



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 6, No. 24, Winter 2026



Clustering and synoptic analysis of heat waves during the warm period of the year in Selected Cities of Ardabil province over the past four decades

Roghayeh Maleki Meresht^{1*}, Mahnaz Saber²

¹ Postdoctoral Researcher of Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: Roghayeh.maleki1395@gmail.com

² Postdoctoral Researcher of Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2025-08-27
Accepted: 2025-09-19

Keywords:
Ardabil
Pressure Patterns
Heat Waves
Clustering

ABSTRACT

This study aimed to identify and analyze the synoptic patterns influencing the formation of heatwaves in selected cities of Ardabil Province (Ardabil, Meshginshahr, and Parsabad) during the warm season over the period 1980–2020. For this purpose, daily maximum temperature data from the synoptic stations of Ardabil, Parsabad, and Meshginshahr were utilized. Heat waves were defined using the 95th percentile of maximum temperature, with a minimum duration of three consecutive days. To examine the related atmospheric conditions, sea level pressure and 500 hPa geopotential height data from the NCEP/NCAR reanalysis were employed, and dominant patterns were classified using Ward's hierarchical clustering method. The results indicated that during the study period, Parsabad station experienced the highest frequency of heat waves (41 events), followed by Ardabil (24 events) and Meshginshahr (23 events). The duration of heat waves varied across stations: 3–5 days in Ardabil, 3–6 days in Meshginshahr, and 3–7 days in Parsabad. Accordingly, Parsabad recorded both the highest frequency and the longest-lasting heat waves. Heat waves with a minimum duration of five days were selected for synoptic analysis, and two representative cases were examined: the first pattern (1–5 August 2015), characterized by the development of a surface anticyclone accompanied by a 500 hPa ridge over the region; and the second pattern (8–12 October 2002), in which Ardabil was located to the west of an omega-blocking system over western Russia. A common feature of both patterns was increased atmospheric thickness, subsidence, and warming during heat wave events. These findings highlight that synoptic analysis can significantly contribute to improve forecasting and early warning of heat waves.

Cite this article: Maleki Meresht, R., Saber, M. (2025). Clustering and synoptic analysis of heat waves during the warm period of the year in Ardabil province over the past decades. Journal of the Climate Change research, 6 (24), 57-72.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

DOI: 10.30488/ccr.2025.543766.1301



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال ششم / شماره مسلسل بیست و سوم / پاییز ۱۴۰۴ / صفحات: ۷۲-۵۷

خوشه‌بندی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی دوره گرم سال در شهرهای منتخب استان اردبیل طی چهار دهه گذشته

رقیه ملکی مرشت^{۱*}، مهناز صابر^۲

^۱ پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،

رایانامه: Roghayeh.maleki1395@gmail.com

^۲ پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹ واژه‌های کلیدی: اردبیل الگوهای فشار امواج گرمایی خوشه‌بندی	پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تحلیل الگوهای همدیدی مؤثر بر شکل‌گیری امواج گرمایی در شهرهای منتخب استان اردبیل طی ماه‌های گرم سال در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ انجام شد. بدین منظور داده‌های روزانه دمای حداکثر ایستگاه‌های سینوپتیک اردبیل، پارس‌آباد و مشکین‌شهر به کار گرفته شد. امواج گرمایی بر اساس شاخص صدک ۹۵ام دمای حداکثر و با شرط حداقل سه روز تداوم شناسایی گردیدند. برای بررسی شرایط جوی مؤثر، از داده‌های بازتحلیل فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پایگاه NCEP/NCAR استفاده و الگوهای غالب با روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی Ward دسته‌بندی شدند. نتایج نشان داد که در دوره مورد مطالعه، بیشترین تعداد امواج گرمایی در ایستگاه پارس‌آباد (۴۱ موج) رخ داده است؛ در حالی که تعداد این امواج در اردبیل ۲۴ و در مشکین‌شهر ۲۳ موج بود. همچنین طول دوره تداوم امواج گرمایی در ایستگاه‌های اردبیل (۳ تا ۵ روز)، مشکین‌شهر (۳ تا ۶ روز) و پارس‌آباد (۳ تا ۷ روز) متغیر بوده و بدین ترتیب ایستگاه پارس‌آباد بیشترین فراوانی و طولانی‌ترین تداوم امواج گرمایی را تجربه کرده است. پس از انتخاب امواج با تداوم حداقل پنج‌روزه، تحلیل همدیدی برای دو نمونه شاخص انجام گرفت: الگوی نخست (۱ تا ۵ اوت ۲۰۱۵) که با استقرار پرفشار سطح زمین و پراارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکالی بر فراز منطقه همراه بود و الگوی دوم (۸ تا ۱۲ اکتبر ۲۰۰۲) که در آن اردبیل در غرب یک بلوکینگ آمگایی در غرب روسیه واقع شده بود. وجه مشترک این الگوها، افزایش ضخامت جو، جریانات نزولی و گرمایش هوا در طول رخداد موج گرمایی بود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل الگوهای همدیدی می‌تواند در بهبود پیش‌بینی و صدور هشدارهای زود هنگام امواج گرمایی نقش مؤثری ایفا کند.
استناد: ملکی مرشت، رقیه؛ صابر، مهناز (۱۴۰۴). خوشه‌بندی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی دوره گرم سال شهرهای منتخب استان اردبیل طی چهار دهه گذشته. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۴)، ۷۲-۵۷.	
DOI: 10.30488/ccr.2025.543766.1301	
ناشر: دانشگاه گلستان © نویسندگان	

مقدمه

طرح مسأله: امواج گرمایی، به‌عنوان دوره‌هایی از شرایط جوی تعریف شده‌اند که در آن‌ها، دماهای روزانه به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از میانگین بلند مدت منطقه قرار می‌گیرند. این دوره‌ها معمولاً با افزایش رطوبت، تابش شدید خورشیدی و سکون جو همراه هستند و شرایطی را ایجاد می‌کنند که در آن بدن انسان قادر به دفع گرما نیست. چنین شرایطی می‌تواند منجر به مشکلات جدی همچون گرم‌زدگی شود (Bonini et al, 2023: 129). این تعریف بر اهمیت درک هم‌زمان دما، رطوبت و تابش در شناسایی و ارزیابی امواج گرمایی تأکید دارد و نشان می‌دهد که این پدیده می‌توانند به‌عنوان حوادث طبیعی با شدت بالا (شامل تداوم طولانی مدت، دمای بسیار فراتر از میانگین بلند مدت و رطوبت بالا) در نظر گرفته شوند که تأثیرات قابل‌توجهی بر سلامت انسان، کشاورزی، منابع آب و زیرساخت‌ها دارند. تأثیر گرما به زمینه‌های بیوفیزیکی و اجتماعی-اقتصادی و همچنین وابسته به آسیب‌پذیری و میزان قرارگیری افراد در معرض گرما، به‌علاوه ظرفیت فیزیولوژیکی و اجتماعی آن‌ها برای سازگاری بستگی دارد (Simpson et al. 2021: 489). افزایش گرمای تابستان به سلامت و رفاه افراد در سراسر جهان آسیب می‌رساند. امواج گرمایی به عنوان یکی از مخاطرات اقلیمی دهه‌های اخیر، آثار مخربی همچون: آتش‌سوزی، آسیب به محصولات زراعی، مرگ و میر ناشی از گرم‌زدگی و سایر مشکلات زیست محیطی و اجتماعی - اقتصادی را به دنبال دارد. این مخاطره آب و هوایی، از جمله وقایع حدی اتمسفر است که سبب خسارت شدید و تخریب محیط زیست می‌شود (Keggenhoff, 2015: 308). نظر به این که فراتر رفتن دمای هوا از آستانه تحمل انسان، آثار منفی همچون فوت و آسیب دیدگی به‌ویژه در گروه‌های آسیب‌پذیر و سالمندان را در پی دارد، لذا کاهش پیامدهای ناشی از امواج گرمایی منوط به شناخت ساز و کار آن، سامانه‌های جوی ایجاد کننده و نیز مناطق آسیب‌پذیر از این مخاطره است (Kovats & Ebi, 2006: 16). پدیده امواج گرمایی به‌دلیل افزایش

فراوانی، شدت و گستره وقوع طی دهه‌های اخیر، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. استان اردبیل با ویژگی‌های اقلیمی خاص، توپوگرافی متنوع و مجاورت با سامانه‌های جوی مؤثر، گرچه جزء مناطق خنک کشور به‌شمار می‌آید، اما طی سال‌های اخیر شاهد بروز دوره‌های گرمایی کوتاه‌مدت اما شدید بوده است. درک الگوهای زمانی و مکانی امواج گرمایی و شناسایی شرایط همدیدی مؤثر بر وقوع آن‌ها، می‌تواند در پیش‌بینی بهتر و مدیریت ریسک‌های ناشی از این پدیده بسیار مؤثر باشد. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف خوشه‌بندی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی در دوره گرم سال در استان اردبیل انجام شده است تا ضمن طبقه‌بندی موج‌های گرمایی، به بررسی نقش الگوهای فشار و گردش‌های جوی در شکل‌گیری این امواج پرداخته شود. با توجه به اهمیت امواج گرمایی و آثاری که در پی دارد، طی دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی به تحلیل خوشه‌ای فضایی-زمانی امواج گرمایی پرداخته‌اند؛ در پی آن، تلاش شده است که الگوهای توزیع جغرافیایی، محرک‌های جوی و پیامدهای انسانی این پدیده‌ها روشن گردد. شرباکوو و همکاران^۱ (۲۰۱۸) به بررسی دمای آثار امواج گرمایی بر بیماران بستری کالیفرنیا با استفاده از میانگین دمای روزانه آن حداقل در دو روز متوالی بالاتر از صدک ۹۵ پرداختند و به این نتیجه دست یافته‌اند که با افزایش درجه حرارت، پذیرش بیماران مبتلا به نارسایی کلیه، آپاندیسیت، کمردرد، سکتة مغزی، سلامت روان و دیابت اولیه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. وانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۸) با استفاده از تحلیل خوشه‌ای بر روی داده‌های دمای حداکثر روزانه از ۵۸۷ ایستگاه در چین (دوره زمانی ۱۹۵۹ تا ۲۰۱۳)، دو نوع موج گرمایی منطقه‌ای را بر اساس آستانه‌های مطلق و نسبی معرفی کردند. آن‌ها دریافتند که فراوانی موج‌های گرمایی از دهه ۱۹۸۰ میلادی تاکنون افزایش یافته و خوشه‌های مکانی مشخصی مانند جنوب‌شرقی، شمال‌غربی و نواحی

۱ . Sherbakov et al

۲ . Rohini

پایین‌دست رودخانه‌ی یانگ‌تسه را شناسایی کردند. همچنین دریافتند خوشه‌های سردسیرتر شمالی دارای شدت بالاتری هستند و تأثیرات سیستم‌های جوی مانند تضاد فشار و رطوبت خاک برجسته‌اند. در تحقیقی دیگر یانگ و همکاران^۱ (۲۰۲۱) با الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، موج‌های گرم تابستانی در شمال شرق آسیا را به دو نوع امواج رشته‌ای و بلوک‌کننده تقسیم کردند. آنان نشان دادند که در طول ۳۸ سال، موج‌های رشته‌ای روند افزایشی قابل توجهی داشتند، در حالی که موج‌های بلوک‌کننده تغییر معناداری را نشان ندادند. تامسون^۲ (۲۰۲۲) موج گرمایی بی‌سابقه سال ۲۰۲۱ در غرب آمریکای شمالی را بررسی کرده و پیش‌بینی نموده است که توزیع آماری رخدادهای حدی در آینده گسترش خواهد یافت. در مطالعه‌ای دیگر، ونگ و همکاران^۳ (۲۰۲۲) به رابطه میان امواج گرمایی تشدیدشده و آلودگی ازن در منطقه پکن-تیانجین پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که امواج گرمایی می‌توانند به‌عنوان یک محرک مؤثر بر تشدید آلودگی O₃ عمل کرده و در دوره‌های طولانی‌مدت، شرایط نامساعد جوی را تقویت کنند. از منظر پیامدهای انسانی، سیلویرا و همکاران^۴ (۲۰۲۳) اثر امواج گرمایی بر مرگ‌ومیر در آمازون برزیل را بررسی کردند و دریافتند که این پدیده خطر مرگ در میان سالمندان را افزایش می‌دهد؛ به‌ویژه زنان و بیماران قلبی-عروقی بیش از سایر گروه‌ها آسیب‌پذیر هستند. در زمینه تحلیل شهری و درون‌شهری، زائو و همکاران^۵ (۲۰۲۴) ترکیبی نوآورانه از تغییر دمای سطحی و ارتفاع لایه مرزی جو (PBLH) را در قالب خوشه‌بندی انجام دادند تا الگوهای داخلی شهرها در طول امواج گرمایی را در شهرهای پاریس، مونترآل و زوریخ بررسی کنند. آن‌ها نشان دادند که چرخه‌های انرژی سطحی و تابش در خوشه‌های شهری و روستایی تفاوت‌های اساسی دارد و روند «بازتأمین-بازگردانی»

(refueling-restoration) در شار حرارتی سطحی در طول موج گرما وجود دارد. در ایران نیز، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. حسین‌پور و همکاران (۱۳۹۵) با تحلیل امواج گرمایی دامنه‌های جنوبی البرز نشان دادند که بیشترین فراوانی مربوط به امواج گرمایی دو روزه است و اوج وقوع آن در ماه‌های ژوئن و سپتامبر رخ می‌دهد. همچنین، حاتمی زرنه و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی نوسانات زمانی امواج گرمایی شمال غرب ایران در ارتباط با غلظت گازهای گلخانه‌ای، به این نتیجه رسیدند که بین فراوانی و شدت وقوع این پدیده با تغییرات گازهای گلخانه‌ای رابطه معناداری مشاهده نمی‌شود. اعتمادیان و همکاران (۱۳۹۹) نواحی امواج گرمایی ایران را با استفاده از داده‌های دمای حداکثر روزانه در ۹۵ ایستگاه سینوپتیک ایران به روش PCA و تحلیل خوشه‌ای بررسی نموده و چنین نتیجه‌گیری کردند که نواحی کوهستانی و کوهپایه‌ای، بیشترین فراوانی موج گرمایی و نواحی ساحلی (شمال و جنوب کشور) کمترین موج گرمایی را تجربه می‌کنند. تاجیک‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) روند تغییرات دماهای فرین آینده ایران را با استفاده از داده‌های CMIP5 بررسی نمودند. یافته‌های آنان بیان‌گر افزایش رخدادهای حدی به ویژه رخدادهای حدی گرم در حوزه‌های آبخیز اصلی ایران بود. ملکی مرشت و سبحانی (۱۴۰۲) نیز با تمرکز بر شهر اردبیل به بررسی رابطه امواج گرمایی با گرمایش شهری پرداختند و نشان دادند که افزایش سطح ساخت‌وساز و کاهش پوشش گیاهی، شدت اثرات موج‌های گرم را افزایش داده است. زینالی و روحی (۱۴۰۲) با بهره‌گیری از مدل زنجیره مارکف، احتمال وقوع امواج گرمایی با دوره‌های تداوم متفاوت را در استان اردبیل محاسبه کرده‌اند که نتایج آن حاکی از تمرکز بیشینه موج‌های گرم در ماه‌های تیر و مرداد است. سبحانی و دل آرا (۱۴۰۲) تأثیر الگوهای جوی مختلف بر تغییرات امواج گرمایی شهرستان نیر را با استفاده از صدک ۹۹ و بر اساس الگوبندی با روش خوشه‌ای سلسله مراتبی Ward بر پایه فاصله اقلیدسی بررسی نمودند. یافته‌های آنان حاکی از ورود سامانه

¹. Yang et al

². Thompson

³. Wang

⁴. Silveira

⁵. Zhao et al

کم‌فشار حرارتی از سمت جنوب شرق و جنوب غرب و افزایش ۴ درجه‌ای دما در روز مورد بررسی، نسبت به طول هفته بوده است.

طی سال‌های اخیر، روند افزایشی دمای زمین و تداوم پدیده تغییر اقلیم، موجب شدت یافتن و افزایش فراوانی امواج گرمایی به‌ویژه در دوره گرم سال شده است. این امواج گرمایی که اغلب با افزایش شدید و ناگهانی دما همراه هستند، آثار نامطلوبی بر سلامت انسان، بهره‌وری اقتصادی، منابع طبیعی و زیرساخت‌های شهری به‌جا می‌گذارند. در چنین شرایطی، شناخت دقیق ویژگی‌ها، الگوهای زمانی-مکانی و عوامل مؤثر بر شکل‌گیری این پدیده، از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعه امواج گرمایی در فصل گرم، با هدف شناسایی مناطق پرخطر، تحلیل شدت و تداوم این پدیده و ارزیابی پیامدهای آن، به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا راهکارهای مؤثر در کاهش آسیب‌پذیری، مدیریت منابع انرژی، ارتقاء تاب‌آوری شهری و سازگاری با تغییرات اقلیمی را تدوین و اجرا نمایند. همچنین، این نوع مطالعات، بستر لازم برای توسعه سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار زودهنگام را فراهم می‌سازند و در کاهش خسارات جانی و مالی نقش بسزایی دارند. با توجه به پیامدهای گسترده امواج گرمایی در فصل گرم و اهمیت روزافزون آن در سطح جهانی و ملی، بررسی جامع این پدیده به منظور تحلیل فضایی-زمانی و شناسایی ساختارهای رفتاری این پدیده، به ویژه در مناطق سردسیر همچون استان اردبیل، که آمادگی مواجهه با افزایش ناگهانی و چند روزه دما در آن کمتر است، ضرورتی اساسی به‌شمار می‌آید. تا از این طریق مشخص شود که الگوهای جوی مؤثر در وقوع این پدیده در استان اردبیل اغلب کدام‌ها هستند؟ کدام ماه‌های دوره گرم سال، بیشترین تأثیرپذیری را دارند؟ کدام ایستگاه بیشترین فراوانی و تداوم موج گرمایی را تجربه کرده است.

امواج گرمایی^۱: امواج گرمایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های حدی اقلیمی تعریف می‌شوند که طی چند روز متوالی دماهایی به‌طور معنادار بالاتر از شرایط اقلیمی محلی رخ می‌دهند. این پدیده معمولاً با شاخص‌های آماری (مانند دماهای روزانه بالاتر از صدک ۹۰) یا شاخص‌های ترکیبی دما-رطوبت عملیاتی می‌شود (Perkins & Alexander, 2013). اهمیت نظری امواج گرمایی در این است که افزون بر نقش آن‌ها به‌عنوان نشانگر تغییر اقلیم جهانی، پیامدهای بهداشتی، کشاورزی و زیست‌محیطی چشمگیری نیز دارند (Meehl & Tebaldi, 2004).

تحلیل خوشه‌ای وارد^۲: روش‌های خوشه‌بندی جزء ابزارهای مهم در آمار و داده‌کاوی برای گروه‌بندی مشاهدات مشابه‌اند. در میان آن‌ها، روش سلسله‌مراتبی وارد، با معیار کمینه‌سازی افزایش واریانس درون خوشه‌ای، ساختاری بهینه برای تجمیع داده‌ها فراهم می‌سازد (Murtagh & Legendre, 2014). در پژوهش‌های اقلیمی، این روش به‌ویژه برای شناسایی الگوهای مشترک مکانی-زمانی پدیده‌های حدی از جمله امواج گرمایی به‌کار گرفته می‌شود (Philipp et al., 2016).

تحلیل سینوپتیک^۳: تحلیل سینوپتیک یکی از بنیان‌های هواشناسی است که با بررسی هم‌زمان داده‌های سطحی و سطوح بالاتر جو در نقشه‌های همدیدی، سازوکارهای دینامیکی و ترمودینامیکی مؤثر بر شرایط اقلیمی محلی شناسایی می‌شوند (Wallace & Hobbs, 2006). در ارتباط با امواج گرمایی، تحلیل سینوپتیک چارچوبی نظری برای تبیین نقش پرفشارهای جنب‌حاره‌ای، بلوکی‌های پارتفاع و جابه‌جایی پرجت‌ها در ایجاد و تداوم این رویدادها فراهم می‌کند (Black et al., 2004).

1. Heat Waves

2. Ward's Hierarchical Clustering

3. Synoptic Analysis

روش تحقیق

در پژوهش حاضر، جهت واکاوی امواج گرمایی دوره گرم سال در منطقه مورد مطالعه، نخست، داده‌های حداکثر دمای روزانه سه ایستگاه منتخب استان اردبیل شامل: اردبیل، پارس‌آباد و مشکین شهر برای دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۲۰) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. در گام بعدی به منظور شناسایی روزهای تحت حاکمیت موج گرمایی در دوره گرم سال، ابتدا آستانه دمایی برای ماه‌های گرم سال براساس شاخص صدک ۹۵ ام مشخص گردید و روزهای گرمی که به مدت ۳ روز یا بیشتر، بالاتر از آستانه تعیین شده بودند، به عنوان روز توأم با موج گرمایی تعریف شدند. سپس الگوبندی براساس تحلیل خوشه‌ای Ward و فاصله اقلیدسی انجام گرفت. در نهایت داده ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال^۱، فشار سطح دریا^۲، باد مداری و نصف النهاری^۳ و همچنین دمای اتمسفر^۴ و امگا^۵ از

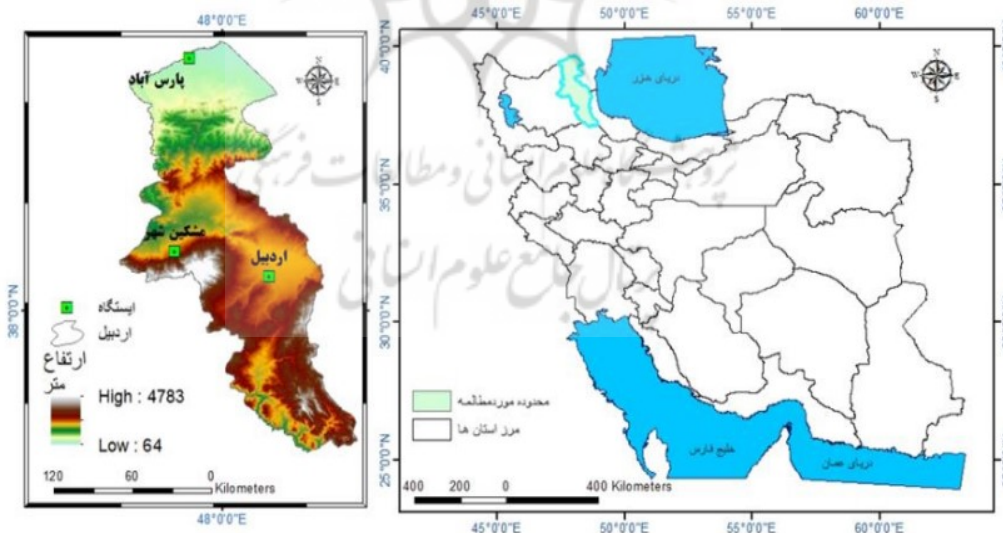
وب سایت مرکز ملی پیش‌بینی محیطی^۶ برای روزهای منتخب دریافت و پس از ترسیم نقشه‌ها در گِردس^۷، تحلیل همدیدی انجام گرفت.

محدوده و قلمرو پژوهش

استان اردبیل به جهت داشتن شرایط طبیعی و منطقه‌ای ویژه و موقعیت مکانی، اقلیمی، زمین‌شناختی و ژئومورفولوژیکی منحصر به فرد، بر توزیع جمعیت، نوع معیشت و نحوه‌ی استقرار سکونتگاه‌ها اثری غیر قابل انکار داشته است (پورکریمی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهش حاضر، سه ایستگاه منتخب استان اردبیل واقع در شمال غرب ایران، شامل: اردبیل، پارس‌آباد و مشکین شهر، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه گردیده است.

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه (مأخذ: میرموسوی و صبوری، ۱۳۹۳)

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	دوره‌ی آماری
پارس‌آباد	۴۷°۵۵'	۳۹°۳۹'	۳۱۹	۱۹۸۰-۲۰۲۰
مشکین شهر	۴۷°۵۶'	۳۸°۳۸'	۱۵۶۸	۱۹۸۰-۲۰۲۰
اردبیل	۴۸°۱۷'	۳۸°۱۵'	۱۳۳۲	۱۹۸۰-۲۰۲۰



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (مأخذ: نگارندگان)

۱. HGT
۲. SLP
۳. Uwnd & Vwnd
۴. Air Temperature
۵. Omega

^۶ . NCEP/NCAR

^۷ . GrADS

بحث

نتایج بررسی صدک ۹۵ام میانگین دمای حداکثر

دوره گرم سال در ایستگاه‌های منتخب: بررسی

صدک ۹۵ام میانگین دمای حداکثر سه ایستگاه منتخب استان اردبیل طی دوره ۶ ماهه گرم سال (جدول ۲) نشان داد که طی دوره مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۲۰) بالاترین مقادیر این صدک در دو ایستگاه اردبیل (۳۲/۶۷°) و مشکین شهر (۳۲/۶۰°) در ماه اوت و در ایستگاه پارس‌آباد در ماه ژوئیه (۳۸/۲۰°) مشاهده می‌شود. همچنین طبق جدول مذکور، پایین‌ترین مقدار صدک در هر سه ایستگاه منتخب در ماه اکتبر و به ترتیب اردبیل (۲۷°)، پارس‌آباد ۲۸ و مشکین شهر ۲۵/۳ درجه سلسیوس می‌باشد.

توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی با تداوم ۳ تا

۷ روزه در ایستگاه‌های منتخب: براساس معیار انتخابی برای تعریف موج گرم در این استان در

ماه‌های گرم سال، ۲۴ موج گرم در ایستگاه اردبیل، ۲۳ موج در مشکین شهر و ۴۱ موج گرم در پارس‌آباد شناسایی گردید. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۳، طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۲۰)، در ایستگاه اردبیل، موج گرمایی با تداوم ۳ روزه در مقایسه با امواج ۴ تا ۷ روزه، بیشترین فراوانی را داشته است. این موج گرم سه روزه در هر ۶ ماه دوره گرم سال رخ داده است و توزیع فراوانی آن به ترتیب در ماه می ۵ موج، اکتبر ۴ موج، اوت ۳ موج، سپتامبر ۲ موج، ژوئن و ژوئیه هر کدام ۱ موج بوده است. طبق جدول مذکور، فراوانی وقوع موج گرمایی ۴ روزه شش موج گرم بوده که تنها در سه ماه ژوئن (۱)، ژوئیه (۳) و اوت (۲) تجربه شده است. فراوانی وقوع موج گرمایی ۵ روزه ۱ مورد و در ماه اوت بوده است. براساس نتایج، در این ایستگاه طی دوره آماری مورد مطالعه، موج گرمایی ۶ و ۷ روزه رخ نداده است.

جدول ۲: نتایج صدک ۹۵ام دوره گرم سال در ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل (بر حسب °C) (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

ردیف	ماه ایستگاه	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر
۱	اردبیل	۲۸/۴	۳۰/۸	۳۱/۸	۳۲/۶۷	۳۱/۶	۲۷
۲	پارس آباد	۳۲/۴	۳۷	۳۸/۲	۳۷/۴	۳۳/۶	۲۸
۳	مشکین شهر	۲۶/۶	۳۰/۴	۳۲/۲	۳۲/۶	۲۹/۴	۲۵/۳

جدول ۳: توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ۳ تا ۷ روزه ایستگاه اردبیل (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

طول موج	فراوانی موج	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر
۳ روزه	۱۶	۵	۱	۱	۴	۲	۴
۴ روزه	۶	-	۱	۳	۲	-	-
۵ روزه	۱	-	-	-	۱	-	-
۶ روزه	-	-	-	-	-	-	-
۷ روزه	-	-	-	-	-	-	-
مجموع	۲۴	۵	۲	۴	۶۷	۲	۴

براساس یافته‌های ارائه شده در جدول (۴)، طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۲۰)، در ایستگاه پارس آباد، فراوانی موج گرمایی ۳ روزه ۲۱ مورد بوده که در مقایسه با امواج ۴ تا ۷ روزه بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده است. این موج گرم سه روزه در هر ۶ ماه دوره گرم سال رخ داده است و توزیع ماهانه‌ی

آن به ترتیب در ماه ژوئیه ۷ موج، سپتامبر ۵ موج، ژوئن و اکتبر هر کدام ۳ موج، اوت ۲ موج و می ۱ موج بوده است. طبق جدول مذکور، فراوانی وقوع موج گرمایی ۴ روزه ۹ موج گرم بوده که به غیر از ماه‌های اوت و اکتبر، در سایر ماه‌های دوره گرم سال تجربه شده است. موج گرمایی ۵ روزه به استثنای ماه می، در

سایر ماه‌های دوره ۶ ماهه رخ داده است که توزیع ماهانه‌ی آن در دو ماه ژوئن و اوت هر کدام ۲ مورد و ژوئیه، سپتامبر و اکتبر ۱ مورد بوده است. براساس نتایج، در این ایستگاه طی دوره آماری مورد مطالعه، فراوانی وقوع موج گرمایی ۶ و ۷ روزه هر کدام ۲ مورد بوده است. توزیع ماهانه موج گرمایی ۶ روزه در ماه‌های ژوئیه و اوت بوده و موج گرمایی ۷ روزه در ماه می و اوت هر کدام ۱ موج تجربه شده است.

جدول ۴: توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ۳ تا ۷ روزه ایستگاه پارس آباد (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

طول موج	فراوانی موج	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر
۳ روزه	۲۱	۱	۳	۷	۲	۵	۳
۴ روزه	۹	۳	۲	۲	-	۲	-
۵ روزه	۷	-	۲	۱	۲	۱	۱
۶ روزه	۲	-	-	۱	۱	-	-
۷ روزه	۲	۱	-	-	۱	-	-
مجموع	۴۱	۵	۷	۱۱	۶	۸	۴

طبق جدول ۵، در دوره آماری مورد مطالعه (۲۰۲۰-۱۹۸۰)، در ایستگاه مشکین شهر نیز همچون دو ایستگاه اردبیل و پارس آباد، موج گرم ۳ روزه با فراوانی ۱۶، در مقایسه با امواج ۴ تا ۷ روزه، بیشترین فراوانی را داشته و در هر ۶ ماه دوره گرم سال تجربه شده است و توزیع فراوانی آن به ترتیب در ماه ژوئیه ۴ موج، می، اوت و سپتامبر هر کدام ۳ موج، ژوئن ۲ و اکتبر ۱ موج بوده است. طبق جدول مذکور، فراوانی وقوع موج گرمایی ۴ روزه پنج موج گرم بوده که به

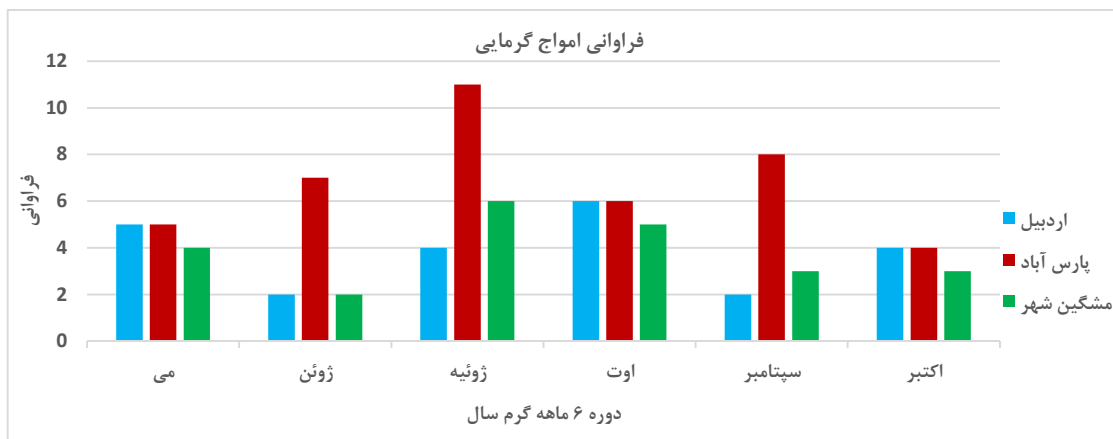
غیر از ماه‌های ژوئن و سپتامبر، در سایر ماه‌ها رخ داده است و توزیع ماهانه‌ی آن در ماه اوت ۲ و ماه‌های می، اکتبر، ژوئیه هر کدام ۱ موج بود. همچنین فراوانی وقوع موج گرمایی ۵ روزه ۱ مورد و در ماه اکتبر بوده است. در این ایستگاه طی دوره آماری مورد مطالعه، فراوانی موج گرمایی ۶ روزه ۱ مورد بوده که در ماه ژوئیه رخ داده است. براساس نتایج، در ایستگاه مشکین شهر نیز همانند ایستگاه اردبیل، موج گرمایی ۷ روزه رخ نداده است.

جدول ۵: توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ۳ تا ۷ روزه ایستگاه مشکین شهر (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

طول موج	فراوانی موج	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر
۳ روزه	۱۷	۵	۱	۱	۴	۲	۴
۴ روزه	۵	۱	-	۱	۲	-	۱
۵ روزه	۱	-	-	-	-	-	۱
۶ روزه	۱	-	-	۱	-	-	-
۷ روزه	-	-	-	-	-	-	-
مجموع	۲۳	۴	۲	۶	۵	۳	۳

در شکل (۲) نمودار مجموع فراوانی ماهانه امواج گرمایی سه ایستگاه منتخب استان اردبیل ارائه شده است. طبق نمودار مذکور، ایستگاه پارس آباد بیشترین فراوانی موج گرمایی را داشته است. این نمودار

همچنین نشان می‌دهد که دو ایستگاه پارس آباد و مشکین شهر، در ماه ژوئیه و ایستگاه اردبیل در ماه اوت شاهد وقوع بیشترین موج گرمایی بوده‌اند.



شکل ۲: نمودار مجموع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ایستگاه های منتخب استان اردبیل (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

پیوسته است. موج ردیف ۷ و ۸ (۹) الی ۱۵ اوت ۲۰۰۶ و ۲۵ الی ۳۱ می ۲۰۰۷ با تداوم ۷ روز و حاکمیت بر روی پارس آباد به عنوان طولانی ترین موج گرم استان اردبیل در دوره گرم سال طی دوره آماری ۴۱ ساله شناسایی شدند. همچنین شدیدترین موج گرمایی ثبت شده با دمای $42/2^{\circ}\text{C}$ در اواخر دوره و در ایستگاه پارس آباد مشاهده شده است. نکته قابل توجه دیگر شیب امواج گرمایی اواخر دوره به سمت ماه های گرم سال و تمرکز مکانی آن ها بر روی پارس آباد است که می تواند هشدار در خصوص تغییرات الگوهای حاکم بر جریان های هوا و احتمالاً تغییر اقلیم باشد.

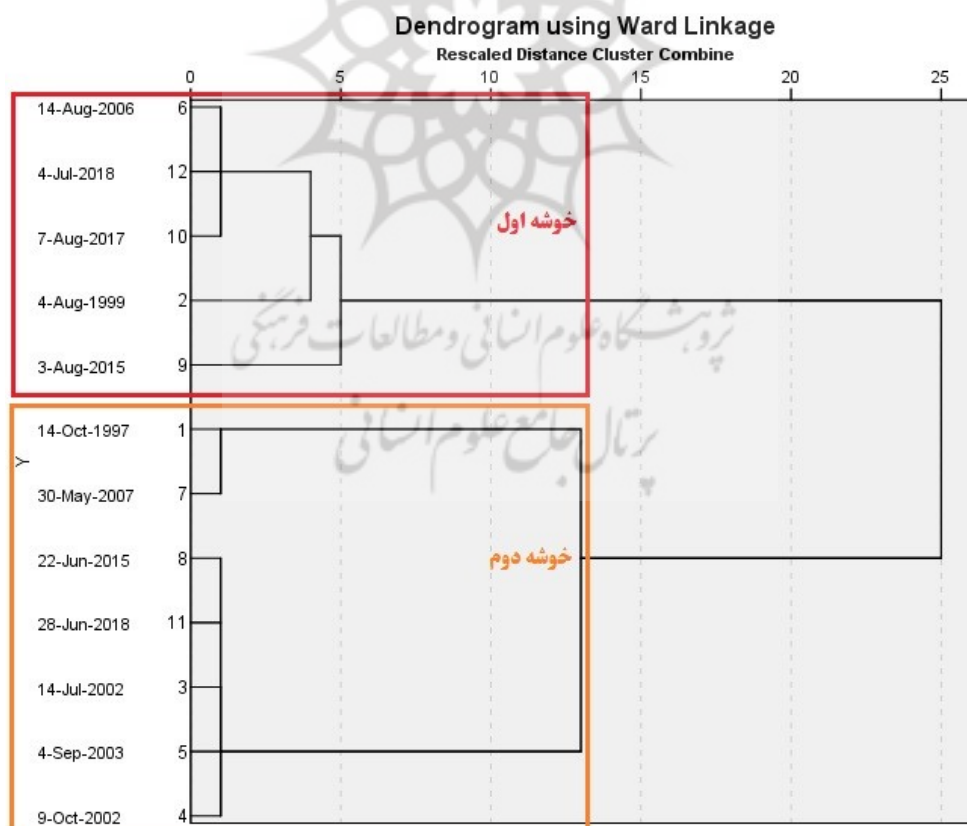
خوشه بندی گرم ترین روزهای ۱۴ موج گرم دوره گرم سال در استان اردبیل طی دوره مورد مطالعه - که ۴ موج در دو ایستگاه هم پوشانی زمانی داشته - با استفاده از پارامترهای جوی فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و روش ward و فاصله اقلیدسی به شناسایی ۲ خوشه منتهی گردید که با عنوان دو خوشه اول و دوم مشخص شدند (شکل ۳). در ادامه به تحلیل همدیدی الگوی دو روز شاخص در این دو گروه، به عنوان نماینده گروه ها پرداخته می شود.

شناسایی و خوشه بندی امواج گرمایی منطقه

مورد مطالعه: به منظور شناسایی روزهای تحت حاکمیت موج گرمایی در دوره گرم سال، ابتدا آستانه دمایی برای ماه های گرم سال براساس شاخص صدک ۹۵ ام مشخص گردید و روزهای گرمی که در دوره مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۲۰) به مدت ۳ روز یا بیشتر، بالاتر از آستانه تعیین شده بودند، به عنوان روز توأم با موج گرمایی تعریف شدند. با توجه به فراوانی بالای امواج گرمایی با تداوم بیش از ۳ روز بر مبنای شاخص صدک ۹۵ حداکثر دما در استان اردبیل (۸۸ موج)، مقرر گردید امواج گرمایی با ماندگاری حداقل ۵ روز، مبنای گزینش موج ها جهت انجام خوشه بندی قرار گیرد. بر این اساس، در مجموع ۱۴ موج با تداوم بیش از ۵ روز در استان اردبیل شناسایی گردید که ویژگی های زمانی و مکانی این امواج در جدول (۶) قید شده است. مهم ترین ویژگی های زمانی امواج گرمایی در این استان بدین شرح زیر است: از ۱۴ موج گرمایی رخ داده، ۱۲ موج در پارس آباد، ۲ موج در مشکین شهر و یک موج در اردبیل ثبت شده است. به لحاظ ماهانه، اوت با ۵ موج بیشترین فراوانی موج گرمایی را داشته است. در جولای ۳ موج، در ژوئن و اکتبر هر کدام ۲ موج و در می و سپتامبر هر کدام ۱ موج گرم به وقوع

جدول ۶: شناسایی و خوشه‌بندی امواج گرمایی دوره گرم سال در ایستگاه‌های منتخب (۱۹۸۰-۲۰۲۰)
(مأخذ: نگارندگان)

ردیف	تاریخ وقوع موج	تداوم موج	میانگین دمای موج °C	گرم‌ترین روز موج	دمای گرم‌ترین روز موج °C	ایستگاه متأثر از موج
۱	۱۲ الی ۱۶ اکتبر ۱۹۹۷	۵ روز	۲۹/۷	۱۴ اکتبر ۱۹۹۷	۳۳	پارس‌آباد
۲	۱ الی ۵ اوت ۱۹۹۹	۵ روز	۳۳	۴ و ۵ اوت ۱۹۹۹	۳۳/۲	اردبیل
۳	۱ الی ۶ اوت ۱۹۹۹	۶ روز	۳۹	۴ اوت ۱۹۹۹	۴۰/۴	پارس‌آباد
۴	۱۲ الی ۱۷ جولای ۲۰۰۲	۶ روز	۳۸/۵	۱۴ و ۱۵ جولای ۲۰۰۲	۳۹	پارس‌آباد
۵	۸ الی ۱۲ اکتبر ۲۰۰۲	۵ روز	۲۶/۹	۹ اکتبر ۲۰۰۲	۲۹/۶	مشکین شهر
۶	۱ الی ۵ سپتامبر ۲۰۰۳	۵ روز	۳۵/۳	۴ سپتامبر ۲۰۰۳	۳۵/۸	پارس‌آباد
۷	۹ الی ۱۵ اوت ۲۰۰۶	۷ روز	۳۸/۷	۱۴ اوت ۲۰۰۶	۴۰	پارس‌آباد
۸	۲۵ الی ۳۱ می ۲۰۰۷	۷ روز	۳۴	۳۰ می ۲۰۰۷	۳۵/۴	پارس‌آباد
۹	۲۱ الی ۲۵ ژوئن ۲۰۱۵	۵ روز	۳۸/۶	۲۲ ژوئن ۲۰۱۵	۴۰	پارس‌آباد
۱۰	۱ الی ۵ اوت ۲۰۱۵	۵ روز	۳۸/۷	۳ اوت ۲۰۱۵	۳۹/۲	پارس‌آباد
۱۱	۶ الی ۱۰ اوت ۲۰۱۷	۵ روز	۳۸/۹	۷ اوت ۲۰۱۷	۴۰/۲	پارس‌آباد
۱۲	۲۶ الی ۳۰ ژوئن ۲۰۱۸	۵ روز	۳۹/۵	۲۸ ژوئن ۲۰۱۸	۴۲/۶	پارس‌آباد
۱۳	۱ الی ۵ جولای ۲۰۱۸	۵ روز	۴۲/۲	۴ جولای ۲۰۱۸	۴۴	پارس‌آباد
۱۴	۱ الی ۶ جولای ۲۰۱۸	۶ روز	۳۴/۱	۱ جولای ۲۰۱۸	۳۶	مشکین شهر



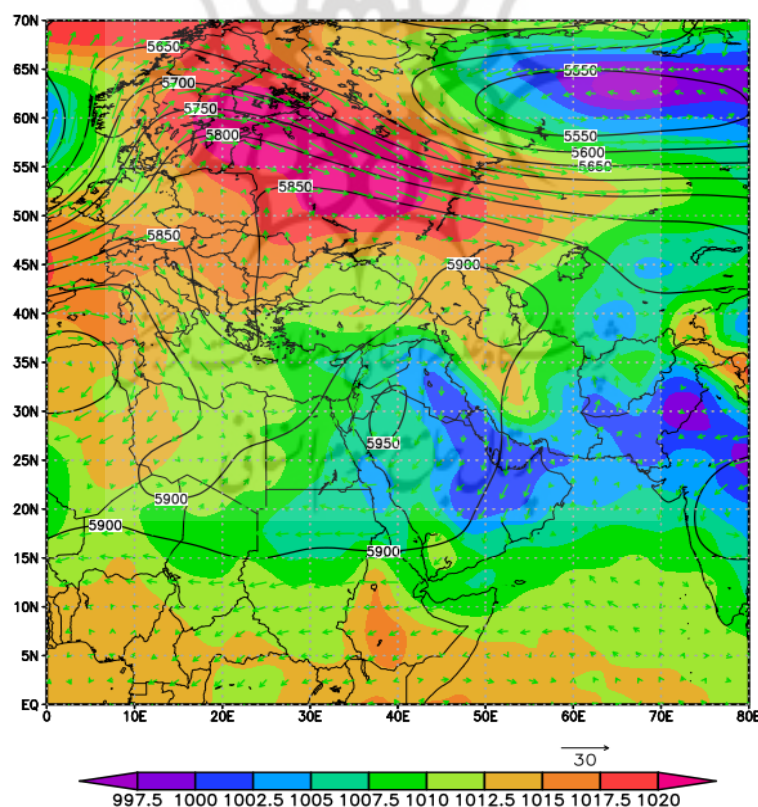
شکل ۳: نمودار دندروگرام سلسله مراتبی وارد (Ward) روزهای توأم با موج گرمایی
حداقل ۵ روز در استان اردبیل (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

تحلیل همدیدی

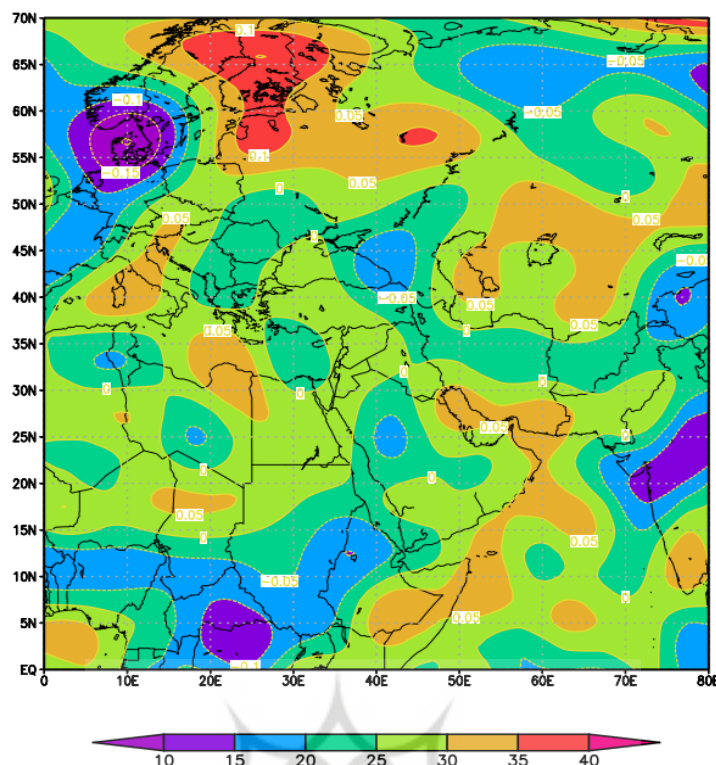
تحلیل همدیدی (۳ اوت ۲۰۱۵) روز نماینده

الگوی امواج گرمایی خوشه دوم: بررسی همدیدی گرم‌ترین روز موج گرمایی یکم تا پنجم اوت ۲۰۱۵ (۳ اوت ۲۰۱۵)، حاکی از استیلای زبانه‌ی پرفشار بر روی شمال‌غرب کشور می‌باشد، طبق نقشه ارائه شده در شکل (۴)، سامانه پرفشار با فشار مرکزی ۱۰۲۳ بر فراز روسیه بسته شده که زبانه‌ی جنوب سوی این سیستم پرفشار بر روی مناطق غربی ایران کشیده شده و محدوده مورد مطالعه تحت سیطره منحنی هم‌فشار ۱۰۱۷ واقع شده و همین عامل، سبب نزول هوا و افزایش دما در استان اردبیل شده است. همچنین در سطح ۵۰۰ میلی‌بار، پراارتفاع بسیار عمیق بر فراز نیمه غربی ایران مستقر شده و شمال‌غرب کشور از جمله استان اردبیل، زیر محور فراز قرار گرفته و این امر منجر به فرونشینی گرمایش آدیاباتیک هوا در شهرهای مورد مطالعه و تشدید گرمای هوا شده است.

پراارتفاع بسته از دریای خزر تا بخش‌هایی از مصر و سودان را تحت حاکمیت خود قرار داده است. این پراارتفاع با ارتفاع مرکزی ۵۹۵۰ ژئوپتانسیل متر بر روی شمال عربستان و بخشی از غرب کشور عراق، فراز مانع از نوع حلقه‌ی آتش را تشکیل داده، فلذا سبب مکش جریانات گرم عرض‌های پایین به منطقه شده است. استقرار هم زمان پراارتفاع در سطح ۵۰۰ میلی بار و پرفشار در سطح زمین ضمن ممانعت از صعود و تخلیه هوای گرم، سبب تشدید نزول و گرمایش هوا و تداوم موج گرمایی در محدوده مورد مطالعه شده است. بررسی جهت باد حاکی از وزش باد غربی تا جنوب غربی در این روز بوده است. همچنین طبق نقشه ارائه شده در شکل (۵)، امگای صفر در تراز میانی جو و دمای بین ۲۵ تا ۳۰ درجه در سطح زمین، دال بر پایداری هوا در تراز میانی و گرمایش سطح زمین است. مجموع این عوامل حاکمیت موج گرمایی روز سوم آگوست ۲۰۱۵ را تأیید می‌نماید.



شکل ۴: نقشه همدیدی روز نماینده الگوی اول (۳ اوت ۲۰۱۵): رنگ‌ها معرف فشار سطح دریا؛ منحنی‌های مشکی معرف ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی جو، پیکان‌ها معرف باد تراز میانی (فلش‌ها نشانگر جهت باد و طول پیکان‌ها معرف سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه) هستند.



شکل ۵: نقشه همدیدی روز نماینده الگوی اول (۳ اوت ۲۰۱۵): رنگ‌ها معرف دمای سطح زمین؛
منحنی‌های زرد معرف امگای تراز میانی جو هستند.

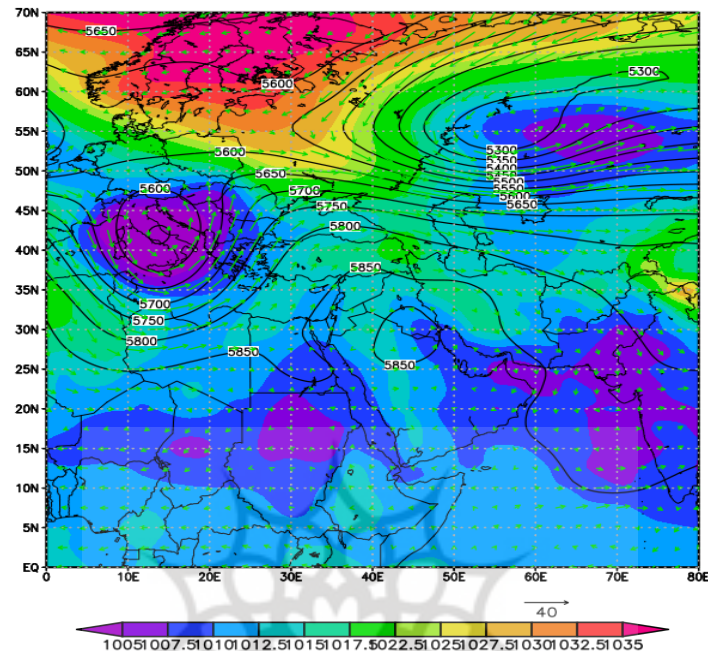
شرایط آفتابی و در نتیجه، بالا رفتن جذب انرژی خورشیدی توسط سطح زمین و افزایش دما شده است. در اثر حاکمیت این سیستم، شرایط پایدار جوی ایجاد شده که مانع ورود هوای سرد از مناطق دیگر به استان اردبیل شده است. بررسی منحنی‌های مربوط به ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز نشان‌دهنده استقرار یک پشته^۱ گسترده بر روی ایران و قرار گیری کشور در زیر محور فراز بعلاوه تشکیل بلوکینگ از نوع حلقه آتش بر فراز نواحی مرکزی و غربی ایران می‌باشد. در این روز، ارتفاع ژئوپتانسیل در محدوده استان اردبیل بیش از ۵۸۰۰ متر بوده و منطقه مورد مطالعه تقریباً در زیر فراز واقع شده است که با چرخش ساعتگرد هوا در زیر فراز و جریانات غربی تا جنوب غربی، سبب مکش هوای گرم و خشک عربستان، عراق و مناطق گرم جنوب کشور به استان اردبیل و افزایش قابل توجه دما در این منطقه شده است. وجود پشته در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشانگر

تحلیل همدیدی (۹ اکتبر ۲۰۰۲) روز نماینده الگوی امواج گرمایی خوشه دوم: تحلیل سینوپتیکی الگوهای فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز نهم اکتبر ۲۰۰۲ به عنوان گرم‌ترین روز موج گرمایی ۸ الی ۱۲ اکتبر حاکی از استیلای زبانه‌ی پرفشار در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۶). فشار مرکزی این سامانه بیش از ۱۰۳۵ هکتوپاسکال است که زبانه‌ی این پرفشار به سمت جنوب و جنوب‌غرب امتداد یافته و کل ایران را متأثر ساخته است. طبق این نقشه (شکل ۶)، در این روز، استان اردبیل در محدوده فشاری ۱۰۲۰ هکتوپاسکال و تحت حاکمیت زبانه جنوبی این سامانه پرفشار واقع شده است. این زبانه‌ی پرفشار سطحی با حرکات واگرا در سطح زمین، کاهش صعود همرفتی و جوی آرام به همراه داشته و در نتیجه، شرایطی بر منطقه اردبیل غالب شده است که از نظر سینوپتیکی بیان‌گر پایداری جو و نبود امکان رشد سامانه‌های بارشی می‌باشد. لذا سبب کاهش ابرناکی و ایجاد

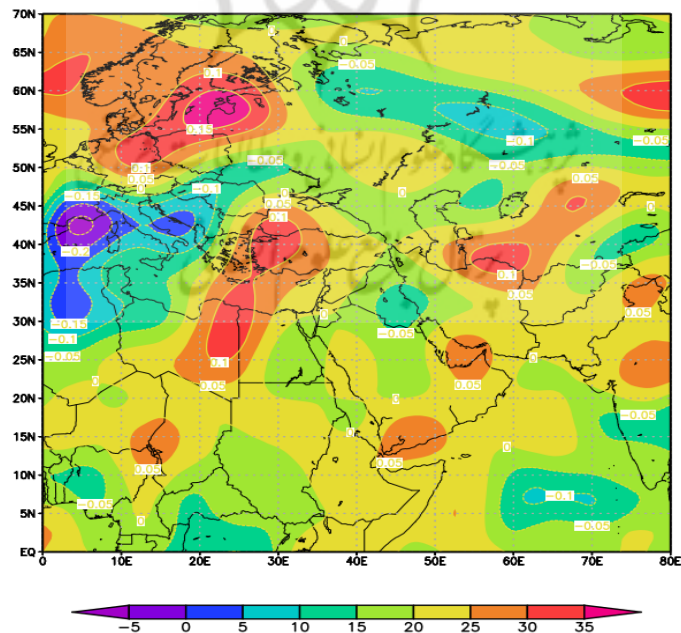
^۱ . Ridge

اکتبر ۲۰۰۲ تأیید می‌نماید. نقشه‌های دمای سطح زمین و امگای تراز میانی جو (شکل ۷) نیز مؤید بالا بودن دمای سطح زمین تا ۲۵ درجه و سکون هوا در تراز میانی جو در این روز از موج گرمایی است.

حرکات نزولی و غلبه وضعیت پایدار است. این شرایط با پرفشار سطحی موجود همزمان شده و یک الگوی سینوپتیکی پایدار در ترازهای پایینی و میانی جو تشکیل داده و حاکمیت موج گرمایی را در روز نهم



شکل ۶: نقشه همدیدی روز نماینده الگوی اول (۹ اکتبر ۲۰۰۲): رنگ‌ها معرف فشار سطح دریا؛ منحنی‌های مشکی معرف ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی جو، پیکان‌ها معرف باد تراز میانی (فلش‌ها نشانگر جهت باد و طول پیکان‌ها معرف سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه) هستند.



شکل ۷: نقشه همدیدی روز نماینده الگوی اول (۹ اکتبر ۲۰۰۲): رنگ‌ها معرف دمای سطح زمین؛ منحنی‌های زرد معرف امگای تراز میانی جو هستند.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به خوشه‌بندی و تحلیل هم‌دیدي امواج گرمایی دوره گرم شهرهای منتخب استان اردبیل طی چهار دهه‌ی گذشته پرداخته شد. یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که امواج گرمایی در استان اردبیل، با وجود اقلیم سردسیر منطقه، طی چهار دهه اخیر روندی افزایشی از نظر فراوانی، شدت و مدت زمان داشته‌اند. تحلیل صدک ۹۵ دمای حداکثر روزانه سه ایستگاه منتخب (اردبیل، مشکین‌شهر و پارس‌آباد) نشان داد که بیشترین دماها در ایستگاه‌های پارس‌آباد و مشکین‌شهر در ماه‌های ژوئیه و اوت رخ داده و ایستگاه اردبیل بیشترین دماهای شدید را در ماه اوت تجربه کرده است. توزیع فراوانی موج‌های گرمایی با تداوم ۳ تا ۷ روزه حاکی از آن است که رخداد‌های کوتاه‌مدت سه‌روزه بیشترین سهم را دارند، اما پارس‌آباد با ثبت موج‌های بلندمدت پنج تا هفت روزه، بیشترین شدت و تداوم را نشان می‌دهد. این تفاوت مکانی با ویژگی‌های توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی قابل توجیه است: ارتفاع کم و قرارگیری در جلگه مغان، نفوذ جریان‌های گرم جنوبی و غربی و شرایط پایدار جوی، شدت و مدت امواج گرمایی را در پارس‌آباد افزایش داده است. ایستگاه اردبیل با ارتفاع بالاتر و اقلیم خنک‌تر، عمدتاً درگیر موج‌های کوتاه‌مدت و متوسط بوده و مشکین‌شهر وضعیت میانی دارد. خوشه‌بندی و تحلیل سینوپتیکی نشان داد که عامل اصلی شکل‌گیری و تداوم امواج گرمایی، استقرار زبانه‌های پرارتفاع در تراز میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال) همراه با سامانه‌های پرفشار سطحی است. این ترکیب موجب فرونشینی و پایداری جو، کاهش صعود همرفتی و جلوگیری از ورود سامانه‌های سرد می‌شود و به افزایش دما و ماندگاری موج گرما منجر می‌گردد. مشاهده پرارتفاع‌های بسته و بلوکینگ‌های حلقه‌آتش نیز نقش مهمی در مکش جریان هوای گرم از جنوب و جنوب‌غرب و تشدید گرمایش سطحی ایفا کرده است. از منظر پیامدهای کاربردی، نتایج پژوهش نشان داد که ایستگاه پارس‌آباد به‌عنوان مرکز تجمع طولانی‌ترین و شدیدترین موج‌های گرمایی استان شناسایی شد؛

شدت و تداوم امواج گرمایی به تعامل میان شرایط سینوپتیکی و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه وابسته است و تحلیل دقیق این الگوها می‌تواند به کاهش پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از امواج گرما کمک کند. چراکه پارس‌آباد به‌عنوان نقطه‌ی حساس استان اردبیل، نیازمند توسعه سامانه‌های هشدار سریع و اقدامات پیشگیرانه در حوزه‌های سلامت عمومی، مدیریت انرژی و منابع آب است. ایستگاه‌های اردبیل و مشکین‌شهر نیز با توجه به الگوهای کوتاه‌مدت موج گرما، می‌توانند هدف برنامه‌های آموزش و کاهش آسیب‌پذیری باشند. یافته‌های این پژوهش با مطالعات ملی و بین‌المللی مشابه همخوانی داشت؛ تمرکز امواج بلندمدت در مناطق جلگه‌ای، نقش پرارتفاع‌های میانی و پرفشارهای سطحی در تداوم موج گرما، و تأثیر موقعیت توپوگرافی بر شدت امواج گرمایی، در مطالعات (Wang et al. (2018)، Yang et al. (2021) و Black et al. (2004) نیز گزارش شده است. در نهایت، این پژوهش نشان داد که شناخت دقیق ویژگی‌های مکانی و زمانی امواج گرمایی و تحلیل سینوپتیکی آن‌ها، می‌تواند راهنمایی علمی برای مدیریت ریسک‌های اقلیمی، برنامه‌ریزی شهری و کاهش آسیب‌های انسانی باشد.

پیشنهاده‌ها

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی به تحلیل آثار تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های محلی و جهانی و بررسی تأثیر تغییرپذیری الگوهای پیوند از دور (مانند نوسان اطلس شمالی) بر فراوانی و شدت وقوع امواج گرمایی در شمال غرب ایران بپردازند. همچنین، ادغام داده‌های ماهواره‌ای (مانند LST سنجنده MODIS) برای پایش فضایی-زمانی دما و تحلیل دقیق‌تر جزایر گرمایی شهری در خلال امواج گرمایی می‌تواند به درک جامع‌تری از تأثیرات محلی این پدیده منجر شود.

منابع

۱. اعتمادیان، الهه، دوستان، رضا، زرین، آذر. ۱۳۹۹. نواحی گرمایی ایران، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۱، (۴۲)، ۳۰-۱۷.
۲. پور کریمی، پرویز، رضالو، رضا، افخمی، بهروز. ۱۳۹۹. تحلیل نقش عوامل طبیعی در توزیع فضایی سکونتگاه‌های قلعه‌ای استان اردبیل با استفاده از GIS و AHP، مطالعات باستان‌شناسی، ۱۲ (۱)، ۴۰-۱۹.
۳. تاجیک، اعظم، اربابی سبزواری، آزاده، برنا، رضا. ۱۴۰۱. بررسی روند تغییرات دماهای فرین آینده ایران با استفاده از داده‌های CMIP5، علوم مهندسی و آب‌خیزداری ایران، ۱۶ (۵۷)، ۲۴-۱۳.
۴. حاتمی زرنه، داریوش. حجازی زاده، زهرا. ناصرزاده، محمدحسین. ۱۳۹۸. تحلیل نوسانات زمانی امواج گرمایی منطقه شمال غرب ایران و ارتباط آن‌ها با گازهای گلخانه‌ای و ناهنجاری‌های دمایی کره زمین، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹ (۵۲)، ۵۶-۳۵.
۵. حسین پور، زینب، شمسی پور، علی اکبر، کریمی، مصطفی، خوش اخلاق، فرامرز. ۱۳۹۵. تحلیل آماری امواج گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۳ (۶۸)، ۹۸-۸۱.
۶. زینالی، بتول، روحی، فاطمه. (۱۴۰۲). برآورد احتمال وقوع امواج گرمایی با دوره تداوم مختلف در استان اردبیل به کمک زنجیره مارکف. فصلنامه جغرافیایی سرزمین، (۷۷)، ۵۱-۶۷.
۷. سبحانی، بهروز دل آرا، قدیر. ۱۴۰۳. بررسی تأثیر الگوهای جوی مختلف بر تغییرات امواج گرمایی شهرستان نیر، جغرافیا و روابط انسانی، ۷ (۱)، ۶۳۷-۶۲۶.
۸. ملکی مرشت، رقیه. سبحانی، بهروز. ۱۴۰۲. بررسی موج‌های گرم شهر اردبیل و نقش آن در گرمایش شهری. فصلنامه جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، (۴۳)، ۱۶۹-۱۹۵.
۹. میر موسوی، سید حسین، صبوری، لیلا. ۱۳۹۳. بررسی روند بارش برف در شمال غرب ایران، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۵ (۳)، ۱۳۶-۱۱۹.
10. Black, E., Blackburn, M., Harrison, G., Hoskins, B., & Methven, J. (2004). Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, 59 (8), 217–223.
11. Boni, Z., Bieńkowska, Z., Chwałczyk, F., Jancewicz, B., Marginean, I., Yáñez Serrano, P. 2023. What is a heat(wave)? An interdisciplinary perspective, *Climatic Change*, 176: 129.
12. Cotlier, G. I., & Jimenez, J. C. 2022. The Extreme Heat Wave over Western North America in 2021: An Assessment by Means of Land Surface Temperature. *Remote Sensing*, 14(3), 561.
13. Keggenhoff, I., Elizbarashvili, M., King, L. 2015. Heat Wave Events over Georgia since 1961: Climatology, Changes and Severity. *Climate*, 3(2), 308–328.
14. Kovats, S. R., Ebi, L. K. 2006. Heat waves and public health in Europe, *Eur. J. Public Health* 16. London.
15. Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305 (5686), 994–997.
16. Murtagh, F., & Legendre, P. 2014. Ward's hierarchical agglomerative clustering method: Which algorithms implement Ward's criterion? *Journal of Classification*, 31(3), 274–295.
17. Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26 (13), 4500–4517.
18. Philipp, A., Beck, C., Huth, R., & Jacobeit, J. (2016). Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *International Journal of Climatology*, 36 (7), 2673–2691.
19. Robinson, P. J. 2001. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40(4), 762–775.
20. Sherbakov T. malig B, gairguis K, gersgunov A, basu R. 2018. Ambient temperature and added heat wave effects on hospitalizations in California, *Environmental Research*, 160: 83–90.

21. Silveira, I H, Shaiana, V H, M, Maurício, N, Cortes, T R, Junger, W L, Cirino, G, I, Eliane, O, Beatriz F A. 2023. Heat waves and mortality in the Brazilian Amazon: Effect modification by heat wave characteristics, population subgroup, and cause of death; *international journal of hygiene and environmental health*, volume 248.
22. Simpson NP, Mach, KJ. Constable A 2021 A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth* 4:489–501.
23. Thompson, V., Kennedy-Asser, A T, Vosper, E., Eunice Lo, Y. T. Huntingford, Ch., Oliver Andrews, M, Hegerl, G., & Mitchell, D. 2022. The 2021 western North America heat wave among the most extreme events ever recorded globally, *Science Advances*. Pp. 1-10.
24. Ventura S, Miró JR, Peña JC, Villalba G. 2023. Analysis of synoptic weather patterns of heatwave events. *Clim Dyn.*;61(9-10):4679-4702.
25. Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. 2006. Atmospheric Science: An Introductory Survey (2nd Ed.). *Academic Press*. (International ed. 2007)
26. Wang, P., Tang, J., Wang, S., & Fang, J. (2018). Regional heatwaves in China: A cluster analysis. *Climate Dynamics*, 50, 1901–1917.
27. Wang, Ruonan Bei, Naifang Hu Bo, Wu, Jiarui Liu, Suixin Li, Xia Jiang, Qian Tie, Xuexi, Li. 2022. Guohui. The relationship between the intensified heat waves and deteriorated summertime ozone pollution in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China, during, 2013–2017; *Environmental Pollution*, 314.
28. Yang, X., Zeng, G., Zhang, S., Hao, Z., & Iyakaremye, V. (2021). Relationship between two types of heat waves in northern East Asia and temperature anomalies in Eastern Europe. *Environmental Research Letters*, 16, 024048.
29. Zhao, Y., Strebel, D., Derome, D., Esau, I., Li, Q., & Carmeliet, J. (2024). Using clustering to understand intra-city warming in heatwaves: Insights into Paris, Montreal, and Zurich. ArXiv Preprint. *Environmental Research Letters* 19(6).