

Variability of Cold Waves and the Role of Atmospheric Anomalies in Their Occurrence During the Last Half-Century: A Case Study of Isfahan City

Tahmine Chehreara Ziabari¹, Somayeh Hajivand Paydari^{2,*}

1- Assistant Professor of Social Sciences, Payam Noor University, Alborz, Iran. ORCID ID: [0000-0002-8571-9254](https://orcid.org/0000-0002-8571-9254)

2- Ph.D. Student of Climatology, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran. ORCID ID: [0009-0006-3537-5859](https://orcid.org/0009-0006-3537-5859)

* Corresponding Author: std_sayeh7climate@khu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Cold waves are among the most impactful extreme climatic phenomena, annually causing substantial socio-economic damage to various sectors including agriculture, energy, transportation, and public health. While global warming has led to an overall increase in temperatures, recent studies have paradoxically highlighted the continued occurrence of severe and damaging cold waves in mid-latitude regions, often linked to stratospheric-tropospheric interactions and large-scale atmospheric blocking patterns (Cohen et al., 2022; Kolstad et al., 2022; Zhang et al., 2022).

Despite numerous studies on temperature extremes in Iran, a comprehensive understanding of the mechanisms driving cold waves—particularly in semi-arid and dry climate regions of central Iran—remains limited. Most previous studies have either focused solely on frost events (local-scale radiative cooling) without distinguishing them from synoptic-scale cold waves, or have relied on descriptive trend analysis without statistical rigor (Fatahi & Salehipak, 2009; Mahmoudi et al., 2016; Aalijahan et al., 2019, 2022). Furthermore, the role of lower-tropospheric temperature advection in modulating cold wave intensity and persistence has rarely been examined alongside mid-tropospheric circulation patterns in the Iranian context.

Therefore, this study aims to: (1) analyze the long-term trend of minimum temperature and cold wave frequency in Isfahan city using robust non-parametric statistical tests (Mann-Kendall and Sen's slope), (2) identify and classify the dominant synoptic-dynamic circulation patterns responsible for severe and persistent cold waves through factor analysis and cluster analysis, (3) quantify the role of horizontal temperature advection at the 1000 hPa level in exacerbating cold spells, and (4) provide a physical interpretation of the tropospheric-stratospheric interactions driving these extreme events in the central plateau of Iran.

Materials and Methods

Study Area: Isfahan city (32°39'N, 51°41'E, elevation ~1590 m) is located in the central plateau of Iran, characterized by a semi-arid to arid climate with high diurnal temperature ranges, cold winters, and hot summers. Its strategic location as a major metropolitan area with significant agricultural and industrial activities makes it particularly vulnerable to cold wave hazards.

-Station data: Daily minimum temperature records from the Isfahan synoptic station spanning 51 years (1970–2021), provided by the Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO). The dataset contained 18,733 valid days out of 19,006 total days, with only 273 missing values (1.44%), which were handled using listwise deletion in percentile calculations—a standard approach in extreme climate indices following WMO guidelines.

-Reanalysis data: Geopotential height at 500 hPa and temperature advection at 1000 hPa were extracted from the NCEP/NCAR Reanalysis 1 dataset with a horizontal resolution of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ latitude-longitude. This dataset was selected for its extended temporal coverage (1948–present), homogeneity, and established use in numerous synoptic climatology studies across Iran and the Middle East.

-Cold wave definition and thresholds: Cold wave episodes were defined based on three percentile thresholds—1st, 5th, and 10th percentiles of the daily minimum temperature distribution—with a minimum persistence criterion of three consecutive days. The 1st percentile (-7.2°C) identified the most extreme and persistent events, while the 5th (-4.2°C) and 10th (-2.4°C) percentiles captured moderate cold spells.

-Trend analysis: The non-parametric Mann-Kendall test was applied to detect statistically significant trends in annual cold wave frequency for each percentile threshold. The Sen's slope estimator was used to quantify the magnitude of the observed trends. These methods are robust against outliers and do not assume a normal distribution of data (Krouma et al., 2026; Öztürk et al., 2026).

-Cold Wave Persistence–Intensity Index (CWPI): To move beyond simple duration criteria, a composite index (CWPI) was defined as: $CWPI = D \times |\Delta T|$, where D is the duration (days), and ΔT is the mean daily minimum temperature anomaly relative to the long-term daily mean. This index identified 130 extreme cold wave days for subsequent synoptic analysis.

-Synoptic classification: Factor analysis (principal component extraction) and hierarchical cluster analysis (Ward's method with squared Euclidean distance) were applied to the 500 hPa geopotential height anomalies of the selected 130 days. Data were standardized using min-max normalization prior to clustering. The optimal number of clusters was determined using dendrogram inspection and scree plot analysis, revealing four distinct circulation patterns.

-Temperature advection analysis: Horizontal temperature advection ($A = -\vec{V} \cdot \nabla T$) at the 1000 hPa level was computed for each of the four identified circulation patterns. Composite anomaly maps were generated to reveal the spatial distribution and intensity of cold-air advection.

Results and Discussion

Long-term temperature trends and cold wave frequency: The analysis revealed a mild but statistically significant increasing trend in annual minimum temperature over the 51 years, with the trend accelerating notably after the early 1990s. The frequency of sub-zero temperature days exhibited a unimodal distribution centered around -1.2°C , -2.0°C , and -2.8°C , while extreme frost events (below -10°C) were relatively rare. The annual cold wave frequency exhibited a decreasing trend across all three thresholds (Table 1), with the most pronounced reduction observed for the 10th percentile threshold. Seasonal analysis indicated that the highest frequency of cold waves occurred during January and February, consistent with the climatological winter peak.

Synoptic-dynamic circulation patterns: Factor analysis identified 17 atmospheric factors explaining approximately 89% of the total variance in the 500 hPa geopotential height field (Table 2, Figure 5). Subsequent cluster analysis reduced these into four dominant circulation patterns (Figure 6):

-Pattern 1 (CP1) – Cut-off Low Formation: A cut-off low with a core geopotential height of ~ 5580 gpm and negative anomalies exceeding -300 gpm was established over the eastern Caspian Sea (55° – 60°E). This feature resulted from Rossby wave breaking due to a dynamic ridge over northwestern Europe. Isfahan's location on the western flank of this trough led to intense cold advection (-8 to -10 units) at 1000 hPa, driven by northerly-northwesterly flows transporting sub-polar air directly into the region.

-Pattern 2 (CP2) – Polar Vortex Extension: A massive blocking high over Greenland with positive anomalies $> +250$ gpm forced the polar vortex core to shift southward into mid-latitudes. A deep, broad trough with core heights below 5400 gpm and negative anomalies approaching -300 gpm developed over eastern Europe and western Asia. Strong meridional (northerly) flows advected extremely cold, dry air from the Kara Sea and northern Russia directly into the region, with cold advection exceeding -12 to -14 units.

-Pattern 3 (CP3) – Omega Blocking: A quasi-stationary omega blocking system formed over the eastern Mediterranean (30° – 40°E), with a ridge core > 5800 gpm and positive anomalies $\sim +200$ gpm, splitting the westerly flow into northern and southern branches. Two cut-off lows developed on either side of this block, with the eastern cut-off centered over central Iran ($\sim 50^{\circ}\text{E}$) at ~ 5500 gpm with negative anomalies of -150 to -200 gpm. The quasi-stationary nature allowed continuous cold air entrainment into the cut-off circulation, resulting in the longest-lasting severe cold events.

-Pattern 4 (CP4) – Dipole (Rex) Blocking: A strong ridge over the northern Caspian Sea (positive anomalies $> +250$ gpm) and a deep trough over the Iranian plateau with amplitude exceeding 40° of latitude. The negative tilt (NE-SW orientation) of the trough axis represented the strongest meridional flow regime, allowing direct, unimpeded advection of polar air masses from beyond 60°N into central Iran. This pattern produced the most intense and widespread cold waves, with minimum temperatures reaching nearly -19°C .

Temperature advection analysis: Composite maps of 1000 hPa temperature advection (Figure 8) revealed consistent patterns of strong cold advection across all four circulation patterns. CP2 and CP4 exhibited the broadest and most intense cold advection (-12 to -14 units), aligning with the deepest troughs and most extensive polar vortex influence. CP3 showed two distinct cold advection cores over western and eastern Iran (-8 and -10 units, respectively), corresponding to the two cut-off lows generated by the omega block. CP1 displayed strong cold advection (-8 to -10 units) concentrated over western and central Iran.

The decreasing trend in cold wave frequency observed in Isfahan is consistent with recent international findings (Krouma et al., 2026; Öztürk et al., 2026) and reflects broader warming patterns across mid-latitude Eurasia. The four identified circulation patterns share similarities with synoptic classifications reported in previous Iranian studies but offer enhanced insight through the integration of temperature advection analysis. Notably, the greater dominance of mid-tropospheric cut-off lows (CP1) in Isfahan—compared to northwestern Iran, where Siberian high-pressure

systems are more prevalent—suggests regional differentiation in cold wave mechanisms. The role of temperature advection emerges as a critical discriminator between patterns: CP2 and CP4 are primarily advective (direct polar air transport), while CP1 and CP3 involve a stronger dynamic-radiative component (cut-off lows and blocking-induced subsidence).

Conclusions

This study provides a comprehensive assessment of cold wave variability and atmospheric mechanisms in Isfahan over the past half-century, with three major contributions:

1- Trend analysis: The Mann-Kendall test confirmed a statistically significant decreasing trend in cold wave frequency across all three percentile thresholds, reinforcing that even in a warming climate, the risk of extreme cold events persists and requires continued vigilance.

2- Synoptic classification: Four dominant circulation patterns were identified—cut-off lows, polar vortex extension, omega blocking, and dipole blocking—each associated with distinct thermodynamic-dynamic mechanisms and varying impacts on cold wave severity and duration.

3- Advection diagnostics: The integration of 1000 hPa temperature advection analysis revealed that cold advection intensity and spatial extent are strongly correlated with trough depth and blocking persistence, providing a valuable operational indicator for forecasting cold wave severity.

The findings underscore that understanding cold wave mechanisms requires a holistic approach combining long-term statistical analysis, mid-tropospheric circulation diagnostics, and lower-tropospheric thermodynamic variables. Future research should extend this methodology to other climatic zones in Iran and incorporate stratospheric indicators (e.g., sudden stratospheric warming events, polar vortex displacement) to fully capture the troposphere-stratosphere coupling that modulates extreme cold spells.

Keywords: Cold waves; Atmospheric circulation patterns; Temperature advection; Percentiles; Trend analysis; Isfahan city; Synoptic climatology; Polar vortex; Blocking systems; Cut-off lows.

تغییرپذیری امواج سرمایی و نقش ناهنجاری‌های جوی در رخداد آن طی نیم‌قرن اخیر مطالعه موردی:

شهر اصفهان

تهمینه چهره‌آرا ضیابری^۱، سمیه حاجی‌وند پایداری^{۲*}

۱- استادیار، گروه علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، البرز، ایران.

۲- دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول: std_sayeh7climate@khu.ac.ir

چکیده

امواج سرمایی از پدیده‌های فرین مهمی هستند که سالانه خسارت‌های جدی به جوامع انسانی وارد می‌سازند. این پژوهش با هدف بررسی روند تغییرات و سازوکار جوی امواج سرمایی شهر اصفهان انجام شد. بدین منظور، داده‌های کمینه‌ی دمای روزانه‌ی ایستگاه همدید اصفهان در دوره‌ی آماری ۵۱ ساله (۲۰۲۱-۱۹۷۰) به کار گرفته شد. آستانه‌های دمایی با استفاده از صدک‌های ۱، ۵ و ۱۰ استخراج و دوره‌های شدید و بادوام شناسایی گردید. سپس داده‌های ارتفاع ژئوتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و وزش دمایی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال از پایگاه NCEP/NCAR دریافت شد. با کاربرد تحلیل عاملی و خوشه‌ای، عوامل و الگوهای جوی مؤثر بر رخداد امواج سرما شناسایی شدند. نتایج نشان داد که دمای کمینه در اصفهان دارای روند افزایشی ملایمی است و به تبع آن، فراوانی رخداد امواج سرمایی در آستانه‌های انتخابی طی نیم‌قرن اخیر به طور محسوسی کاهش یافته است. یافته‌های همدیدی نشان داد ۱۷ عامل جوی، حدود ۸۹ درصد از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کنند که در قالب ۴ الگوی گردشی غالب شامل سردچال‌های بریده، گسترش جنوب‌سوی تاوهی قطبی، بندال امگابی و بندال دوقطبی قابل طبقه‌بندی هستند. همچنین، بررسی وزش دمایی تراز زیرین نشان داد که فرارفت شدید هوای سرد از عرض‌های شمالی، به‌ویژه در الگوهای دوم و چهارم، همراه با پایداری بندال‌ها، مهم‌ترین عامل در افت ناگهانی و ماندگاری هوای سرد در منطقه است.

کلمات کلیدی: امواج سرما، الگوی جوی، صدک‌ها، شهر اصفهان.

مقدمه

الگوهای گردش اتمسفری، شرایط آب‌وهوایی خاصی را برای مناطق تحت سیطره خود رقم می‌زنند؛ اما گاه این شرایط از حالت نرمال خارج شده و پدیده‌های فرین جوی را پدید می‌آورند که خسارت‌های سنگینی در بخش‌های کشاورزی، ترابری، عمران، انرژی و خدمات شهری به‌بار می‌آورند (Parvin & Ataei, 2013). در میان این پدیده‌ها، دو مفهوم یخبندان و موج سرما اگرچه از نظر عمومی مترادف پنداشته می‌شوند، اما از دیدگاه هواشناسی دارای تفاوت‌های بنیادین در مقیاس، سازوکار و پیامدها هستند.

یخبندان، پدیده‌ای محلی است که هنگامی رخ می‌دهد که دمای کمینه به زیر صفر درجه سانتی‌گراد برسد. این پدیده در یک طبقه‌بندی کلی به دو گروه تابشی و فرارفتی تقسیم می‌شود. یخبندان‌های تابشی، در فاصله زمانی غروب تا طلوع خورشید و طی شب‌های آرام و صاف، ناشی از تابش موج‌بلند شبانه از سطح زمین بوده و معمولاً با وارونگی دمایی همراهاند (Oke, 1987; Linacre & Geerts, 1997). در مقابل، یخبندان‌های فرارفتی هنگام عبور یک توده‌هوای خشک و بسیار سرد از منطقه رخ می‌دهند، با جو آمیخته و بادی همراه هستند و ممکن است حتی در ساعات روز نیز اتفاق بیافتند (Scholefield, 1994).

در سوی دیگر، موج سرما پدیده‌ای منطقه‌ای و پیوسته با گردش بزرگ‌مقیاس جو است که به واسطه افت شدید و ناگهانی دمای هوا طی یک دوره‌ی مشخص (معمولاً بیش از ۲ تا ۳ روز متوالی) تعریف می‌شود و تأثیرات مستقیمی بر سلامت عمومی، زیرساخت‌های انرژی و حمل‌ونقل دارد. برخلاف یخبندان که به‌شدت وابسته به شرایط تابشی و سطحی محلی است، درک موج سرما نیازمند بررسی برهم‌کنش وردسپهر و پوشش‌سپهر و همچنین پیوندهای دوردست اقلیمی (teleconnections) است، نه صرفاً شرایط محلی است. تاکنون مطالعات فراوانی در خصوص تعیین الگوهای پدیدآورنده‌ی رخداد‌های فرین دمایی در سطح جهان و ایران انجام گرفته است. در سطح جهانی، پژوهش‌های اولیه توسط اسکوبار و بیسشوف (Escobar & Bischoff, 1999)، پیزا و امبریزی (Pezza & Ambrizzi, 2000) و در سطح منطقه‌ای، پژوهش‌های اخیر توسط چهره‌آرا و ضیابری (Cheraghian & Ziaei, 2021) انجام شده است.

2005)، روستی کوچی و وارگاس (Rusticucci & Vargas, 1995) و وان دن باسلا و همکاران (Van den Besselaar et al., 2010) به الگوهای همدیدی پرداختند.

در حوزه موج سرما، پژوهش‌های اخیر با وجود گرمایش کلی جو، بر محتمل بودن وقوع امواج سرمای شدید و پرخسارت تأکید دارند. کوهن و همکاران (Cohen et al., 2022) با بررسی گردش و ردسپهری - پوشن سپهری تاوه قطبی در زمستان نیمکره شمالی نشان دادند که گسترش قائم امواج راسبی و شکستگی تاوه قطبی پوشن سپهر، مسیر اصلی نفوذ هوای سرد قطبی به عرض‌های میانی است. کلستاد و همکاران (Kolstad et al., 2022) نیز دریافتند که سرماهای شدید اوراسیا با تضعیف تاوه قطبی پوشن سپهری همراه است و بررسی صرف و ردسپهر برای تبیین این ناهنجاری‌ها کافی نیست. ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2022) اثر گرمایش ناگهانی پوشن سپهر (SSW) را در شکل‌گیری الگوی امگای معکوس (IOCP) و انتقال سرمای قطبی به شرق آسیا نشان دادند؛ یافته‌ای که توپتونوا و همکاران (Toptunova et al., 2025) برای رخداد ژانویه‌ی ۲۰۱۹ تأیید کردند. کروما و همکاران (Krouma et al., 2026) با بررسی هشت دهه داده در اروپای شمالی و آلپ نشان دادند فراوانی، طول دوره و شدت امواج سرما در اغلب مناطق روند کاهشی معنادار داشته و این کاهش با رژیم‌های گردشی نظیر نوسان اطلس شمالی (NAO) و بلوکینگ اسکاندیناوی مرتبط است؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های اوزتورک و همکاران (Öztürk et al., 2026) در کلان‌شهرهای ترکیه (کاهش فراوانی موج سرد در بیشتر ایستگاه‌ها بر پایه‌ی آزمون من - کندال) هم‌راستاست.

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی به تحلیل همدیدی این پدیده‌ها پرداخته‌اند. براتی (Barati, 1996) نشان داد که جابه‌جایی سامانه‌های فشار از عرض‌های بالا و خلاف جهت عقربه‌های ساعت، به یخبندان‌های شدید و فراگیر منجر می‌شود و استقرار محور فرود در ساحل شرقی مدیترانه، نشانه ورود موج یخبندان به ایران با تداوم حدود ۷ روزه است. فتاحی و صالحی‌پاک (Fatahi & Salehipak, 2009) با تحلیل عاملی و خوشه‌ای بر روی داده‌های فشار سطح زمین و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، سه تیپ پرفشار اروپای شمالی، سیبری و اروپای شرقی را به‌عنوان مؤثرترین الگوها در یخبندان‌های فراگیر ایران معرفی کردند. محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2016) نیز نقش یک سیستم بندالی امگایی شکل را در ریزش هوای سرد قطبی به سمت ایران برجسته دانستند.

در خصوص امواج سرما، لشکری (Lashkari, 2008) و لشکری و کیخسروی (Lashkari & Keykhosravi, 2010) الگوهای همدیدی امواج سرمای فراگیر ۲۰۰۳ و زمستان ۲۰۰۶-۲۰۰۷ را تحلیل کردند. کریمی و همکاران (Karimi et al., 2020) با استفاده از داده‌های ECMWF طی دهه ۲۰۰۴-۲۰۱۳، الگوهای موج سرمای ایران را در دو گروه فرارفتی و ترکیبی طبقه‌بندی نمودند. عالی‌جهان و همکاران (Aalijahan et al., 2019, 2022) با بازسازی مکانی - زمانی امواج سرمای شمال غرب ایران طی بیش از یک قرن نشان دادند که دماهای فرین منفی (کمتر از ۱۵- درجه) با الگوهای پرفشار سیبری و بلوکینگ اروپای شرقی مرتبط‌اند. رضایی و منظر (Rezaei & Manzar, 2024) در غرب ایران نشان دادند که برخلاف روند افزایشی موج گرما، فراوانی و شدت موج سرما از پایان سده بیستم روند کاهشی داشته و پرفشار سیبری مهم‌ترین الگوی موج‌های سرد شدید و ماندگار بوده است. قویدل و مطلبی‌زاد (Ghavidel & Motalebizad, 2024) پیوند فراوانی موج سرمای شمال غرب ایران را با نمایه‌های نوسان قطبی (AO) و نوسان اطلس شمالی (NAO) نشان دادند.

تازه‌ترین پژوهش در این زمینه، صالحی‌پاک، قویدل و فرج‌زاده (Salehi Pak et al., 2025) با بازسازی ۱۸۵ ساله (۱۸۳۶-۲۰۲۰) شدیدترین موج سرمای تاریخ ایران (ژانویه ۱۹۲۵) را شناسایی و نشان دادند که ترکیب پرفشار سیبری، پرفشار مهاجر غربی و یک الگوی بلوکینگ در اقیانوس اطلس شمالی، عامل اصلی این رخداد بی‌سابقه بوده است.

با وجود این تلاش‌ها، هنوز مطالعات محدودی در ایران به طور هم‌زمان به سه رکن اصلی پرداخته‌اند: (۱) سنجش معناداری آماری روند بلندمدت موج سرما با آزمون‌های ناپارامتری استاندارد (به‌جای توصیف بصری صرف)، (۲) تحلیل عمیق‌تر همدیدی با افزودن

نقشه‌های وزش دمایی برای تعیین منشأ و مسیر فرارفت هوای سرد (فراتر از تحلیل ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل)، و (۳) تبیین نقش برهم‌کنش ورودسپهر - پوشن‌سپهر (تاوه قطبی، گرمایش ناگهانی پوشن‌سپهر) در مقیاس یک ایستگاه کلان‌شهری در فلات مرکزی ایران.

از این‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر شهر اصفهان - به‌عنوان کلان‌شهری با اقلیم خشک و دامنه دمایی شبانه‌روزی بالا در فلات مرکزی ایران - و با به‌کارگیری هم‌زمان آزمون روند من - کندال و شیب سن، شاخص ترکیبی ماندگاری - شدت موج سرما، تحلیل وزش دمایی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و تحلیل عاملی و خوشه‌ای سنتی، سعی دارد تا این خلأ را پوشش داده و به درک عمیق‌تری از نقش گردش نابه‌نجار ورودسپهری - پوشن‌سپهری در رخداد یخبندان‌ها و امواج سرمای فراگیر در این منطقه دست یابد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تحلیل تغییرات و سازوکار جوی امواج سرمای اصفهان، از آمار دمایی کمینه ایستگاه سینوپتیک واقع در شهر اصفهان برای دوره سرد سال، طی دوره آماری ۵۱ ساله (۱۹۷۰-۲۰۲۱) استفاده شد. در ادامه به بررسی شرایط هواشناختی دوره‌ها پرداخته شد. بدین منظور از یک روش تحلیل هم‌دید ترکیبی استفاده شد. از منظر روش‌شناسی مطالعه حاضر از یک رویکرد هم‌دید «محیط به گردش» استفاده شده است، علی‌جانی (2002, Alijani). با توجه به دوره‌های یخبندان‌های فراگیر از روش تحلیل عاملی و تحلیل خوشه‌ای به روش وارد جهت پردازش و تحلیل وضعیت جوی حاکم استفاده نمود. برای مطالعه شرایط جو از داده‌های بازتحلیل‌شده مرکز ملی پیش‌بینی محیطی/ مرکز ملی پژوهش‌های جوی (NCEP/NCAR¹) با تفکیک افقی ۲/۵×۲/۵ درجه استفاده گردید. روش انجام کار بدین صورت بود که برای تحلیل تغییرات امواج سرمای شهر اصفهان با استفاده از صدک‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه‌های مختلف موج سرما با استمرار بیش از ۳ روز استخراج گردید. پس از آن به بررسی و توزیع سالانه و ماهانه آن پرداخته شد. برای شناسایی الگوهای هم‌دید مؤثر بر شدیدترین امواج سرما، روزهای واقع در صدک اول انتخاب شدند. سپس با اعمال تحلیل عاملی بر داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال این روزها، عوامل جوی مؤثر شناسایی و با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، الگوهای غالب منطقه استخراج گردید.

برای انجام تحلیل خوشه‌ای چون داده‌ها دارای یکاهای مختلفی بودند اقدام به استانداردسازی داده‌های گردید تا وزن همه متغیرها در تفکیک تیپ‌های هوا یکسان باشد. برای استانداردسازی از رابطه زیر استفاده شد.

$$STND_{ij} = \frac{Data_{ij} - Min_j}{Max_j - Min_j} \quad (1)$$

$STND_{ij}$ مقدار استاندارد شده متغیر زام در روز i ، $Data_{ij}$ مقدار متغیر زام در روز i ، Min_j مقدار کمینه متغیر زام و Max_j مقدار بیشینه متغیر زام است مسعودیان (2008, Masoudian). بسته به روشی که برای محاسبه درجه همانندی و چگونگی ادغام استفاده می‌کنیم، یک تحلیل خوشه‌ای را می‌توان به شیوه‌های مختلفی اجرا کرد. در این پژوهش از روش فاصله اقلیدسی استفاده شده است. ضریب فاصله اقلیدسی که آن را با e_{jk} نشان می‌دهند از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$e_{jk} = \left[\sum_{i=1}^2 (X_{ij} - X_{jk})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در این رابطه e_{ijk} ضریب فاصله اقلیدسی، X_{ij} مقدار صفت i ام بر روی فرد j ام و X_{jk} مقدار صفت i ام بر روی فرد k است فرشادفر (Farshadfar, 2010). پس از اندازه‌گیری درجه همانندی باید شیوه‌ای برای ادغام داده‌هایی که بالاترین همانندی را نشان داده‌اند به کار برد. در مطالعات آب‌وهواشناسی شیوه معمول روش ادغام وارد هست، زیرا در این صورت میزان پراش درون‌گروهی به حداقل و همگنی گروه‌های حاصل به حداکثر می‌رسد.

آزمون روند من - کندال: برای فراتر رفتن از توصیف نموداری روند (که در نسخه پیشین صرفاً بر پایه شیب رگرسیون خطی ساده بود)، روند فراوانی سالانه امواج سرما در هر یک از سه آستانه صدکی با آزمون ناپارامتری من - کندال (Mann-Kendall) و شدت روند با برآوردگر شیب سن (Sen's Slope Estimator) سنجیده می‌شود. این آزمون به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها و مقاومت در برابر داده پرت، در مطالعات اخیر روند امواج سرما و گرما به طور گسترده به کار رفته است (Krouma et al., 2026; Öztürk et al., 2026).

آماره Z آزمون من - کندال به شرح رابطه استاندارد زیر محاسبه می‌شود:

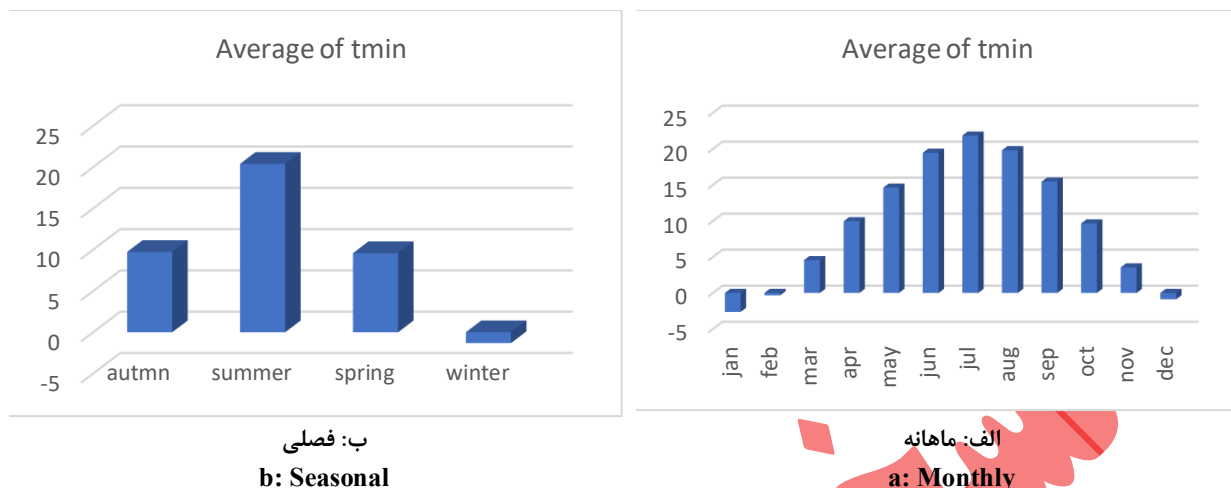
$S = \sum \sum sign(x_j - x_i) - Var(S)$ از رابطه استاندارد من - کندال با تصحیح گروه‌های مساوی محاسبه و $Z = S / \sqrt{Var(S)}$ به دست می‌آید.

شاخص ترکیبی ماندگاری - شدت موج سرما (CWPI): برای رتبه‌بندی رخداد‌های موج سرما فراتر از معیار ساده «تداوم بیش از ۳ روز»، شاخص ترکیبی ماندگاری - شدت (Cold Wave Persistence-Intensity Index) تعریف می‌شود که هم‌زمان طول دوره رخداد (D ، به روز) و میانگین آنومالی منفی دما نسبت به میانگین بلندمدت روزانه (ΔT) را در قالب رابطه $CWPI = D \times |\Delta T|$ ترکیب می‌کند. این شاخص امکان تفکیک موج‌های «طولانی و ملایم» از موج‌های «کوتاه و بسیار شدید» را که هر دو ممکن است در صدک یکم قرار گیرند، فراهم می‌آورد و مبنای انتخاب ۱۳۰ روز مرجع برای تحلیل عاملی و خوشه‌ای را از یک آستانه صرفاً دمایی به یک معیار ترکیبی ارتقا می‌دهد.

تحلیل وزش دمایی: برای هر یک از چهار الگوی خوشه‌بندی شده، نقشه وزش دمایی افقی (Horizontal Temperature Advection) در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نیز از رابطه استاندارد $A = -\vec{V} \cdot \nabla T$ محاسبه و هم‌پوشان با میدان باد همان تراز ترسیم می‌شود. این کار امکان تفکیک آماری - دینامیکی سردچال‌های ناشی از فرارفت مستقیم هوای قطبی از سردچال‌های ناشی از سرمایش تابشی موضعی زیر پشته‌های واچرخندی را فراهم می‌کند و تحلیل هم‌دید را از سطح توصیفی (صرفاً نقشه ارتفاع) به سطح تبیینی (سازوکار انتقال گرما/سرما) بهبود می‌دهد.

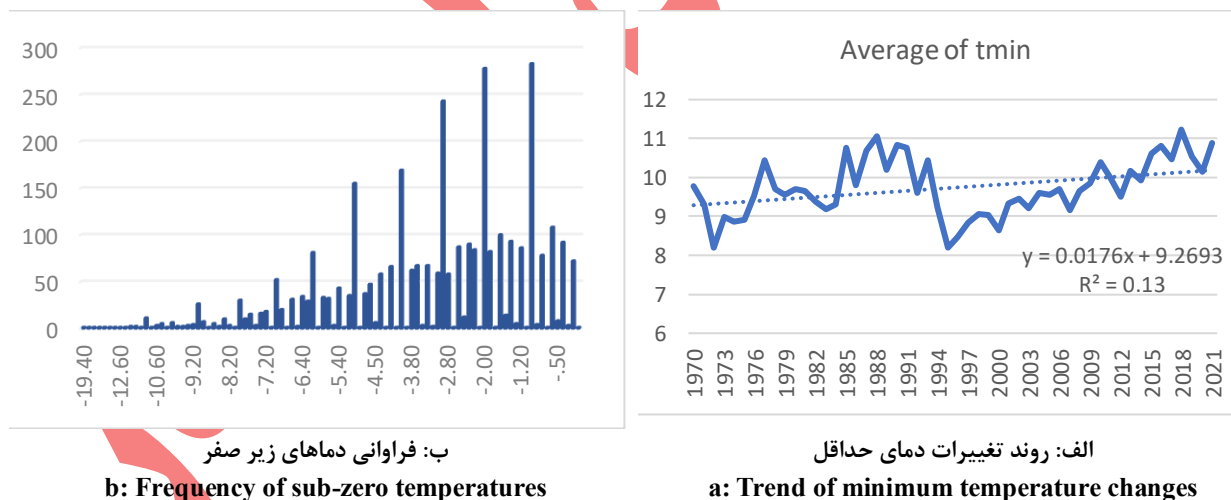
نتایج و بحث

توزیع فصلی و ماهانه‌ی دمای کمینه در ایستگاه اصفهان (شکل ۱) نشان می‌دهد که بیشینه‌ی فراوانی سرماهای فرین در ماه‌های دسامبر تا فوریه متمرکز است؛ با این تفاوت که در ماه ژانویه، میانگین کمینه دما به حدود ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رسد که در مقایسه با ایستگاه‌های هم‌عرض در اقلیم نیمه‌خشک ایران، نشان‌دهنده‌ی نقش تشدیدکننده‌ی موقعیت جغرافیایی و ارتفاع منطقه است. همچنین، تغییرات شدید دامنه‌ی دمایی بین فصول، بیانگر وابستگی شدید رژیم دمایی منطقه به تغییرات زاویه‌ی تابش و طول روز است که در تحلیل سازوکار امواج سرمای، باید به‌عنوان زمینه‌ی اقلیمی مدنظر قرار گیرد.



شکل ۱. تغییرات بلندمدت دمای حداقل در ایستگاه اصفهان
Fig 1. Long-term changes of minimum temperature at Isfahan station.

در (شکل ۲ الف) روند تغییرات حداقل دما در شهر اصفهان به نمایش درآمده است. نتایج نشان می‌دهد که از ابتدای دوره آماری تا سال ۱۹۹۱ دامنه تغییرات دما از نوسان کمی برخوردار بوده؛ ولی بعد از این سال ناگهان با کاهش شدید دما همراه بوده است. پس از این سال مشاهده می‌شود که روند افزایشی در دمای حداقل منطقه به وجود آمده و دارای شیبی مثبت است. در شکل ۲ ب مشاهده شد که تغییرات دمای زیر صفر درجه در منطقه دارای الگوی متفاوتی است. طوریکه بیشترین فراوانی‌ها در طی نیم‌قرن اخیر در دماهای $-1/2$ ، -2 و $-2/8$ به ثبت رسیده است. یخبندان‌های شدیدی که در منطقه بوده با دامنه‌ای نزدیک به $-1/5$ سانتی‌گراد تا کمتر از -19 رسیده است.



شکل ۲. تغییرات روند دمای حداقل و رخداد دمای زیر صفر در شهر اصفهان
Fig 2. Trends of minimum temperature and occurrence of sub-zero temperatures in Isfahan city

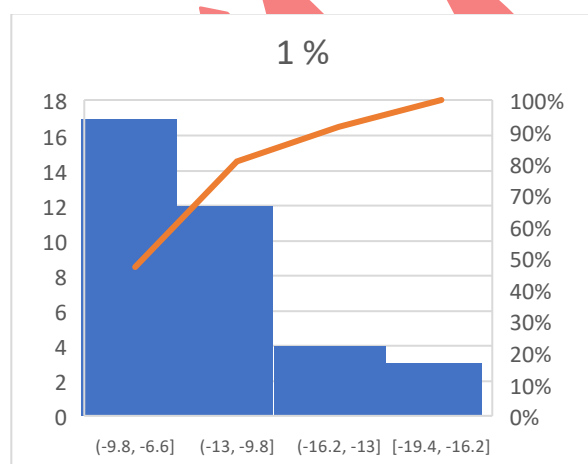
پس از بررسی‌های صورت پذیرفته بر روی وضعیت دمای حداقل ویژگی‌های آماری این کمیت در شهر اصفهان استخراج گردید. بررسی‌های نشان داد که در بازه یادشده ۲۷۳ روز داده مفقود وجود داشته و میانگین، میانه، انحراف معیار داده‌ها به ترتیب $9/7$ ، 10 ، $8/8$ هست. دامنه تغییرات دمای حداقل در منطقه در طی بازه ۵۰ ساله بیش از 48 درجه بوده است. نتایج حاصل از صدک‌ها نشان داد که آستانه‌ها برای صدک‌های ۱، ۵ و ۱۰ ام به ترتیب $-7/2$ ، $-4/2$ و $-2/4$ هست.

جدول ۱. آماره‌های مربوط به دماهای حداقل شهر اصفهان

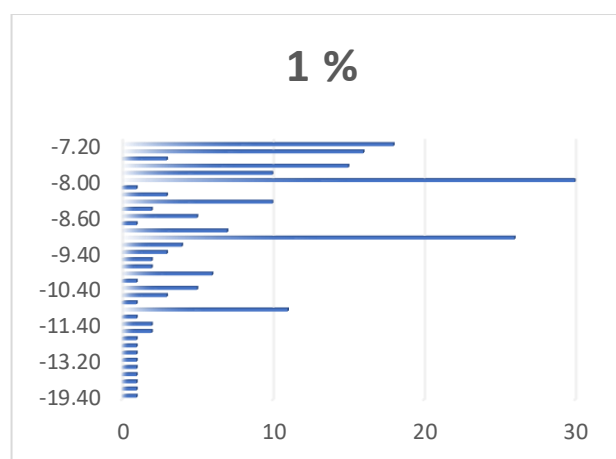
Table 1. Statistics of minimum temperatures in Isfahan city

N	Valid	18,733
	Missing	73
Mean		7352.9
Median		10.0000
Std. Deviation		8.87780
Variance		87.815
Range		48.20
Minimum		-19.40
Maximum		20.80
Percentiles	1	-7.2000
	5	-4.2000
	10	-2.4000

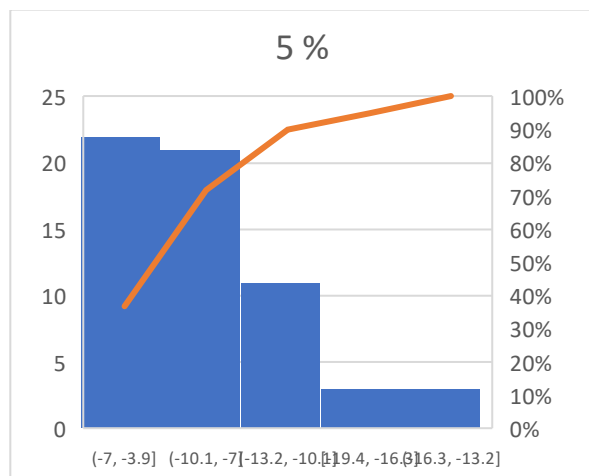
با توجه به شکل ۳ مشاهده شد که در آستانه ۱ صدم بیشترین تکرار مربوط به دمای ۸- درجه سانتی‌گراد است و پس از آن در آستانه ۹- بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در بازه‌های یادشده برای این شاخص نیز بیشترین مقدار بین بازه‌های ۶/۶- تا ۹/۸- بوده و کمترین آن در بازه ۱۶/۲- تا ۱۹/۴- به ثبت رسیده است. در آستانه ۵ صدم مشاهده شد که بیشترین مقدار فراوانی مربوط به دماهای ۵- درجه سانتی‌گراد است که بیش از ۱۵۰ بار تکرار شده است. پس از آن دمای ۶- درجه سانتی‌گراد با ۸۰ بار تکرار در رتبه دوم قرار دارد. در این شاخص بیشترین بازه تکرار شده بین ۳/۹- تا ۷- بوده که بیش از ۱۰ بار در ۵۰ سال اخیر تکرار شده‌اند. بیشترین مقدار تکرار شده در شاخص ۱۰ صدم دمای ۳/۵- درجه سانتی‌گراد بوده که بیش از ۲۴۰ بار در بازه زمانی یادشده تکرار شده است. از سایر دماها می‌توان به ۳/۵- و ۵/۵- اشاره نمود که به ترتیب بیش و نزدیک به ۱۵۰ بار تکرار شده‌اند.



ب: فراوانی در هر بازه
b: Frequency per interval

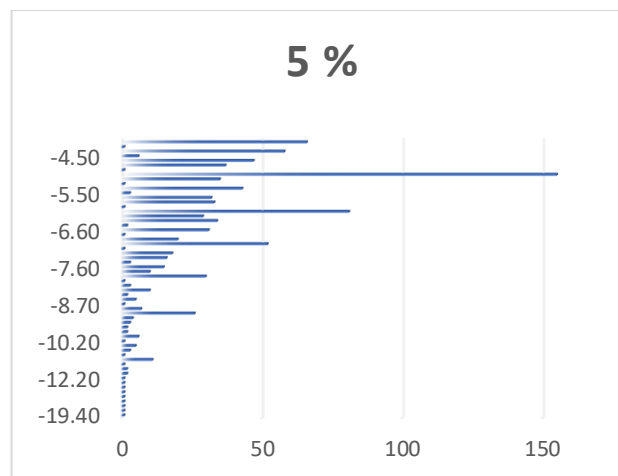


الف: فراوانی کل
a: Total frequency



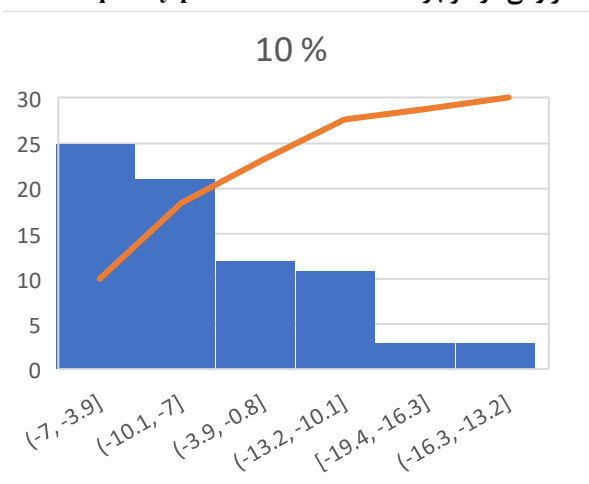
c: Frequency per interval

د: فراوانی در هر بازه



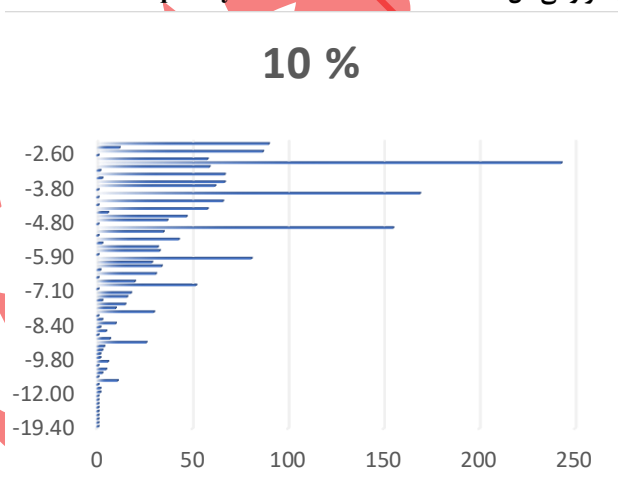
d: Total frequency

ج: فراوانی کل



e: Frequency per interval

و: فراوانی در هر بازه

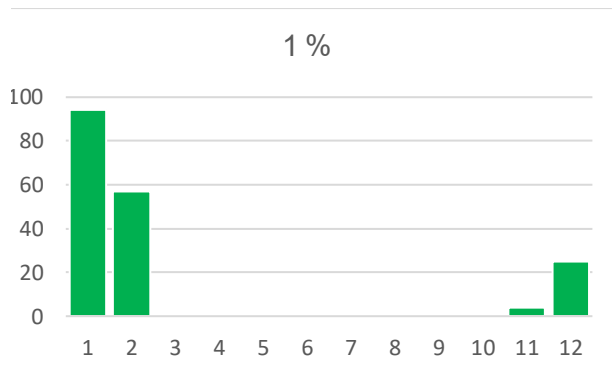


f: Total frequency

ه: فراوانی کل

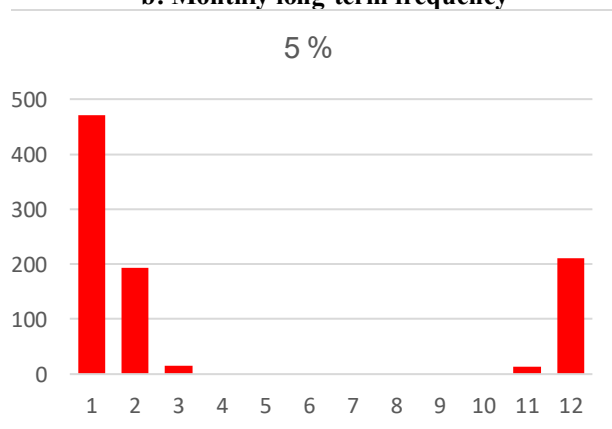
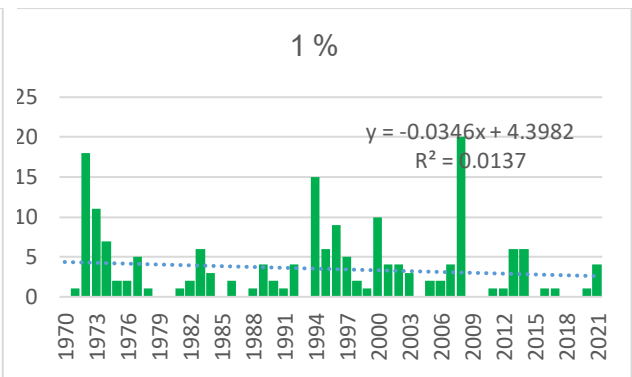
شکل ۳. ویژگی‌های آستانه‌های دمایی شهر اصفهان برای ۱، ۵ و ۱۰ صدم
Fig 3. Threshold temperature characteristics of Isfahan city for the 1st, 5th, and 10th percentiles

بررسی آستانه‌های تعیین شده در شکل ۴ نشان داد که صدک ۱ ام در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه رخ داده است که بیشترین مقدار آن در ماه ژانویه است. اما در صدک ۵ ام در ماه مارس نیز آستانه دمایی این شاخص مشاهده می‌گردد. این وضعیت در شاخص ۱۰ ام نیز مشهود است و ۵ ماه از سال شهر اصفهان یخبندان‌های سبک تا سنگین را تجربه می‌نماید. بررسی روند فراوانی هر یک از صدک‌ها نشان داد که با شیئی ملایم در حال کاهش بوده و در طی سال‌های اخیر از فراوانی وقوع آن‌ها کاسته شده است.



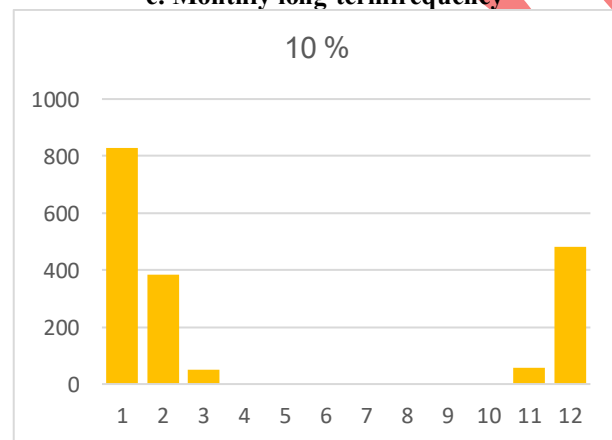
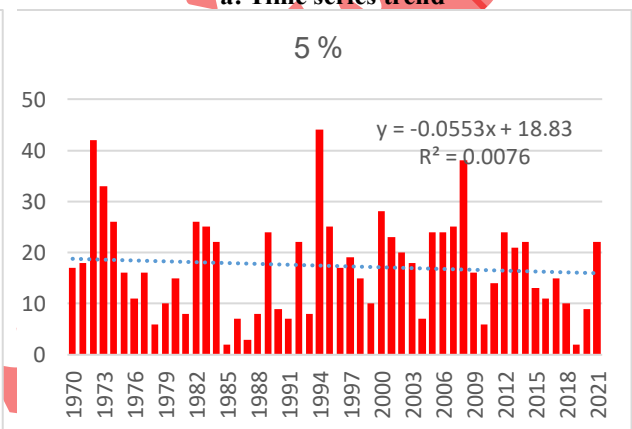
ب: فراوانی بلندمدت ماهانه

b: Monthly long-term frequency



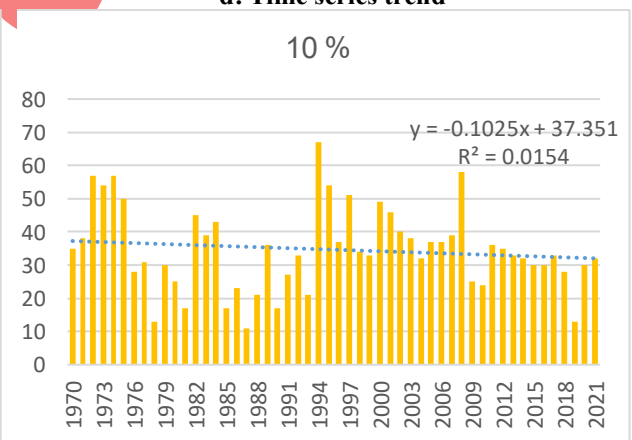
ب: فراوانی بلندمدت ماهانه

c: Monthly long-term frequency



ب: فراوانی بلندمدت ماهانه

e: Monthly long-term frequency



شکل ۴. فراوانی و روند آستانه‌های دمایی ۳ گانه برای شهر اصفهان

Fig 4. Frequency and trend of the three temperature thresholds for Isfahan city

بخش همدید: پس از بررسی‌های به عمل آمده سعی شد تا یخبندان‌های شدید و با استمرار بالا در شهر اصفهان جهت تحلیل گردش جو منطقه‌ای شناسایی گردد. در این بین در آستانه ۱ صدم دماهای با استمرار بیش از ۳ روز انتخاب شد. برای دوره یادشده ۱۳۰ روز استخراج گردید و پس از آن مقادیر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای شناسایی الگوهای همدید برای انجام تحلیل عاملی

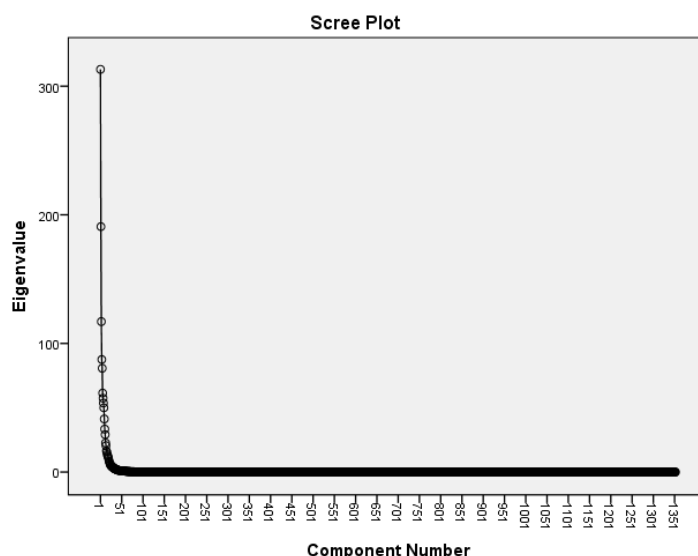
اخذ شد. در جدول ۲ برون داد تحلیل عاملی به نمایش درآمده است. نتایج نشان داد ۱۷ عامل در رخداد این نوع از یخبندانها در منطقه دخیل بوده اند (شکل ۵) که در مجموع نزدیک به ۸۹ درصد واریانس کل را تبیین می نمایند. در این میان عامل اول ۲۳ و عامل دوم ۱۴ درصد از واریانس کل را تبیین می نمایند. پس از استخراج عوامل یادشده، اقدام به استخراج الگوهای گردش جو منطقه ای شد. با استفاده از تحلیل خوشه ای الگوی کلی برای منطقه شناسایی گردید.

جدول ۲. برون داد تحلیل عاملی بر روی داده های شبکه بندی شده تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

Table 2. Output of factor analysis on gridded data at the 500 hPa level

Component	Initial Eigenvalues: Total	% of Variance	Cumulative %	Extraction Sums of Squared Loadings: Total	% of Variance	Cumulative %
1	313.079	23.140	23.140	313.079	23.140	23.140
2	190.815	14.103	37.243	190.815	14.103	37.243
3	116.965	8.645	45.888	116.965	8.645	45.888
4	87.508	6.468	52.355	87.508	6.468	52.355
5	80.693	5.964	58.319	80.693	5.964	58.319
6	61.397	4.538	62.857	61.397	4.538	62.857
7	57.409	4.243	67.100	57.409	4.243	67.100
8	53.645	3.965	71.065	53.645	3.965	71.065
9	49.965	3.692	74.757	49.965	3.692	74.757
10	41.264	3.050	77.807	41.264	3.050	77.807
11	33.394	2.468	80.275	33.394	2.468	80.275
12	29.114	2.152	82.427	29.114	2.152	82.427
13	22.614	1.671	84.099	22.614	1.671	84.099
14	20.475	1.513	85.612	20.475	1.513	85.612
15	16.489	1.219	86.831	16.489	1.219	86.831
16	15.467	1.143	87.974	15.467	1.143	87.974
17	13.654	1.009	88.983	13.654	1.009	88.983

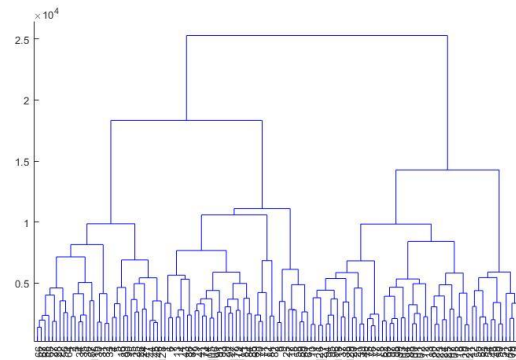
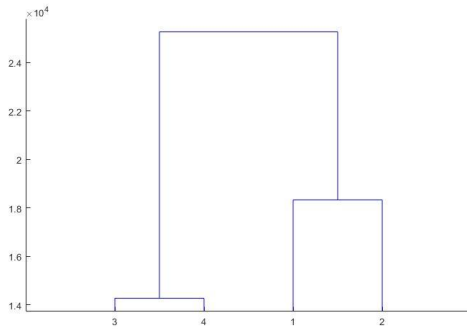
Extraction Method: Principal Component Analysis.



شکل ۵. نمودار سنگریزه عوامل مؤثر بر رخداد امواج سرمای شدید

Fig 5. Scree plot of factors affecting the occurrence of severe cold waves

در (شکل ۶) دار نمای کلی الگوهای گردشی به نمایش درآمده است. بررسی‌ها نشان داد که ۱۳۰ روز شناسایی شده در غالب ۴ الگو در رخداد امواج سرمای شدید اصفهان دخیل هستند که در ادامه سعی شد تا میانگین هر الگو استخراج شود و نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل ناهنجاری آن برای هر الگو به صورت مستقل محاسبه گردد.

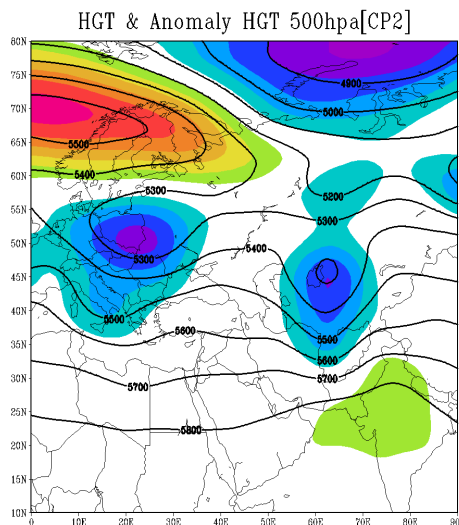


b. Dendrogram of the 4 circulation patterns
ب: دار نمای ۴ الگوی گردشی

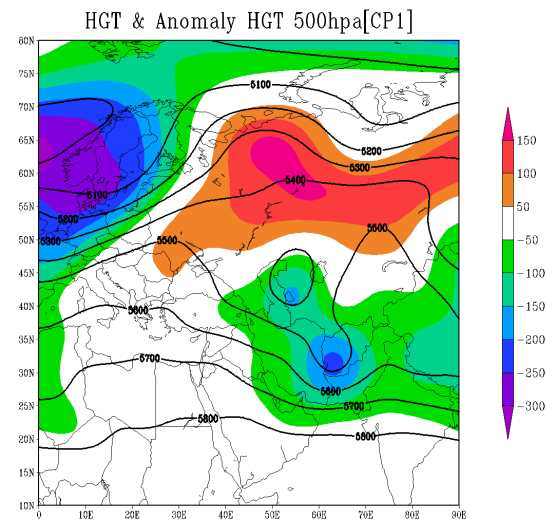
a. Overall dendrogram
الف: دار نمای کلی

شکل ۶. دار نمای مربوط به برون داد خوشه بندی انجام شده بر روی داده های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

Fig 6. Dendrogram of cluster analysis output on 500 hPa geopotential height data



b: Second pattern
ب: الگوی دوم

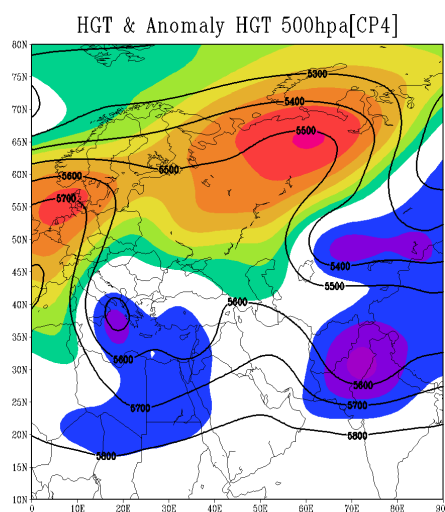


a: First pattern
الف: الگوی اول

الگوی اول CP ۱ - شکل ۷-الف: در این الگو، یک ناوهی بریده (Cut-off Low) با هسته‌ی بسته‌ی سرد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، با ارتفاع مرکزی حدود ۵۵۸۰ ژئوپتانسیل متر و ناهنجاری منفی فراتر از ۳۰۰ ژئوپتانسیل متر، بر روی جانب شرقی دریای خزر (محدوده‌ی ۵۵° تا ۶۰° شرقی) مستقر شده است. این سردچال نتیجه‌ی شکست موج راسبی (Rossby Wave Breaking) و جدایش از جریان غربی به دلیل وجود یک پشته‌ی دینامیک بر روی شمال غرب اروپا است. محور ناوهی وابسته به آن با امتداد شمال جنوبی بر

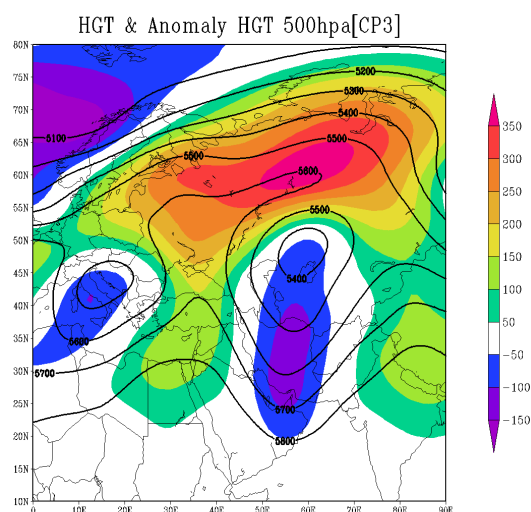
روی شرق فلات ایران (حدود 50° تا 60° شرقی) قرار گرفته و شیب شدید ارتفاعی در حدود 20 ژئوپتانسیل متر بر درجه‌ی عرض در شرق آن مشهود است که نشان‌دهنده‌ی منطقه‌ی باروکلینیک شدید و وجود رودباد جنب‌حاره‌ای است. موقعیت اصفهان ($51^{\circ}E$, $32^{\circ}N$) در سوی غربی محور ناوه قرار گرفته است. در این موقعیت، شار تاوایی مثبت (Positive Vorticity Advection) در پیشانی ناوه، واگرایی فوقانی شدیدی را در سطوح بالای وردسپهر ایجاد می‌کند. هرچند این واگرایی معمولاً با همگرایی سطحی همراه است، اما سازوکار غالب در افت شدید دمای سطحی، فرارفت سرد همرفت‌گونه (Advective Cooling) ناشی از جریان‌های شمالی - شمال غربی است که هوای سرد و خشک جنب قطبی را مستقیماً از پشت ناوه به درون منطقه می‌ریزد. هم‌زمانی بیشینه‌ی فرارفت سرد در تراز 1000 هکتوپاسکال (با شدت بیش از 8 تا 10 - واحد نرمال‌شده) با هسته‌ی سردچال تراز میانی، نشان از استقرار یک ستون هوای سرد و پایدار دینامیکی دارد که با کاهش شدید دمای کمینه (نزدیک به 12 - درجه در برخی روزها) همراه بوده است.

الگوی دوم CP۲ - شکل ۷-ب: الگوی دوم تجلی بارز گسترش جنوب‌سوی تاوه‌ی قطبی (Polar Vortex Extension) است. یک پرفشار بندالی عظیم با ناهنجاری مثبت بیش از 250 ژئوپتانسیل متر بر روی گرینلند و شمالگان، موجب جابه‌جایی شدید مرکز تاوه‌ی قطبی به سوی عرض‌های میانی (جنوبی‌تر از 55° شمالی) گردیده است. در نتیجه، یک ناوه‌ی بسیار عمیق و پهن دامنه با ارتفاع مرکزی کمتر از 5400 ژئوپتانسیل متر و ناهنجاری منفی نزدیک به 300 - ژئوپتانسیل متر بر روی شرق اروپا و غرب آسیا شکل گرفته است. محور این ناوه به‌صورت واچرخندی (با شیب غربی نسبت به سطوح زیرین) می‌باشد که نشان از رشد شدید موج باروکلینیک و وجود گرم‌فرارفت در سطوح زیرین دارد. در این الگو، منطقه‌ی مورد مطالعه در خروجی پشته‌ی دینامیکی مستقر بر روی دریای سیاه و در جلوی محور ناوه قرار گرفته است. این آرایش مکانی، سبب ایجاد جریانات نصف‌النهاری قوی (شمالی) می‌شود که هوای بسیار سرد و خشک با منشأ دریای کارا و شمال روسیه را به‌سرعت به عرض‌های پایین‌تر (جنوبی‌تر از 35° شمالی) هدایت می‌کند. با وجود فرونشست دینامیک (نزول دینامیکی) در خروجی پشته (که معمولاً سبب گرمایش بی‌دررو می‌شود)، شدت فرارفت سرد در ترازهای پایین به‌حدی است که بر این گرمایش فائق آمده و سبب کاهش شدید دمای ترازهای زیرین می‌شود. این فرایند با شیب فشار شدید (ناشی از تراکم ایزوهیپس‌ها) همراه بوده و شرایط را برای انتقال بی‌دررو و انباشت هوای سرد در منطقه‌ی کم‌ترافای فلات ایران فراهم می‌آورد.



d: Fourth pattern

د: الگوی چهارم



c: Third pattern

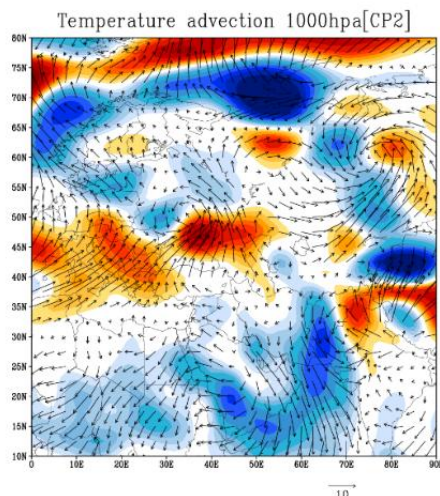
ج: الگوی سوم

شکل ۷. مقادیر ارتفاع ژئوپتانسیل و ناهنجاری آن برای الگوهای ۴ گانه امواج سرمای

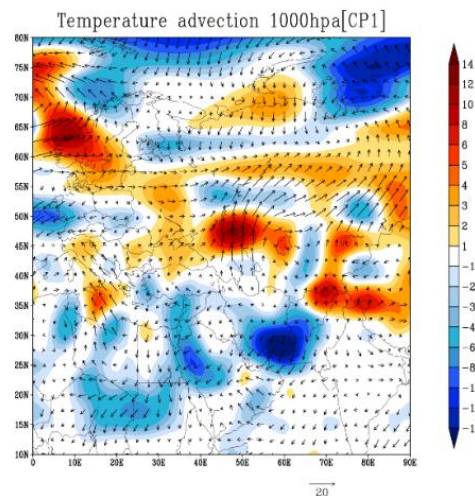
Fig 7. Geopotential height values and their anomalies for the four cold wave patterns.

الگوی سوم CP ۳ - شکل ۷-ج: الگوی سوم بر اساس یک سیستم بندالی آمگایی شکل (Omega Blocking) بر روی شرق مدیترانه (محدوده‌ی ۳۰° تا ۴۰° شرقی) تعریف می‌شود. هسته‌ی پرفشار این بندال با ارتفاع بیش از ۵۸۰۰ ژئوپتانسیل‌متر و ناهنجاری مثبت حدود ۲۰۰+ ژئوپتانسیل‌متر، جریان غربی را به دو شاخه‌ی شمالی و جنوبی منشعب کرده است. در دو سوی این بندال، دو سردچال بریده (Cut-off Lows) تشکیل شده‌اند که سردچال شرقی بر روی مرکز ایران (حول ۵۰° شرقی) با ارتفاع مرکزی ~ ۵۵۰۰ ژئوپتانسیل‌متر و ناهنجاری منفی ۱۵۰- تا ۲۰۰- ژئوپتانسیل‌متر مستقر شده است. آنچه این الگو را از دو الگوی قبلی متمایز می‌کند، پایداری و ماندگاری (Quasi-Stationary) آن است. در غیاب جریان هدایت‌کننده (Steering Flow)، این سردچال شرقی به مدت چندین روز در منطقه تثبیت می‌شود. مکانیسم سرمایش در این الگو، خوردگی مداوم هوای سرد (Cold Air Entrainment) به درون گردش چرخندی سردچال است. جریان‌های شمالی بر روی شاخه‌ی شرقی بندال، به‌صورت پیوسته هوای سرد قطبی را به درون هسته سردچال تزریق می‌کنند. همچنین، همرفت دینامیکی ناشی از واگرایی تاوایی مثبت در مرکز سردچال، ضمن تداوم ناپایداری، موجب افزایش ضخامت ستون هوای سرد (افت شدید ضخامت ۱۰۰۰-۵۰۰ هکتوپاسکال) و تشدید سرما در ترازهای زیرین می‌شود. ماهیت ایستای این الگو، سبب تجمع قابل‌توجه هوای سرد و ثبت پایدارترین و طولانی‌ترین دوره‌های سرمای شدید در اصفهان گردیده است.

الگوی چهارم CP ۴ - شکل ۷-د: الگوی چهارم، یک بندال دوقطبی (Dipole یا Rex Block) بر روی غرب آسیا را نمایش می‌دهد که شامل یک پشته‌ی پرفشار قوی بر روی شمال دریای خزر (ناهنجاری مثبت فرائر از ۲۵۰+ ژئوپتانسیل‌متر) و یک ناوه‌ی عمیق بر روی فلات ایران است. در این الگو، دامنه‌ی موج در تراز میانی به‌شدت رشد کرده و ناوه‌ی مذکور بیش از ۴۰ درجه‌ی عرض جغرافیایی (از ۷۰° شمالی تا ۳۰° شمالی) امتداد یافته است که نشان از یک اختلال باروکلینیک با دامنه‌ی بسیار زیاد و انتقال انرژی فوق‌العاده از سطوح زیرین به بالاست است. عمق ناوه به‌حدی است که ارتفاع ژئوپتانسیل در هسته‌ی آن به کمتر از ۵۴۰۰ ژئوپتانسیل‌متر رسیده و ناهنجاری منفی آن به ۲۰۰- تا ۲۵۰- ژئوپتانسیل‌متر می‌رسد. محور این ناوه دارای تیلت منفی (Negative Tilt) (امتداد شمال شرقی - جنوب غربی) است که بیانگر شدیدترین نوع شارش نصف‌النهاری و انتقال بی‌دررویی هوای سرد از مدارهای جنب قطبی به درون منطقه است. بسته‌های هوای سرد و خشک با منشأ فرائر از ۶۰° شمالی، در یک حرکت تقریباً مستقیم جنوب‌سو، بدون برخورد با موانع گرمایی عمده، وارد جو مرکزی ایران می‌شوند. همنهشتی این ناوه‌ی عظیم با هسته‌ی سرد در ترازهای زیرین، ضمن ایجاد یک ستون هوای سرد یکپارچه (همگن در عمق حدود ۵۰۰۰ متری)، شرایط را برای ثبت شدیدترین و فراگیرترین امواج سرمایی در منطقه فراهم می‌سازد، به‌گونه‌ای که دماهای کمینه در اصفهان در این الگو به پایین‌ترین مقدار خود در کل دوره‌ی آماری (نزدیک به ۱۹- درجه) می‌رسد.



ب: الگوی دوم
b: Second pattern

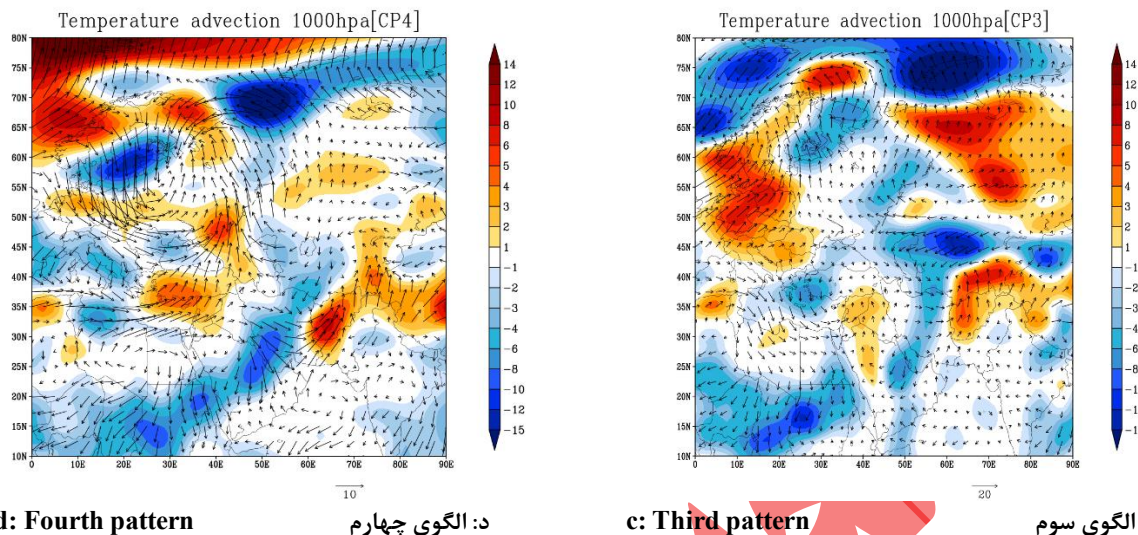


الف: الگوی اول
a: First pattern

الگوهای وزش دمایی: برای درک بهتر سازوکار دینامیکی و ترمودینامیکی انتقال هوای سرد به منطقه‌ی مورد مطالعه، الگوی وزش دمایی (Temperature Advection) در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای هر یک از چهار الگوی گردشی استخراج گردید (شکل‌های ۸). وزش دمایی به عنوان معیاری از انتقال افقی هوای گرم یا سرد، نقش کلیدی در تشدید یا تضعیف سرمایش سطحی ایفا می‌کند. در تمامی الگوها، هسته‌های قوی وزش سرد (منفی) بر روی فلات ایران و به ویژه منطقه‌ی اصفهان قابل شناسایی است که نشان‌دهنده‌ی هجوم هوای با منشأ قطبی یا شمالگان به سمت عرض‌های پایین‌تر است.

الگوی اول (CP1): وزش سردی با شدت حدود ۸- تا ۱۰- درجه سانتی‌گراد بر ثانیه (مقادیر نرمال شده) از سمت شمال شرق تا شمال غرب وارد فلات ایران می‌شود. این الگو با استقرار یک ناوه‌ی عمیق بر روی شرق ایران در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همخوانی کامل دارد و نشان می‌دهد که جریان‌های شمالی - شمال غربی، هوای سرد انباشته شده در پشت ناوه را به طور مستقیم به سمت اصفهان هدایت می‌کنند. بیشینه‌ی شدت وزش سرد بر روی نیمه‌ی غربی و مرکزی ایران متمرکز است که دلیل افت شدید دمای حداقل در این منطقه می‌باشد.

الگوی دوم (CP2): در این الگو، وزش سرد وسیع‌تری با پوشش شمال شرق تا جنوب غرب ایران دیده می‌شود و هسته‌هایی با شدت بیش از ۱۲- تا ۱۴- درجه سانتی‌گراد بر ثانیه بر روی نیمه‌ی شرقی کشور و همچنین بخش‌هایی از عراق و ترکیه شکل گرفته است. این وضعیت حاصل گسترش جنوب‌سوی تاوه‌ی قطبی و نفوذ هوای بسیار سرد و خشک جنب قطبی به عرض‌های میانی است. هم‌زمانی حداکثر وزش سرد با محور ناوه‌ی تراز میانی، نشان‌دهنده‌ی انتقال قائم مؤثر سرما و ایجاد همرفت دینامیکی در ناحیه‌ی سردچال است.



شکل ۸. مقادیر وزش دمایی و ناهنجاری آن برای الگوهای ۴ گانه امواج سرمای
Fig 8. Temperature advection values and their anomalies for the four cold wave patterns.

تحلیل وزش دمایی در تراز نزدیک سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال: الگوی سوم (CP3): الگوی وزش سرد در این حالت به صورت دو هسته‌ی مجزا بر روی غرب و شرق ایران نمایان می‌شود که شدت آن به ترتیب به ۸- و ۱۰- درجه سانتی‌گراد بر ثانیه می‌رسد. شکل‌گیری این هسته‌ها در ارتباط با سامانه‌ی بندانگلی بر روی شرق مدیترانه است که با ایجاد دو سردچال شرقی و غربی، جریان‌های سرد را از دو مسیر متفاوت به درون فرورفتگی‌های موجود بر روی ایران می‌کشاند. ماندگاری بندانگلی سبب تداوم وزش سرد و انباشت هوای بسیار سرد در منطقه شده که با افت دمای بیش از ۱۵- درجه سانتی‌گراد در برخی روزها همراه بوده است.

الگوی چهارم (CP4): در این الگو، یک زبانه پیوسته و قوی از وزش سرد با شدت حدود ۱۲- تا ۱۴- درجه سانتی‌گراد بر ثانیه، سراسر غرب، مرکز و شرق ایران را دربرگرفته است. این الگوی یکپارچه، نشان‌دهنده‌ی فرارفت شدید هوای قطبی در جلو و شرق یک پشته‌ی دینامیکی قدرتمند است که بر روی غرب آسیا شکل گرفته (بندانگلی دوقطبی). ناوهای عمیق حاصل در شرق فلات ایران، ضمن ایجاد جریان‌های شمالی - شمال شرقی پایدار، شرایط را برای انتقال بی‌دررویی هوای سرد به ترازهای زیرین و تشدید ناهنجاری منفی دما فراهم نموده است.

به طور کلی، تحلیل هم‌زمان میدان‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با وزش دمایی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که در همه‌ی الگوها، شدیدترین امواج سرمای اصفهان با فرارفت سرد در ترازهای پایین همراه است که از تعامل بین ساختار ناوهای عمیق، گسترش تاوهای قطبی و سیستم‌های بندانگلی ناشی می‌شود. این یافته، نقش تعیین‌کننده‌ی دینامیک افقی و قائم جو را در وقوع سرماهای فرین تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

روند بلندمدت دما و فراوانی امواج سرما: یافته‌های این پژوهش نشان داد که کمینه دمای شهر اصفهان طی دوره آماری ۱۹۷۰-۲۰۲۱ با شیبی ملایم و پیوسته افزایشی همراه بوده و فراوانی امواج سرما در هر سه آستانه‌ی صدکی (۱، ۵ و ۱۰ ام) روند کاهشی داشته است. این افزایش دمای حداقل از حدود سه دهه گذشته آغاز شده و به طور متوسط نوید زمستان‌های نسبتاً گرم‌تر و کاهش روزهای خنک در فصل‌های سرد را می‌دهد. بررسی توزیع دماهای زیر صفر نیز نشان داد که بیشترین فراوانی مربوط به دمای بین صفر تا ۵- درجه سانتی‌گراد است و دماهای فرین‌تر (سردتر) در طی ۵۰ سال اخیر از فراوانی کمتری برخوردار بوده‌اند. همچنین مشخص شد که دامنه تغییرات دمای حداقل در اصفهان بسیار بالاست که به اقلیم خشک منطقه و اختلاف دمای شبانه‌روزی قابل توجه بازمی‌گردد؛ این دامنه در فصل گرم تشدید می‌شود. از نظر فصلی، بیشترین رخداد دماهای فرین در آستانه‌های صدکی منتخب (۱،

۵ و ۱۰ ام) مربوط به فصل زمستان و به‌ویژه ماه‌های ژانویه و فوریه است و اغلب امواج سرمایی ماندگار در این ماه‌ها متمرکز می‌باشند. محدوده دمایی آستانه‌های مذکور به ترتیب بین ۶/۵- تا ۹/۸- و ۳/۹- تا ۷- درجه سانتی‌گراد قرار دارد.

این الگوی کاهشی با نتایج کروما و همکاران (Krouma et al., 2026) در اروپای شمالی و آلپ - که کاهش معنادار فراوانی، طول دوره و شدت موج سرما را طی هشت دهه گزارش کردند. یافته‌های اوزتورک و همکاران (Öztürk et al., 2026) در کلان‌شهرهای ترکیه که کاهش فراوانی موج سرد را در اغلب ایستگاه‌ها بر پایه‌ی آزمون من - کندال تأیید کردند، نیز با یافته‌های تحقیق همسویی دارد. این همگرایی بین‌المللی نشان می‌دهد که کاهش فراوانی امواج سرمای اصفهان بخشی از یک الگوی گسترده‌تر گرمایش زمستانه در عرض‌های میانی نیمکره شمالی است؛ و صرفاً یک نوسان محلی نیست؛ هرچند تأیید قطعی این ادعا برای اصفهان مستلزم اجرای واقعی آزمون من - کندال و شیب سن بر روی سری زمانی این ایستگاه است که در بند روش‌شناسی به آن اشاره شد.

با این حال، همان‌طور که رضایی و منظر (Rezaei & Manzar, 2024) در غرب ایران و صالحی‌پاک و همکاران (Salehi Pak et al., 2025) در تحلیل شدیدترین موج سرمای تاریخ ایران نشان دادند، روند کاهشی میانگین به معنای حذف ریسک رخدادهای حدی نیست؛ حتی در اقلیم گرم‌شونده، ترکیب هم‌زمان پرفشار سبیری با یک سامانه بلوکی در اطلس شمالی یا اروپای شرقی می‌تواند به رخدادی نادر اما مخرب منجر شود.

الگوهای همدیدی و دینامیکی حاکم بر امواج سرمای اصفهان: به‌منظور درک عمیق‌تر سازوکار جوی، ۱۷ عامل جوی در رخداد امواج سرمایی بسیار شدید و ماندگار در منطقه شناسایی شد که در نهایت به چهار الگوی غالب تقلیل یافت:

الگوی اول: سردچال‌های وردسپهری میانی: این الگو حاصل به‌جاماندگی از امواج عمیق غربی است که با به‌دام‌افتادن بین دو پشته‌ی دینامیکی، دمای هوا را در منطقه به‌شدت کاهش می‌دهد. عمق ناوه در شرق ایران در این الگو احتمالاً بازتاب سطحی یک اختلال پوشش‌سپهری بزرگ‌مقیاس است، نه صرفاً یک رخداد وردسپهری مستقل.

الگوی دوم: گسترش جنوب‌سوی تاوه قطبی: این الگو با فرارفت سرد و حاکمیت جریان شمالی، هوای سرد و خشک قطبی را برای منطقه به‌همراه داشته و افت ناگهانی دما در ابعاد وسیع را سبب شده است. این یافته باید در چارچوب پژوهش‌های کوهن و همکاران (Cohen et al., 2022) و کلستاد و همکاران (Kolstad et al., 2022) تفسیر شود: تضعیف‌شدن یا کشیدگی تاوه قطبی پوشش‌سپهری - که خود می‌تواند پیامد یک رخداد گرمایش ناگهانی پوشش‌سپهر (SSW) باشد - موجب جابه‌جایی جنوب‌سوی هوای بسیار سرد قطبی به عرض‌های میانی می‌شود. ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2022) و توپتونوا و همکاران (Toptunova et al., 2025) این سازوکار را برای شرق آسیا مستند کرده‌اند و نتایج پژوهش حاضر شباهت قابل‌توجهی با آن پدیده‌شناسی نشان می‌دهد.

الگوی سوم و چهارم: بندال‌های امگایی و دوقطبی: رخداد بندال‌ها از مهم‌ترین الگوهای مؤثر در امواج سرما بودند. بندال امگایی و بندال دوقطبی بیشترین تأثیر را بر افت دما در منطقه داشته‌اند. یافته پژوهش حاضر مبنی بر نقش این دو نوع بندال در شدیدترین امواج سرمای اصفهان با سازوکار گزارش‌شده توسط محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2016) همخوانی دارد. در هر دو مطالعه، بلوکی‌نگ عامل تعیین‌کننده تبدیل یک ناهنجاری معمولی به یک رخداد فرین و ماندگار است. در الگوی سوم (بندال امگایی)، سرمایش غالباً دینامیکی - تابشی زیر یک پشته ماندگار رخ می‌دهد و در الگوی چهارم (بندال دوقطبی)، فرارفت مستقیم هوای قطبی نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کند.

تحلیل وزش دمایی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نشان داد که در تمامی چهار الگوی گردشی شناسایی‌شده، فرارفت هوای سرد از عرض‌های شمالی و شمال شرقی به‌سوی فلات ایران، سازوکار اصلی کاهش شدید دمای حداقل در شهر اصفهان است. شدت و گستردگی وزش سرد در الگوهای دوم و چهارم بیش از سایر الگوها بوده و با عمیق‌ترین ناوه‌ها و گسترده‌ترین نفوذ تاوه قطبی هم‌راستا است. همچنین، وجود بندال‌های امگایی و دوقطبی، نه‌تنها سبب ماندگاری الگوی فرارفت سرد می‌شود، بلکه با ایجاد ناپایداری دینامیکی در لایه‌های زیرین، انتقال سرمای شدید به سطح را تشدید می‌کند؛ بنابراین، پایش هم‌زمان وزش دمایی در کنار الگوهای

تراز میانی وردسپهر، قدرت پیش‌بینی و درک فیزیکی پدیده‌ی امواج سرمایی در منطقه‌ی اصفهان را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و می‌توان از آن به‌عنوان یک شاخص عملیاتی در هشدارهای سرمازدگی بهره‌گرفت.

به طور کلی، وقوع امواج سرما در اصفهان بیش از هر چیز با سازوکار دینامیکی جو در ارتباط است و برای پایش این پدیده ابتدا باید به درک عمیقی از برهم‌کنش همدیدی - دینامیکی در منطقه دست یافت. همان‌طور که کلسن و همکاران (Kolstad et al., 2022) و نیز محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2016) تأکید کرده‌اند، شناخت علت وقوع امواج سرما مستلزم درک سازوکار دینامیک جو در مقیاس بزرگ‌مقیاس است.

در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، الگوهای شناسایی‌شده در اصفهان با یافته‌های عالی‌جهان و همکاران (Aalijahan et al., 2019, 2022) در شمال غرب ایران (با تأکید بر غلبه پرفشار سیبری و بلوکینگ اروپای شرقی) و کریمی و همکاران (Karimi et al., 2020) طبقه‌بندی فرارفتی - ترکیبی هم‌راستا اما نه یکسان است. تفاوت اصلی در سهم بیشتر سردچال‌های وردسپهری میانی (الگوی اول) در اصفهان نسبت به مناطق شمال غربی کشور است که می‌تواند به موقعیت فلات مرکزی، فاصله بیشتر از منشأ رطوبتی دریای خزر و مدیترانه، و شرایط تابشی - زمینی خاص این منطقه مرتبط باشد. این فرضیه آزمون خود را مستلزم تحلیل مقایسه‌ای مسیر رطوبت و دمای تراز پایین بین دو منطقه می‌داند که می‌تواند موضوع پژوهش تکمیلی باشد.

این ترکیب، ضمن حفظ پیوستگی روش‌شناختی با مطالعات پیشین ایران مانند فتاحی و صالحی‌پاک (Fatahi & Salehipak, 2009) و محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2016)، امکان تبیین علی عمیق‌تر و مقایسه‌پذیرتر با ادبیات بین‌المللی اخیر در زمینه دینامیکی تاول قطبی و گرمایش ناگهانی پوشش سپهر (SSW) را فراهم می‌آورد. به‌ویژه، افزودن تحلیل وزش دمایی این امکان را می‌دهد که در ادامه مشخص شود کدام یک از چهار الگو عمدتاً محصول فرارفت افقی مستقیم هوای قطبی است (الگوهای دوم و چهارم، با وزش منفی قوی و همسو با جهت باد شمالی) و کدام یک بیشتر ناشی از سرمایش دینامیکی - تابشی زیر یک پشته ماندگار است.

منابع

- Alijani, B. (2002). Synoptic climatology. *SAMT Publications, Tehran, Iran, 1*, 112-114.
- Aalijahan, M., Lupo, A. R., Salahi, B., Et Al. (2022). The Long-Term (142 Years) Spatiotemporal Reconstruction and Synoptic Analysis of Extreme Low Temperatures (-15°C or Lower) In The Northwest Region of Iran. *Theoretical And Applied Climatology*, 147 (3-4), 1415-1436. <https://doi.org/10.1007/S00704-022-03922-Y>.
- Aalijahan, M., Salahi, B., & Ghavidel, Y. (2019). A New Approach In Temporal-Spatial Reconstruction And Synoptic Analysis Of Cold Waves In The Northwest Of Iran. *Theoretical And Applied Climatology*, 137, 341-352. <https://doi.org/10.1007/S00704-018-2601-7>
- Alijani, B. (2002). *Synoptic Climatology*. Samt Publications. <https://Samta.Samt.Ac.Ir/Product/13514> [In Persian]
- Barati, G. (1996). *Design And Prediction Of Synoptic Patterns Of Spring Frosts In Iran, Doctoral Dissertation*, Tarbiat Modares University. Tehran. [In Persian]
- Cohen, J., Agel, L., Barlow, M., Furtado, J. C., Kretschmer, M., & Wendt, V. (2022). The "Polar Vortex" Winter Of 2013/2014. *Journal Of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(17), E2022jd036493. <https://doi.org/10.1029/2022JD036493>
- Escobar, G. C. J., & Bischoff, S. A. (1999). Meteorological Situations Associated With Significant Temperature Falls In Buenos Aires: An Application To The Daily Consumption Of Residential Natural Gas. *Meteorological Applications*, 6(3), 253-260. <https://doi.org/10.1017/S1350482799001258>
- Farshadfar, E. (2010). *Principles And Methods Of Multivariate Statistical Analysis*. Kermanshah: Tagh Bostan Publications. [In Persian]
- Fatahi, E., & Salehipak, T. (2009). Analysis Of Synoptic Patterns Of Winter Frosts In Iran. *Geography And Development*, 13, 127-136. <https://doi.org/10.22111/Gdij.2009.1232> [In Persian]
- Ghavidel, Y., Motalebizad, S. Temporal characteristics of cold waves hazard frequency in northwest of Iran and Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation impacts. *Nat Hazards* 120, 4941-4957 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06391-2>

- Karimi, M., Ahmadi, N., Moradiyan, M. M., & Rafati, S. (2020). Synoptic Patterns Of Cold Waves Of Recent Decades In Iran (2004-2013). *Physical Geography Research*, 52(2), 165-177. <https://doi.org/10.22059/Jphgr.2020.238066.1007089>
- Kolstad, E. W., Lee, S. H., Butler, A. H., Domeisen, D. I., & Wulff, C. O. (2022). Diverse Surface Signatures Of Stratospheric Polar Vortex Anomalies. *Journal Of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(20), E2022jd037422. <https://doi.org/10.1029/2022JD037422>
- Krouma, M., M. K. Schutte, and L. Maniora. (2026). Cold Waves in a Changing Climate: Characteristics, Trends, and Large-Scale Drivers in Northern Europe and the Alps. *Atmospheric Science Letters* 27, no. 4: e70021. <https://doi.org/10.1002/asl2.70021>.
- Lashkari, H. (2008). Synoptic Analysis of the Widespread Cold Wave Of 2003 In Iran. *Physical Geography Research*, 66, 1-18. https://Scholar.Google.Com/Scholar?Hl=En&As_Sdt=0.5&Cluster=5085550073021917539 [In Persian]
- Lashkari, H., & Keykhosravi, G. (2010). Synoptic Analysis of the Cold Wave Of December 28, 2006, to January 4, 2007, in Iran. *Space Planning And Planning*, 65, 151-177. https://tsmsp.modares.ac.ir/article_14190_en.html?lang=fa. [In Persian]
- Linacre, E. T., & Geerts, B. (1997). *Climates And Weather Explained*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203042632>.
- Öztürk, E., Bayram, G., Yavuz, V., Kara, Y., Temiz, C., & Lupo, A. R. (2026). Trend Analysis of Heat Waves and Cold Spells in Major Turkish Cities Under Climate Change. *Atmosphere*, 17(3), 326. <https://doi.org/10.3390/atmos17030326>
- Mahmoudi, P., Khosravi, M., Masoudian, S. A., & Alijani, B. (2016). Synoptic Analysis Of The Most Extensive And Long-Lasting Frost In Iran During 1963- 2004. *Climatological Research*, 7(25-26). https://clima.irimo.ir/article_42035.html?lang=en. [In Persian]
- Masoudian, S. A. (2008). *Climate Of Iran*. Isfahan: University Of Isfahan Press. [Masoodian: Climate Of Iran - Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?hl=en&as_sdt=0.5&cluster=5085550073021917539). [In Persian]
- Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climates*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>.
- Parvin, N., & Ataei, H. (2013). Synoptic Patterns Of Mid-Troposphere During Late Spring Frosts In Kermanshah Province. *Geography*, 11(36), 215-229. SID. <https://Sid.Ir/Paper/150394/Fa>. [In Persian]
- Pezza, A. B., & Ambrizzi, T. (2005). Dynamical Conditions And Synoptic Tracks Associated With Different Types of Cold Surges Over Tropical South America. *International Journal Of Climatology*, 25, 215-241. <https://doi.org/10.1002/Joc.1110>
- Rezaei, M., & Manzar, H. (2024). Spatio-Temporal Changes Of Heat And Cold Wave Patterns In Western Iran. *Climate Research*, 93, 29-41. <https://doi.org/10.3354/cr01740>.
- Rusticucci, M., & Vargas, W. (1995). Synoptic Situations Related To Spells Of Extreme Temperatures Over Argentina. *Meteorological Applications*, 2, 291-300. <https://doi.org/10.1002/Met.5060020402>
- Salehi Pak, T., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2025). Synoptic Analysis Of The Most Severe And Widespread Extreme Cold Wave Hazard In Iran. *Natural Hazards*, 121, 11151-11172. <https://doi.org/10.1007/S11069-025-07241-Z>
- Scholefield, P. (1994). Frost—Is This The Year? *Australian Grapegrower And Winemaker*, 370, 31-64.
- Toptunova, O. N., Motsakoy, M. A., Koval, A. V., Ermakova, T. S., & Didenko, K. A. (2025). Impact Of Sudden Stratospheric Warming On Tropospheric Circulation and Cold Wave Formation: The Case Of The January 2019 Event. *Atmospheric Research*, 318, 107998. <https://doi.org/10.1016/J.Atmosres.2025.107998>
- Van Den Besselaar, E. J. M., Klein Tank, A. M. G., & Van Der Schrier, G. (2010). Influence Of Circulation Types On Temperature Extremes In Europe. *Theoretical And Applied Climatology*, 99(3-4), 431-439. <https://doi.org/10.1007/S00704-009-0160-3>
- Zhang, Y., Si, D., Ding, Y., Jiang, D., Li, Q., & Wang, G. (2022). Influence Of Major Stratospheric Sudden Warming On The Unprecedented Cold Wave In East Asia In January 2021. *Advances In Atmospheric Sciences*, 39(4), 576-590. <https://doi.org/10.1007/S00376-021-1198-5>