه شد. همچنین طولانی‌ترین موج گرمای زمستانه در هر سال مشخص گردید. به منظور بررسی الگوی زمانی رخداد امواج گرمایی، درصد وقوع این پدیده به تفکیک ماه‌ها و فصل‌های پاییز و زمستان محاسبه شد. علاوه بر این، نمودارهای مربوط به طولانی‌ترین موج گرمایی هر ایستگاه ترسیم گردید تا نحوه قرارگیری دماهای بیشینه نسبت به میانگین بلندمدت به صورت بصری مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

شماره	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)
۱	یزد	۱۲۳۰	۵۴.۳۵۶۹	۳۱.۸۹۷۴
۲	میبد	۱۲۳۵	۵۴.۳۶۲۱	۳۲.۰۶۴۶
۳	بافق	۱۰۳۰	۵۵.۳۸۲۲	۳۱.۵۷۸۷
۴	عقدا	۱۰۵۰	۵۴.۳۵۶۱	۳۱.۷۴۶۳
۵	مروست	۹۵۰	۵۵.۱۳۶۷	۳۱.۲۱۰۱
۶	گاریز	۹۷۰	۵۵.۳۱۶۴	۳۱.۵۰۷۸
۷	رباط پشت بادام	۱۰۲۰	۵۴.۹۸۷۶	۳۱.۸۷۶۵

نتایج

۲۷ روز از ۱۳۸۶/۸/۹ تا ۱۳۸۶/۹/۵ رخ داده است. در ایستگاه عقدا بیشترین تعداد موج‌ها در سال ۱۳۸۷ با ۱۳ موج مشاهده شد و طولانی‌ترین موج طی دوره ۱۵ ساله ۲۰ روز بوده و در دو بازه ۱۳۹۳/۱۱/۷ تا ۱۳۹۳/۱۱/۲۶ و ۱۳۹۶/۸/۲ تا ۱۳۹۶/۸/۲۱ رخ داده است. در ایستگاه رباط پشت بادام بیشترین تعداد موج‌ها ۱۳ موج در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۷ ثبت شد و طولانی‌ترین موج این ایستگاه ۲۱ روز از ۱۳۸۹/۹/۲ تا ۱۳۸۹/۹/۲۲ بوده است (نمودار ۱).

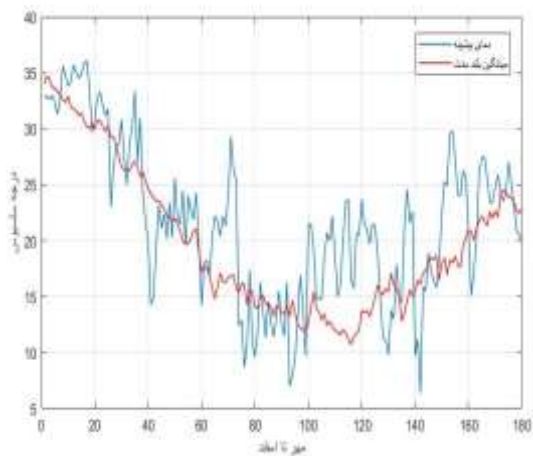
با توجه به هدف پژوهش مبنی بر بررسی آماری رخداد موج‌های گرما در ماه‌های سرد سال، تعداد موج‌های گرما در هر ایستگاه تعیین شد (جدول ۲). در ایستگاه یزد بیشترین تعداد موج‌ها در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۹۶ با ۱۴ موج ثبت شد و طولانی‌ترین موج به مدت ۲۸ روز از ۱۳۸۶/۸/۷ تا ۱۳۸۶/۹/۴ بوده است. در ایستگاه بافق بیشترین تعداد موج‌ها ۱۷ موج در سال ۱۳۹۶ بوده و طولانی‌ترین موج ۲۷ روز از ۱۳۸۶/۸/۱۰ تا ۱۳۸۶/۹/۶ ثبت شده است. در ایستگاه گاریز بیشترین تعداد موج‌ها ۱۳ موج در سال ۱۳۸۷ بوده و طولانی‌ترین موج به مدت

جدول ۲- تعداد موج‌های گرمایی زمستانه به تفکیک سال و ایستگاه‌ها

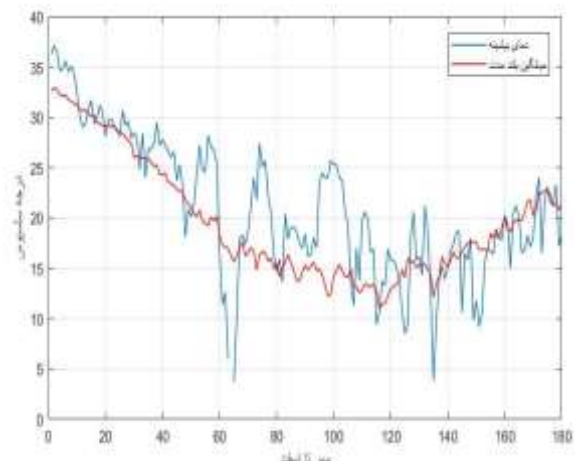
سال ایستگاه	۸۲	۸۳	۸۴	۸۵	۸۶	۸۷	۸۸	۸۹	۹۰	۹۱	۹۲	۹۳	۹۴	۹۵	۹۶
بافق	۱۳	۹	۱۳	۸	۹	۹	۹	۷	۶	۹	۱۱	۱۰	۱۱	۱۲	۱۷
عقدا	۱۱	۱۲	۱۱	۶	۶	۱۳	۸	۱۱	۷	۱۲	۱۱	۸	۱۰	۹	۱۲
یزد	۱۰	۸	۱۴	۶	۸	۱۲	۹	۱۰	۱۰	۱۲	۹	۵	۱۰	۱۱	۱۴
رباط پشت بادام	۱۲	۱۱	۱۳	۷	۹	۱۳	۹	۸	۶	۱۱	۹	۷	۱۰	۱۰	۱۲
گاریز	۱۱	۶	۹	۵	۶	۱۳	۸	۹	۹	۵	۹	۶	۱۰	۱۱	۱۰
مروست	۱۰	۴	۱۲	۷	۸	۱۳	۱۰	۹	۱۰	۸	۹	۸	۱۰	۸	۱۱
میبد	۹	۹	۱۰	۷	۹	۱۰	۸	۹	۸	۱۲	۹	۹	۱۲	۱۰	۱۰

نمودارها همچنین امکان شناسایی موج‌های سرما را در همان سال فراهم می‌آورند، به گونه‌ای که کاهش دما به زیر LTM نشان‌دهنده رخداد موج سرما است.

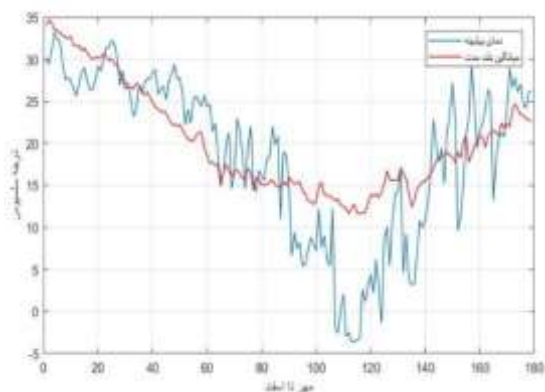
نمودارهای طولانی‌ترین موج‌های گرما برای هر ایستگاه (شکل ۲) نشان می‌دهد که دماهای موج‌های گرما چگونه نسبت به میانگین بلندمدت (LTM) افزایش یافته‌اند. این



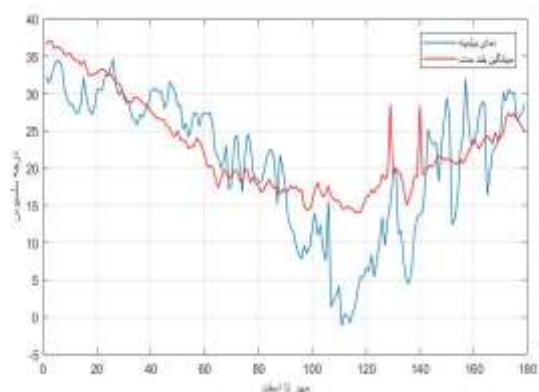
ایستگاه میبد



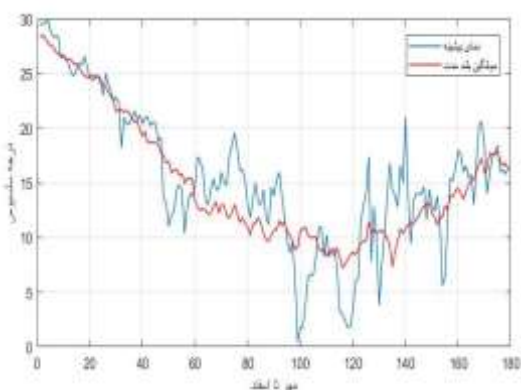
ایستگاه مروست



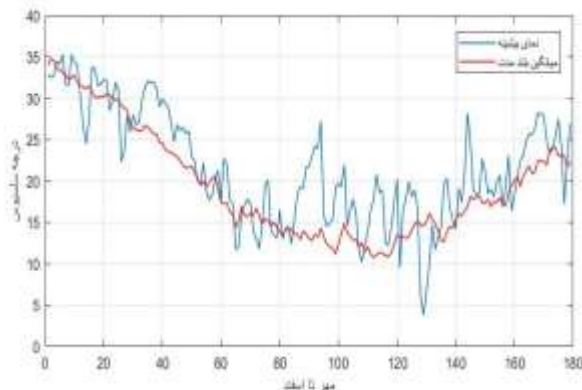
ایستگاه یزد



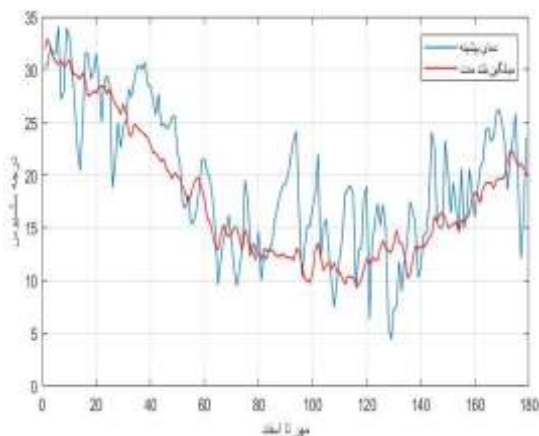
ایستگاه بافق



ایستگاه گاریز



ایستگاه عقدا



ایستگاه رباط پشت بادام

شکل ۲- امواج گرمایی سال‌های با بیشترین موج گرما در هر ایستگاه

و گاریز بیشترین امواج گرمای زمستانه را در دی و بهمن مشاهده کردند. این تفکیک فصلی بیانگر آن است که ویژگی‌های مکانی و زمان‌بندی رخداد موج‌های گرما در استان یزد تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی و شرایط سینوپتیکی متفاوت است.

برای تحلیل تفاوت رخداد موج‌ها در فصل پاییز و زمستان، درصد وقوع موج‌ها به تفکیک ماه و فصل تعیین شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که ایستگاه‌های میبد، بافق، عقدا و رباط پشت بادام بیشترین موج‌های گرما را در ماه مهر تجربه کرده‌اند، در حالی که ایستگاه‌های مروست، یزد

جدول ۳- درصد موج‌های گرمایی در ماه‌های مختلف در ایستگاه‌های استان یزد

ایستگاه ماه	میبد	مروست	یزد	بافق	گاریز	عقدا	رباط
مهر	۱۸/۲	۱۳/۹	۱۶/۹	۲۱/۱	۱۵/۴	۲۲/۴	۲۱/۹۱
آبان	۱۶/۸	۱۶/۱	۱۴/۸	۱۳/۸	۱۸/۵	۱۴/۳	۱۵/۰۶
آذر	۱۶/۱	۱۹	۱۶/۲۱	۱۷/۱۰	۱۴/۶	۱۵/۶۴	۱۶/۴
دی	۱۶/۱	۱۹	۱۸/۲۴	۱۵/۱	۱۶/۱	۱۵/۶۴	۱۶/۴۳
بهمن	۱۶/۱	۱۷/۵	۱۹/۰۵	۱۷/۸	۱۹/۳	۱۶/۳	۱۷/۸۰
اسفند	۱۶/۱	۱۴/۵	۱۴/۹	۱۵/۱	۱۶/۱	۱۵/۶۴	۱۴/۴
پاییز	۵۱/۱	۴۸/۹	۴۷/۹	۵۱/۹	۴۸/۵	۵۲/۴	۵۱/۴
زمستان	۴۸/۲۵	۵۱/۱	۵۲/۱	۴۸/۱	۵۱/۵	۴۷/۶	۴۸/۶

نتایج نشان می‌دهند که توزیع ماهانه و فصلی رخداد موج‌های گرما در ایستگاه‌های استان یزد دارای الگوهای مکانی و زمانی مشخص است. بیشترین درصد موج‌های گرما در ایستگاه‌های میبد، بافق، عقدا و رباط پشت بادام در ماه مهر رخ داده است، در حالی که در ایستگاه مروست، بیشترین موج‌های گرما مربوط به ماه‌های آذر و دی و در ایستگاه‌های یزد و گاریز بهمن‌ماه مشاهده شد. این الگو نشان می‌دهد که موقعیت جغرافیایی و شرایط سینوپتیکی هر ایستگاه، از جمله قرارگیری نسبت به جریان‌های پرارتفاع و منابع گرمایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در آغاز و شدت موج‌های گرما دارد. تفکیک فصلی نیز بیانگر آن است که ایستگاه‌های میبد، بافق، عقدا و رباط پشت بادام

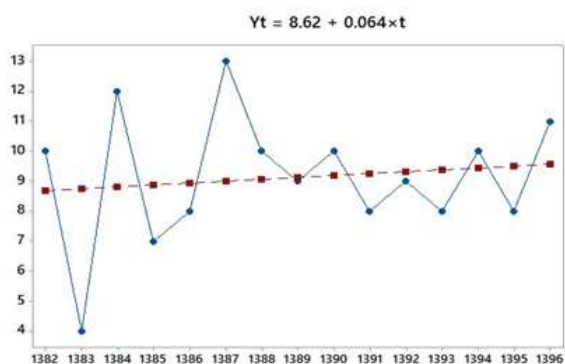
در فصل پاییز بیشترین تعداد موج گرما را تجربه کرده‌اند، در حالی که در ایستگاه‌های مروست، یزد و گاریز، درصد رخداد موج‌های گرما در فصل زمستان بیشتر بوده است. این یافته‌ها تغییرات زمانی و دینامیکی موج‌های گرما را نشان می‌دهند و تأکید می‌کنند که موج‌های گرما تنها یک پدیده آماری نیستند، بلکه بازتابی از رفتار غیرخطی و حافظه‌دار سامانه جوی منطقه هستند. برای بررسی روند وقوع موج‌های گرما طی دوره آماری، از دو آزمون ناپارامتریک من-کندال و برآوردکننده شیب سنس استفاده شد که محاسبات آن‌ها با بهره‌گیری از ماکرو اکسل (MAKESENS 1.0) انجام گردید (جدول ۴).

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون‌های من کندال و شیب سنس برای تعداد موج‌های گرما

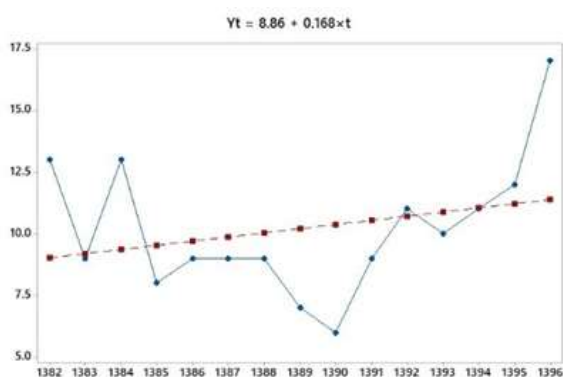
ایستگاه	TEST Z	Q	Qmin95	Qmax95	روند
میبد	۱/۴۰	۰/۰۷۷	۰/۰۰	۰/۲۸۶	افزایشی
مروست	۰/۲۵	۰/۰۰	-۰/۲۵۰	۰/۳۵۹	افزایشی
یزد	۰/۹۰	۰/۱۶۷	-۰/۲۷۳	۰/۵۰۰	افزایشی
بافق	۱/۰۱	۰/۱۸۲	-۰/۱۹۵	۰/۴۸۹	افزایشی
گاریز	۱/۱۱	۰/۱۸۲	-۰/۱۳۹	۰/۴۲۹	افزایشی
عقدا	۰/۵۰	۰/۰۰	-۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	افزایشی
رباط	-۰/۵۰	-۰/۰۸۳	-۰/۴۰۳	۰/۳۰۳	کاهشی

بازسازی فضای فاز (PSR)، مدل‌های آماری قادر به بازنمایی دقیق الگوهای پایدار موج‌های گرما نبوده و احتمال بیش‌برازش و ارائه برآوردهای غیرواقعی از عدم قطعیت افزایش می‌یابد. در مقابل، بهره‌گیری از PSR امکان شناسایی و یادگیری الگوهای دینامیکی سیستم و ارائه پیش‌بینی‌های واقع‌گرایانه از روندهای موج گرما را فراهم می‌کند (شکل ۳).

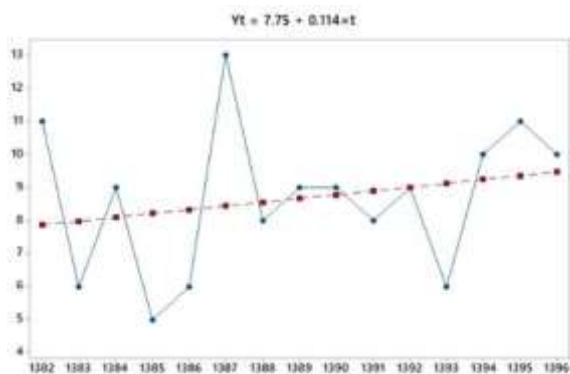
نتایج نشان‌داد که موج‌های گرمای زمستانه در تمامی ایستگاه‌های منتخب استان یزد، به جز رباط پشت بادام، دارای روند افزایشی معنی‌دار بوده و بیشترین شیب مثبت در ایستگاه بافق مشاهده شد. این روند افزایشی نشان‌دهنده شدت یافتن اثر تغییر اقلیم و افزایش احتمال تداوم موج‌های گرما در منطقه خشک یزد است. علاوه بر آمار، نمودار روند هر ایستگاه با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ترسیم شد و معادله رگرسیون مربوطه نیز درج گردید. تحلیل این نمودارها نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن



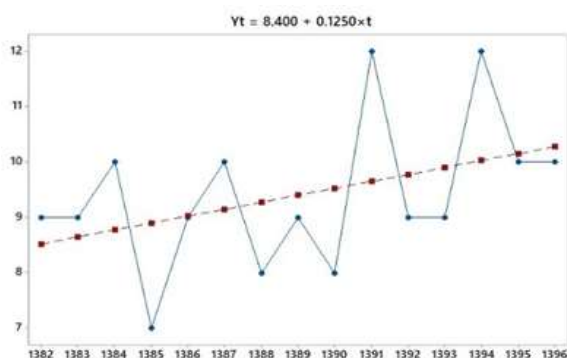
ایستگاه مروست



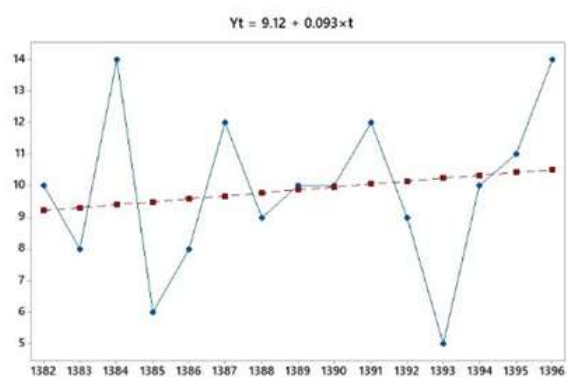
ایستگاه بافق



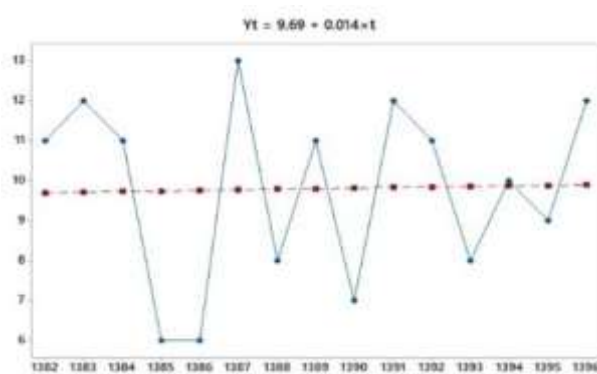
ایستگاه گاریز



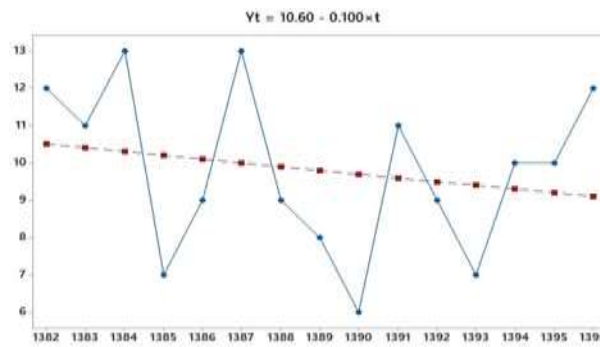
ایستگاه میبد



ایستگاه یزد



ایستگاه عقدا



ایستگاه رباط پشت بادام

شکل ۳- نمودار روند امواج گرمایی زمستانه ایستگاه‌های منتخب استان یزد

بررسی همدیدی طولانی‌ترین موج گرمای زمستانه فراگیر در استان یزد

برای تحلیل دلایل همدیدی وقوع طولانی‌ترین موج گرمای زمستانه در منطقه مورد مطالعه، ابتدا طولانی‌ترین موج گرما که در تمامی ایستگاه‌های منتخب ثبت شده بود، به‌عنوان موج گرمای فراگیر انتخاب شد (جدول ۵). داده‌های مورد نیاز از سایت NCEP/NCAR دریافت و

نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزار GrADS ترسیم گردید. این نقشه‌ها شامل پارامترهای دما، رطوبت، امگا و باد در ترازهای ۱۰۰۰، ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌باشند و دوره زمانی آن‌ها از ۱ تا ۱۰ دسامبر ۲۰۰۵ را پوشش می‌دهد. با توجه به افزایش حجم نقشه‌ها، در این مقاله تنها نقشه‌های مربوط به روز اول، روز پنجم که اوج موج گرما بوده و روز نهم ارائه شده است.

جدول ۵- تعیین موج گرمای فراگیر استان یزد

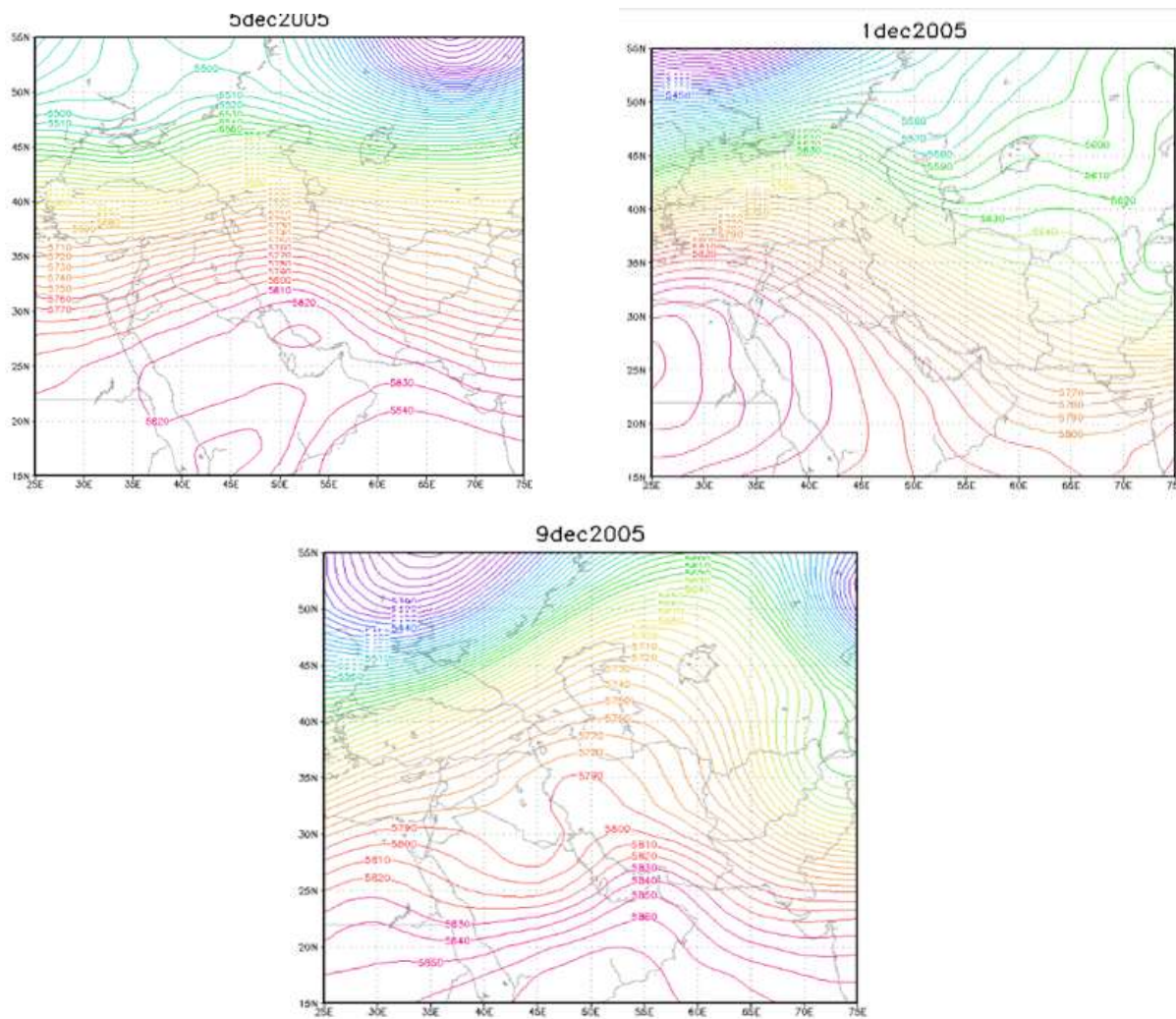
ماه	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
ایستگاه																																
گاریز	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
میبد								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
مروست													+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
یزد	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
بافق													+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
عقدا																																
رباط																																
پشت																																
بادام																																

اروپا و غرب ایران امتداد یافته بود. پراارتفاع‌های ۵۸۰۰ تا ۵۸۴۰ دکامتر ژئوپتانسیل در غرب و جنوب‌غرب ایران مشاهده می‌شوند، در حالی که مرکز این پشته پراارتفاع

در روز اول دسامبر ۲۰۰۵ (۱۳۸۴/۱۰/۹)، یعنی دو روز پیش از آغاز امواج گرمایی در استان یزد و مناطق مرکزی ایران، پشته پراارتفاع آזור از شمال شرق آفریقا تا جنوب

معکوس ایجاد شده و حاکمیت جریان نزولی سبب شد که اوج موج گرما در منطقه مورد مطالعه رخ دهد. از روز ششم تا روز نهم دسامبر، منطقه مورد مطالعه کاملاً در رأس پشته پراتفعا آזור واقع شد و پراتفعا‌های سمت راست این پشته، با ایجاد پربندهای نزولی، فروریزش هوا را به همراه داشتند (شکل ۴).

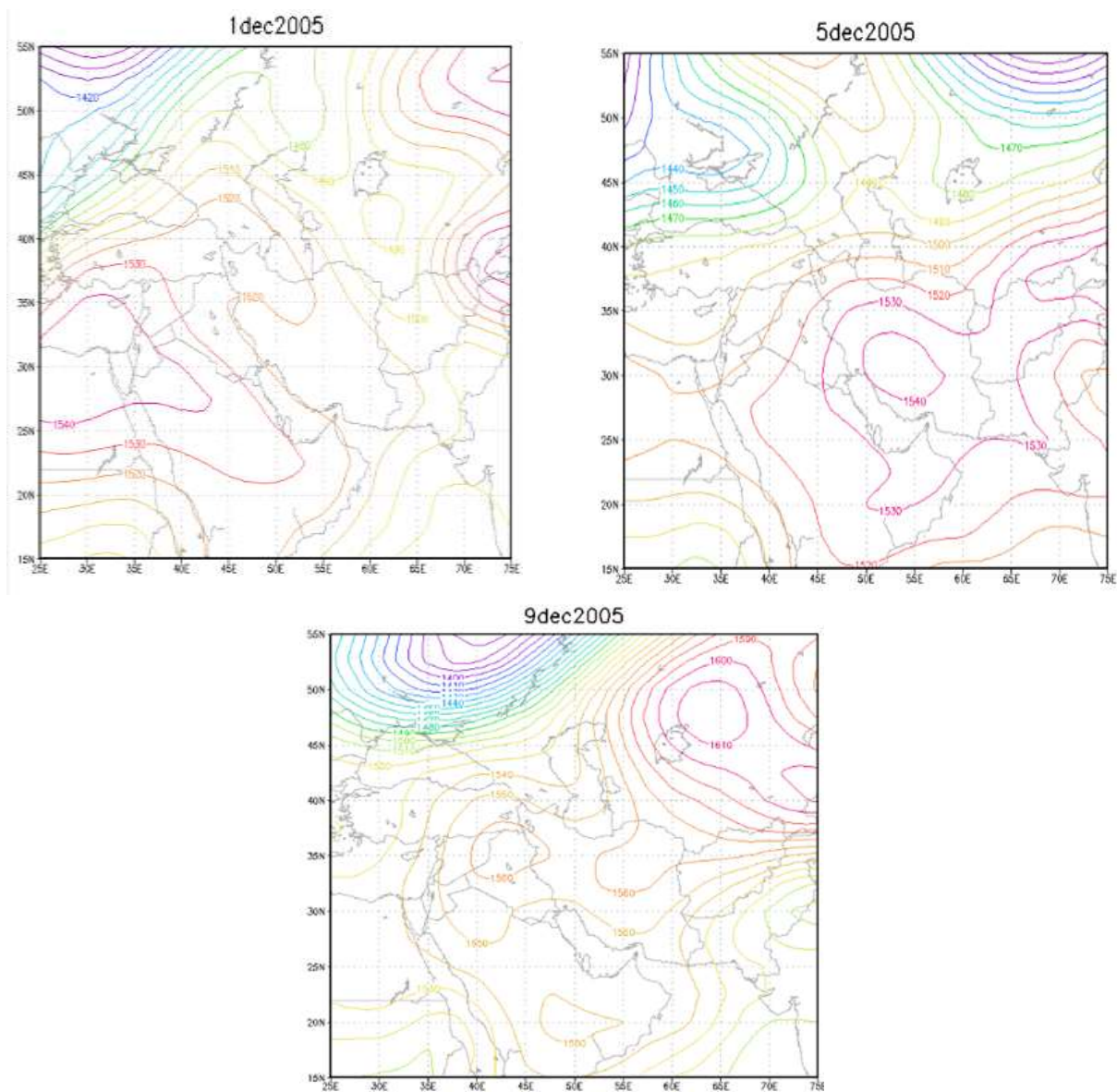
(۵۹۰۰ دکامتر ژئوپتانسیل) در غرب دریای سرخ و شمال شرق آفریقا واقع شده است. در این روز، مرکز ایران در ضلع شرقی پشته آזור قرار داشت و هنوز تحت تأثیر هوای گرم این پشته پراتفعا قرار نگرفته بود. در روز پنجم دسامبر ۲۰۰۵، مرکز پشته پراتفعا آזור بر روی خلیج فارس قرار گرفت؛ در این شرایط، در تراز دریا جریان



شکل ۴- نقشه های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ۱، ۵، ۹ دسامبر ۲۰۰۵

قرار داشته و فرارفت هوای گرم از عربستان و رطوبت وارد شده از خلیج فارس را در منطقه تثبیت کرده است. در این میان، ترازهای ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال به‌عنوان پربندها و واسطه‌های مؤثر در تقویت این فرآیند عمل می‌کنند. (شکل ۵).

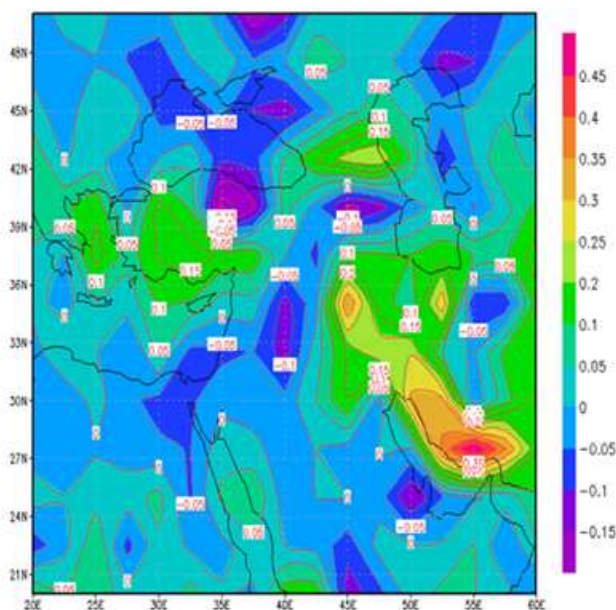
جریانات کم‌فشار در سطح پایین، موجب تشکیل مراکز سلولی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌شوند؛ با این حال، در ارتفاع تراز ۵۰۰، واگرایی رخ می‌دهد که به فروریزش و نزول هوای گرم در سطح زمین منجر می‌شود. از آغاز تا پایان دوره دهروزه موج گرما، فشار مرکزی پربندهای سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال بین ۱۵۶۰ تا ۱۵۷۰ دکامتر ژئوپتانسیل



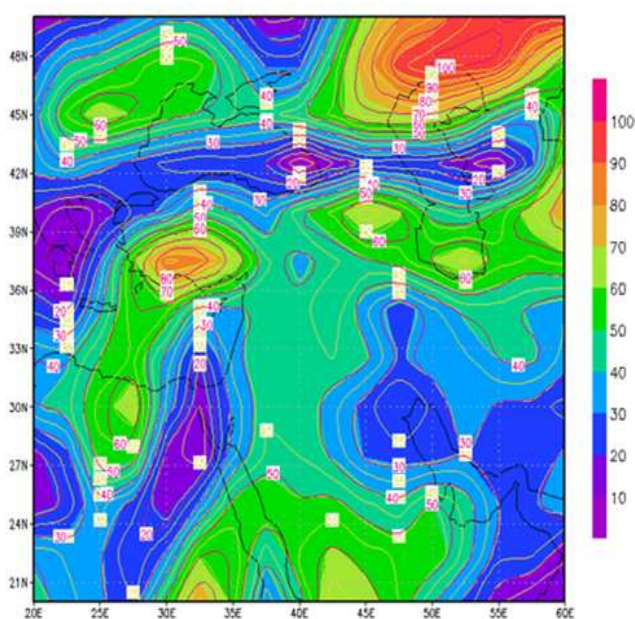
شکل ۵- نقشه های تراز ۸۵۰ روزهای ۹، ۵، ۱، دسامبر ۲۰۰۵

میزان رطوبت موجود در مناطق خلیج فارس، غرب، جنوب غرب و نوار جنوبی ایران، همچنین شمال عربستان و عراق، برای ایجاد بارش بسیار اندک است. همان طور که پیش تر اشاره شد، در مناطق بیابانی صعود هوا برقرار است و خلیج فارس به عنوان منبع رطوبت مرکز ایران عمل می کند که تحت تأثیر پشته پرفشار آזור، جریان رطوبت به استان وارد شده است. این شرایط باعث نشست هوای گرم و جلوگیری از صعود آن گردیده است (شکل ۷).

نقشه امگا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای روز ۹ دسامبر ۲۰۰۵ نشان می دهند که هوای مرطوب موجود در سطح زمین، مستقر بر بیابان های شمال آفریقا، عربستان و عراق، توسط جریان قائم وارد ایران شده است. این جریان موجب نزول و نشست هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شده و در نتیجه رطوبت موجود توانایی لازم برای تولید بارش را از دست داده است. این وضعیت ناشی از قرارگیری منطقه تحت تأثیر پشته پرفشار آזור در تراز ۵۰۰ است که همگرایی هوای شرجی را به همراه داشته است (شکل ۶).



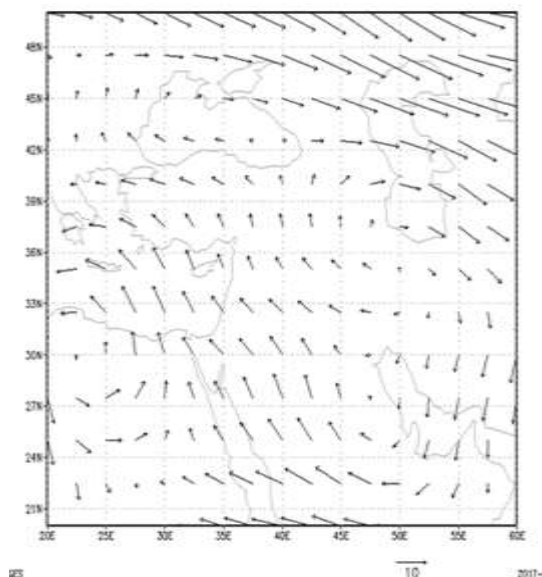
شکل ۶- نقشه امگا ۵۰۰ هکتوپاسکال نهم دسامبر ۲۰۰۵



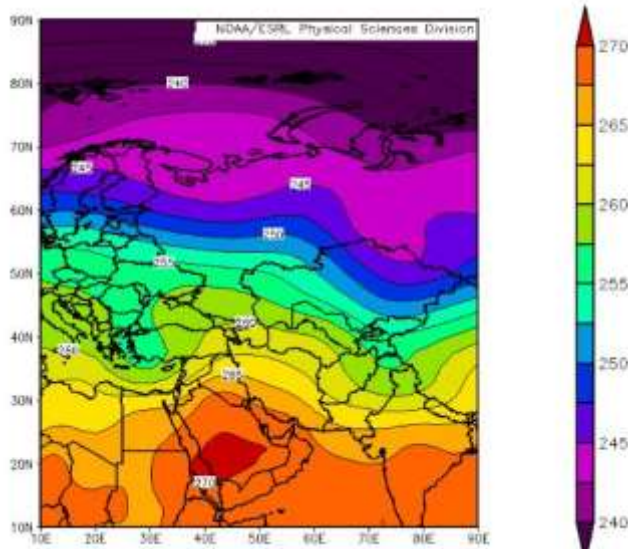
شکل ۷- نقشه رطوبت ۸۵۰ نهم دسامبر ۲۰۰۵

هستند؛ مرکز گرما بر روی جنوب عربستان واقع شده است، اما پشته مرتبط با آن به سمت شرق ایران جابجا شده و گرمای مرکزی نیز به طور تقریبی در جهت غربی- شرقی منتقل شده است. این جابجایی منجر به کاهش شدت جریان هوا و ایجاد شرایط نسبی ایستایی در منطقه شده است (شکل ۸).

همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، در نقشه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، جریان باد موازی با مراکز پرفشار در مرکز ایران و در جهت حرکت عقربه‌های ساعت (جهت مداری) قرار دارد، که ورود امواج گرمایی از جنوب و نواحی بیابانی به مرکز کشور را تسهیل می‌کند (شکل ۸). نقشه دما و خطوط ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز نشان می‌دهد که خطوط دما و ژئوپتانسیل تقریباً هم‌راستا



شکل ۸- نقشه باد ۸۵۰ هکتوپاسکال نهم دسامبر ۲۰۰۵



شکل ۹- نقشه دما نهم سامبر ۲۰۰۵

بحث و نتیجه گیری

شده و تا اسفند ادامه دارد، به گونه‌ای که بیشینه فراوانی و شدت آن در ماه‌های دی، بهمن و اسفند مشاهده می‌شود. در زمان شکل‌گیری این الگو، فرازی گرم بر روی ایران مستقر می‌شود که بیش از نیمی از کشور، به‌ویژه ارتفاعات داخلی و نواحی نیمه شمالی، با دماهای فراتر از حد نرمال (گرمای فرین) مواجه می‌شوند. تحلیل‌های همدیدی نشان می‌دهد که استقرار طولانی‌مدت و زود هنگام پرفشار آزر در سطوح بالای جو و حضور کم‌فشار سطح پایین جنوب ایران، شرایط واگرایی در ارتفاعات بالا و همگرایی در سطح زمین را ایجاد می‌کند و بدین ترتیب، موج‌های گرمایی به شکل گسترده در کشور تقویت می‌شوند. این

امواج گرمایی زمستانه، با وجود نادر بودن، از پدیده‌های جوی تأثیرگذار در مناطق خشک ایران محسوب می‌شوند و به دلیل اثرات زیست‌محیطی و کشاورزی، اهمیت بالایی دارند. این پژوهش به بررسی فراوانی، روند و ویژگی‌های آماری این امواج در استان یزد می‌پردازد. برای این منظور، داده‌های روزانه دمای بیشینه طی یک بازه زمانی ۱۵ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۶) در هفت ایستگاه سینوپتیک (یزد، میبد، بافق، عقدا، مروست، گاریز و رباط پشت بادام) جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوی موج‌های گرمایی در نیمه سرد سال ایران، از ماه آبان آغاز

خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۸۹) روند افزایشی دماهای بیشینه در شهر یزد و کاهش رطوبت در اغلب ماه‌ها گزارش شد که نشان‌دهنده افزایش بروز رویدادهای دمایی فراتر از نرمال است. همچنین ابراهیمی و فلاح‌زاده (۱۳۹۴) نشان دادند که تعداد روزهای داغ و رخداد‌های موج‌های گرمایی در یزد در دوره‌های اخیر افزایش یافته است. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که روند افزایشی موج‌های گرما در نیمه سرد سال، با الگوهای تغییر اقلیم و گرم شدن فصول سرد تطابق دارد. بر پایه نتایج این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب عوامل سینوپتیکی مانند پرفشارهای پرارتفاع گرم، جریانات جنوبی و جریان‌های چرخشی از عوامل اصلی وقوع موج‌های گرمای فرین در استان یزد طی نیمه سرد سال هستند. این مطالعه با ارائه تحلیل‌های مفهومی و عددی، بینشی روشن درباره ساختار و پیامدهای امواج گرمایی زمستانه فراهم می‌آورد و می‌تواند در مدیریت اثرات زیست‌محیطی و کشاورزی ناشی از این پدیده‌ها به کار گرفته شود.

References

- [1]. Alijani, B., Mahmoudi, P., & Chogan, A. (2012). Trend analysis of precipitation in Iran using Mann–Kendall and Sen's slope estimator. *Climatological Research*, 3(9). <https://dx.doi.org/10.61186/jgs.24.73.521> [In Farsi]
- [2]. Alijani, B., Mahmoudi, P., Saligheh, M., & Rigi Chahi, A. (2011). Changes in annual minimum and maximum temperatures in Iran. *Geographical Research Quarterly*, 26(3), 101–122. <https://doi.org/20.1001.1.22518517.1384.9.1.2.5> [In Farsi].
- [3]. Alijani, B., Sarvati, M. R., & Alizadeh, O. (2013). Classification of heat waves in Gilan Province. *Journal of Physical Geography*, 19, 1–16. <https://www.magiran.com/p1681099>. [In Farsi]
- [4]. Asakereh, H. (2011). Statistical climatology principles. Zanjan University Press. [In Farsi]
- [5]. Asakereh, H., & Shadman, H. (2016). Statistical analysis of hot day frequency and temperature changes in Iran. *Geographical*

الگوها به‌ویژه در میانه‌های زمستان با ورود هوای مرطوب همراه بوده و وزش جریان‌های جنوبی و جنوب‌غربی از مناطق بیابانی به سمت ایران را تشدید می‌کنند. در استان یزد، وقوع موج‌های گرمای فرین در نیمه سرد سال عمدتاً ناشی از گسترش و تقویت بادهای غربی و جریان‌های چرخنده و واچرخندها است، که به‌دلیل شیب افقی بالاتر دما در این فصل نسبت به نیمه گرم سال، توده‌های هوایی با ویژگی‌های متفاوت توسط فرارفت جابه‌جا می‌شوند. بنابراین، نقش الگوهای همدید در توسعه و گسترش رویدادهای دمایی فرین در نیمه سرد سال، به‌ویژه در فصل زمستان، قابل توجه است.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که قرارگیری محور فراز و گسترش پربندهای پرارتفاع گرم در سطوح بالای جو و توسعه پرفشار سطح زمین، همراه با برقراری جریانات جنوبی و غربی ناشی از آن‌ها، از عوامل اصلی وقوع موج‌های گرمای فرین در استان یزد طی نیمه سرد سال می‌باشد. این نتایج با یافته‌های دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در ایران همسو است؛ برای نمونه، در مطالعه

Information Journal (Sepehr), 25(100), 147–156.

<https://doi.org/20.1001.1.25883860.1395.25.100.11.9> [In Farsi]

- [6]. Asakereh, H., Masoudian, S. A., & Shadman, H. (2013). Synoptic-dynamic analysis of the most widespread hot day in Iran (1340–1386). *Geography and Environmental Hazards Journal*, 7, 35–52. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.19835> [In Farsi]
- [7]. Ahmadabadi, A., & Ahmadi, M. (2005). Synoptic patterns strengthening heat waves over Iran. *In Proceedings of the Medical Climatology Conference*, Hamedan–Malayer, 115–122. [In Farsi]
- [8]. Barati, G., & Mousavi, S. S. (2005). Spatial displacement of winter heat waves in Iran. *Geography and Development Journal*, 5, 5–41. <https://www.magiran.com/p340316> [In Farsi]
- [9]. Barzegar, F., & Maleknejad, H. (2016). Water demand in agriculture under climate change conditions (Case study: Yazd–Ardakan plain). *Scientific Journal of Irrigation and Water Engineering*, 39(4),

- 85–95.
<https://doi.org/10.22055/jise.2016.12498> [In Farsi]
- [10]. Bullock, J.; J, D, Haddow; K, S, Haddow, (2009). 'Global warming natural hazards and emergency management. Taylor & Francis.
- [11] Colacino, M., & Conte, M. (1995). Heat waves in the central Mediterranean. A synoptic climatology. *Il Nuovo Cimento C*, 18(3), 295-304.
<https://doi.org/10.1007/BF02508561>.
- [12]. Campetella, C., & Rusticucci, M. (1998). Synoptic analysis of an extreme heat wave over Argentina in March 1980. *Meteorological Applications*, 5(3), 217-226.
<https://doi.org/10.1017/S1350482798000851>
- [13]. Cowan, T., Purich, A., Perkins, S., Pezza, A., Boschhat, G., & Sadler, K. (2014). More frequent, longer, and hotter heat waves for Australia in the twenty-first century. *Journal of Climate*, 27(15), 5851-5871.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00092.1>
- [14]. DeGaetano, A. T., & Allen, R. J. (2002). Trends in twentieth-century temperature extremes across the United States. *Journal of Climate*, 15(22), 3188-3205.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<3188:TITCTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3188:TITCTE>2.0.CO;2).
- [15]. Ebrahimi, A., & Fallahzadeh, F. (2015). Statistical analysis and comparison of heat waves in Yazd City. International Conference on Development with a Focus on Agriculture, *Environment and Tourism, Tabriz, Iran*.
<https://civilica.com/doc/468723/> [In Farsi]
- [16]. Esmailnejad, M. (2011). Identification of heat waves in Iran and their relationship with synoptic patterns (Doctoral dissertation). University of Sistan and Baluchestan, Faculty of Earth Sciences. [In Farsi]
- [17]. Esmailnejad, M., Khosravi, M., Alijani, B., & Masoudian, S. A. (2013). Identification of heat waves in Iran. *Geography and Development Journal*, 33, 39–54.
<https://doi.org/10.22111/gdij.2013.1321> [In Farsi]
- Frich, P. A. L. V., Alexander, L. V., DellaMarta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A. K., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate research*, 19(3), 193-212.
<https://doi.org/10.3354/cr019193>
- [19]. Folland, C. K., and Coauthors, (1999): Workshop on indices and indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3–6 June (1997): Breakout group C: Temperature indices for climate extremes. *Climatic Change*, 42, 31–43., P. Frich, T. Basnett, N. Rayner, D. Parker, and B. Horton, (2000): Uncertainties in climate datasets—A challenge for WMO. *WMO Bull.*, 49, 59–68.
- [20]. Fujibe, F., Yamazaki, N., Kobayashi, K., & Nakamigawa, H. (2007). Long-term changes of temperature extremes and day-to-day variability in Japan. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 58, 63-72.
<https://doi.org/10.2467/meteor.58.63>
- [21]. Ghavidel Rahimi, Y. (2011). Identification and synoptic analysis of the extreme hot wave in summer 2009 in Iran. *Arid Zone Geographical Studies*, 3, 85–100.
<https://www.magiran.com/p921741>. [In Farsi]
- [22]. JahanBakhsh, S., & Torabi, S. (2004). Investigation and prediction of temperature and precipitation in Iran. *Geographical Research Quarterly*, 74.
<https://www.magiran.com/p263961>. [In Farsi]
- [23]. JahanBakhsh, S., Ghovdil, F., & Ashjaee, M. (2015). Identification, classification and synoptic analysis of heat waves to reduce human hazards in northwest Iran. *Hazard Knowledge Journal*, 2(4), 377–391.
<https://www.magiran.com/p2119747>. [In Farsi]
- [24]. Khosh Akhlagh, F., Naghaban, S., Roshan, G., & Baghyani, H. (2010). Climate change impacts on thermal comfort in Yazd using Evans model. *Geography and Development Journal*, 20, 167–181.
<https://www.magiran.com/p826164>. [In Farsi]
- [25]. Koppe, C., Kovats, S., Jendritzky, G., & Menne, B. (2004). *Heat-waves: risks and responses* (No. EUR/03/5036810). World Health Organization. Regional Office for Europe.

- [26]. Mojarad, F., Masoompour, J., & Rostami, T. (2015). Synoptic-statistical analysis of heat waves above 40°C in western Iran. *Geography and Environmental Hazards Journal*, 4(13), 41–57. <https://www.magiran.com/p1437600>. [In Farsi]
- [27]. Nissan H ،Burkart K ،Vanaalst M ،mason S (2017).Defining and predicting heat waves in bangladesh ،*journal of applied meteorology and climatology* . <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0177.1>
- [28]. Omidvar, K., Mahmoudabadi, M., Alipour, S., & Moradi, K. (2016). Statistical analysis of heat wave occurrence probability in selected stations of Kermanshah. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(9). <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2877>. [In Farsi]
- [29]. Ragasakthi ،s sandarvel s (2003): anthropogenic in daces climate change in india proceeding of the international symposium on climate change (ISCC). Beijing china.
- [30]. Theoharatos, G., Pantavou, K., Mavrakakis, A., Spanou, A., Katavoutas, G., Efstathiou, P., ... & Asimakopoulos, D. (2010). Heat waves observed in 2007 in Athens, Greece: synoptic conditions, bioclimatological assessment, air quality levels and health effects. *Environmental research*, 110(2), 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.07.002>
- [31]. Suparta, W., & Yatim, A. N. M. (2017, May). An analysis of heat wave trends using heat index in East Malaysia. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 852, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- [32]. Clark, C. S., Rampal, K. G., Thuppil, V., Roda, S. M., Succop, P., Menrath, W., ... & Yu, J. (2009). Lead levels in new enamel household paints from Asia, Africa and South America. *Environmental research*, 109(7), 930-936. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.07.002>

Investigation of the Most Severe Winter Heat Waves in Yazd Province (Research Paper)

1- Kamal Omidvar, Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

Komidvar@yazd.ac.ir

2- Mahdieh Zareh Shehneh, M.Sc. , Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

3- Forough Mohammadi Ravari, Ph.D. , Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

Received: 18 Aug. 2025

Accepted: 1 Feb 2026

Abstract

Winter heat waves are among the rare but influential climatic phenomena in the arid regions of Iran, with significant environmental and agricultural consequences. In this study, the frequency, trend, and statistical characteristics of heat waves were analyzed using daily maximum temperature data over a 15-year period (2003–2017) from seven synoptic stations in Yazd Province, including Yazd, Meybod, Bafq, Aqda, Marvast, Gariz, and Robat-e Posht-e Badam. The results revealed that the highest number of heat-wave events was recorded at Bafq station in 2017 with 17 events, while Yazd station experienced 14 events in both 2005 and 2017. The longest heat-wave episode occurred at Yazd station during autumn 2007 and persisted for 28 days, whereas the longest event at Marvast station lasted 23 days in 2016. Seasonal analysis indicated that in Meybod, Bafq, Aqda, and Robat-e Posht-e Badam stations, the highest occurrence of heat waves was observed in autumn, accounting for more than 51% of all events. In contrast, Yazd, Gariz, and Marvast stations experienced the highest frequency of heat waves during winter, representing more than 52% of total events. The non-parametric Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator indicated increasing trends at all stations except Robat-e Posht-e Badam. The strongest positive trend was detected at Bafq station with a Sen’s slope of $Q = 0.182$ and a Mann–Kendall statistic of $Z = 1.01$. Synoptic analysis of the most extensive and persistent heat wave (a 10-day event in December 2005) demonstrated that the establishment of the Azores High ridge at the 500-hPa level and warm air advection from the Arabian Peninsula at the 850-hPa level played a dominant role in the development of this event. These findings suggest an increasing likelihood of the persistence and intensity of winter heat waves in the arid climate of Yazd Province under the influence of climate change.

Keywords: Winter Heat Waves, Climate Change, Statistical Trend Analysis, Mann–Kendall Test, Yazd Province.