



Exploring the Link Between Jet Stream Patterns and Cold Temperature Extremes in Iran

Nahid Mohammadi¹, Firouz Mojarrad^{2*}, & Jafar Masompour Samakoosh³

^{1,2&3} Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 03 August 2025

Revised: 23 October 2025

Accepted: 25 October 2025

Available Online: 25 October 2025

Keywords:

Cold Temperature
Extremes

Jet Stream

Self-Organizing Maps
(SOM)

Iran

ABSTRACT

Cold Temperature Extremes (CTEs), in addition to impacting the energy, agricultural, and environmental sectors, pose significant risks to biological systems and human health. Accordingly, understanding this hazard and the atmospheric mechanisms that contribute to its occurrence is considered essential for deepening conceptual insight and improving forecasting accuracy. Upper-tropospheric jet streams are among the principal drivers and modulators of CTEs. To investigate this relationship, temperature records from 30 stations and 300 hPa wind reanalysis data from the ECMWF database spanning a 32-year period were utilized. The gridded jet stream data were initially clustered using the Self-Organizing Map (SOM) neural network technique. Subsequently, CTE frequency within each cluster was quantified, and the corresponding synoptic patterns were analyzed. The study's findings revealed that the mean frequency of CTEs has declined in parallel with the rise in the country's average air temperature between 1992 and 2023. The highest CTE frequencies occurred under conditions dominated by strong jet streams over the region, typically associated with the confluence of the polar front and subtropical jet streams during the colder months. In contrast, a smaller proportion of CTE events—more prevalent in autumn and spring—was linked to weaker upper-level flow, as indicated by the absence of pronounced jet stream activity at the 300 hPa level.

* Corresponding author: Dr. Firouz Mojarrad

E-mail address: f_mojarrad@yahoo.com

How to cite this article: Mohammadi, N., Mojarrad, F., & Masompour Samakoosh, J. (2025). Exploring the Link Between Jet Stream Patterns and Cold Temperature Extremes in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.94634.1598>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Cold Temperature Extremes (CTEs) can adversely affect public health, agriculture, and the environment. Investigating the meteorological drivers of CTEs and analyzing the atmospheric patterns that trigger them enhances understanding, improves forecasting, and promotes awareness to help mitigate associated impacts. The 300 hPa level is a key layer for analyzing large-scale atmospheric flows and phenomena such as jet streams and planetary waves. Previous studies have examined patterns in the mid- and lower troposphere during CTE events. For example, the role of deep troughs and ridges at the 500 hPa level, along with temperature advection, has been explored in relation to the persistence of cold spells. The occurrence of cold anomalies and their relationship with atmospheric blocking patterns have also been studied. Eastward shifts in blocking systems can displace cold anomalies toward downstream regions, resulting in cold winter conditions. Analysis of jet streams and upper-level circulation is crucial for understanding meteorological phenomena near the Earth's surface. The two primary jet streams in the Northern Hemisphere—the polar front jet stream and the subtropical jet stream—play a significant role in this context. Increased curvature and intensification of these jet streams can lead to the advection of cold air toward lower latitudes, contributing to the occurrence of CTEs. The main objective of this study is to investigate the relationship between jet stream patterns and CTEs in the upper atmosphere over Iran.

Material and Methods

In this study, daily temperature data from 30 stations operated by the Iranian Meteorological Organization were analyzed over a 32-year period (1992–2023) to identify CTEs. Days on which the average daily temperature at a station fell below the 10th percentile were classified as CTE days. Synoptic maps of the upper atmosphere were examined using daily wind direction and speed data at the 200, 300, and 500 hPa levels, with a horizontal resolution of 0.1 degrees, obtained from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). To identify dominant wind patterns, a Self-Organizing Map (SOM) neural network was applied using MATLAB's built-in functions. SOM is an unsupervised learning algorithm designed to detect and visualize the distribution of multidimensional data. It is typically implemented by constructing a two-dimensional grid of nodes that represent clusters within the dataset.

Results and Discussion

The lowest annual average temperature in Iran during the study period was approximately 14.6°C, recorded in 1992—a year that also experienced the highest number of CTE events. The trend line of average temperatures over the 32-year period indicates a warming rate of 0.05°C per year.

Daily horizontal wind data at the 300 hPa level, spanning the same 32-year period, were clustered into six groups using the Self-Organizing Map (SOM) method. Based on the clustering results and the frequency of CTE events, Pattern 1 accounts for approximately 45% of the average CTE frequency across stations in Iran. This pattern is characterized by a strong jet stream at the 300 hPa level, with wind speeds reaching 40 m·s⁻¹ over the southern half of the country, positioning Iran within both the cold inlet and outlet zones of the jet stream. A comparison of wind flow at the 200, 300, and 500 hPa levels reveals the influence of both the polar front and subtropical jet streams on CTE events. Pattern 1 occurred most frequently in January, February, and March, with its highest annual frequency observed in 2019. Pattern 4 also played a significant role, accounting for about 36% of CTE occurrences. It was present in all months except June, July, August, and September. In this pattern, the 300 hPa jet stream extended across the entire country, with its core centered over the central and southern regions. In both Patterns 1 and 4, the presence of strong wind flow at all three levels suggests that the merging of the polar front and subtropical jet streams created favorable conditions for cold air advection into Iran. Patterns 2 and 5 ranked third and fourth, respectively, in terms of CTE frequency. In Pattern 2, no strong jet stream was observed at any of the three levels, and the prevailing wind direction was westerly. These conditions indicate a lack of

significant kinetic energy in the upper troposphere. This pattern was most frequent in March, April, and May. Pattern 5 accounted for approximately 5% of CTE events and occurred predominantly in May, June, September, and October—transitional months between cold and warm seasons. In this pattern, a jet stream at the 200 hPa level, with maximum speeds of $35\text{--}40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, extended in a narrow band from Iraq to northeastern Iran. Patterns 3 and 6 did not play a significant role in CTE occurrence. Wind flow in the upper troposphere within these clusters clearly exhibited anticyclonic circulation associated with the dominance of the subtropical high-pressure system.

Conclusions

Based on the results of the statistical analysis, the mean frequency of CTEs has declined in parallel with the rise in the country's average air temperature between 1992 and 2023. The analysis of clustering patterns and CTE event frequencies—consistent with previous studies—indicates that jet streams play a significant role in the occurrence of CTEs in Iran. Wind flow patterns at various atmospheric levels clearly demonstrate the influence of both the polar front and subtropical jet streams on these events. Among the six identified clusters, strong and persistent jet streams are defining features of Clusters 1 and 4, both of which have played a major role in CTE formation. Cluster 1 occurred most frequently during the cold months, while Cluster 4 was observed during both cold and temperate months. In these two patterns, the polar front jet stream is responsible for advecting cold air into Iran. In Cluster 2, strong jet streams were absent in the upper troposphere, and the prevailing currents were predominantly westerly. This pattern was more common in late winter and early spring. CTE events in Cluster 5 primarily occurred during the equinox months, when relatively weak jet streams were present over the northern half of the country. The frequency of CTE events in Clusters 3 and 6 was nearly zero across stations, due to the dominance of subtropical high-pressure and the absence of favorable conditions for CTE development.



بررسی ارتباط بین الگوهای رودباد و فرین‌های دمایی سرد در ایران

ناهید محمدی^۱، فیروز مجرد^{۲*}، جعفر معصوم‌پور سماکوش^۳

^{۱،۲،۳} گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳	فرین‌های دمایی سرد علاوه بر آسیب به بخش‌های انرژی، کشاورزی و محیط زیست، می‌تواند زندگی جانداران را به خطر بیندازد. از اینرو بررسی و شناخت این مخاطره و الگوهای جوی به وجود آوردن آن به منظور درک بهتر و پیش‌بینی مناسب ضروری به نظر می‌رسد. رودبادهای تراز بالایی وردسپهر از عوامل مهم کنترل‌کننده و محرک دماهای فرین سطح زمین هستند. به منظور بررسی ارتباط بین فرین‌های سرد و رودبادهای تراز بالایی وردسپهر، از داده‌های دمای ۳۰ ایستگاه هواشناسی و داده‌های بازتحلیل باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال پایگاه ECMWF در بازه زمانی ۳۲ ساله استفاده شده است. ابتدا داده‌های شبکه‌ای رودباد با به کارگیری روش شبکه عصبی خودسامان‌دهنده (SOM) خوشه‌بندی شد. سپس فراوانی رویدادهای فرین سرد هر دسته، محاسبه و الگوهای سینوپتیکی مربوطه تحلیل گردید. نتایج تحقیق نشان داد با توجه به روند افزایشی میانگین دمای هوای کشور بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳، میانگین فراوانی رویدادهای فرین سرد کاهش یافته است. بیشترین فراوانی فرین‌های سرد در شرایطی رخ داده است که رودبادهای قوی در کشور حاکمیت داشته‌اند. این رودبادهای حاصل ادغام دو رودباد جبهه قطبی و جنب‌حاره بوده و غالباً در ماه‌های سرد سال اتفاق افتاده‌اند. در مورد درصد کمی از رویدادهای فرین سرد که در فصل‌های پاییز و بهار پرتکرار بوده‌اند، الگوهای تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نشان‌دهنده نبود رودباد قوی می‌باشد.
کلمات کلیدی: فرین دمایی سرد رودباد نقشه خودسامان‌دهنده (SOM) ایران	

مقدمه

دمای هوا ویژگی مهم کره زمین و عاملی تعیین‌کننده در زندگی موجودات است. تغییرات دمایی می‌تواند آثار زیان‌باری بر جنبه‌های مختلف زندگی مانند سلامتی، کشاورزی (Zenozi Alamdari, Sobhani, Islahi & Mohammadi, 2025) و محیط زیست (Eskandari Damaneh, Gholami, Mahdavi, Khorani & Li, 2019) داشته باشد. بررسی عوامل هواشناسی در رویدادهای فرین سرد و تحلیل الگوهای جوی محرک آن، علاوه بر شناخت بهتر، سبب بهبود پیش‌بینی پدیده مذکور و آگاهی‌بخشی برای کاهش خسارات خواهد شد. رخداد فرین سرد، به استقرار هوای سرد در یک منطقه مشخص اشاره دارد که

معمولاً تحت تأثیر آرایش ویژه‌ای از الگوهای لایه‌های مختلف جو از جمله در ترازهای میانی و بالایی و ردسپهر رخ می‌دهد (Asakereh & Shahbaee Kotenae, 2018). تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال یکی از مهم‌ترین سطوح برای تحلیل جریان‌های جوی بزرگ‌مقیاس و پدیده‌هایی همچون رودباد و امواج سیاره‌ای است. در مطالعات پیشین، اغلب الگوهای لایه‌های پایینی و میانی جو هنگام رخداد فرین‌های سرد بررسی شده است. تول و مارتیوس (Tuel & Martius, 2024) نشان دادند که دوره‌های گرم و سرد در نیمکره شمالی با الگوهای جوی بزرگ‌مقیاس مانند بندال جوی^۱ و امواج راسبی^۲ مرتبط هستند و ناوه‌های عمیق و پشته‌ها در تراز میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال) همراه با فرارفت دمایی نقشی کلیدی در ماندگاری دوره‌های سرد ایفاء می‌کنند. آدامز و همکاران (Adams, Lee, Smith & Sheridan, 2021) با استفاده از روش نقشه‌های خودسامان‌دهنده^۳ (SOM) بر روی ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال و فشار تراز دریا نشان دادند که ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال نسبت به فشار تراز دریا ارتباط قوی‌تری با فرین‌های دمایی در آمریکای شمالی دارند. در مطالعه دیگری نایگارد و همکاران (Nygard, Papritz, Naakka & Vihma, 2023) با استفاده از نقشه‌های خودسامان‌دهنده و شناسایی شش الگوی شاخص ناهنجاری دمایی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال دریافتند که موقعیت ناهنجاری‌های سرد به‌طور مستقیم با موقعیت الگوهای بندالی جوی مرتبط است؛ به‌طوری‌که جابجایی شرق‌سوی سیستم بندالی، ناهنجاری سرد را نیز به سمت شرق منتقل می‌کند و سبب رویداد هوای سرد زمستانی در اروپا می‌شود.

تحلیل رودباد و جریان‌های جوی ترازهای بالایی و ردسپهر در بررسی پدیده‌های هواشناسی مجاور سطح زمین اهمیت زیادی دارد. رودباد، جریان‌های سریع و باریکی از هوا (غالباً با سرعت بیش از ۳۰ متر بر ثانیه) هستند که نقش مهمی در تغییرات دما ایفاء می‌کنند (Shaw & Miyawaki, 2023). دو رودباد اصلی و شناخته‌شده در نیمکره شمالی عبارتند از رودباد جبهه قطبی و رودباد جنب‌حاره‌ای (Saligheh, 2017). این دو رودباد گستره بزرگی را در نیمکره شمالی در بر گرفته و از اجزاء اصلی گردش عمومی جو هستند. حرکت‌های عمودی متفاوت در دو توده‌های سرد قطبی و گرم استوایی عرض‌های میانی و تضاد دمایی شدید بین آن‌ها سبب ایجاد رودباد جبهه قطبی می‌شود که در منطقه برون‌حاره نقش مهمی در ایجاد و تقویت سیکلون‌ها دارند (Kavyani & Alijani, 2019). همچنین وجود رودباد و جریان سریع هوا سبب انتقال انرژی و تکانه در جو می‌شود (Trevisiol, Gilli & Faggian, 2022; Stendel, Francis, White, Williams & Woollings, 2021). جریان مداری رودباد جبهه قطبی، هوای سرد را در مجاورت قطب نگه می‌دارد. مسیر رودباد جبهه قطبی همواره مداری نیست و همراه با امواج راسبی انحناء پیدا می‌کند. امواج راسبی بیانگر حالت کلی شکل امواج جوی در نیمکره شمالی است که غالباً در نواحی برون‌حاره جریان دارد. این امواج با شکل‌گیری، تقویت و یا تضعیف ناوه‌ها و پشته‌ها، شرایط استقرار هوای سرد و گرم را در یک منطقه فراهم می‌کنند (Jimenez-Estevé & Domeisen, 2022; Liu, Xu, Peng & Wu, 2018). افزایش انحناء و تقویت رودباد می‌تواند منجر به فرارفت هوای سرد به عرض‌های پایین‌تر شود (Kornhuber et al., 2020). وجود ناوه‌های عمیق که با هوای سرد همراه هستند، می‌تواند هوای سرد قطبی را به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر هدایت کند و سبب وقوع فرین‌های سرد شود (Asakereh & Shahbaee Kotenae, 2018). چنانچه این ناوه به شکل یک مرکز کم‌ارتفاع بسته‌شده از امواج اصلی جدا و به عرض‌های پایین‌تر منتقل شود، می‌تواند در مناطق وسیعی هوای سرد را به دام انداخته و به کاهش شدید دما در سطح زمین منجر شود (Sepadeh, Salahi, Alijani & Zeinali, 2021). از طرفی پشته‌های قوی در کنار ناوه‌ها می‌توانند تشکیل یک سامانه بندالی دهند و هوای سرد را در ناحیه‌ای ماندگار کنند (Asakereh & Shahbaee Kotenae, 2018). در یکی از انواع سامانه‌های بندالی، رودباد جبهه قطبی دچار انسداد شده و مسیر حرکتش به شکل یک حلقه ثابت (بندال امگا) در می‌آید که سبب ماندگاری هوای سرد قطبی برای مدت طولانی در یک منطقه می‌شود (Pazhoh, 2020).

چند نمونه از مطالعاتی که به بررسی ارتباط رودباد و امواج راسبی با فرین‌های دمایی پرداخته‌اند، در ادامه بررسی می‌شود. پارک و همکاران (Park, Hong & Park, 2020) با خوشه‌بندی الگوهای ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال

1- Blocking Pattern

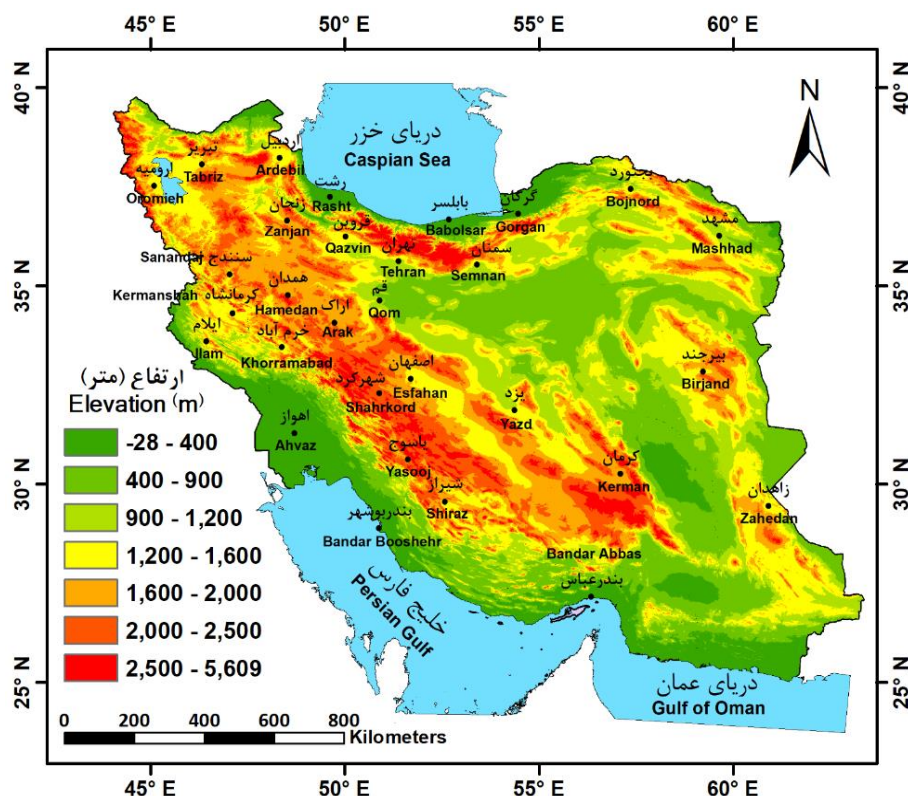
2- Rossby Waves

3- Self Organizing Map (SOM)

دریافتند که قطار امواج راسبی سبب رویدادهای فرین سرد کوتاه مدت در کره جنوبی می شود. راتنا و همکاران (Ratna, Osborn, Joshi & Luterbacher, 2020) امواج راسبی را با استفاده از ناهنجاری باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در ناحیه اقیانوس اطلس شمالی بررسی کردند و دریافتند که قطار امواج راسبی شرق سو سبب استقرار پرفشار و در نتیجه، ناهنجاری گرم و خشک در شرق چین و ژاپن می شود. در مطالعه لئو و همکاران (Liu et al., 2018) موج راسبی رانده شده از باد غربی در نزدیکی دریای مدیترانه مسئول فرین دمایی زمستانی در چین شناخته شده است. پرز و همکاران (Perez et al., 2021) با بررسی موقعیت رودباد، دلیل اصلی رخداد موج گرم دریایی شمال غرب اطلس را موقعیت عرض جغرافیایی رودباد و فرارفت اقیانوسی ناشی از جریان گلف استریم دانستند. ژو و همکاران (Zhou et al., 2022) با استفاده از توابع تجربی متعامد^۱ (EOF) بر روی داده های باد مداری، تغییرات رودباد جنب حاره در شرق آسیا را در رخداد فرین گرم همراه با رطوبت بالا مؤثر تشخیص دادند. در پژوهش خیمنز-استیو و دومایسن (Jimenez-Estevé & Domeisen, 2022) معلوم شد که رشته کوه های با ارتفاع بیش از شش کیلومتر به واسطه تغییر در جریان رودباد و در نتیجه فرارفت افقی دما در پراکندگی امواج گرم عرض های میانی تأثیر دارند. دی کاپو و همکاران (Di capua et al., 2021) با بررسی ناهنجاری سرعت باد و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نقش قطار امواج راسبی را در رویداد موج گرما در روسیه و سیل در پاکستان که به طور همزمان رخ دادند، بررسی کردند. روسی و همکاران (Rousi, Kornhuber, Beobide-Arsuaga, Luo & Coumou, 2022) وجود دو رودباد جبهه قطبی و جنب حاره ای را در اوراسیا در افزایش رویدادهای موج گرما در اروپا مؤثر دانستند. همچنین احسان و همکاران (Ehsan et al., 2020) نشان دادند که تضعیف رودباد غربی در تراز بالایی وردسپهر بر دمای سطح زمین در خاورمیانه تأثیرگذار است. در مطالعات مربوط به فرین های سرد، نقش ویژگی های ترازهای بالایی وردسپهر کمتر مورد توجه محققان بوده است. به منظور بررسی جامع شرایط جوی در هنگام رخدادهای فرین سرد در ایران، نیاز به تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی نقش رودباد و الگوهای جو بالا کاملاً مشهود است. از این رو مطالعه رودباد در شناخت و بهبود پیش بینی فرین های سرد ضروری به نظر می رسد. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی ارتباط رخدادهای فرین سرد با رودباد و الگوهای ترازهای بالایی جو در ایران است.

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر منطقه مورد مطالعه کشور ایران است که مابین عرض های جغرافیایی $25^{\circ}03'$ تا $39^{\circ}47'$ شمالی و طول های جغرافیایی $44^{\circ}02'$ تا $63^{\circ}20'$ شرقی واقع شده است (شکل ۱). ایران کشوری با ویژگی های آب و هوایی متنوع است که طیف وسیع دمایی در سطح آن رخ می دهد. به طور میانگین در بازه زمانی ۳۲ ساله مورد مطالعه، اردبیل با میانگین دمای ۱۰ درجه سردترین و بندرعباس، اهواز و بوشهر با میانگین دمای بیش از ۲۵ درجه گرم ترین ایستگاه های مورد بررسی بودند.



شکل ۱- پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در ایران

Fig. 1. Spatial distribution of weather stations in Iran

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی سازوکارهای همدیدی جو بالا و اثر آن بر رخداد‌های فرین سرد، با به کارگیری رویکرد گردشی به محیطی، ابتدا الگوهای رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با روش نقشه‌های خودسامان دهنده (SOM) خوشه‌بندی و سپس ارتباط هر خوشه با فرین‌های سرد بررسی شده است. بررسی نقشه‌های سینوپتیکی جو بالا با به کارگیری داده‌های روزانه سمت و سرعت باد در ترازهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال با قدرت تفکیک افقی ۰/۱ درجه از «مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا»^۱ (ECMWF) به انجام رسیده است. همچنین برای شناسایی رویدادهای فرین سرد، از داده‌های میانگین دمای روزانه ۳۰ ایستگاه سازمان هواشناسی کشور (شکل ۱) در یک بازه زمانی ۳۲ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳) استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های دمایی متفاوت ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران، روزهایی که دمای میانگین روزانه هر ایستگاه از صدک دهم کمتر بوده به عنوان فرین دمایی سرد در ایستگاه مورد نظر انتخاب شده است. در واقع شاخص دمای کمتر از صدک دهم، که به طور مجزا برای هر ایستگاه محاسبه شده است، از بین کل روزهای مورد بررسی (بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳) ده درصد از روزهایی را نشان می‌دهد که کم‌ترین دمای روزانه را داشته‌اند.

همچنین برای شناخت الگوهای غالب رودباد در بازه زمانی ۳۲ ساله، از شبکه عصبی نقشه‌های خودسامان دهنده (SOM) با استفاده از توابع تعبیه‌شده در بستر برنامه متلب^۲ استفاده شده است. نقشه خودسامان دهنده (SOM) یک الگوریتم شبکه عصبی است که از روش‌های یادگیری نظارت‌نشده استفاده می‌کند. این الگوریتم که برای تعیین و نمایش تابع توزیع یک مجموعه داده چندبعدی استفاده می‌شود، معمولاً با ایجاد یک شبکه دوبعدی از گره‌ها اجرا می‌شود (Sheridan & Lee, 2011). هر گره با یک بردار وزن مشخص می‌شود که نماینده بخشی از داده‌های ورودی است. این بردارها در طول فرآیند آموزش مدل به تدریج به سمت

1- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

2- MatLab

داده‌های مشابه حرکت می‌کنند. نتایج شبکه‌نهایی به این صورت است که داده‌هایی که شباهت بیشتری دارند، در یک گروه یا گره قرار می‌گیرند. در این مدل خوشه‌اول و خوشه آخر بیشترین تفاوت را با هم دارند و بین آن‌ها سایر دسته‌ها به‌طور پیوسته قرار می‌گیرند (Hewitson & Crane, 2002). داده‌های سرعت باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک زمانی روزانه در بازه زمانی ۳۲ ساله در قالب ماتریس ورودی به شبکه عصبی یادشده معرفی شد. برای ارائه نتایج بهتر، پیش از انجام این الگوریتم، داده‌های باد با رابطه (۱) نرمال شدند.

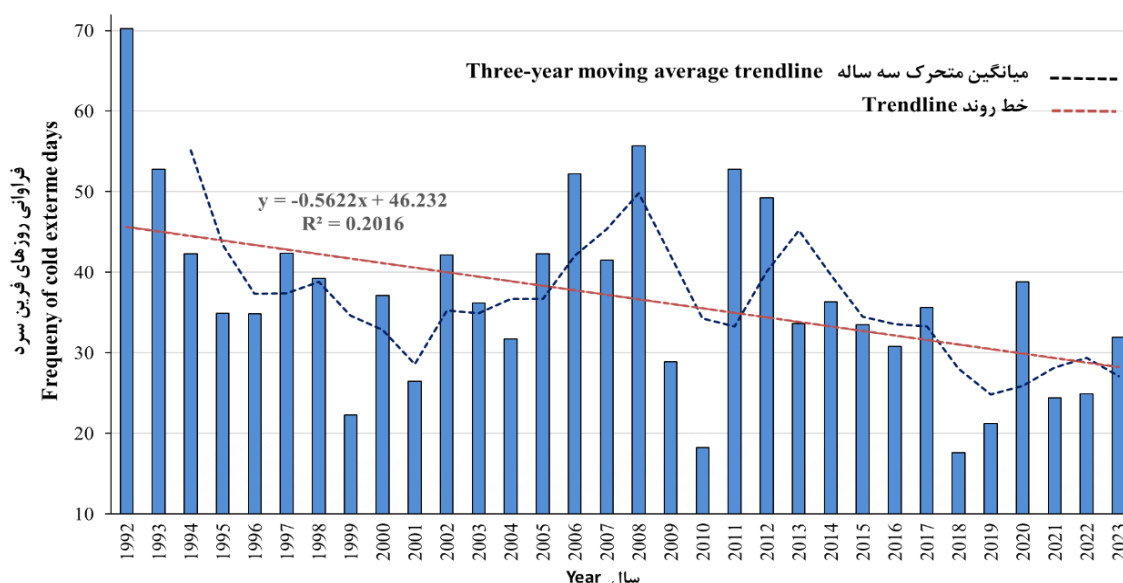
$$v_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1)$$

که در آن v_i سرعت باد افقی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در نقطه شبکه i ام و n تعداد داده‌های سری زمانی باد افقی در این نقطه شبکه یا به عبارت دیگر تعداد روزهای مورد بررسی است. در این پژوهش از شبکه با ابعاد 2×3 استفاده شده است. نتایج این شبکه، در قالب شش الگو، نمایش مختصر و مفیدی را از سرعت باد در دوره مورد بررسی ارائه می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر رودباد بر فرین‌های سرد، فراوانی این رویدادها در ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی برای هریک از خوشه‌ها محاسبه شد. این مقدار نشان‌دهنده اهمیت الگوی رودباد در هر خوشه در ایجاد رویدادهای فرین سرد است.

نهایتاً الگوهای جوی به وجود آورنده رخداد‌های فرین سرد در سطح کشور بررسی و تحلیل گردید. به منظور تحلیل جامع وضعیت رودباد در ترازهای بالایی، افزون بر نقشه باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، نقشه‌های باد ترازهای ۲۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز برای دسته‌های حاصل از خوشه‌بندی اصلی رسم شده است. مطالعه وضعیت باد در این سه تراز بالایی و ردسپهر درک بهتری از وضعیت رودباد ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به این که رودباد جنب‌حاره نسبت به رودباد جبهه قطبی در ارتفاع بالاتری جریان دارد، مقایسه الگوهای باد در این سه سطح باعث تشخیص رودباد جنب‌حاره از رودباد جبهه قطبی می‌شود.

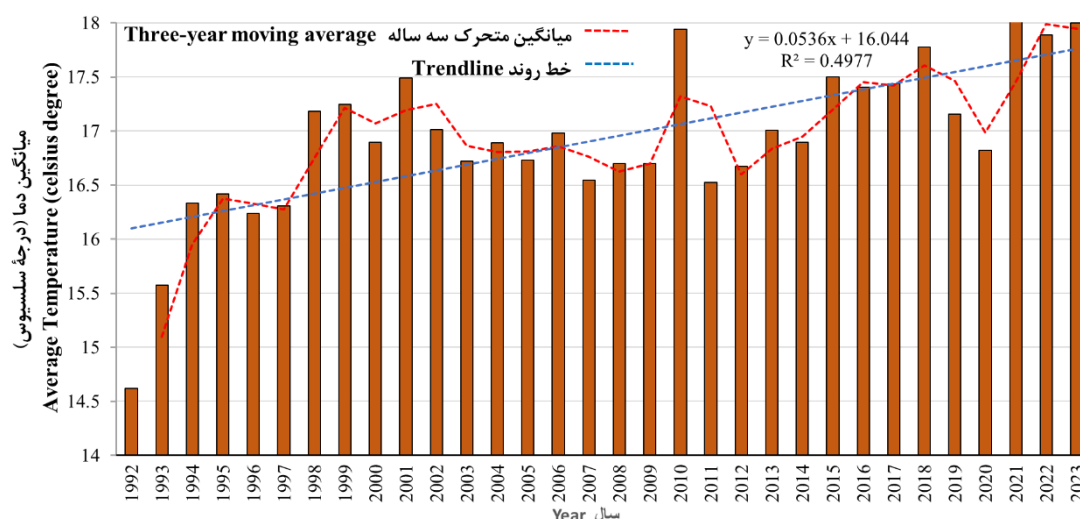
نتایج و بحث

میانگین فراوانی سالانه فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران روند کاهشی داشته است. این روند به‌ویژه در سالیان اخیر نمایان‌تر بوده و با شیب بیشتری دست‌خوش تغییر شده است. در چند سال ابتدایی بازه مورد بررسی، میانگین فراوانی این رویدادها در ایستگاه‌های مورد بررسی بیشترین مقدار را داشته است. پس از آن با وجود افت‌وخیزهایی، بطور کلی روند فراوانی فرین‌های سرد کاهش یافته بوده است. در بین سال‌های مورد بررسی، کمترین میانگین سالانه دما در ایران حدود $14/6$ درجه سلسیوس مربوط به سال ۱۹۹۲ بوده که بیشترین میزان رویداد فرین‌های سرد نیز مربوط به همین سال است (شکل ۲). خط روند میانگین دما در بازه زمانی یادشده نشان می‌دهد که میانگین دمای ایران در هر ۱۰ سال، به میزان $0/5$ درجه سلسیوس و به عبارت دیگر در طی دوره ۳۲ ساله مورد مطالعه، تقریباً بیش از $1/5$ درجه سلسیوس افزایش یافته است (شکل ۳).



شکل ۲- میانگین فراوانی سالانه رویدادهای فرین سرد در ایران

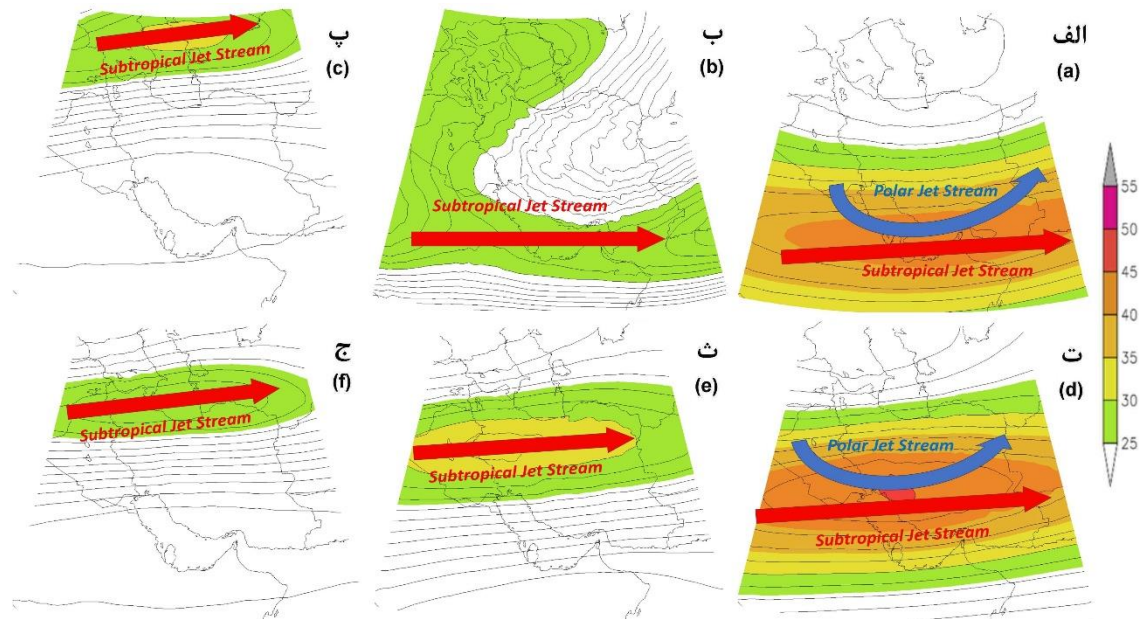
Fig. 2. Average annual frequency of extreme cold events in Iran



شکل ۳- میانگین سالانه دما در ایران

Fig. 3. Average annual temperature in Iran

همانگونه که گفته شد، برای بررسی الگوهای جوی تراز بالایی و ردسپهر، ابتدا داده‌های روزانه باد افقی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در بازه زمانی ۳۲ ساله با به‌کارگیری شبکه خودسامان‌دهنده در قالب شش گروه خوشه‌بندی شد. در خوشه‌های شماره یک و چهار، رودبادهای قوی دیده می‌شود. این الگوها بیشترین تأثیر را در ایجاد رویدادهای سرد داشته‌اند. همچنین در خوشه‌های دو و پنج رودباد به‌صورت محدود و نسبتاً ضعیف وجود دارد. در دو خوشه سه و شش نیز رودباد قوی دیده نمی‌شود (شکل ۴).



شکل ۴- خوشه‌های باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال (ارقام بر حسب متربرثانیه؛ الف خوشه یک، ب خوشه دو، پ خوشه سه، ت خوشه چهار، ث خوشه پنج، ج خوشه شش

Fig. 4. Clusters of wind speed at the 300 hectopascal level ($m \cdot s^{-1}$); (a) Cluster one, (b) Cluster two, (c) Cluster three, (d) Cluster four, (e) Cluster five & (f) Cluster six

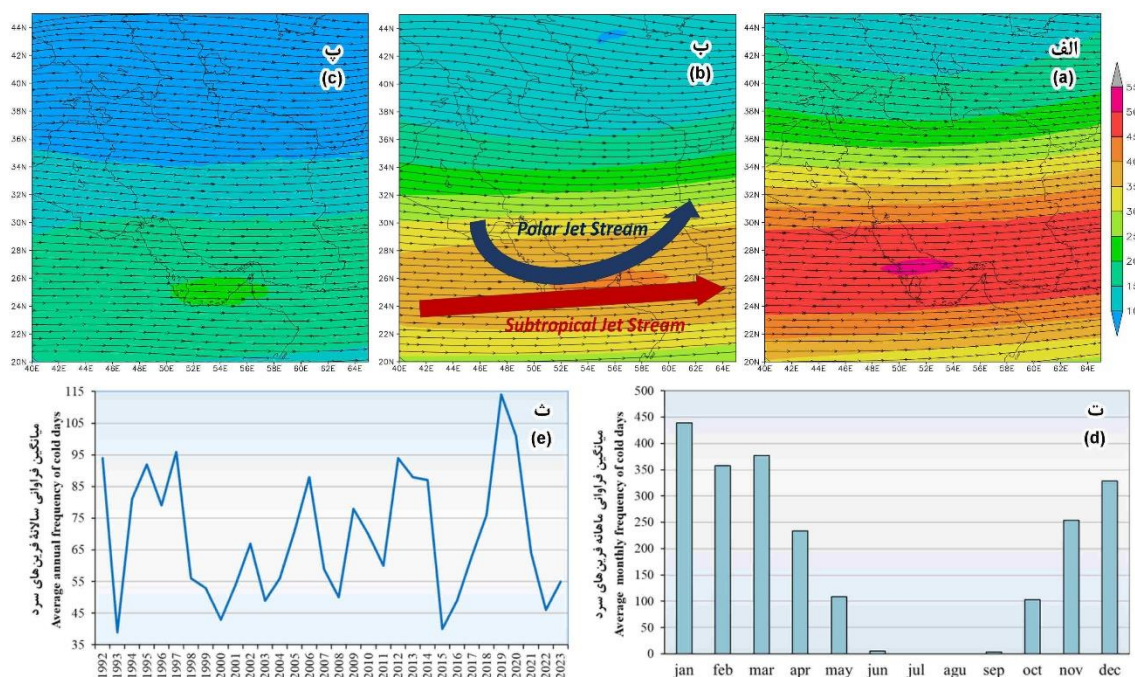
نتایج فراوانی روزهای فرین سرد در بین ایستگاه‌های مورد بررسی در هر خوشه (جدول ۱) حاکی از آن است که الگوهای شماره یک و چهار بیشترین تأثیر را در ایجاد فرین‌های سرد داشته‌اند. وجود رودباد قوی با هسته بیش از ۴۰ متربرثانیه در نیمه جنوبی کشور ویژگی مهم الگوهایی است که با بیشترین فراوانی فرین‌های سرد همراه بوده‌اند. الگوهای شماره دو و پنج درصد کمی از رویدادهای سرد را به خود اختصاص داده‌اند. در الگوهای شماره سه و شش، فراوانی فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مختلف نزدیک به صفر بوده که نشان‌دهنده شرایط نامساعد برای وقوع رخداد فرین سرد است.

جدول ۱- درصد فراوانی رویدادهای فرین سرد در خوشه‌های شش‌گانه

Table 1- Percentage frequency of extreme cold events for six clusters

شماره خوشه cluster number	1	2	3	4	5	6
میانگین درصد فراوانی فرین‌های سرد در ایران Average of percentage frequency of extreme cold events in Iran	45	14	0	36	5	0

الگوی شماره یک ۴۵ درصد از میانگین فراوانی فرین‌های سرد را بین ایستگاه‌های کشور به خود اختصاص داده است. در این دسته رودباد قوی در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با سرعت ۴۰ متربرثانیه در نیمه جنوبی کشور دیده می‌شود. طبق این الگو، جو ایران در ناحیه ورودی و خروجی سرد رودباد قرار دارد. مقایسه جریان باد در سه سطح مورد بررسی (شکل ۵، الف، ب و پ) حاکی از تأثیر دو رودباد جبهه قطبی و جنب‌حاره در رخداد‌های فرین سرد در کشور می‌باشد. بیشترین فراوانی این الگو مربوط به ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس بوده است. همچنین این الگو در سال ۲۰۱۹ بیشترین فراوانی را در بازه زمانی ۳۲ ساله داشته است.

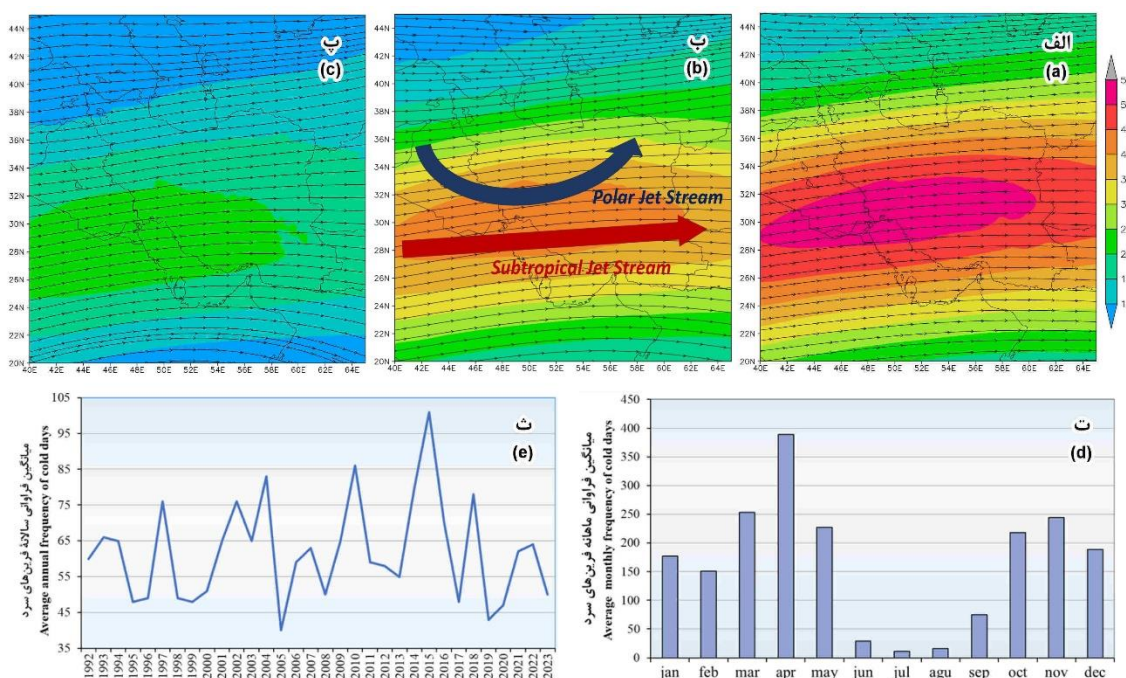


شکل ۵- خوشه یک: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$), ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$), پ) جریان باد تراز

۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$), ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانه فرین‌های سرد در بازه ۳۲ ساله در ایران

Fig. 5. Cluster one: a) Wind of 200-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), b) Wind of 300-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), c) Wind of 500-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), d) Average monthly frequency, and e) Average annual frequency of extreme cold events over a 32-year period in Iran

خوشه چهار در همه ماه‌های سال به جز ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر پرتکرار بوده است (شکل ۶، ت). این الگو در وقوع فرین‌های سرد نقش مهمی داشته است؛ چراکه به‌طور میانگین حدود ۳۶ درصد فراوانی فرین‌های سرد مربوط به این دسته است. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، ناحیه سرد رودباد سراسر ایران به‌ویژه نواحی مرکزی و شمالی را تحت تأثیر قرار داده است. هسته رودباد در ترازهای ۲۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال در نواحی مرکزی و نیمه جنوبی کشور قرار دارد (شکل ۶، الف، ب، پ). همانند الگوی شماره یک، با توجه به وجود جریان باد قوی در هر سه سطح می‌توان نتیجه گرفت که ادغام رودباد جبهه قطبی و جنب‌حاره سبب ایجاد شرایط مساعد برای فرارفت هوای سرد به کشور شده است. فراوانی این الگوها در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه بیشتر بوده است. برخلاف الگوی شماره یک، فراوانی این دسته در بازه زمانی ۳۲ ساله روندی کاهشی دارد. در این دسته، از بین ایستگاه‌های مورد بررسی در کشور که فراوانی قابل توجه فرین‌های سرد را داشته‌اند، ایستگاه‌های واقع در نوار شمالی کشور شامل رشت، بابلسر و سمنان بیشترین فراوانی فرین‌ها را به‌خود اختصاص داده‌اند.

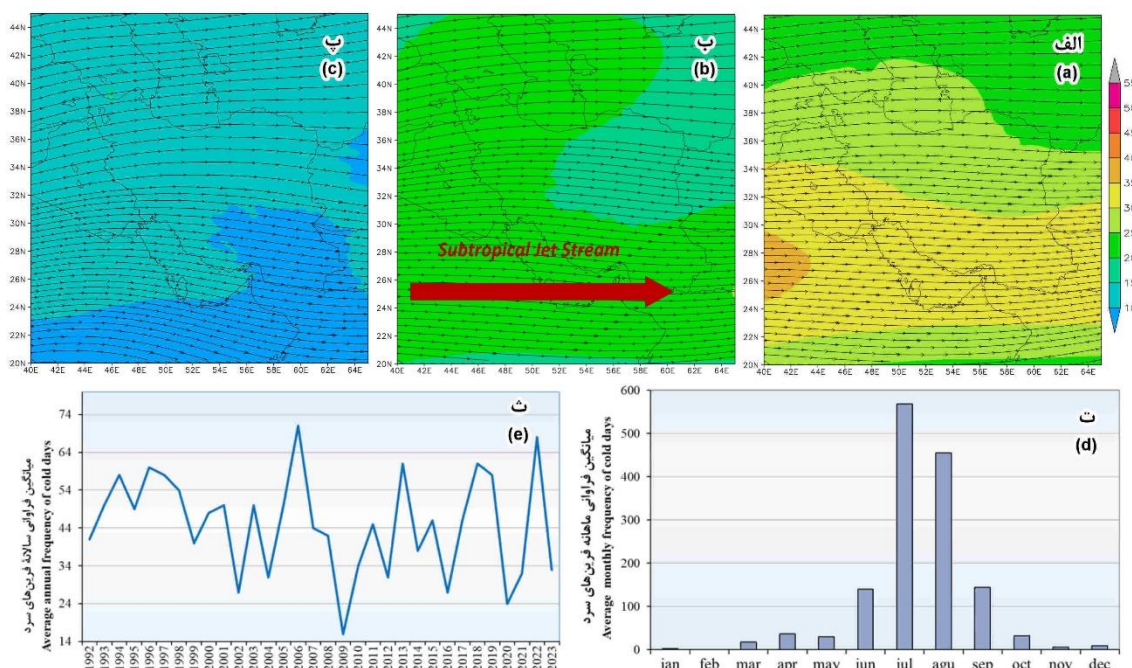


شکل ۶- خوشه چهار: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانه فرین‌های سرد در بازه ۳۲ ساله در ایران

Fig. 6. Cluster four: a) Wind of 200-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), b) Wind of 300-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), c) Wind of 500-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), d) Average monthly frequency, and e) Average annual frequency of extreme cold events over a 32-year period in Iran

الگوی شماره دو از نظر اهمیت فراوانی وقوع فرین‌های سرد در سطح کشور در بین شش دسته، در رده سوم قرار دارد. در این دسته به جز رودباد ضعیف جنب‌حاره تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در نیمه جنوبی ایران، در سایر ترازها رودباد دیده نمی‌شود (شکل ۷، الف، ب و پ). این شرایط نشان‌دهنده نبود انرژی جنبشی قابل توجه در لایه‌های بالایی و ردسپهر است. این الگو در ماه‌های مارس، آوریل و می پرتکرار بوده است (شکل ۷، ت).

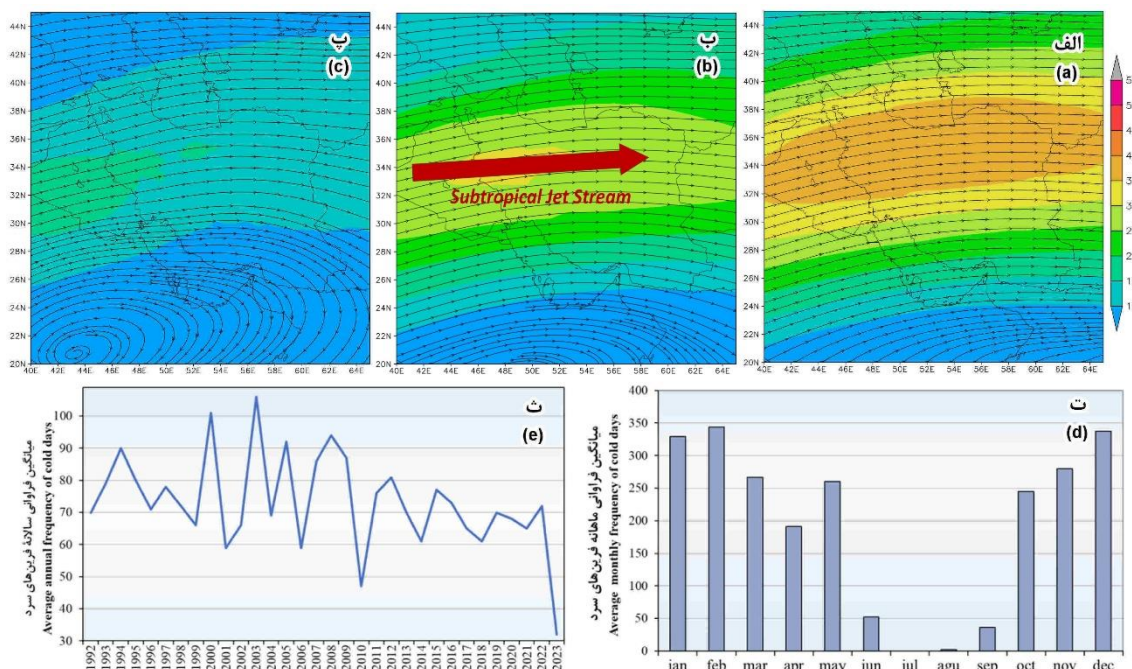
الگوی شماره پنج، در پنج درصد از رویدادهای فرین سرد در کشور تأثیر داشته است. این الگو به‌طور غالب در ماه‌های می، ژوئن، سپتامبر و اکتبر رخ داده است که ماه‌های انتقالی بین فصل‌های سرد و گرم محسوب می‌شوند. در این الگو رودباد جنب‌حاره در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸، الف) با بیشینه سرعت ۳۵ تا ۴۰ متربرثانیه به‌صورت نواری از عراق تا شمال شرق ایران کشیده شده است. در حوالی عرض جغرافیایی ۲۲ درجه شمالی گردش و اچرخندی پراارتفاع جنب‌حاره کاملاً مشخص است. این گردش در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال گستردگی بیشتری دارد. این شرایط با توجه به فصل، نشان‌دهنده جابجایی تدریجی رودباد و پراارتفاع جنب‌حاره است.



شکل ۷- خوشه دو: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، پ) جریان باد

تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانه فرین‌های سرد در بازه ۳۲ ساله در ایران

Fig. 7. Cluster two: a) Wind of 200-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), b) Wind of 300-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), c) Wind of 500-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), d) Average monthly frequency, and e) Average annual frequency of extreme cold events over a 32-year period in Iran

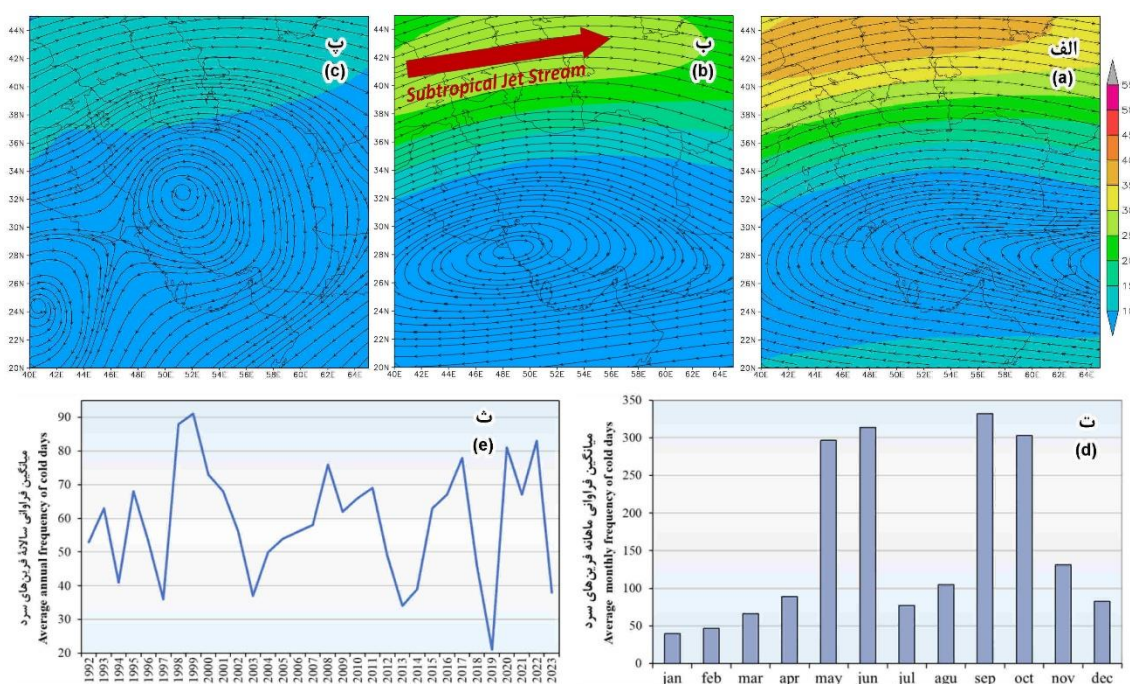


شکل ۸- خوشه پنج: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، پ) جریان باد

تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانه فرین‌های سرد در بازه ۳۲ ساله در ایران

Fig. 8. Cluster five: a) Wind of 200-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), b) Wind of 300-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), c) Wind of 500-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), d) Average monthly frequency, and e) Average annual frequency of extreme cold events over a 32-year period in Iran

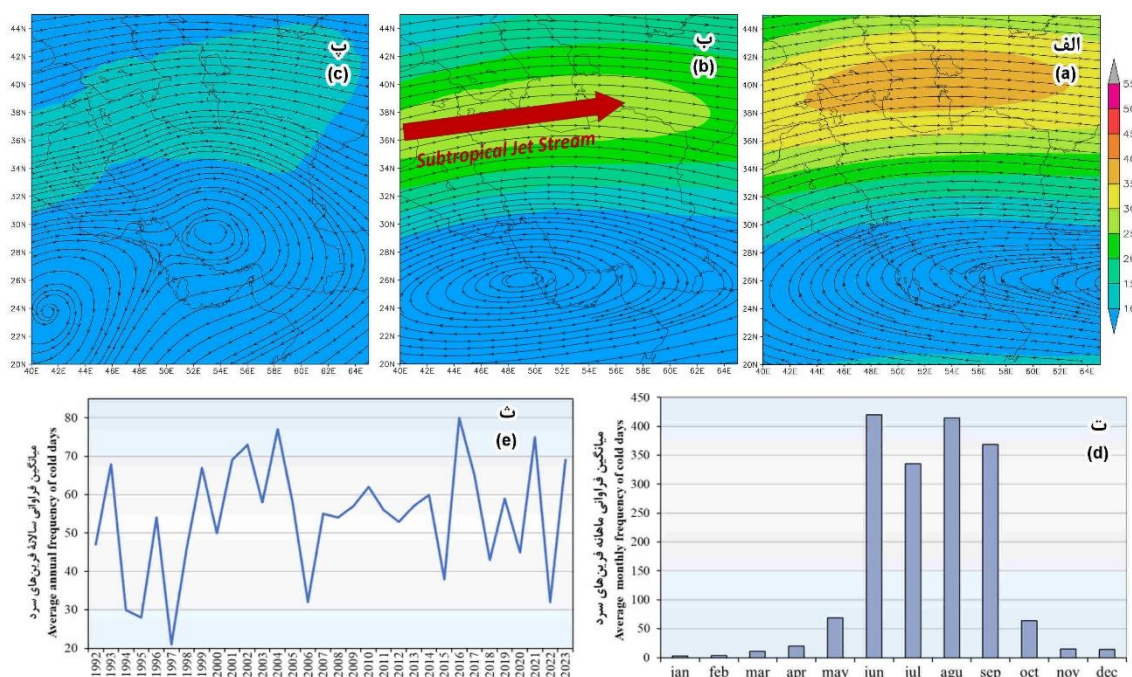
تاریخ‌های خوشه سه غالباً مربوط به ماه‌های ژوئیه و اوت، و فراوانی فرین‌های سرد در این خوشه نزدیک به صفر درصد بوده است. بنابراین این خوشه نقشی در رخداد‌های فرین سرد کشور ندارد. جریان باد در هر سه تراز بالایی وردسپهر (شکل ۹، الف، ب و پ)، حرکت و اچرخندی ناشی از حاکمیت پراتفعا جنب‌حاره را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین رودباد جنب‌حاره که هسته آن در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال قرار دارد، در عرض‌های شمالی منطقه مورد بررسی دیده می‌شود. الگوی شماره شش که در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر بیشترین فراوانی را به خود اختصاص می‌دهد، همانند الگوی شماره سه نقشی در رخداد‌های فرین سرد ایران ندارد. در این دسته، در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال رودباد دیده نمی‌شود و تنها جریان بادی با سرعت بین ۲۵ تا ۳۰ متربرثانیه در نواحی شمالی ایران رخ می‌دهد (شکل ۱۰، ب).



شکل ۹- خوشه سه: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانه فرین‌های سرد در بازه ۳۲ ساله در ایران

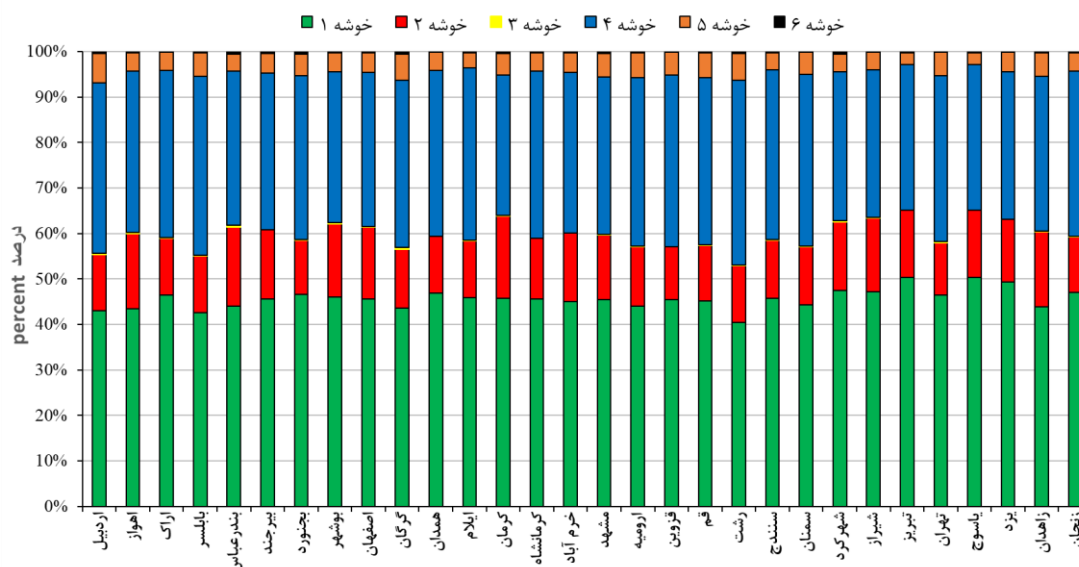
Fig. 9. Cluster three: a) Wind of 200-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), b) Wind of 300-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), c) Wind of 500-hpa level ($m \cdot s^{-1}$), d) Average monthly frequency, and e) Average annual frequency of extreme cold events over a 32-year period in Iran

الگوهای شماره یک و چهار بیش از ۷۰ درصد فراوانی فرین‌های سرد را در ایستگاه‌های مورد بررسی به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۱۱). در این دو دسته، بررسی الگوی باد در ترازهای بالایی وردسپهر حاکی از جریان باد قوی است که حاصل ادغام دو رودباد جبهه قطبی و جنب‌حاره می‌باشد. این شرایط سبب ریزش هوای سرد و ماندگاری آن در ایران می‌شود.



شکل ۱۰- خوشه شش: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانه فرین‌های سرد در بازه ۳۲ ساله در ایران

Fig. 10. Cluster six: a) Wind of 200-hpa level ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), b) Wind of 300-hpa level ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), c) Wind of 500-hpa level ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), d) Average monthly frequency, and e) Average annual frequency of extreme cold events over a 32-year period in Iran



شکل ۱۱- درصد فراوانی رویدادهای فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مورد بررسی در بازه زمانی ۳۲ سال برای هر خوشه

Fig. 11. Percentage frequency of extreme cold events in the stations over the period of 32 years for each cluster

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای بررسی ارتباط بین فرین‌های دمایی سرد و رودادهای تراز بالایی وردسپهر در ایران، داده‌های باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با به‌کارگیری شبکه‌ی عصبی خودسامان‌دهنده در قالب شش الگو خوشه‌بندی شدند. بر پایه‌ی نتایج بررسی آماری، با توجه به روند افزایشی میانگین دمای هوای کشور بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳ و در راستای پدیده‌ی گرمایش جهانی و افزایش دمای کره‌ی زمین، میانگین فراوانی رویدادهای فرین سرد در کشور کاهش یافته است، که قابل انتظار بود. از دیدگاه سینوپتیکی، همان‌طور که پارک و همکاران (Park et al., 2020) نیز نشان دادند، آرایش الگوهای تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با رویدادهای فرین سرد مرتبط است. نتایج بررسی الگوهای حاصل از خوشه‌بندی و فراوانی رویدادهای فرین در این تحقیق، همسو با مطالعات ژو و همکاران (Zhou et al., 2022)، خیمنز-استیو و دومایسن (Jimenez-Estevé & Domeisen, 2022) و پرز و همکاران (Perez et al., 2021) نشان داد که وجود رودباد از عوامل مهم در بروز دماهای فرین سرد در ایران است و به‌طور خاص حضور رودباد قوی در نیمه‌ی جنوبی کشور، که موجب قرارگیری جو ایران در قسمت سرد رودباد می‌شود، شرایط را برای نفوذ هوای سرد فراهم می‌کند. نتایج بررسی الگوهای جریان باد در سه سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، همانند مطالعه‌ی روسی و همکاران (Rousi et al., 2022)، حاکی از تأثیر دو رودباد جب-هه‌ی قطبی و جنب‌حاره در رویداد فرین دمایی می‌باشد. رودباد قوی با هسته‌ی بیش از ۴۰ متربرثانیه در نیمه‌ی جنوبی ایران از ویژگی‌های بارز الگوهای شماره‌ی یک و چهار به‌ترتیب با ۴۵ و ۳۶ درصد میانگین فراوانی فرین‌های سرد است. این الگو حاصل ادغام رودادهای جنب‌حاره و جبهه‌ی قطبی است که هسته‌ی آن غالباً در نیمه‌ی جنوبی کشور قرار دارد.

بیشترین فراوانی دسته‌ی شماره‌ی یک در ماه‌های سرد سال شامل ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس، و دسته‌ی شماره‌ی چهار در ماه‌های سرد و معتدل (همه‌ی ماه‌های سال به‌جز ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر) رخ داده است. در الگوی شماره‌ی دو که رودباد ضعیف جنب‌حاره در نیمه‌ی جنوبی ایران قرار دارد، حدود ۱۴ درصد از رخداد فرین‌های سرد اتفاق افتاده است. این الگو در اواخر زمستان و اوایل بهار (ماه‌های مارس، آوریل و می) پرتکرارتر بوده است. همچنین در الگوی شماره‌ی پنج (با پنج درصد از فراوانی کل رویدادهای سرد) که اغلب در ماه‌های اعتدالی رخ داده است، رودباد نسبتاً ضعیفی در نوار مرکزی کشور از غرب به شرق جریان دارد. در دو الگوی دیگر (شماره‌های سه و شش) که فراوانی فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مختلف تقریباً صفر بوده است، جریان رودباد در جو ایران وجود نداشته است و تنها رودباد جنب‌حاره در عرض‌های شمالی منطقه خارج از جو ایران دیده می‌شود. وجود رودباد قوی حاصل از ادغام دو رودباد جنب‌حاره و جبهه‌ی قطبی در نیمه‌ی جنوبی ایران از عوامل مهم رخداد فرین‌های سرد است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، مطالعه‌ی تغییرات رودباد با توجه به گرمایش جهانی و ارتباط آن با رویدادهای فرین سرد به‌صورت مطالعه‌ی موردی در نقاط مختلف ایران پیشنهاد می‌شود.

References

- Adams, R. E., Lee, C. C., Smith, E. T., & Sheridan, S. C. (2021). The relationship between atmospheric circulation patterns and extreme temperature events in North America, *International Journal of Climatology*, 41(1), 92-103. <https://doi.org/10.1002/joc.6610>
- Asakereh, H., & Shahbaee Kotenaee, A. (2018). Synoptic Analysis of Productive Patterns of Winter Cold Waves in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(3), 109-124. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v6i3.59919>
- Di Capua, G., Sparrow, S., Kornhuber, K., Rousi, E., Osprey, S., Wallom, D., ... & Coumou, D. (2021). Drivers behind the summer 2010 wave train leading to Russian heatwave and Pakistan flooding. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 4(1), 55. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00211-9>
- Ehsan, M. A., Nicolì, D., Kucharski, F., Almazroui, M., Tippett, M. K., Bellucci, A., ... & Kang, I. S. (2020). Atlantic Ocean influence on Middle East summer surface air temperature. *NPJ Climate and Atmospheric Science*

- Science*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0109-1>
- Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khoorani, A., & Li, J. (2019). Evaluation of land degradation trend using satellite imagery and climatic data (Case study: Fars province). *Desert Ecosystem Engineering*, 8(24), 49-64. [in Persian] <https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.24.35>
- Hewitson, B. C., & Crane, R. G. (2002). Self-organizing maps: applications to synoptic climatology. *Climate Research*, 22(1), 13-26. <https://doi.org/10.3354/cr022013>
- Jiménez-Esteve, B., & Domeisen, D. I. V. (2022). The role of atmospheric dynamics and large-scale topography in driving heatwaves. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(746), 2344-2367. <https://doi.org/10.1002/qj.4306>
- Kavyani, M., & Alijani, B. (2019). *The Foundations of Climatology*. 21st Edn. Tehran: SAMT. [in Persian]
- Kornhuber, K., Coumou, D., Vogel, E., Lesk, C., Donges, J. F., Lehmann, J., & Horton, R. M. (2020). Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nature Climate Change*, 10(1), 48-53. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0637-z>
- Liu, X., Xu, Z., Peng, D., & Wu, G. (2018). Influences of the North Atlantic Oscillation on extreme temperature during the cold period in China. *International Journal of Climatology*, 39(1), 43-49. <https://doi.org/10.1002/joc.5779>
- Nygard, T., Papritz, L., Naakka, T., & Vihma, T. (2023). Cold wintertime air masses over Europe: where do they come from and how do they form? *Weather and Climate Dynamics*, 4, 943-961. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-943-2023>
- Park, T. W., Hong, J. G., & Park, D. S. R. (2020). Intra-seasonal characteristics of wintertime extreme cold events over South Korea. *International Journal of Climatology*, 40(5), 2639-2658. <https://doi.org/10.1002/joc.6356>
- Pazhoh, F. (2020). Identification of the effective jet stream patterns in the heavy Precipitation of the cold season in the southern half of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7(1), 177-196. [in Persian] <https://doi.org/10.29252/jsaeh.7.1.12>
- Perez, E., Ryan, S., Andres, M., Gawarkiewicz, G., Ummenhofer, C. C., Bane, J., & Haines, S. (2021). Understanding physical drivers of the 2015/16 marine heatwaves in the Northwest Atlantic. *Scientific Reports*, 11(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97012-0>
- Ratna, S. B., Osborn, T. J., Joshi, M., & Luterbacher, J. (2020). The influence of Atlantic variability on Asian summer climate is sensitive to the pattern of the sea surface temperature anomaly. *Journal of Climate*, 33(17), 7567-7590. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0039.1>
- Rousi, E., Kornhuber, K., Beobide-Arsuaga, G., Luo, F., & Coumou, D. (2022). Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent doublejets over Eurasia. *Nature Communications*, 13, 3851. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>
- Saligheh, M. (2017). *Synoptic Climatology of Iran*. 2nd Edn. Tehran: SAMT. [in Persian]
- Sepadeh, D., Salahi, B., Alijani, B., & Zeynali, B. (2021). A study of the effect of the polar Jet stream on the precipitation of the cold season in Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 4(3), 178-192. [in Persian] https://www.ims-jmas.net/article_161011.html
- Shaw, T. A., & Miyawaki, O. (2024). Fast upper-level jet stream winds get faster under climate change. *Nature Climate Change*, 14, 61-67. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01884-1>
- Sheridan, S. C., & Lee, C. C. (2011). The self-organizing map in synoptic climatological research. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 35(1), 109-119. <https://doi.org/10.1177/0309133310397582>
- Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D., & Woollings, T. (2021). The jet stream and climate change. In *Climate change* (pp. 327-357). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00015-3>
- Trevisiol, A., Gilli, L., & Faggian, P. (2022). Short and long-term projections of Rossby wave packets and blocking events with particular attention to the northern hemisphere. *Global and Planetary Change*, 209, 103750. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103750>
- Tuel, A., & Martius, O. (2024). Persistent warm and cold spells in the Northern Hemisphere extratropics:

- regionalisation, synoptic-scale dynamics and temperature budget. *Weather and Climate Dynamics*, 5(1), 263-292. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-263-2024>
- Zenozi Alamdari, N., Sobhani, B., Islahi, M., & Mohammadi, M. (2025). Evaluating the consequences of climate change on the trend of extreme events and its impact on the phenology of almond trees, a case study: East Azarbaijan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(12), 2351-2371. [in Persian] <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375011.669697>
- Zhou, Y., Yuan, J., Wen, Z., Huang, S., Chen, X., Guo, Y., & Lin, Q. (2022). The impacts of the East Asian subtropical westerly jet on weather extremes over China in early and late summer. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15(5), 100212. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2022.100212>