

DOI: <https://doi.org/10.22034/jmas.2026.579829.1269>

واکاوی الگوهای جوی مؤثر در موج‌های گرم دوره سرد سال در استان اردبیل طی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۰

رقیه ملکی مرشت^{۱*}، مهناز صابر^۲

۱- پژوهشگر پسا دکتري آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- پژوهشگر پسا دکتري آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی الگوهای همدیدی مؤثر بر شکل‌گیری امواج گرمایی در فصل سرد سال در استان اردبیل طی یک دوره ۴۱ ساله (۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰) انجام شد. بدین منظور داده‌های دمای بیشینه‌ی روزانه ایستگاه‌های همدیدی اردبیل، پارس‌آباد و مشگین‌شهر گردآوری شد و امواج گرمایی بر اساس شاخص صدک ۹۵، به‌گونه‌ای تعریف شدند که روزهای با دمای بیش از آستانه ماهانه و با حداقل تداوم سه روز متوالی را دربرگیرند. برای تحلیل شرایط جوی مؤثر، از داده‌های فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پایگاه NCEP/NCAR استفاده گردید و الگوهای غالب با روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی Ward شناسایی شد. یافته‌ها نشان داد بیشترین آستانه گرمایی (صدک ۹۵) هر سه ایستگاه به ماه آوریل تعلق دارد. طی دوره مطالعه، تعداد امواج گرمایی در ایستگاه‌های اردبیل، مشگین‌شهر و پارس‌آباد به‌ترتیب ۳۹، ۲۶ و ۲۰ موج بود. ایستگاه اردبیل بیشترین فراوانی و ایستگاه مشگین‌شهر بیشترین تداوم موج گرمایی را تجربه کرده‌اند. براساس نتایج خوشه‌بندی، امواج گرمایی با تداوم حداقل پنج‌روزه در دو الگوی اصلی همدیدی دسته‌بندی شدند: در الگوی نخست (نمونه: ۱۵ مارس ۲۰۱۰): استقرار پرفشار در سطح زمین و پراارتفاع در تراز میانی جو موجب نزول هوا و گرمایش بی‌دررو گردیده و در الگوی دوم (نمونه: ۱۰ دسامبر ۱۹۹۸): تشکیل پرفشار گسترده در سطح زمین و قرارگیری منطقه جلوی یک ناوه عمیق در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال سبب نفوذ جریانات گرم از عرض‌های جنوبی و جنوب‌غربی به استان شده است. در هر دو الگو، چرخش ساعتگرد سامانه‌های پرفشاری، عامل انتقال هوای گرم از عرض‌های پایین‌تر به استان اردبیل بوده است.

کلمات کلیدی: تحلیل همدیدی، خوشه‌بندی، موج گرم.

مقدمه

امواج گرمایی (HWS^۱) جزء فرین‌های آب‌وهوایی آسیب‌زا بر جوامع بشری و تهدیدی بر سلامت انسان در سراسر جهان محسوب می‌شود (فوندا و سانتاموریس^۲، ۲۰۱۷). دانشمندان اقلیم، امواج گرمایی را به‌عنوان دوره‌های طولانی از دماهای غیرعادی بالا تعریف می‌کنند. آن‌ها شاخص‌های مختلفی برای امواج گرمایی توسعه داده‌اند که علاوه بر دما، متغیرهای جوی مانند رطوبت، سرعت باد و تابش خورشیدی را نیز در نظر می‌گیرند (اسچواینگشکل و همکاران^۳، ۲۰۲۱). پدیده امواج گرمایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در نتیجه گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار شده است. افزایش فراوانی، شدت و گستره جغرافیایی این امواج، تبعات قابل توجهی در زمینه‌های سلامت عمومی، کشاورزی، منابع آب و زیست‌پذیری شهرها داشته است (پرکینز-کیرکپاتریک و گیبسون^۴، ۲۰۱۷). مطالعات نشان می‌دهند که هوای گرم، برای برخی گروه‌ها، مانند نوزادان، زنان، افراد در موقعیت‌های اجتماعی-اقتصادی دشوار و بزرگسالان بالای ۶۵ سال، عواقب شدیدتری دارد (کونلون و همکاران^۵، ۲۰۲۰). امواج گرمایی معمولاً در فصل گرم سال رخ می‌دهند و تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل همدیدی نظیر استقرار پرفشارهای جنب‌حاره‌ای، فروود جریانات خشک و ناپایداری‌های منطقه‌ای شکل می‌گیرند (یین و همکاران^۶، ۲۰۱۵). استان اردبیل با موقعیت جغرافیایی خاص، تنوع کوهساری و قرارگیری در گذرگاه سامانه‌های جوی مختلف، اگرچه جزء مناطق سرد کشور به‌شمار می‌آید، اما طی سال‌های اخیر، با رویدادهای گرمایی کوتاه‌مدت اما شدید مواجه

شده است. بررسی دقیق الگوهای زمانی و مکانی این امواج و شناسایی شرایط همدیدی مؤثر در وقوع آن‌ها، می‌تواند نقشی مهم در افزایش آمادگی و کاهش آسیب‌پذیری منطقه ایفا کند. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف خوشه‌بندی امواج گرمایی در دوره گرم سال و تحلیل شرایط همدیدی مؤثر بر آن‌ها در استان اردبیل انجام می‌گیرد. استفاده از روش‌های آماری مانند خوشه‌بندی، امکان طبقه‌بندی رخدادها و شناسایی الگوهای مشترک را فراهم می‌سازد و ابزار مفیدی در مطالعات اقلیم‌شناسی کاربردی محسوب می‌شود. تحلیل خوشه‌ای، ابزار مؤثری برای طبقه‌بندی داده‌های اقلیمی و کشف الگوهای پنهان در آن‌هاست (ویلکس^۷، ۲۰۱۱). با توجه به اهمیت دما در حیات موجودات زنده و نقش مؤثر امواج گرمایی در افزایش دمای مناطق و پیامدهای منفی ناشی از وقوع آن، به‌ویژه در پی تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین که به افزایش شدت و فراوانی این پدیده منجر شده است. بسیاری از پژوهش‌گران به واکاوی امواج گرمایی به روش‌های مختلف پرداخته‌اند تا راه حلی برای کاهش آثار سوء حاصل از افزایش دما بیابند. لذا طی دهه‌های اخیر پژوهش در زمینه امواج گرمایی رشد قابل توجهی یافته است. پژوهش‌های انجام گرفته، نشان می‌دهند که گرمایش جهانی نه تنها میانگین دمای زمین را افزایش داده، بلکه الگوهای مکانی و زمانی رخدادهای گرمایی را نیز دچار دگرگونی کرده است. از جمله این پژوهش‌ها به موارد زیر اشاره می‌گردد:

فیشر و شار^۸ (۲۰۱۰) در مطالعات خود نشان دادند که تغییرات اقلیمی با ایجاد الگوهای جغرافیایی منسجم، منجر به افزایش فراوانی و شدت امواج گرمایی در سطوح منطقه‌ای شده است. پرکینز-کیرکپاتریک و گیبسون^۹ (

^۶. Yin et al

^۷. Wilks

^۸. Fischer & Schär

^۹. Perkins-Kirkpatrick & Gibson

^۱. Heat waves

^۲. Founda & Santamouris

^۳. Schwingshackl et al

^۴. Kirkpatrick & Gibson

^۵. Conlon et al

همدیدی، چهار الگوی عمده برای امواج گرمایی این منطقه شناسایی کردند و نقش پرفشارهای جنب‌حاره‌ای را مؤثر دانستند. 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 امواج گرمایی 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 امواج گرمایی در ماه‌های تیر و مرداد است. حسین پور و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل آماری امواج گرمایی دامنه جنوبی البرز پرداختند و برای شناسایی امواج گرمایی از نمایه‌های صدک (۹۸.۹۵) بهره گرفتند. طبق یافته‌های آنان، در روش صدک، شناسایی امواج گرمایی در دوره سرد سال نمایان‌تر بوده است.

بررسی پیشینه‌های ارائه شده نشان می‌دهد که طی سال‌های آتی احتمال افزایش رخداد امواج گرمایی بیشتر است. همچنین از لحاظ الگوهای همدیدی، بیشتر پژوهشگران، حاکمیت پرفشار و پر ارتفاع در روز حادثه را بر وقوع امواج گرمایی مؤثر دانسته‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر در پی تلفیق دو رویکرد «خوشه‌بندی آماری» و «تحلیل همدیدی» با تمرکز بر استان اردبیل است تا به درکی جامع‌تر از ساختار، روند و محرک‌های جوی امواج گرمایی این منطقه دست یابد. چراکه در سال‌های اخیر، پدیده‌های اقلیمی فرین همچون امواج گرمایی، نه تنها در فصل‌های گرم سال بلکه به‌طور غیرمنتظره‌ای در دوره‌های سرد نیز مشاهده می‌شود. امواج گرمایی که در فصل‌های سرد سال رخ می‌دهند، به دلیل ناهمخوانی با شرایط معمول جوی، می‌توانند آثار منفی چشم‌گیری بر محیط‌زیست، منابع طبیعی، سلامت انسان و

(2017) با تحلیل تغییرات منطقه‌ای موج‌های گرم، تأکید کردند که شرایط جوی مانند پرفشارهای ماندگار و ناوهای قوی نقش کلیدی در شکل‌گیری این پدیده دارند. پرکینز-کیرکپاتریک و لوئیس^۱ (۲۰۲۰) نیز تأیید کرده‌اند که تداوم روند کنونی انتشار گازهای گلخانه‌ای، ضریب اطمینان وقوع این امواج را در مناطق مختلف جغرافیایی، به‌ویژه در عرض‌های میانی، افزایش داده است. هوشیار و همکاران (۱۳۹۸) به تحلیل آماری و سینوپتیکی امواج گرمایی زودرس شمال‌غرب ایران پرداختند. یافته‌های آنان نشان داده است که علت وقوع امواج زودرس شمال‌غرب ایران، اغلب، حاکمیت پرارتفاع بر روی جنوب عربستان، تنگه عدن و مرکز سودان در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و شکل‌گیری کم فشار سودانی در سطح دریا و گسیل زبانه‌های آن به سمت شمل، شمال‌شرق و شمال‌غرب است. برون و همکاران (۱۳۹۸) نقش پرفشار عربستان در امواج گرم استان خوزستان را به روش همدیدی تحلیل نمودند. نتایج نشان داده است که در لایه میانی ورد سپهر پرفشار عربستان، در نیمه شمالی دریای سرخ استقرار داشته و پشته‌ی حاصل از این واچرخند تمام خوزستان را در بر گرفته و سبب وقوع موج گرمایی در این استان شده است. رضایی و همکاران (۱۳۹۸) آستانه‌ی دمایی موج گرمایی دوره گرم ایران را براساس سناریوهای RCP شبیه‌سازی نمودند. طبق یافته‌های آنان، طی سال‌های آتی، عرض‌های متوسط و بالا، در دوره گرم سال بالاترین تغییرات و افزایش را در مقدار آستانه دمایی تجربه خواهند کرد. خسروی و اسمعیل نژاد (۱۳۹۹) به شناسایی همدیدی امواج گرمایی ایران پرداختند. طبق یافته‌های آنان، حاکمیت کم‌فشار، مهم‌ترین علت وقوع موج گرمایی ایران بوده است. صلاحی و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای بر روی استان اردبیل با استفاده از روش خوشه‌بندی وارد و تحلیل نقشه‌های

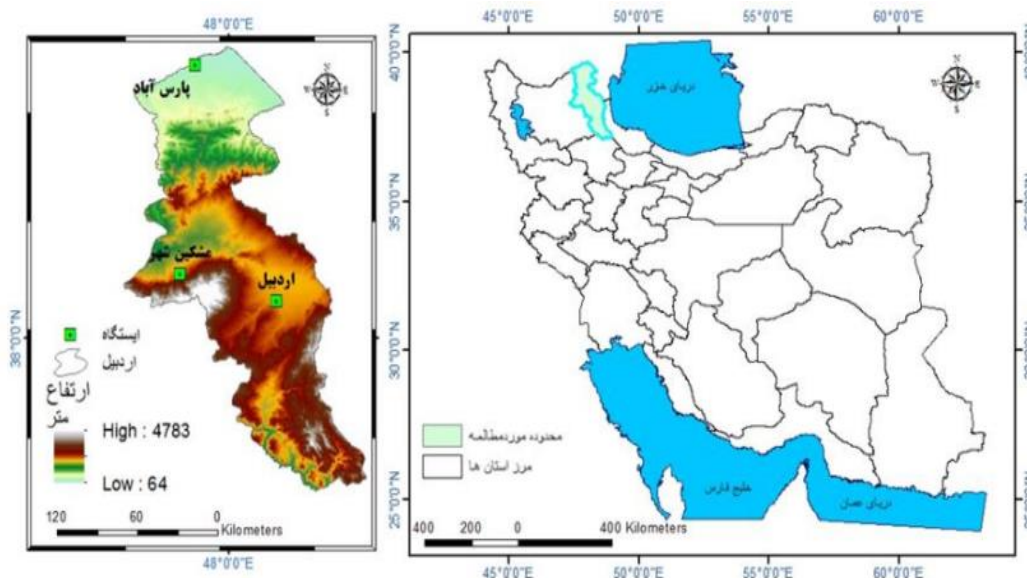
¹ . Perkins-Kirkpatrick & Lewis

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل با وسعتی حدود ۱۷۸۶۷ کیلومتر مربع، تقریباً ۱/۱ درصد از کل مساحت کشور را در بر گرفته و با جهت گیری شمالی - جنوبی، دارای ناهمواری های بسیار ناهمگن، کوه های مرتفع، حوضه ها و دشت های بین کوهستانی می باشد. این استان مابین استان های گیلان، زنجان، آذربایجان شرقی از یک سو و جمهوری آذربایجان از سوی دیگر واقع شده است (یزدانی و سیدین، ۱۳۹۵). مشخصات و موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه گردیده است.

سازوکارهای شهری داشته باشند. به ویژه، تغییرات ناگهانی دما در فصل سرد می تواند آسیب های شدیدی به کشاورزی وارد کرده، منجر به افزایش مصرف منابع انرژی (خصوصاً مصرف گاز و برق) شود. بنابراین؛ استفاده از روش های خوشه بندی به عنوان یکی از ابزارهای پیشرفته در تحلیل داده های اقلیمی، این امکان را فراهم می سازد تا بتوان امواج گرمایی غیرمعمول در فصل سرد را از نظر مکانی، زمانی و شدت دسته بندی و تحلیل نمود. این رویکرد، نه تنها موجب شناخت بهتر الگوهای رفتاری این امواج می شود، بلکه می تواند نقش مؤثری در بهبود پیش بینی، هشدار دهی زودهنگام و برنامه ریزی های تطبیقی ایفا کند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی هر یک از ایستگاه های منتخب در سطح کشور و استان اردبیل

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه های مورد مطالعه (مأخذ: میرموسوی و صبور، ۱۳۹۳)

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	دوره ی آماری
پارس آباد	۴۷°۵۵'	۳۹°۳۹'	۳۱۹	۲۰۲۰-۱۹۸۰
مشگین شهر	۴۷°۶'	۳۸°۳۸'	۱۵۶۸	۲۰۲۰-۱۹۸۰
اردبیل	۴۸°۱۷'	۳۸°۱۵'	۱۳۳۲	۲۰۲۰-۱۹۸۰

برای انجام پژوهش حاضر و جهت شناسایی و واکاوی امواج گرمایی استان اردبیل در دوره سرد سال، ابتدا داده‌های دمای بیشینه روزانه ایستگاه‌های اردبیل، پارس آباد و مشگین شهر به‌منزله نماینده‌ی سایر ایستگاه‌های استان برای سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۰ از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. در گام بعدی، براساس شاخص صدک ۹۵ ام، آستانه دمایی برای ماه‌های سرد سال مشخص و دوره‌هایی که به مدت ۳ روز یا بیشتر، بالاتر از آستانه تعیین شده بودند، به‌منزله دوره‌هایی با حاکمیت موج گرمایی معرفی شدند سپس امواج گرم با تداوم دست کم ۵ روزه با روش خوشه‌ای سلسله مراتبی Ward براساس فاصله اقلیدسی الگوبندی انجام گرفت. در مرحله آخر تحلیل همدیدی برای روزهای نماینده تحت حاکمیت امواج گرمایی انجام گرفت.

بدین منظور NETCDF مولفه‌های ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، فشار سطح دریا، نقشه باد مداری و نصف النهاری و همچنین نقشه دمای جو از پایگاه داده NCEP/NCAR با تفکیک مکانی ۲/۵ درجه در ۲/۵ درجه برای محدوده جغرافیایی ۰ تا ۷۰ درجه شمالی و ۰ تا ۸۰ درجه شرقی (به منظور پوشش کامل سامانه‌های سینوپتیک مؤثر بر منطقه) دریافت و در GrADS ترسیم شد. این محدوده شامل ۵۷۵۱ نقطه شبکه بود.

لازم به ذکر است که به منظور یافتن همانندی بین اعضای یک مجموعه، از روش خوشه‌ای بهره گرفته می‌شود. از جمله روش‌های محاسبه‌ی میزان همانندی در پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، استفاده از فاصله اقلیدسی می‌باشد که طبق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_{i,p} - x_{j,p})^2} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، n شماره افراد، $x_{i,p}$ مقدار متغیر p ام در روز i ام $x_{j,p}$ مقدار متغیر p ام در روز j ام. بعد از

اندازه‌گیری میزان همانندی با روش‌هایی همچون روش ادغام وارد (Ward)، پیوند بین داده‌ها انجام می‌گیرد و در آن، میزان پراش درون گروهی کمینه شده و همه‌ی گروه‌های حاصل، بیشینه می‌شوند (منتظری و فنایی، ۱۳۹۷).

در مرحله آخر، تحلیل همدیدی برای روزهای نماینده تحت حاکمیت موج گرمایی انجام گرفت. هدف از این واکاوی، شناسایی و تبیین سازوکارهای دینامیکی و الگوهای همدیدی حاکم (به‌مثابه اصلی‌ترین عوامل مؤثر در رخداد گرما) است که با بهره‌گیری از نقشه‌های تراز میانی و سطوح فشار، نقش سامانه‌های پرفشار و پشته‌های جوی در ایجاد پایداری‌های جوی غیرفصلی را آشکار می‌سازد.

بحث و نتایج

نتایج بررسی صدک ۹۵ میانگین دمای بیشینه سه ایستگاه منتخب استان اردبیل

بررسی صدک ۹۵ میانگین دمای بیشینه سه ایستگاه منتخب استان اردبیل طی دوره ۶ ماهه سرد سال (جدول ۲) نشان می‌دهد که بالاترین مقادیر این صدک در هر سه ایستگاه اردبیل (۲۵/۸)، پارس آباد (۲۷/۸) و مشگین شهر (۲۴) در ماه آوریل و پایین‌ترین مقدار آن در ماه ژانویه مشاهده می‌شود که مقادیر آن به ترتیب در اردبیل ۱۲ درجه سلسیوس، پارس آباد ۱۹ درجه سلسیوس و مشگین شهر ۱۱/۸ درجه سلسیوس می‌باشد.

جدول ۲. نتایج صدک ۹۵ام دوره سرد سال در منطقه مورد مطالعه (بر حسب سلسیوس) (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

ردیف	ماه ایستگاه	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل
۱	اردبیل	۱۹/۸	۱۵	۱۲	۱۴/۴	۲۰	۲۵/۸
۲	پارس آباد	۲۱/۶	۱۷/۴	۱۶/۶	۱۹	۲۲/۵	۲۷/۸
۳	مشگین شهر	۱۸/۲	۱۴/۸	۱۱/۸	۱۳/۵	۱۹/۶	۲۴

نتایج بررسی توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ۳ تا ۱۰ روزه در ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل

ایستگاه اردبیل در دوره ۶ ماهه سرد سال در مجموع ۳۹ موج گرمایی با تداوم ۳ تا ۷ روزه را تجربه کرده است. فراوانی ماهانه رخداد امواج گرمایی با تداوم دست کم ۳ روز در اردبیل (جدول ۳) نشان می‌دهد که در ماه دسامبر با ۱۱ موج بیشترین فراوانی ماهانه موج گرم و در ماه نوامبر با ۲ موج، کمترین فراوانی موج گرم تجربه شده است. براساس نتایج ارائه شده در جدول (۳)، طی دوره مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۲۰) در ایستگاه اردبیل موج گرمایی ۳ روزه با مجموع فراوانی ۲۳ موج بیشترین فراوانی را داشته است. این امواج گرمایی به

استثنای ماه نوامبر، در سایر ماه‌ها تجربه شده است. توزیع ماهانه این موج در دسامبر (۷ موج) و ژانویه (۶ موج)، فوریه (۴ موج) مارس و آوریل (هر کدام ۳ موج) می‌باشد. در این ایستگاه امواج گرمایی ۴ روزه ۶ مورد بوده که در ماه‌های فوریه (۳ موج)، ژانویه (۲ موج) و آوریل (۱ موج) رخ داده است. امواج گرمایی ۵ روزه در ایستگاه اردبیل ۵ مورد بوده که در ماه‌های دسامبر (۳ موج) و نوامبر و مارس (هر کدام ۱ موج) رخ داده است. امواج گرمایی ۶ و ۷ روزه کمترین فراوانی وقوع را داشته است. فراوانی امواج گرمایی با تداوم ۶ روز در این ایستگاه ۳ مورد بوده است که در ماه‌های نوامبر و دسامبر و آوریل هر کدام ۱ موج و فراوانی موج گرمایی ۷ روزه ۲ مورد بوده که در ماه مارس تجربه شده است.

جدول ۳. توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ایستگاه اردبیل (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

طول موج	فراوانی موج	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل
۳ روزه	۲۳	-	۷	۶	۴	۳	۳
۴ روزه	۶	-	-	۲	۳	-	۱
۵ روزه	۵	۱	۳	-	-	۱	-
۶ روزه	۳	۱	۱	-	-	-	۱
۷ روزه	۲	-	-	-	-	۲	-
مجموع	۳۹	۲	۱۱	۸	۷	۶	۵

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، ایستگاه پارس آباد در دوره ۶ ماهه سرد سال در مجموع ۲۰ موج گرمایی با تداوم ۳ یا ۴ روزه تجربه کرده است. طبق جدول مذکور، توزیع ماهانه موج گرم سه روزه در ماه نوامبر (۴ موج)، دسامبر (۳ موج)، فوریه، مارس و آوریل (هر کدام ۱ موج) می‌باشد. موج گرم ۴ روزه به استثنای

ماه فوریه، در سایر ماه‌های دوره شش ماهه تجربه شده است که توزیع آن در ماه آوریل (۴ موج)، نوامبر و ژانویه (هر کدام ۲ موج) و دسامبر و مارس (هر کدام ۱ موج) بوده است. در این ایستگاه طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۲۰)، امواج گرمایی ۵ تا ۷ روزه رخ نداده است.

جدول ۴. توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ایستگاه پارس آباد (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

طول موج	فراوانی موج	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل
۳ روزه	۱۰	۴	۳	-	۱	۱	۱
۴ روزه	۱۰	۲	۱	۲	-	۱	۴
۵ روزه	-	-	-	-	-	-	-
۶ روزه	-	-	-	-	-	-	-
۷ روزه	-	-	-	-	-	-	-
مجموع	۲۰	۶	۴	۲	۱	۲	۵

ایستگاه مشکین شهر در دوره ۶ ماهه سرد سال در مجموع ۲۶ موج گرمایی با تداوم ۳ تا ۱۰ روزه تجربه کرده است. بررسی توزیع فراوانی ماهانه ایستگاه مشکین شهر (جدول ۵) نشان داد که در این ایستگاه همانند دو ایستگاه دیگر طی دوره آماری مورد مطالعه، موج گرمایی ۳ روزه، بیشترین فراوانی را داشته است. توزیع ماهانه این موج گرمایی در ماه مارس ۵ موج در ماه‌های دسامبر، فوریه و آوریل هر کدام ۳ موج و نوامبر و ژانویه

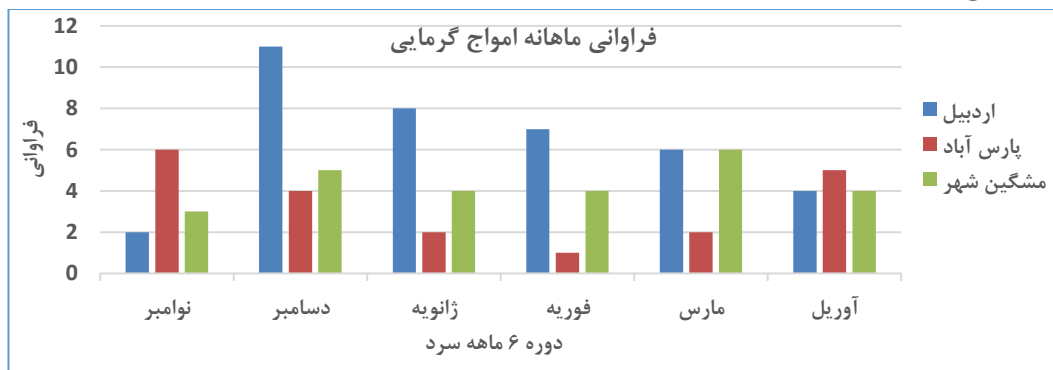
هر کدام ۲ موج بوده است. امواج گرمایی با تداوم ۴ روز تنها در دو ماه ژانویه (۲ موج) و فوریه (۱ موج) تجربه شده است. فراوانی موج گرمایی ۵ روزه ۱ مورد و در ماه دسامبر بوده است. موج گرم ۶ روزه ۳ مورد و در ماه‌های نوامبر، مارس و آوریل (هر کدام ۱ موج) رخ داده است. در این ایستگاه، طی دوره مورد مطالعه، موج گرمایی ۷ روزه تجربه نشده اما بر خلاف دو ایستگاه دیگر، یک موج ۱۰ روزه در ماه دسامبر اتفاق افتاده است.

جدول ۵. توزیع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ایستگاه مشکین شهر (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

طول موج	فراوانی موج	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل
۳ روزه	۱۸	۲	۳	۲	۳	۵	۳
۴ روزه	۳	-	-	۲	۱	-	-
۵ روزه	۱	-	۱	-	-	-	-
۶ روزه	۳	۱	-	-	-	۱	۱
۷ روزه	-	-	-	-	-	-	-
۱۰ روزه	۱	-	۱	-	-	-	-
مجموع	۲۶	۳	۵	۴	۴	۶	۴

در شکل (۲) نمودار مجموع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل ارائه شده است. طبق نمودار، در بین سه ایستگاه مورد مطالعه، بیشترین فراوانی موج گرمایی در ایستگاه اردبیل، تجربه شده

است. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که ایستگاه اردبیل در ماه دسامبر، پارس آباد در ماه نوامبر و مشگین شهر در ماه مارس بیشترین موج گرمایی را تجربه کرده‌اند.



شکل ۲. نمودار مجموع فراوانی ماهانه امواج گرمایی ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل طی دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

یافته‌های به دست آمده از تحلیل فراوانی امواج گرمایی دوره ۴۱ ساله نشان‌دهنده یک بی‌هنجاری در الگوهای همدیدی حاکم بر منطقه است. تغییرات مشاهده شده در فراوانی و تداوم امواج گرمایی، به‌ویژه با استقرار پرفشارهای جنوبی در فصول سرد، نشان‌دهنده تقویت و پایداری جریان‌های گرم جنوبی است. از منظر اقلیم‌شناسی پویا، این روندها را می‌توان با تغییر در پیکربندی سامانه‌های فشار و تغییر در مسیر جریان‌های جوی مرتبط دانست که در پی تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، الگوی گردش جوی را به سمت شرایط پایداری‌تر سوق داده است. وقوع امواج گرمایی با تداوم‌های بالا (مانند موج ۱۰ روزه در مشگین شهر) مؤید آن است که حاکمیت پرفشارهای دینامیکی جنوبی به الگویی کم‌وبیش پایدار تبدیل شده که می‌تواند در آینده نیز منجر به افزایش تکرار این پدیده‌های فرین شود.

شناسایی و خوشه‌بندی امواج گرمایی منطقه مورد مطالعه

با توجه به فراوانی بیشتر امواج گرمایی بیش از ۳ روز بر مبنای شاخص صدک ۹۵ام بیشینه دما در استان اردبیل

علاوه بر نقش ساز و کارهای همدیدی مقیاس بزرگ، عوامل محلی نیز در تشدید اثرات گرمایی نقش مؤثری ایفا می‌کنند. توپوگرافی پیچیده استان اردبیل، به‌ویژه نقش ارتفاعات سبلان و تالش در ایجاد جریان‌های پایین‌سو^{۱۱} و اثرات فون^{۱۲} یا گرمایش آدیاباتیک، موجب شده است که هوای گرم منتقل شده از عرض‌های جنوبی، در ترازهای پایین‌تر بیش از پیش تشدید شود. در واقع، هم‌افزایی^{۱۳} بین استقرار پرفشارهای دینامیکی در مقیاس همدیدی و ویژگی‌های محلی توپوگرافی، عامل اصلی در تفاوت معنادار فراوانی و تداوم امواج گرمایی در سه ایستگاه مورد مطالعه (اردبیل، پارس‌آباد و مشگین‌شهر) بوده است. این تعامل بین‌مقیاسی، تبیین‌کننده این واقعیت است که چرا ایستگاه‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی به الگوهای همدیدی یکسان نشان می‌دهند.

(۸۴ موج) مقرر گردید امواج گرمایی با ماندگاری دست کم ۵ روزه، مبنای گزینش موج‌ها جهت انجام

¹³. Synergy

¹¹. Subsidence

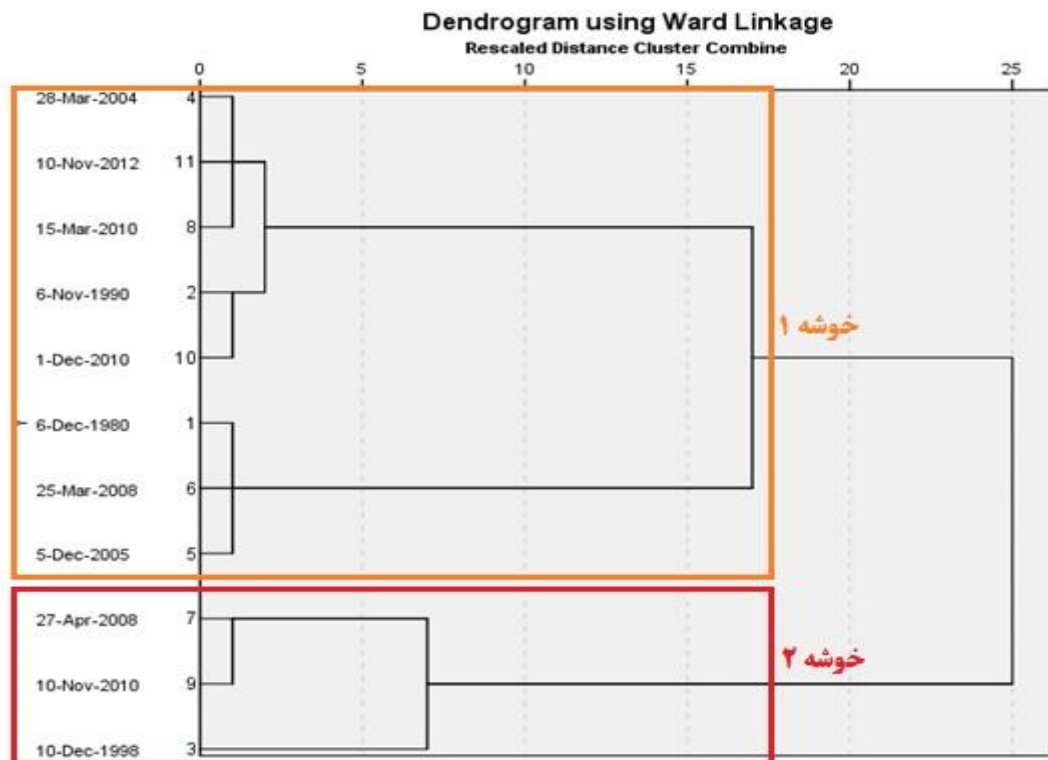
¹². Foehn

خوشه‌بندی قرار گیرد. بر این اساس، در مجموع ۱۵ موج گرمایی با تداوم ۵ روز و بالاتر در منطقه مورد مطالعه شناسایی گردید که ۸ موج دو ایستگاه اردبیل و مشگین شهر را همزمان تحت تاثیر قرار داده‌است. این امواج گرمایی در ۱۱ خوشه قرار گرفت (شکل ۳). مشخصات زمانی و مکانی این امواج در جدول (۶) ارائه شده است. طبق جدول مذکور، از ۱۵ موج گرمایی، ۱۰ موج در اردبیل و ۵ موج در مشگین شهر ثبت شده است. اما در ایستگاه پارس آباد هیچ موج گرمایی با تداوم ۵ روز و بالاتر رخ نداده است. به لحاظ ماهانه، دسامبر با ۶ موج بیشترین فراوانی موج گرمایی را داشته‌است. در مارس ۴ موج، در نوامبر ۳ موج، در آوریل ۲ موج گرم با تداوم دست کم ۵ روزه به وقوع پیوسته است. موج گرمایی ردیف ۱۴ (۱ تا ۱۰ دسامبر ۲۰۱۰) با تداوم ۱۰ روز و حاکمیت بر روی مشگین شهر به‌منزله طولانی‌ترین موج

گرم استان اردبیل در دوره گرم سال طی دوره آماری ۴۱ ساله شناسایی شد. همچنین شدیدترین موج گرمایی ثبت شده مربوط به ۲۳ تا ۲۸ آوریل ۲۰۰۸ در ایستگاه اردبیل رخ داده که طی حاکمیت این موج گرمایی دما در گرم‌ترین روز، ۳۲ درجه بوده است. خوشه‌بندی گرم‌ترین روزهای ۱۵ موج گرم دوره سرد سال در استان اردبیل طی دوره مورد مطالعه (که ۸ موج در دو ایستگاه هم‌پوشانی زمانی داشته) با استفاده از پارامترهای جوی فشار سطح دریا (SLP) و ارتفاع ژئوپتانسیلی (HGT) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و روش Ward و فاصله اقلیدسی به شناسایی ۳ زیرخوشه منتهی گردید که در دو خوشه اول و دوم قرار گرفتند (شکل ۳). در ادامه به تحلیل همدیدی الگوی دو روز شاخص در این دو گروه به‌عنوان نماینده گروه‌ها پرداخته می‌شود.

جدول ۶. شناسایی و خوشه‌بندی امواج گرمایی دوره سرد سال در ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

ردیف	تاریخ وقوع موج	طول موج	میانگین دمای موج (درجه سلسیوس)	تاریخ گرم‌ترین روز موج	دمای گرم‌ترین روز موج (درجه سلسیوس)	ایستگاه مطالعاتی متأثر
۱	۴ تا ۸ دسامبر ۱۹۸۰	۵ روز	۱۷/۲	۶ دسامبر ۱۹۸۰	۲۰	اردبیل
۲	۳ تا ۷ نوامبر ۱۹۹۰	۵ روز	۲۱/۵	۶ نوامبر ۱۹۹۰	۲۲/۶	اردبیل
۳	۷ تا ۱۱ دسامبر ۱۹۹۸	۵ روز	۱۹	۱۰ دسامبر ۱۹۹۸	۲۱/۲	اردبیل
۴	۷ تا ۱۱ دسامبر ۱۹۹۸	۵ روز	۱۸/۱	۱۰ دسامبر ۱۹۹۸	۲۰/۴	مشگین شهر
۵	۲۴ تا ۳۰ مارس ۲۰۰۴	۷ روز	۲۲/۳	۲۸ مارس ۲۰۰۴	۲۴/۶	اردبیل
۶	۲ تا ۶ دسامبر ۲۰۰۵	۵ روز	۱۶/۶	۵ دسامبر ۲۰۰۵	۱۸/۶	اردبیل
۷	۲۲ تا ۲۷ مارس ۲۰۰۸	۶ روز	۲۲/۹	۲۴ مارس ۲۰۰۸	۲۵	مشگین شهر
۸	۲۱ تا ۲۷ مارس ۲۰۰۸	۷ روز	۲۳/۸	۲۵ مارس ۲۰۰۸	۲۶/۲	اردبیل
۹	۲۳ تا ۲۸ آوریل ۲۰۰۸	۶ روز	۲۹/۷	۲۷ آوریل ۲۰۰۸	۳۲	اردبیل
۱۰	۲۳ تا ۲۸ آوریل ۲۰۰۸	۶ روز	۲۷/۵	۲۵ آوریل ۲۰۰۸	۲۹	مشگین شهر
۱۱	۱۲ تا ۱۶ مارس ۲۰۱۰	۵ روز	۲۴/۱	۱۵ مارس ۲۰۱۰	۲۷/۲	اردبیل
۱۲	۶ تا ۱۱ نوامبر ۲۰۱۰	۶ روز	۲۰/۴	۱۰ نوامبر ۲۰۱۰	۲۱/۲	اردبیل
۱۳	۱ تا ۶ دسامبر ۲۰۱۰	۶ روز	۱۹/۳	۱ دسامبر ۲۰۱۰	۲۱	اردبیل
۱۴	۱ تا ۱۰ دسامبر ۲۰۱۰	۱۰ روز	۱۷	۲ دسامبر ۲۰۱۰	۲۰/۴	مشگین شهر
۱۵	۶ تا ۱۱ نوامبر ۲۰۱۲	۶ روز	۱۹/۵	۱۰ نوامبر ۲۰۱۲	۲۱/۴	مشگین شهر



شکل ۳. نمودار درختی سلسله مراتبی وارد (Ward) روزهای توأم با موج گرمایی با تداوم دست کم ۵ روزه استان اردبیل

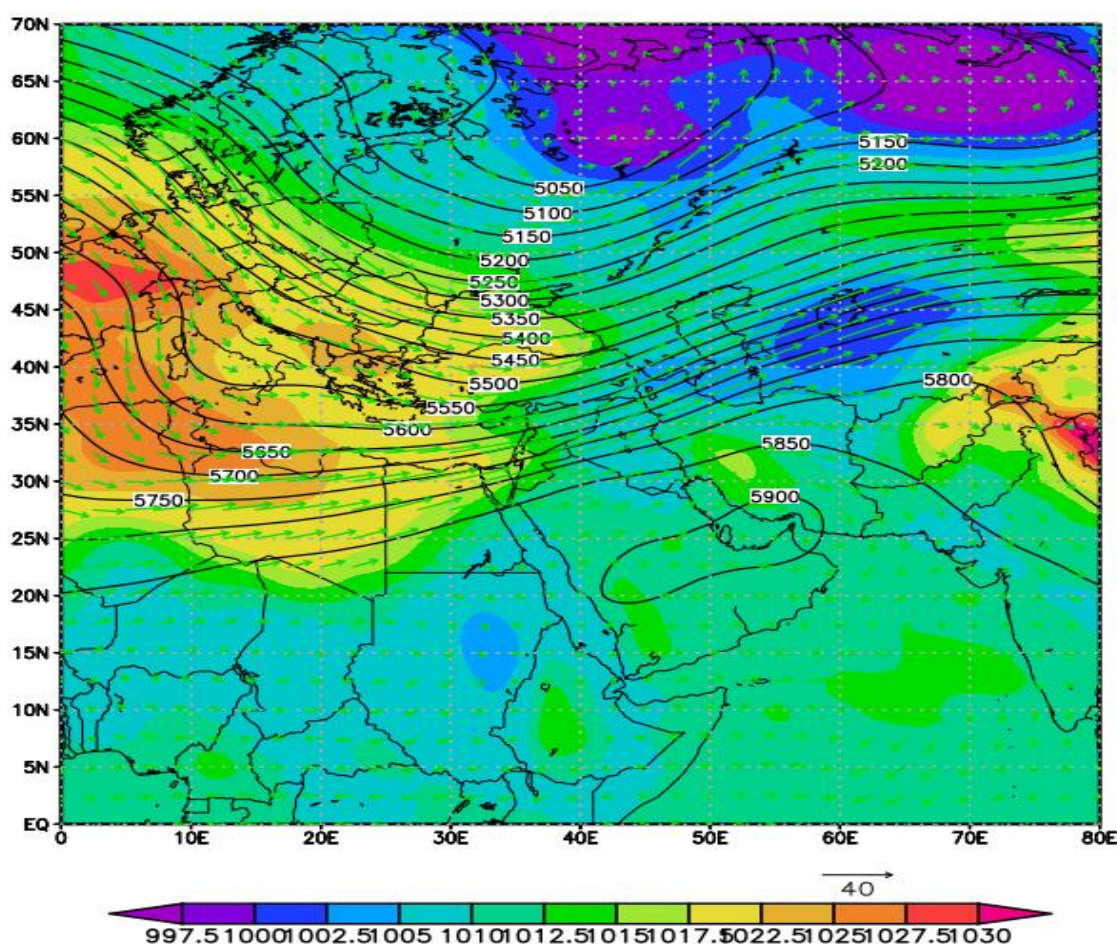
تحلیل همدیدی موج گرمایی نماینده گروه اول (۱۵ مارس ۲۰۱۰)

براساس نقشه‌ی همدیدی ارائه شده در شکل (۴)، استان اردبیل در روز ۱۵ مارس ۲۰۱۰، تحت سیطره‌ی زبانه‌ی پرفشار ۱۰۰۰ هکتوپاسکال قرار داشته است مرکز این سامانه بر روی شرق دریای سیاه و سوریه و عراق قرار داشته و از سمت غرب و جنوب غرب وارد این ایران شده و استان اردبیل را تحت تأثیر قرار داده است. این سامانه سبب ایجاد شرایط جوی گرم در منطقه شده و موجب گردیده تا در این روز دمای استان، بالاتر از میانگین‌های فصلی و نرمال باشد. هم زمان با ورود زبانه‌ی این سامانه پرفشار، در نواحی مرکز ایران، یک مرکز پرفشار دیگر تشکیل شده است. بعلاوه زبانه پرفشار سبیری نیز از سمت شرق و شمال شرق، ایران را تحت تأثیر قرار داده است. با

حاکمیت این پرفشارها شرایط برای ورود بادهای غربی و صعود و ناپایداری و تشکیل ابر و بارش وجود نداشته است، همچنین وجود پشته^{۱۴} ارتفاعی در تراز میانی جو، قرارگیری استان اردبیل در جلوی ناوه و تشکیل بندال بر روی خلیج فارس و بخش وسیعی از شبه جزیره عربستان، سبب انتقال جریان‌های گرم جنوبی عرض‌های پایین تر به سمت اردبیل و وجود هوای پایدار و گرم در این استان شده است. این الگوها همچنین موجب فرونشینی هوا، آسمان صاف و گرمایش هوای لایه‌های پایین تر در منطقه مورد مطالعه شده و شرایط وقوع موج گرمایی را در سطح زمین فراهم ساخته است. جهت باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نیز بیانگر ورود جریانات جنوبی-جنوب غربی و نفوذ هوای گرم بیابانی یا نیمه‌بیابانی از شمال عراق، سوریه یا عربستان و انتقال توده‌های گرم و خشک

به سمت شمال غرب ایران در این روز است. همچنین دمای سطح زمین در استان اردبیل بین ۵ تا ۱۰ درجه سلسیوس و امگا در لایه‌ی میانی جو منفی بوده که مؤید فرونشست هوا است (شکل ۵). ترکیب همه این عوامل منجر به وقوع یک موج گرمایی غیرمعمول در اواخر زمستان شده است. با توجه به قرارگیری اردبیل در دامنه‌های غربی کوه سبلان، افزایش دما ممکن است با

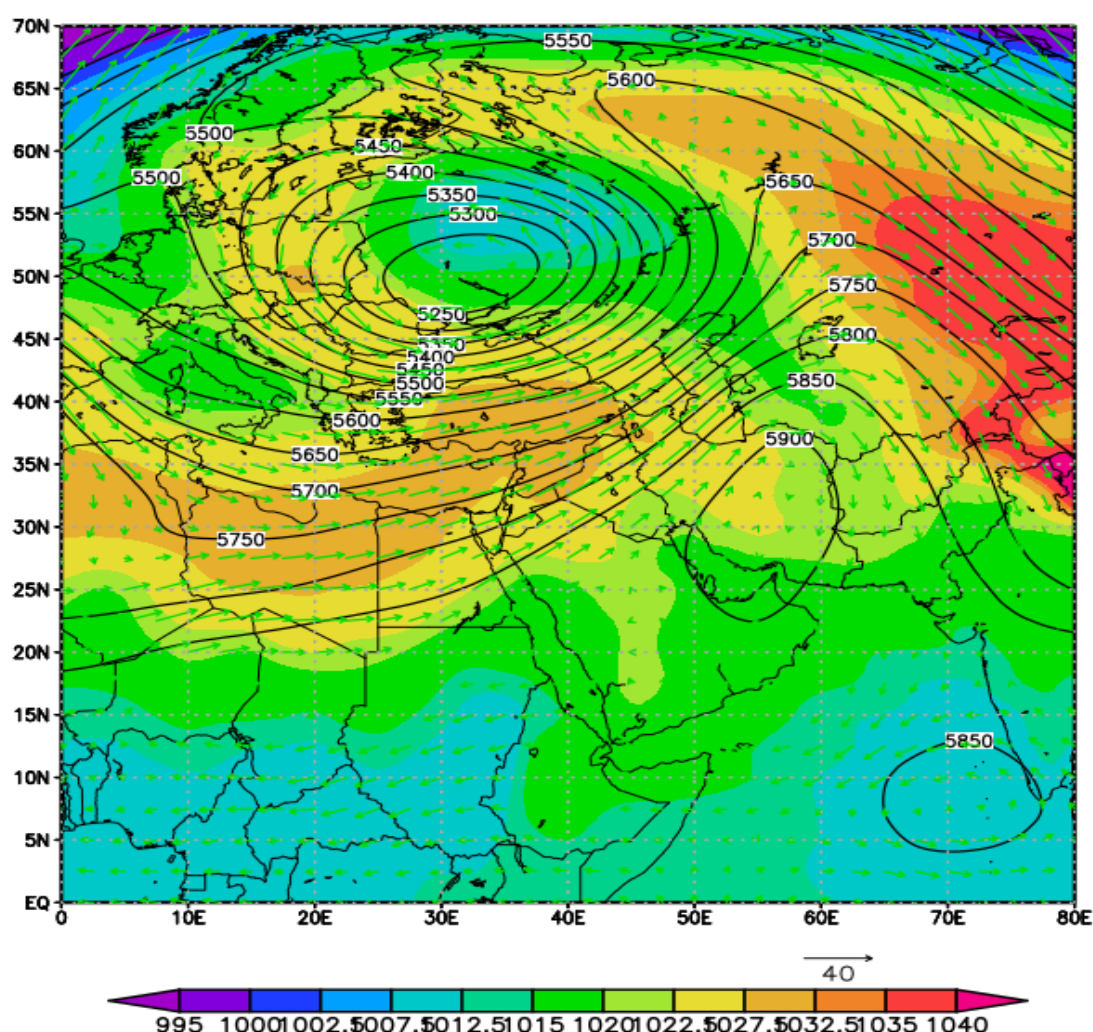
فشرده‌سازی بی‌دررو هوا در اثر فرونشینی از ارتفاعات هم تشدید شده باشد. استان اردبیل با توجه به موقعیت کوهستانی خود معمولاً در اواخر زمستان دارای هوای سرد است. ثبت موج گرمایی در میانه مارس، بیانگر پدیده‌ای غیرمعمول و نتیجه مستقیم شرایط همدیدی خاص (حاکمیت پشته قوی، جریانات جنوبی و فرونشینی گسترده) در منطقه می‌باشد.



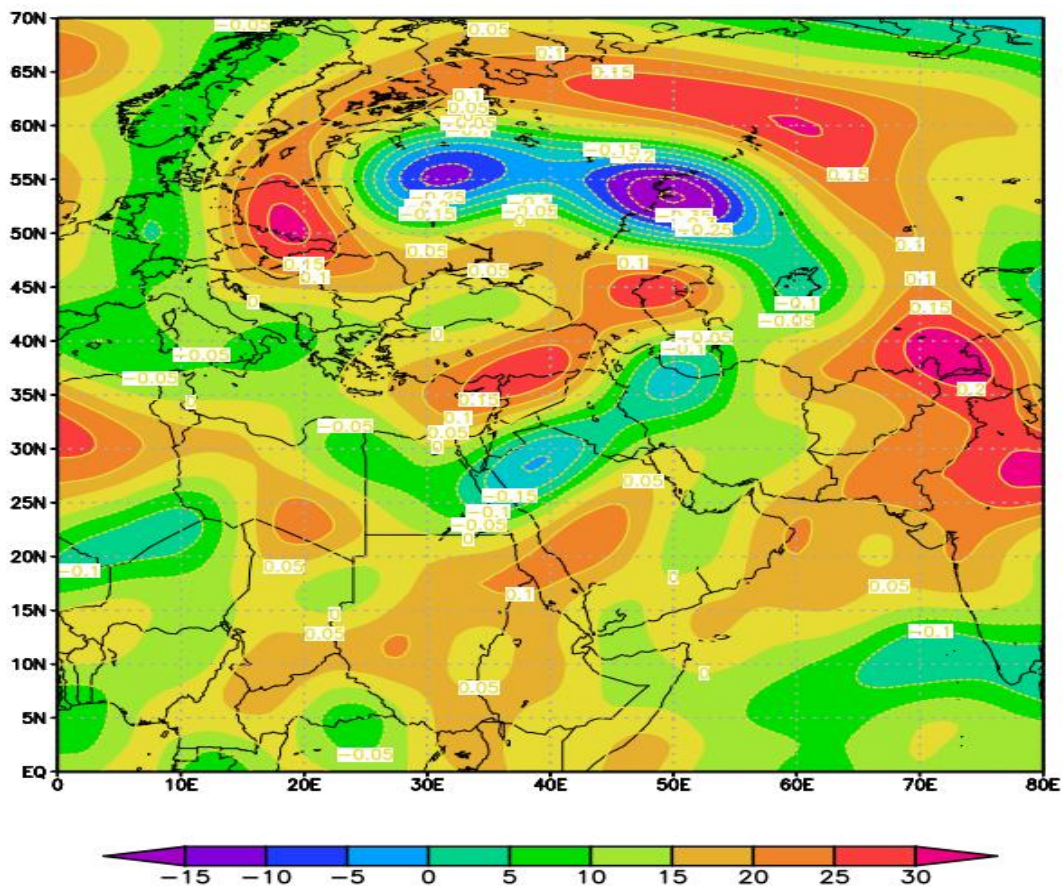
شکل ۴. نقشه همدیدی موج گرمایی نماینده گروه اول (۱۵ مارس ۲۰۱۰): رنگ‌ها معرف فشار سطح دریا؛ منحنی‌های مشکی معرف ارتفاع ژئوپتانسیلی، پیکان‌ها معرف باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (فلش‌ها نشانگر جهت باد و طول پیکان‌ها معرف سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه) هستند.

وسعی از ایران و عربستان در این روز است. طبق نقشه، قرارگیری استان اردبیل در جلوی ناوه، شرایط برای مکش هوای گرم و خشک عرض‌های جنوبی به منطقه را فراهم کرده است. با حاکمیت پر فشار در سطح زمین و پرفشار در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، جریان بادهای غربی که به طور معمول در فصول سرد از غرب به شرق در منطقه می‌وزند، در این روز تغییر مسیر داده و این امر

شرایط ورود هوای گرم از مناطق جنوبی را به منطقه اردبیل فراهم نموده است. براساس نقشه‌ای ارائه شده در (شکل ۷) دمای سطح زمین در این روز در استان اردبیل بین ۵ تا ۱۰ درجه سلسیوس بوده همچنین منفی بودن امگا نیز نشان دهنده‌ی نزول هوا و پایداری جو منطقه مورد مطالعه در این روز تأیید می‌نماید.



شکل ۶: نقشه همدیدی موج گرمایی نماینده گروه دوم (۱۰ دسامبر ۱۹۹۸): رنگ‌ها معرف فشار سطح دریا؛ منحنی‌های مشکی معرف ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، پیکان‌ها معرف باد تراز میانی (فلش‌ها نشانگر جهت باد و طول پیکان‌ها معرف سرعت باد برحسب متر بر ثانیه) هستند.



شکل ۷. نقشه‌های همدیدی موج گرمایی نماینده گروه دوم (۱۰ دسامبر ۱۹۹۸): رنگ‌ها معرف دمای سطح زمین؛ منحنی‌های زرد معرف امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال هستند.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف واکاوی الگوهای جوی مؤثر در موج‌های گرم دوره سرد سال در استان اردبیل طی سال‌های (۱۹۸۰-۲۰۲۰) انجام شد. طبق نتایج، بالاترین مقدار صدک ۹۵م در دوره ۶ ماهه مورد مطالعه، در هر سه ایستگاه منتخب، مربوط به ماه آوریل بوده است. همچنین براساس یافته‌های حاصل از خوشه‌بندی موج‌های گرم، ۳ خوشه در ۲ گروه شناسایی شد. فراوانی موج گرمایی طی دوره مورد مطالعه (۱۹۸۰-۲۰۲۰) در اردبیل، پارس آباد و مشگین شهر به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۲۶ مورد بوده است. لذا در ایستگاه اردبیل امواج گرمایی بیشتری نسبت به دو ایستگاه دیگر رخ داده است. افزایش مشاهده‌شده در فراوانی و تداوم امواج گرمایی شناسایی‌شده در این پژوهش را می‌توان در چارچوب

تغییر اقلیم جهانی تفسیر کرد. مدل‌های اقلیمی به طور مکرر هشدار داده‌اند که فراوانی و شدت رویدادهای حدی گرمایی در قرن ۲۱م افزایش خواهد یافت (میهل و تبالدی، ۲۰۰۴). از لحاظ تداوم نیز موج گرمایی در اردبیل ۳ تا ۷ روزه، در پارس آباد ۳ تا ۴ روزه و در مشگین شهر ۳ تا ۱۰ روزه بوده است. بنابراین ایستگاه مشگین شهر بیشترین و ایستگاه پارس آباد کمترین تداوم موج گرمایی را تجربه کرده‌اند. تداوم برخی از امواج گرم در فصل سرد (مانند موج ۱۰ روزه دسامبر ۲۰۱۰ در مشگین شهر) می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی شدیدی به همراه داشته باشد. این افزایش تداوم می‌تواند استرس گرمایی بر اکوسیستم‌های سازگار با سرما، اختلال در چرخه فنولوژی گیاهان و افزایش مصرف انرژی برای سرمایش (در صورت نیاز) را موجب شود. این موضوع

اهمیت مطالعه جداگانه امواج گرمایی غیرفصلی را بیش از پیش آشکار می‌سازد، چرا که معیارها و تأثیرات آن‌ها با امواج فصل گرم متفاوت است. همچنین نتایج این پژوهش مؤید آن است که امواج گرمایی در دوره سرد سال استان اردبیل، برخلاف تصور رایج، پدیده‌هایی کاملاً امکان‌پذیر هستند و عمدتاً تحت تأثیر دو الگوی همدیدی متمایز شکل می‌گیرند. سازوکار اول مبتنی بر نفوذ هوای گرم و خشک از سمت جنوب و جنوب غرب (عربستان و عراق) توسط پرفشارهای سطح زمین و سازوکار دوم ناشی از حاکمیت پرفشار و نزول گسترده هوا (سوبسیدنس^{۱۵}) و گرمایش بی‌دررو است. این یافته که پدیده‌های گرمایی زمستانه می‌توانند ناشی از پرفشار باشند، با نتایج مطالعاتی پژوهش هوشیار و همکاران (۱۳۹۸) بر روی شمال غرب ایران و برون و همکاران (۱۳۹۸) بر روی استان خوزستان که به ترتیب بر نقش پرارتفاع عربستان و پرفشار عربستان تأکید داشتند، هم‌سو است. این اشتراک نشان می‌دهد که دینامیک بزرگ‌مقیاس مشابهی می‌تواند در مناطق مختلف ایران منجر به رویدادهای گرمایی غیرفصلی شود. علت وقوع موج گرمایی در روزهای مذکور، استقرار هم‌زمان زبانه پرفشار در سطح زمین و پرارتفاع در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در روزهای مورد مطالعه بوده که سبب نزول، پایداری و گرمایش هوا شده و با چرخش ساعتگرد خود، موجب مکش هوای گرم از عرض‌های پایین به این منطقه شده است. یافته‌های پژوهش حاضر، همچنین نشان داد که الگوهای جوی مؤثر در بروز امواج گرم در دوره سرد سال در استان اردبیل از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است. بررسی داده‌های دمایی و نقشه‌های همدیدی حاکی از آن است که سیستم‌های فشار بالایی که وارد منطقه می‌شوند به دلیل شرایط خاص اقلیمی استان اردبیل، باعث افزایش دما در دوره‌های سرد سال

می‌گردند. به علاوه پدیده‌های جهانی همچون تغییرات اقلیمی و الگوهای عمومی جو، در تغییرات دمایی و افزایش فراوانی امواج گرمایی این منطقه مؤثر است. با تطبیق یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات سایر پژوهشگران چنین نتیجه‌گیری می‌شود که اکثر محققان همچون صلاحی و همکاران (۱۴۰۲)، حاکمیت پرفشار و پرارتفاع را در وقوع موج گرمایی مؤثر دانسته‌اند که پژوهش حاضر نیز به نتیجه مشابه دست یافته است. همچنین هم‌راستا با نتایج مطالعات پژوهشگرانی همچون حسین‌پور و همکاران (۱۴۰۲) پژوهش حاضر نیز تأیید می‌کند که در روش صدک، شناسایی موج‌های گرمایی در دوره سرد سال نمایان‌تر است. این پژوهش تأکید دارد که خوشه‌بندی امواج گرمایی و شناخت دقیق‌تر الگوهای جوی مؤثر بر امواج گرم می‌تواند به بهبود پیش‌بینی‌های جوی و مدیریت مخاطرات مرتبط با تغییرات دما کمک کند. بدین نحو که شناسایی الگوهای همدیدی خاصی که منجر به امواج گرمایی زمستانه می‌شوند، ابزار ارزشمندی را در اختیار کارشناسان پیش‌بینی هواشناسی و مدیران بحران قرار می‌دهد. توانایی پیش‌بینی چنین رویدادهایی می‌تواند به بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی (محافظت از محصولات در برابر یخ‌زدگی زودرس یا شکوفه دهی نابهنگام)، بهداشت عمومی (آماده‌سازی برای تأثیرات ناگهانی گرما بر گروه‌های آسیب‌پذیر) و مدیریت انرژی (پیش‌بینی بار شبکه برق) کمک کند. این یافته‌ها پشتوانه‌ای علمی برای توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام چندمتغیره و خاص منطقه اردبیل فراهم می‌آورد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که امواج گرمایی دوره سرد سال در استان اردبیل پدیده‌هایی با خواستگاه همدیدی پیچیده و مشخص هستند که عمدتاً تحت تأثیر سامانه‌های پرفشار و نفوذ توده‌های گرم از جنوب شکل می‌گیرند. این مطالعه با

15. subsidence

به کارگیری روش خوشه‌بندی، گامی در جهت عینی‌سازی و طبقه‌بندی این الگوها برداشته است. برای تکمیل این پژوهش، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی با هدف بررسی دقیق‌تر ارتباط بین تغییرات اقلیمی و رفتار سیستم‌های جوی در سطح محلی، به مطالعه نقش

منابع

- (۱) برون، ا.، ظهوریان پردل، م.، لشکری، ح.، شکبیا، ع. ر.، و محمدی، ز. (۱۳۹۸). تحلیل همدیدی نقش پرفشار عربستان در امواج گرم استان خوزستان، نشریه هواشناسی و علوم جو، ۲ (۱)، ۵۵-۶۷.
- (۲) حسین پور، ز.، شمسی پور، ع. ا.، کریمی، م.، و خوش اخلاق، ف. (۱۴۰۲). تحلیل آماری امواج گرمایی در دامنه های البرز، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۳ (۶۸)، ۸۱-۹۸. <https://sid.ir/paper/964378/fa>
- (۳) خسروی، م.، و اسمعیل نژاد، م. (۱۳۹۹). واکاوی آماری-همدیدی موج گرمایی کم تداوم ایران، فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی، ۱ (۲)، ۱۹-۳۳. [Doi:10.29252/gasma.1.2.19](https://doi.org/10.29252/gasma.1.2.19)
- (۴) رضایی، ف.، احمدی، م.، شکبیا، ع. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی آستانه دمایی موج گرمایی طی دوره گرم سال در ایران براساس سناریوهای RCP در بازه زمانی (۲۰۱۶-۲۰۴۵)، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۰ (۳۹)، ۲۳۱-۲۴۷.
- (۵) صلاحی، ب.، صابر، م.، و وطن پرست قلعه جوق، ف. (۱۴۰۲). الگویابی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی استان اردبیل. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۷ (۶۳)، ۱۷-۳۵.
- (۶) زینالی، ب.، و روحی، ف. (۱۴۰۲). برآورد احتمال وقوع امواج گرمایی با دوره تداوم مختلف در استان اردبیل به کمک زنجیره مارکوف. فصلنامه جغرافیایی سرزمین، ۲۰ (۷۷)، ۵۱-۶۷. doi.org/10.30495/sarzamin.2023.71948.2086
- (۷) معجد، م.، و راضیه، ف. (۱۳۹۷). شناسایی قلمروهای برفی ایران به روش تحلیل خوشه ای، مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۷ (۱۶)، ۲۴۱-۲۵۸.
- (۸) ملکی مرشت، ر.، و سبحانی، ب. (۱۴۰۲). بررسی موج‌های گرم شهر اردبیل و نقش آن در گرمایش شهری. فصلنامه جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، (۴۳)، ۱۶۹-۱۹۵. <https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.79213.1203>
- (۹) میر موسوی، س. ح.، و صبوری، ل. (۱۳۹۳). مطالعه روند تغییرات بارش برف در منطقه شمال غرب ایران، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۵ (۳)، ۱۱۹-۱۳۶.
- (۱۰) هوشیار، م.، سبحانی، ب.، و پروین، ن. (۱۳۹۸). تحلیل آماری سینوپتیکی امواج گرمایی زودرس در شمال غرب ایران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹ (۵۴)، ۲۰۳-۱۸۵.
- (۱۱) یزدانی، م. ح.، و سیدین، ا. (۱۳۹۵). بررسی آسیب پذیری شهر از منظر پدافند غیر عامل، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۵ (۱۰۰)، ۳۴-۱۷.
- 12) Conlon, K. C., Mallen, E., Gronlund, C.J., Berrocal, V. J., Larsen, L. & O'Neil, M. S. (2020) Mapping human vulnerability to extreme heat: a critical assessment of heat vulnerability indices created using principal components analysis. *Environ Health Perspect* 128:097001 <https://doi.org/10.1289/EHP4030>
- 13) Fischer, E. M., & Schär, C. (2010). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3(6), 398- 403. <https://doi.org/10.1038/ngeo866>
- 14) Founda, D., M. Santamouris, 2017. Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012), *SCIENTIfic Reports*, 1-16.
- 15) Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Gibson, P. B. (2017). Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Scientific Reports*, 7, 12256. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12520-2>
- 16) Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11(1), 3357. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>
- 17) Schwingshackl, C., Sillmann, J., Vicedo-Cabrera, A. M. et al (2021) Heat stress indicators in CMIP6: estimating future trends and exceedances of impact-relevant thresholds. *Earth's Future* 9.
- 18) Yin, H., Wang, X. L., & Yao, F. (2015). Detection of heat waves in China using daily maximum and minimum temperature *Theoretical and Applied Climatology*, 121(3), 641-652.
- 19) Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3rd ed.). Academic Press.

Analysis of atmospheric patterns effective in cold season heatwaves in Ardabil Province during 1980-2020

Roghayeh Maleki Meresht^{1*}, Mahnaz Saber²

¹ Postdoctoral Researcher of Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

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

*Corresponding Author Email: Roghayeh.maleki1395@gmail.com

Received: 25 Apr 2026, Accepted: 5 June 2026

ABSTRACT

This study aimed to investigate the synoptic patterns contributing to the formation of heat waves during the cold season in Ardabil Province over a 41-year period (1980–2020). Daily maximum temperature data from the synoptic stations of Ardabil, Parsabad, and Meshginshahr were collected. Heat waves were defined based on the 95th percentile threshold, as periods of at least three consecutive days with daily maximum temperatures exceeding the respective monthly threshold. To analyze the associated atmospheric conditions, sea level pressure and 500 hPa geopotential height data from the NCEP/NCAR reanalysis were employed, and dominant patterns were identified using Ward's hierarchical clustering method. The results indicated that the highest thermal thresholds (95th percentile) at all three stations occurred in April. During the study period, the total number of heat waves at Ardabil, Meshginshahr, and Parsabad stations was 39, 26, and 20, respectively. Ardabil experienced the highest frequency, whereas Meshginshahr recorded the longest duration of heat waves. Cluster analysis revealed two dominant synoptic patterns associated with persistent heat waves (≥ 5 days): Pattern I (example: 15 March 2010): The presence of a surface anticyclone combined with a mid-tropospheric ridge induced subsidence and adiabatic warming. Pattern II (example: 10 December 1998): The development of a broad surface anticyclone and the positioning of the region ahead of a deep trough at 500 hPa facilitated the advection of warm air from southern and southwestern latitudes into the province. In both patterns, the clockwise circulation of anticyclonic systems enhanced the transport of warm air masses from lower latitudes toward Ardabil.

Keywords: Synoptic Analysis, Clustering, Heat Wave.

HOW TO CITE THIS ARTICLE?

Maleki Meresht, R., & Saber, M. (2026). Analysis of atmospheric patterns effective in cold season heatwaves in Ardabil Province during 1980-2020. Journal of Meteorology and Atmospheric Science, 8(2), 49-65. <https://doi.org/10.22034/jmas.2026.579829.1269>

COPYRIGHTS

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

