



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Analysis of the structural and dynamic nature of the atmosphere during the heavy snow event in Iran from January 29 to February 3, 2017, and its hazards

Tahmine Chehreara Ziabari¹ | Mehdi Asadi^{2*} | Hasan Haji-Mohammadi³ | Karim Amininia⁴

1. Climatology, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: T.chehreara@pnu.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Geography Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran. Email: Asadi.M@cfu.ac.ir

3. Department of natural Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: has.mohamadi7@gmail.com

4. Department of Geography, Faculty of Humanities, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran. Email: karimaminini@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 01 December 2024
Revised 14 January 2025
Accepted 18 January 2025
Published 25 January 2025

Keywords:
Polar vortex,
vorticity gradient,
leeward cyclone,
Hazards

ABSTRACT

The mechanism governing heavy snowfall is complex and follows physical and dynamic laws. To investigate the structure of the atmosphere during heavy and widespread snowfall in Iran between January 29 and February 3, 2017, Era-Interim gridded data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) with a resolution of 0.125 degrees and data from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) were used. The atmospheric circulation showed deep anomalies in the polar vortex and its southward expansion to the center of the Middle East and most parts of the country, accompanied by an increase in potential vorticity and strengthening of updrafts. In this process, the formation of positive anomalies in the subpolar regions between eastern and northeastern Europe has strengthened the atmospheric cold chain. On the other hand, the anomalous formation of the polar vortex and the creation of a meridional potential vorticity gradient has been accompanied by the southward flow of this quantity, causing the formation of two cold trough cores, one over the northern half and the other over the southern half of Iran. The pressure pattern indicates the formation of extremely dynamic high pressure in the windward part of the Zagros Mountains, which has caused a windbreak on the opposite side and in the leeward part of this mountain. The analysis of omega values showed that the main currents in the vertical profile of the atmosphere in the windward parts of the Zagros Mountains were descending, while in the leeward areas, the speed of the upward currents continued to the upper troposphere.

Cite this article: Chehreara Ziabari, T.; Asadi, M.; Haji-Mohammadi, H. & Amininia, K. (2025). Analysis of the structural and dynamic nature of the atmosphere during the heavy snow event in Iran from January 29 to February 3, 2017, and its hazards. *Environmental Hazards Management*, 11 (4), 273-288. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.386292.855>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.386292.855>

1. Introduction

Heavy snowfall events during the cold season are of great importance in terms of the amount of snow and the length of its duration for surface and groundwater resources, agriculture, etc. Still, on the other hand, they lead to many problems and damage [3]. The extent of events caused by heavy snowfall has consequences in various sectors, including destroying buildings and facilities and disruptions in transportation, agriculture, industry, and energy and fuel distribution [6]. Therefore, by identifying and being aware of atmospheric circulation patterns at the synoptic scale, the intensity, continuity, and

frequency of climatic parameters, including snowfall, can be analyzed and investigated; it can also play an important and effective role in crisis management. The general circulation of the atmosphere exhibits various patterns over time and space. However, extreme changes in atmospheric factors have disrupted these patterns, resulting in temperature changes, humidity, pressure, and Global precipitation across various regions. One of these changes can be in the characteristics of snowfall in snow catchment areas. Improving our understanding of the mechanisms behind these events on synoptic and intermediate scales is crucial for enhancing the nation's meteorological knowledge and short-term weather forecasting. The factors driving heavy rainfall vary by region and must be identified based on each area's climate [5]. In Iran, extratropical patterns during the cold season introduce chaotic weather, including frost and rain from cold, moist air masses. Snowfall plays a crucial environmental role, impacting the ecosystem differently than other forms of precipitation. Heavy snowfall during winter is essential for surface and underground water resources and agriculture, but it also causes various problems and damage.

2. Materials and methods

We first obtained snowfall statistics from the Iranian Meteorological Organization to investigate the weather conditions that caused heavy snowfalls in Iran from January 29 to February 3, 2017. Since the snow height data were not accurate enough, the snow height output was prepared using ERA-Interim gridded data with a resolution of 0.125 geographic degrees for the desired period. In the following, to investigate and analyze the synoptic and dynamic conditions of the days with heavy snowfall, we referred to the website of the National Center for Environmental Prediction/Atmospheric Sciences (NCEP/NCAR) to obtain daily data on surface pressure (SLP), geopotential height (Hgt), zonal wind components (Uwnd), meridional wind (Vwnd), air temperature (Air), vertical velocity (Omega), and tropopause pressure at the intersection of 2.5 x 2.5 degrees, and the corresponding maps were drawn and analyzed.

3. Discussion and results

Investigations revealed that the heavy snowfall in Iran during the specified period resulted from large-scale interactions, with a significant influence from the upper and middle atmospheric levels. Consequently, efforts were made to analyze outputs across various atmospheric levels.

3.1. Investigation of geopotential height and level of 500 hectopascals

The January 29, 2017 surface map at 500 hectopascals shows meridional winds from latitude 30 and north, with a ridge axis dominating Europe, alongside blocking omega, negative vorticity, and convergence in the region, exhibiting vorticity strengths between -4 and -10 per second.

3.2. Investigating the geopotential height anomaly and the state of the polar wave at 500 hectopascals

According to the pattern of the polar ice anomaly maps, during late January and early February 2017, the polar ice of the Northern Hemisphere broke up. One of the vorticity cells is active over Eurasia, with a low-pressure center over the Caspian Sea; it is located in the Caucasus Mountains and northwest of Iran.

3.3. The state of wind speed is 500 hectopascals, and the potential temperature is 320 degrees Kelvin

In the wind speed map at the level of 500 hectopascals on January 29, there is a strong high pressure over Europe, which has caused cold and dry air to flow into Iran, especially in the north and northwest.

3.4. Examining the status of the vertical profile of omega values

A vertical profile prepared along the middle latitude of 34°N from January 29 to February 3, 2017, for days with snowfall in Iran, shows that on January 29, air rises over the Hindu Kush highlands and descends over the eastern Mediterranean and the Zagros Mountain range.

4. Conclusion

The polar vortex's strong anomaly and subsequent breakup have impacted the region's atmosphere under current conditions. With the breaking of the polar ice sheet, which formed two very strong ridges, one over Europe and the other over the North Pacific Ocean, the representative ice sheet

stretched to 35 degrees north latitude. With its penetration into the region, the cold weather and the resulting instability have dominated the area. Investigations showed that the occurrence of heavy snow in Iran is the result of the interaction between polar convection and the increase in potential convection.

Reference

1. Bazgeer, S. , Mohammadi, H. , Sharifi, L. , & Soleimani, N. (2016). The Analysis of Frost and Chilling Hazards on Horticultural Crops in West Azerbaijan. *Environmental Management Hazards*, 3(4), 365-378.
2. Rahimi, A. , Borna, R. , Morshedi, J. , & Ghorbanian, J. (2019). The Vulnerability of Infrastructure of the Southern Regions of Khuzestan Province in Climate Change Conditions. *Environmental Management Hazards*, 6(4), 361-376.
3. Khansalari, S. , & Mohammadi, S. A. (2023). Projection of extreme precipitation over Iran based on the ensemble approach of CMIP6 models in the near future (2026-2050) with rank-based weighting. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 727-746.



تحلیل ماهیت ساختاری و دینامیکی جو در رخداد برف سنگین ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷ ایران و مخاطرات آن

تهمینه چهره‌آرا ضیابری^۱ | مهدی اسدی^{۲*} | حسن حاجی‌محمدی^۳ | کریم امینی‌نیا^۴

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، ایران. رایانامه: T.chehrehara@pnu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران. رایانامه: Asadi.m@cfu.ac.ir
۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: has.mohamadi7@gmail.com
۴. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران. رایانامه: karimaminini@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش از داده‌های شبکه‌بندی‌شده Era-interim وابسته به مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جو اروپا (ECMWF) با توان تفکیک ۰/۱۲۵ درجه جغرافیایی و داده‌های مرکز پیش‌بینی محیطی/علوم جو (NCEP/NCAR) برای بررسی ساختار جو در رخداد بارش برف سنگین و فراگیر ایران بین ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷ استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داد که در دامنه زمانی یادشده بیش از ۵۰ درصد گستره ایران زیر پوشش برف بوده است. گردش جو، نشان از ناهنجاری‌های عمیق در تاوه قطبی و گسترش جنوب‌سوی آن به مرکز خاورمیانه و بیشتر مناطق کشور دارد که این جریان با افزایش تاوایی پتانسیل و تقویت جریان‌های بالاسو همراه بوده است. در این فرایند، تشکیل ناهنجاری‌های مثبت در مناطق جنب قطبی در حد فاصل شرق و شمال شرق اروپا، سبب تقویت سردچال‌های جو شده است. از طرفی، ناهنجار شدن تاوه قطبی و ردسپهری و ایجاد گرادیان تاوایی پتانسیل به‌صورت نصف‌النهاری، با شارش جنوب‌سوی این کمیت همراه شده و سبب تشکیل دو هسته سردچال، یکی روی نیمه شمالی و دیگری در نیمه جنوبی ایران شد. الگوی فشار گویای شکل‌گیری پرفشار دینامیکی بسیار قوی در قسمت رو به باد کوهستان زاگرس است که در ضلع مقابل آن و در بادپناه این کوهستان سبب تشکیل چرخندی بادپناهی شده است. بررسی مقادیر امگا نشان داد که بیشتر جریان‌ها در نیمرخ قائم جو در قسمت‌های رو به باد کوهستان زاگرس نزولی بوده و در مناطق بادپناه سرعت جریان‌های بالاسو تا وردسپهر فوقانی ادامه داشته است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

تاوه قطبی،

چرخند بادپناهی،

سردچال،

گرادیان تاوایی،

مخاطرات.

استناد: چهره‌آرا ضیابری، تهمینه؛ اسدی، مهدی؛ حاجی‌محمدی، حسن و امینی‌نیا، کریم (۱۴۰۳). تحلیل ماهیت ساختاری و دینامیکی جو در رخداد برف سنگین ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷ ایران و مخاطرات آن. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۱ (۴)، ۲۷۳-۲۸۸.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.386292.855>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.386292.855>



۱. مقدمه

رخداد برف سنگین در دوره سرد سال، از نظر مقدار برف و طول دوره ماندگاری اهمیت زیادی در زمینه منابع آب سطحی و زیرزمینی، کشاورزی و ... دارد، اما از طرف دیگر سبب بروز مشکلات و خسارات بسیاری می‌شود [۳]. وسعت رویدادهای ناشی از بارش برف سنگین پیامدهایی در بخش‌های مختلف از جمله تخریب ساختمان‌ها و تأسیسات و ایجاد اختلال در امور حمل‌ونقل، کشاورزی، صنعت و توزیع انرژی و سوخت دارد [۶]؛ بنابراین با شناسایی و آگاهی از الگوهای گردش جوی در مقیاس هم‌مدید می‌توان شدت، تداوم و فراوانی پارامترهای اقلیمی از جمله بارش برف را تحلیل و بررسی کرد؛ این کار اثر مهمی در مدیریت بحران نیز دارد. گردش عمومی جو از نظر زمانی و مکانی الگوهای متنوعی دارد؛ اما تغییرات شدید در عوامل و عناصر جوی سبب ناهنجاری‌هایی در این الگوها شده و تغییراتی در رژیم دما، رطوبت، فشار و بارش‌های مناطق مختلف کره زمین به وجود آورده است. یکی از این تغییرات تأثیر بر ویژگی‌های ریزش برف در مناطق برفگیر است. بنابراین درک بهتر و جزئی‌تر سازوکارهایی که در مقیاس هم‌مدیدی و میانی موجب این رویدادها می‌شوند، از نظر ارتقای دانش هواشناسی کشور و بهبود پیش‌بینی کوتاه‌مدت وضع هوا از اهمیت بسزایی برخوردار است. عوامل اصلی مسبب بارش سنگین در هر منطقه، متناسب با اقلیم آن، متفاوت است و به شناسایی نیاز دارد [۵]. اقلیم ایران تحت تأثیر سامانه‌های جوی متنوعی قرار دارد که شامل سامانه‌های فشار، جبهه‌های هوایی و الگوهای جریان‌های جوی است. به‌خصوص در فصل‌های مختلف سال، تعامل بین سیستم‌های پرفشار و کم‌فشار، مانند سیستم‌های پرفشار سیبری و رطوبت دریای خزر، تأثیر عمیقی بر دما و بارش در مناطق مختلف کشور دارد. ورود امواج بادهای غربی و ناپایداری با پاییز و دوره سرد در ایران همراه است و پژوهش درباره تغییر در اقلیم ایران با الگوهای سینوپتیکی دوره سرد و نقش کمتر پدیده‌های سطحی و تابش، اهمیت و ضرورت دارد [۱]. اقلیم ایران در دوره سرد سال تحت تأثیر الگوهای برون حاره قرار دارد که این الگو با توده‌های سرد و مرطوب، اغتشاش، یخبندان و بارش را برای ایران به همراه دارد. بارش برف رخداد محیطی بسیار مهمی تلقی می‌شود و اثرهای متفاوتی نسبت به بقیه بارش‌ها بر محیط زیست بر جای می‌گذارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش ناگهانی دمای هوا در منطقه اوراسیا و فرارفت سرد حاصل از ورود جریان‌های شمالی به منطقه که برهم‌کنشی بین تاوه قطبی و منطقه اوراسیا است، سبب رخداد برف سنگین در اغلب مناطق یادشده می‌شود [۳۳، ۲۶، ۲۵]. سرمایه‌ش به‌وجود آمده در این منطقه در دوره سرد سال اثر مستقیم بر تغییرپذیری سرعت و خمیدگی جریان جت دارد [۳۱] که این وضعیت با افزایش فرین‌های جوی در منطقه سبب اختلال در فعالیت جوامع بشری می‌شود [۱۵]. از طرفی پیش‌بینی کوتاه‌مدت و میان‌مدت این شرایط در مقیاس منطقه‌ای و هم‌مدید براساس کمیت‌های دینامیکی و استفاده از تاوایی پتانسیل، موضوع مهمی به شمار می‌رود [۳۴، ۳۳، ۱۸، ۱۵]. برای پیش‌بینی‌های دقیق در این زمینه باید سازوکار سامانه‌های بندالی و موقعیت^۱ NAO و AO را نیز در نظر گرفت تا بهترین و دقیق‌ترین پیش‌بینی‌ها در زمینه بارش برف سنگین در منطقه صورت گیرد [۲۸، ۳۰، ۲۲، ۱۷، ۱۶].

۲. پیشینه پژوهش

با وقوع مداوم رویدادهای طبیعی مخاطره‌آمیز در دوره‌های زمانی مختلف، همواره رویکردهای جدیدی در مسیر مدیریت مخاطرات طبیعی و اتخاذ روش‌های کاهش خسارات ناشی از آنها در جوامع بشری توسعه پیدا کرده [۲] و در نتیجه تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گرفته است. کانو و همکاران (۲۰۲۵) در ساحل دریای اوخوتسک به بررسی ویژگی‌های سینوپتیکی و میان‌مقیاس رویداد تجمع برف سنگین در ۲۲ تا ۲۳ دسامبر ۲۰۲۲ پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان داد که ترکیبی از گردش‌های هم‌مدیدی و میکروفیزیکی ابر، اثر مهمی در وقوع تجمع برف مرطوب سنگین دارد [۲۳]. سون و همکاران (۲۰۲۴) در ارزیابی روند کاهشی میانگین بارش برف سنگین در کوهستان‌های مرتفع آسیا دریافتند که بارش شدید برف در منطقه کوهستانی اغلب تحت تأثیر شاخص نوسان جنوبی است [۲۹]. یائو و همکاران (۲۰۲۳) براساس تاوایی پتانسیل و شارش آن به بررسی رویدادهای سرد همراه با بارش برف در آمریکای شمالی پرداختند و نتیجه گرفتند که گرادیان نصف‌النهاری تاوایی

پتانسیل بین منطقه اوراسیا و آمریکای شمالی بر گردش جو منطقه تأثیر گذاشته و با ایجاد یک موج قوی و ماندگار در منطقه سبب رخداد توفان برف سنگین در منطقه شده است [۳۲]. اسیز و آکار (۲۰۲۳) با تحلیل همدید برف سنگین در سال ۲۰۰۴ در ترکیه دریافتند که یک جریان بزرگ مقیاس متأثر از تاوه قطبی و یک جریان محلی - منطقه‌ای همراه با وزش تندبادها با کاهش ناگهانی دما در منطقه سبب کولاک برف در منطقه می‌شود [۲۰]. ونگ و فن (۲۰۲۳) به پیش‌بینی میان‌مدت توفان‌های برف براساس مدل‌های تلفیقی اقلیمی پرداختند. پیش‌بینی‌ها نشان داد که مدل CFSv2 دقت بیشتری برای پیش‌بینی برف سنگین دارد و وضعیت AO و NAO باید به‌صورت یکجا برای پیش‌بینی فصلی نیز ارزیابی شود [۳۰]. نخعی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی سازوکار جوی حاکم بر رخداد برف‌های سنگین استان همدان پرداختند. نتایج نشان داد که در سطوح فوقانی جو چهار الگوی غالب تفکیک‌پذیر است که اثر مهمی در رخداد بارش‌های برف سنگین دارند [۱۴]. حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) نقش تاوه قطبی پوشن سپهری جابه‌جاشده بر بارش برف ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در فاصله ۶ تا ۷ روز پس از اوج جابه‌جایی جنوب‌سوی تاوه قطبی پوشن سپهری در قطاع اروپا، ناهنجاری‌های ناشی از آن به عرض‌های جنب‌حاره‌ای و منطقه مدیترانه نفوذ کرده و در ادامه سبب شکل‌گیری و توسعه سامانه‌های بارش‌زا روی خاورمیانه شده است [۴]. فتاحی و مقیمی (۱۳۹۸) اثر تغییرات اقلیمی بر روند برف شمال غرب ایران را بررسی کردند. بررسی روند تغییرات سطح پوشش برف در استان آذربایجان غربی در ماه ژانویه طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که در این ماه میزان پوشش برفی در استان آذربایجان غربی به‌شدت کاهش یافته و دارای روند منفی است [۹]. قصابی و همکاران (۱۳۹۹) عوامل دینامیکی و همدیدی مؤثر در رخداد بارش سنگین برف در استان تهران را بررسی و تحلیل کردند. بررسی‌ها نشان داد که استقرار جبهه ساکن در جنوب دامنه‌های البرز به‌مدت دو روز سبب بیشینه فعالیت سامانه در بخش‌های جنوبی استان نسبت به ارتفاعات شمال آن شده است [۱۰]. شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) الگوبندی و تحلیل همدید رخدادهای کولاک برف‌های شدید شمال غرب ایران را بررسی کردند. براساس نتایج، پنج الگوی اصلی در ایجاد رخداد کولاک برف شدید در منطقه نقش دارند: الگوی همدیدی ایجادکننده شامل تشکیل یک مرکز کم‌ارتفاع بریده، عبور ناو بلند از ایران، شکل‌گیری ناوه به‌نسبت عمیق و کشیده‌شده شرق مدیترانه، سامانه بندالی از نوع رکس و تشکیل سامانه‌های بندالی امگایی است [۸]. رضایی و همکاران (۱۳۹۹) تحلیل همدیدی - ماهواره‌ای مخاطره‌ای برف سنگین در استان کرمان را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از سنجنده مادیس نشان می‌دهد که روزهای ۱۶ تا ۲۰ ژانویه ۲۰۰۸ و ۷ تا ۱۰ ژانویه ۲۰۱۴ دامنه زمانی حداکثر پوشش برف در سطح استان کرمان است و در این مدت، ضخامت جو و الگوی فشار همبستگی قوی با یکدیگر داشته‌اند [۷]. مرادی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی همدیدی سیلاب سیستان و بلوچستان و برف سنگین گیلان در زمستان ۱۳۹۸ پرداختند. نتایج نشان داد که هر دو سامانه بارشی هسته سردی دارند و از نظر نحوه تشکیل و تقویت مشابه‌اند [۱۳]. کاشکی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی ماهواره‌ای - همدید بارش‌های فراگیر برف در غرب ایران پرداختند. نتایج نشان داد که با تشکیل یک چرخند قوی در سطح زمین روی عراق، هوای ناپایدار و آشفته‌ای به وجود می‌آید که سبب می‌شود موجبات عروج بسته‌هوا تسریع یابد و با صعود سریع، بخار آب موجود در جو به بارش برف تبدیل شود [۱۱]. با توجه به مباحث بیان‌شده، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی ماهیت ساختاری و دینامیکی جو در زمان رخداد برف سنگین ایران است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

به‌منظور بررسی دینامیکی بارش برف شرایط تاوه قطبی نیز بررسی شد که در این میان تاوه قطبی تروپوسفری و تلاویی پتانسیل روی سطوح همدرگاشت و سطوح فشاری تحلیل شد. تاوه قطبی شکل دینامیکی غالب گردش زمستانی در پوشن سپهر و وردسپهر محسوب می‌شود. مهم‌ترین مشخصه تاوه، وجود بادهای شدید در لبه بیرونی و کم بودن دما در نواحی داخلی تاوه است. موقعیت مرکز تاوه قطبی و شدت آن در فصل زمستان در نیمکره شمالی سبب ریزش هوای سرد مناطق قطبی به عرض‌های پایین‌تر می‌شود و افزایش شدت آن، سبب انتقال و جابه‌جایی بیشتر محور پرفشار جنب حاره به عرض‌های پایین‌تر می‌شود. هرچقدر مراکز پرفشار جنب حاره به عرض‌های پایین‌تر انتقال یابد، فضای ایران برای عبور سامانه‌های کم‌فشار فراهم می‌شود و

توده‌های هوای ناپایدار به عرض‌های پایین‌تر از جمله ایران نفوذ می‌کنند. یکی از نشانه‌های تأثیر تاوه قطبی در نیمکره شمالی، وجود پرفشار سیبری از نوع حرارتی است که از شرق آسیا تا شرق اروپا گسترش می‌یابد. هرچه تضاد حرارتی بین مناطق قطبی و عرض‌های پایین‌تر بیشتر باشد، قدرت و شدت این پرفشار بیشتر می‌شود و اگر گسترش آن روی اروپا به طرز مناسبی صورت گیرد، همه سیستم‌هایی که از روی اروپای مرکزی عبور می‌کنند، به‌ناچار متوجه بخش جنوبی پرفشار سیبری می‌شوند که بیشتر این سامانه‌ها از نواحی ساحلی دریای مدیترانه وارد خاورمیانه و ایران می‌شوند. وجود پرفشار موجب ازدیاد متواتر و مدت توقف این سامانه‌ها روی ایران می‌شوند. این فرکانس و مدت توقف سامانه‌ها موجب ازدیاد بارش و تا حدودی کاهش دما در کشور می‌شود. پربندهای معرف تاوه قطبی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. پربند معرف ارتفاعی تاوه قطبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال [۲۱]

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن
پربند معرف تاوه	۵۴۶۰	۵۴۶۰	۵۵۲۰	۵۵۸۰	۵۶۴۰	۵۷۰۰
ماه	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
پربند معرف تاوه	۵۷۰۰	۵۷۶۰	۵۶۴۰	۵۵۸۰	۵۵۲۰	۵۴۶۰

برای بررسی تاوه قطبی مرز بیرونی آن در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مشخص شد. در ادامه به منظور اثر جریان‌های ناپهنجار، نقشه‌های ترکیبی ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال تهیه و مرز لبه بیرونی تاوه قطبی تعیین شد. برای بررسی تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در روزهای همراه با بارش سنگین برف در منطقه، داده‌های مربوط به میانگین ۳۰ ساله هر روز (۲۰۱۰-۱۹۸۰) از تارنمای مربوط به مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP/NCAR) اخذ شد. در ادامه با کسر روز مورد نظر از میانگین بلندمدت آن، ناهنجاری مربوط به هر یک از این روزها به دست آمد. در نهایت با استفاده از شاخص تاوایی پتانسیل مقادیر شاخص یادشده روی سطوح همدرگاشت برای روزهای همراه با بارش سنگین برف محاسبه شد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PV = -g(\xi_{\theta} + f) \left[\frac{\partial \theta}{\partial p} \right] \quad \text{رابطه ۱}$$

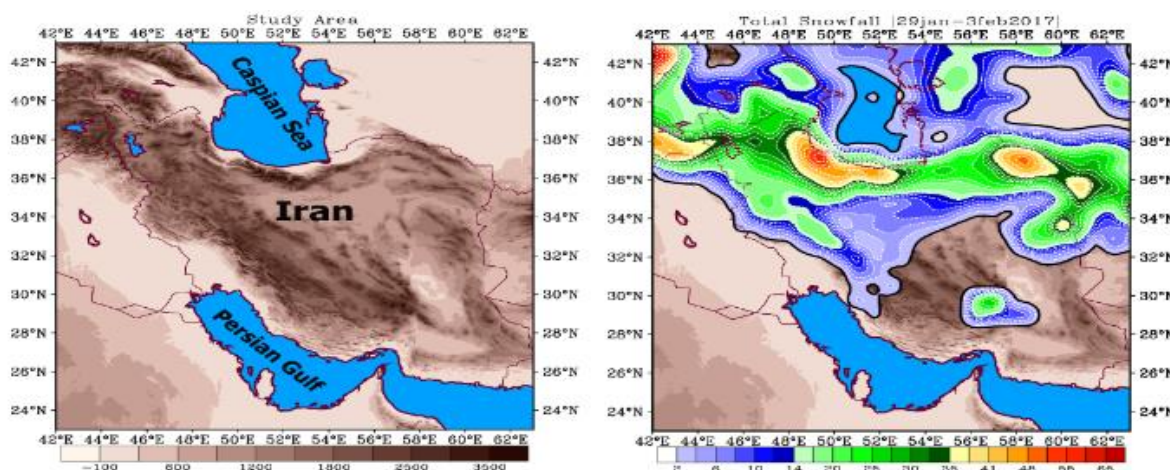
که در آن PV: تاوایی پتانسیل، g: شتاب گرانش زمین که تقریباً معادل ۹/۸ است، ξ_{θ} : تاوایی نسبی در دستگاه همدرگاشت، f: پارامتر کوریولیس و $\frac{\partial}{\partial p}$: تغییرات دمای پتانسیل به تغییرات فشار است. تاوایی پتانسیل به صورت واحد تاوایی پتانسیل (PVU) بیان می‌شود که یک واحد پتانسیل برابر است با 10-6m2S-1Kkg-1، مترمربع در ثانیه در کلون بر کیلوگرم. رابطه ۱ آشکار می‌کند که PV را از آن‌رو تاوایی پتانسیل نامیده‌اند که بیانگر امکان پیدایش تاوایی نسبی بر اثر تغییر عرض جغرافیایی به دلیل تغییر پارامتر کوریولیس و بر اثر تغییر بی‌دررو فاصله میان خطوط همدرگاشت به دلیل تغییر دمای پتانسیل به تغییرات فشار است [۲۷].

۳-۱. داده‌ها

به منظور بررسی شرایط جوی منجر به بارش‌های فوق سنگین برف در ایران از ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷ ابتدا آمار ارتفاع برف در روزهای مورد نظر از سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. از آنجا که داده‌های ارتفاع برف از دقت کافی برخوردار نبود، با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده Era interim با توان تفکیک ۰/۱۲۵ درجه جغرافیایی برای دوره مورد نظر خروجی ارتفاع برف تهیه شد (شکل ۱). در ادامه به منظور بررسی و تحلیل شرایط همدیدی و دینامیکی روزهای با بارش سنگین برف با مراجعه به تارنمای مرکز ملی پیش‌بینی محیطی /علوم جو (NCEP/NCAR)، داده‌های روزانه فشار سطح زمین^۱ (SLP)، ارتفاع ژئوپتانسیل^۲ (Hgt)، مؤلفه‌های مداری^۳ (Uwnd) و نصف‌النهاری باد^۴ (Vwnd)، دمای هوا (Air)، سرعت قائم (مگا) و فشار

1. Sea level pressure
2. Geopotential height
3. Zonal Wind Component
4. Meridional Wind Component

تروپوپاز در تلاقی $2/5 \times 2/5$ درجه دریافت شد و نقشه‌های مربوط ترسیم و تحلیل شد. در شکل ۱، منطقه تحت بررسی و ارتفاع و پوشش برف به نمایش درآمده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که بیش از ۶۰ درصد ایران زیر پوشش برف است که در برخی مناطق مانند شمال شرق و شمال غرب ارتفاع برف به بیش از ۴۰ سانتی‌متر رسیده است.



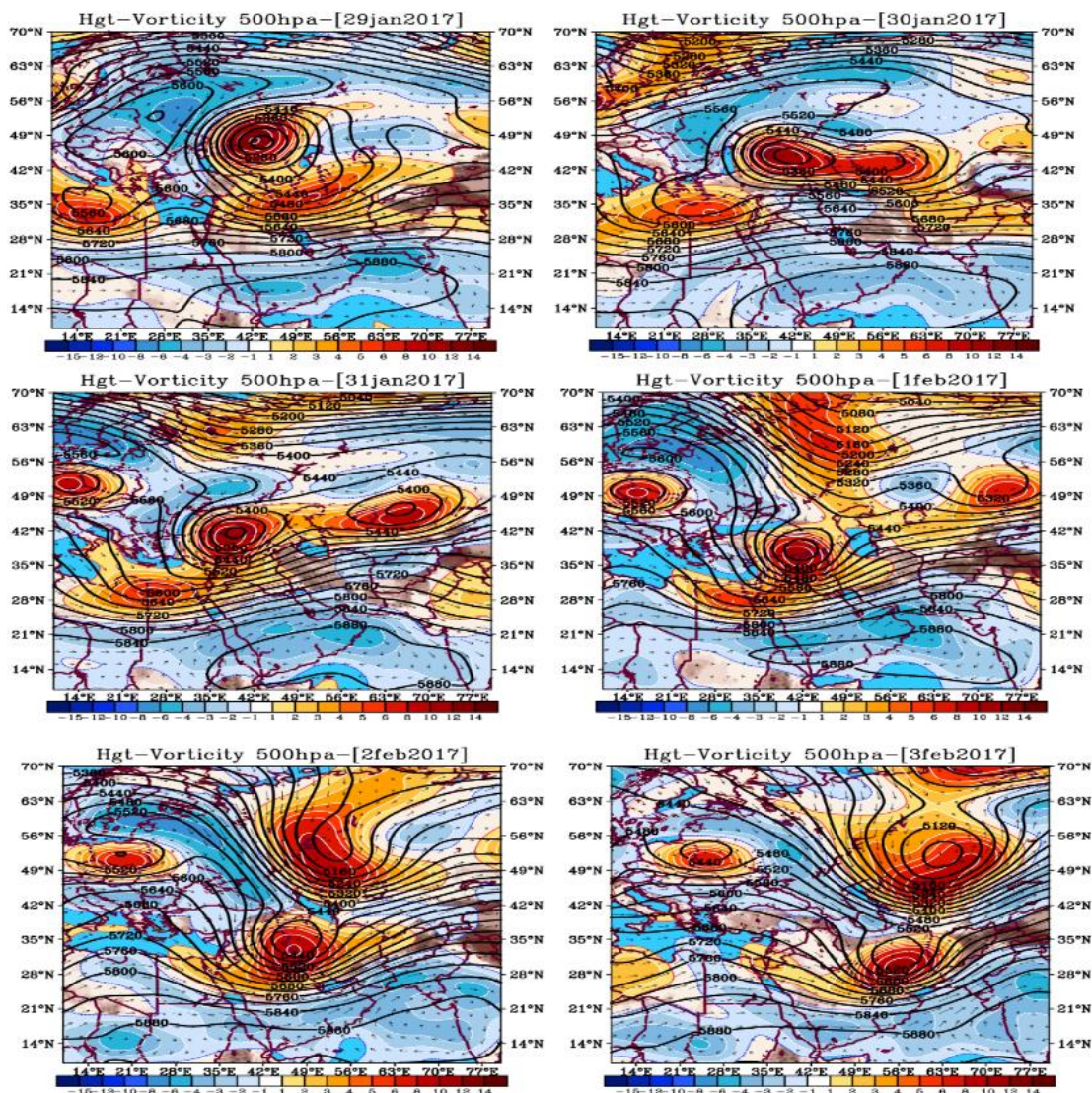
شکل ۱. موقعیت جغرافیای منطقه و مجموع ارتفاع برف (سانتی‌متر) حاصل از داده‌های شبکه‌بندی شده ERA interim

۴. تحلیل داده‌ها

بررسی‌ها نشان داد که بارش برف سنگین در ایران در دامنه زمانی یادشده حاصل برهم‌کنش بزرگ‌مقیاس است و نقش واداشته‌ای ترازهای فوقانی و میانی باید پررنگ‌تر باشد. در همین زمینه سعی شد در بخش‌های مختلف به بررسی خروجی‌ها در ترازهای مختلف جوی پرداخته شود. شایان ذکر است که اعتبارسنجی داده‌های تحقیق براساس تحقیقات پایه پیشین ارزیابی شد (برای اعتبارسنجی داده‌های ERA به پژوهش دی و همکاران (۲۰۱۱) و برای اعتبارسنجی داده‌های NCEP/NCAR به پژوهش کیسلر و کالنی (۲۰۰۱) مراجعه شود [۲۴، ۱۹]).

۴-۱. بررسی ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

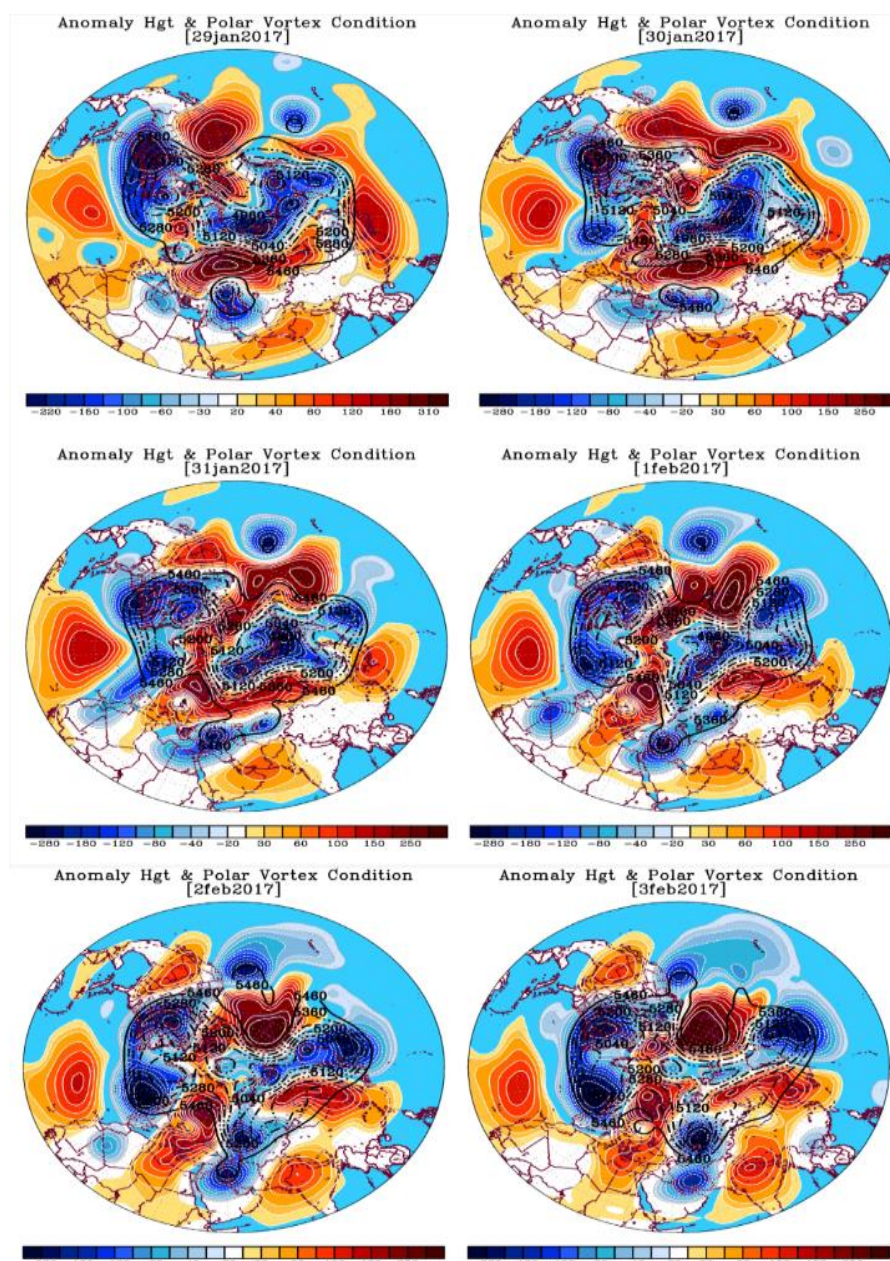
در نقشه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۲۹ ژانویه ۲۰۱۷ می‌توان گفت از عرض ۳۰ به بالا وزش به‌صورت نصف‌النهاری است و محور پشته روی اروپا همراه با بلاکینگ امگا و تاوایی منفی و همگرایی روی اروپا با قدرت واچرخندی ۴- تا ۱۰- متر بر ثانیه حاکم است. بر فراز دریای خزر، دریای سیاه و شمال غرب ایران ناوهی عمیق و سردچال واقع شده که سبب ریزش هوای سرد به ایران شده است. بیشینه تاوایی مثبت و واگرایی در قفقاز، شمال و شمال غرب ایران با قدرت چرخندی ۴ تا ۱۴ متر بر ثانیه و همچنین در غرب مدیترانه نیز تاوایی مثبت و واگرایی با قدرت چرخندی ۴ تا ۸ متر بر ثانیه قرار دارد. در ۳۰ ژانویه ناوهی همراه با تاوایی مثبت و واگرایی روی دریای خزر و قفقاز با قدرت چرخندی ۵ تا ۸ است و همچنین ناوهی دیگر با تاوایی مثبت و قدرت چرخندی ۵ تا ۸ متر بر ثانیه روی مدیترانه واقع است. محور پشته همراه با تاوایی منفی و همگرایی با قدرت واچرخندی ۳- تا ۸- متر بر ثانیه روی سبیری و بخشی از اروپای شرقی حاکم است.



شکل ۲. نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷

۲-۴. بررسی ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل و وضعیت تاوه قطبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

با توجه به الگوی نقشه‌های آنومالی تاوه قطبی در طی اواخر ژانویه و اوایل فوریه ۲۰۱۷ تاوه قطبی نیمکره شمالی دچار گسستگی شده است. یکی از سلول‌های تاوه روی اوراسیا فعال است که مرکز کم‌فشار روی دریای خزر، کوه‌های قفقاز و شمال غرب ایران قرار دارد. استقرار مرکز توده‌های پرفشار روی سبیری و اروپا با گردش آنتی‌سیکلونی خود موجب تداوم ریزش هوای شمالی به سمت عرض‌های پایین می‌شود و منطقه فعال تاوه روی دریای خزر و قفقاز نیز با الگوی گردش سیکلونی موجب ریزش هوای سرد شمالی روی ایران می‌شود. خروجی مدل نشان‌دهنده این است که امواج غربی با کاهش ارتفاع در مناطق کم‌فشار و همچنین نوسان تاوه قطبی طی این شش روز با حرکت جنوب‌سوی خود، پراارتفاع سبیری و اروپا واقع بر فراز ایران را رفته‌رفته به دو هسته به سمت شرق و غرب خواهد راند و پراارتفاع جنب حاره واقع در جنوب ایران نیز به سمت شرق رانده خواهد شد. برهم‌کنش این دو توده هوایی با ویژگی‌های متفاوت روی منطقه با جریان‌های آنتی‌سیکلونی موجب فرارفت هوای گرم و مرطوب از دریای سرخ و مدیترانه در دوره تحت بررسی به سمت ایران می‌شود. این هوای مرطوب با عبور امواج کوتاه در لایه تراز میانی جو در ۲۹ تا ۳۰ ژانویه روی دریای خزر و شمال ایران، در ۳۱ ژانویه و ۱ فوریه در شمال غرب ایران، در ۲ فوریه در شمال غرب و قسمتی از مرکز تا شمال شرق ایران و در ۳ فوریه در شمال شرق، مرکز، جنوب و جنوب غرب ایران جریان‌های ناپایدار بارندگی به شکل برف را در پی داشته است (شکل ۳).

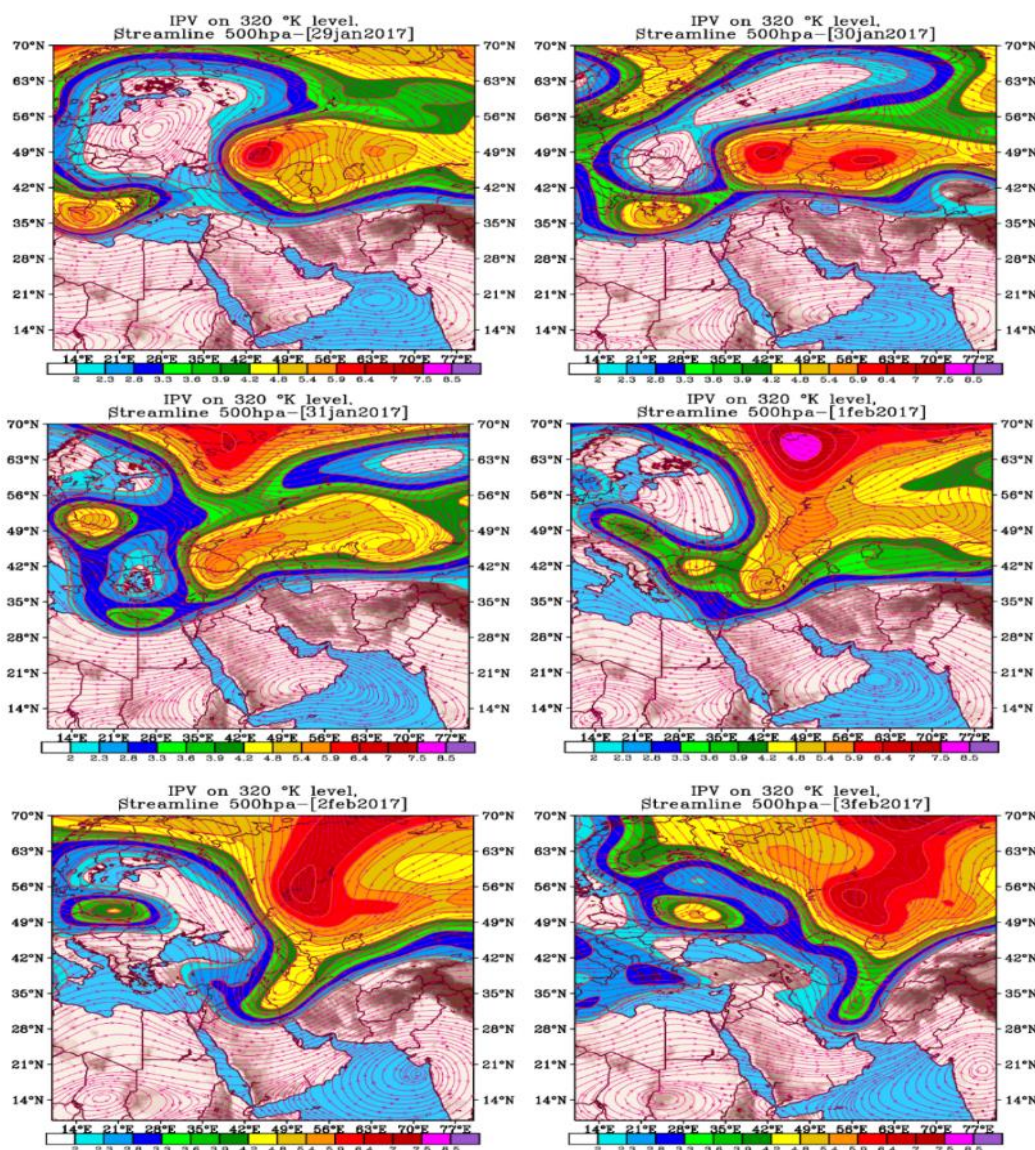


شکل ۳. وضعیت ناهنجاری ارتفاع ژنوپتانسیل و وضعیت تاوه قطبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷

۳-۴. وضعیت سرعت باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ناوایی پتانسیل تراز ۳۲۰ درجه کلونین

در نقشه سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۲۹ ژانویه پرفشاری قوی روی اروپا قرار داشت که سبب ریزش هوای سرد و خشک به ایران به‌ویژه شمال و شمال غرب شد. سیستم کم‌فشار قوی روی اورال با حرکت سیکلونی خود از سمت شمال غرب وارد ایران شد. کم‌فشار دیگری روی دریای مدیترانه وجود داشت که وزش رطوبتی حاصل از حرکت سیکلونی آن از سمت غرب و شمال غرب وارد ایران شد و بخشی از رطوبت دریای سرخ و خلیج فارس نیز ایران را تحت تأثیر قرار داد که سبب ایجاد ناپایداری به‌ویژه در شمال و شمال غرب ایران شد. در ۳۰ ژانویه کم‌فشار قوی روی اورال با حرکت سیکلونی خود از سمت غرب دریای خزر را تحت تأثیر قرار داد و ناپایداری ایجاد کرد. همچنین وجود یک پرفشار روی بالکان، ایران به‌خصوص غرب و شمال غرب را تحت تأثیر هوای سرد و خشک خود قرار داد. در ۳۱ ژانویه یک کم‌فشار بر فراز دریای سیاه از سمت غرب وارد دریای خزر شد و شرایط ناپایداری را فراهم کرد و کم‌فشار دیگری در آلپ با گذشتن از دریای مدیترانه و بخشی از دریای سرخ شمال غرب ایران را تحت تأثیر ناپایداری قرار داد و پرفشاری روی سیبری سبب ریزش هوای سرد و خشک به عرض‌های پایین‌تر شد.

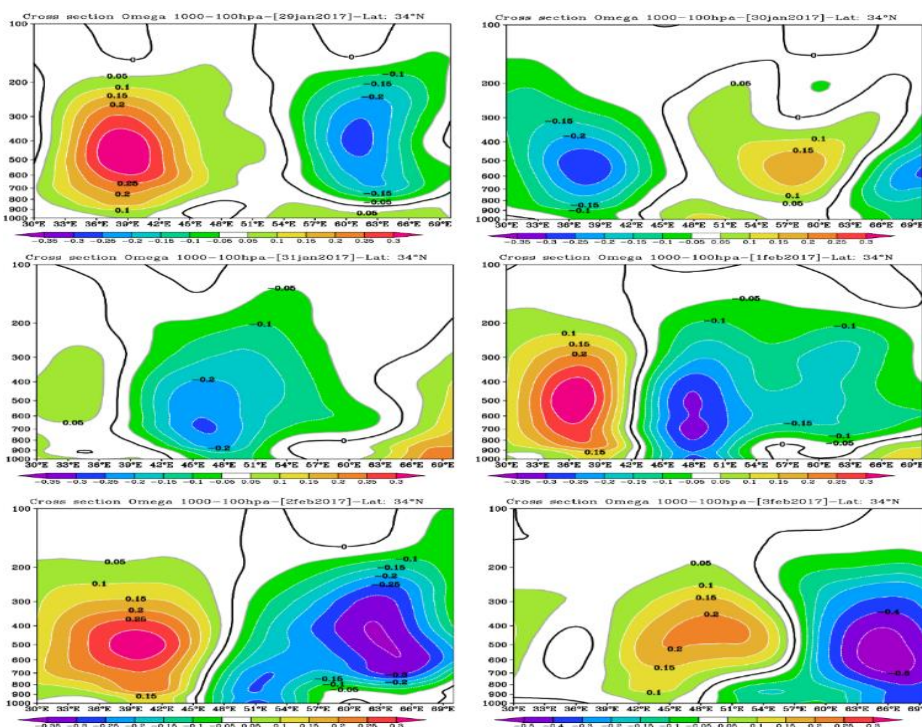
در یکم فوریه پرفشار روی اروپا (دریای بالتیک) حاکم بود و سیستم کم‌فشاری روی دریای سیاه و آلپ نسبت به روز قبل به عرض‌های پایین‌تر کشیده شد و با عبور از بخشی از مدیترانه شرقی، بخش‌های بیشتری از شمال غرب ایران را تحت تأثیر مثبت قرار داد. همچنین کم‌فشار دیگری در اورال با حرکت سیکلونی خود از سمت دریای خزر وارد ایران شده و سبب صعود و ناپایداری شد. در دوم فوریه کم‌فشار قوی در شمال غرب ایران و روی آلپ همراه با تاوایی پتانسیل زیاد با عبور از دریای مدیترانه رطوبت را از سمت غرب و شمال غرب وارد ایران کرد و در شمال، غرب و شمال غرب ایران ناپایداری به وجود آورد. پرفشاری روی اروپا از سمت شمال غرب با ریزش هوای سرد وارد ایران شد. در سوم فوریه کم‌فشاری قوی در شمال دریاچه آرال و آلپ از سمت دریای خزر وارد کشور شد و شمال شرق، مرکز، جنوب غرب، بخشی از جنوب شرق و جنوب ایران را تحت تأثیر قرار داد و سبب صعود و ناپایداری هوا شد. افزایش تاوایی پتانسیل و منطقه‌ای بین روزهای ۲۹ تا ۳۱ ژانویه در حد واسط بین دریای سیاه تا شرق دریاچه آرال سبب ماندگاری بیش از پیش جریان چرخندی شد. از روز یکم فوریه با توسعه جنوب‌سوی جریان تاوۀ قطبی و افزایش تاوایی پتانسیل در مرزهای غربی شرایط ناپایدار بسیار قوی حاکم شد که در روز سوم فوریه بیشینه مقدار تاوایی پتانسیل در داخل ایران مستقر شد (شکل ۴).



شکل ۴. وضعیت سرعت باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و تاوایی پتانسیل تراز ۳۲۰ درجه کلونین از تاریخ ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷

۴-۴. بررسی وضعیت نیمرخ قائم مقادیر امکا

نیمرخ قائم تهیه شده در امتداد بین عرض متوسط ۳۴ درجه شمالی از ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷ برای روزهای همراه با بارش برف در ایران نشان می‌دهد که در ۲۹ ژانویه روی ارتفاعات هندوکش صعود هوا و روی مدیترانه شرقی و رشته‌کوه زاگرس جریان نزولی هوا شکل گرفت. در ۳۰ ژانویه شمال شبه‌جزیره عربستان صعود هوا و نیمه شرقی و جنوب شرقی ایران نزول هوا را نشان می‌دهد. در ۳۱ ژانویه مرکز و جنوب غرب ایران امکان صعود و بارش فراهم شد و در مدیترانه شرقی نزول هوا مشاهده می‌شود. در یکم فوریه روی کوه‌های زاگرس، مرکز و شرق ایران جریان‌های بالاسوی قوی و در مدیترانه شرقی و شمال عربستان جریان‌های پایین‌سوی به‌خصوص در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به وجود آمد. در دوم فوریه به‌واسطه افزایش تاوایی پتانسیل در منطقه‌ای از رشته‌کوه زاگرس به سمت شرق ایران تا کوه‌های هندوکش شاهد جریان‌های بالاسو به‌خصوص در بالاتر از تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال تا ۲۰۰ هکتوپاسکال شکل گرفت و در غرب خاورمیانه نزول بسته‌ها مشاهده می‌شود. در سوم فوریه صعود هوا در ایران جهت شرق‌سوی بیشتری نسبت به روز قبل داشت و از کوه‌های زاگرس تا هندوکش بیشترین صعود روی ارتفاعات هندوکش متمرکز شد (شکل ۵).

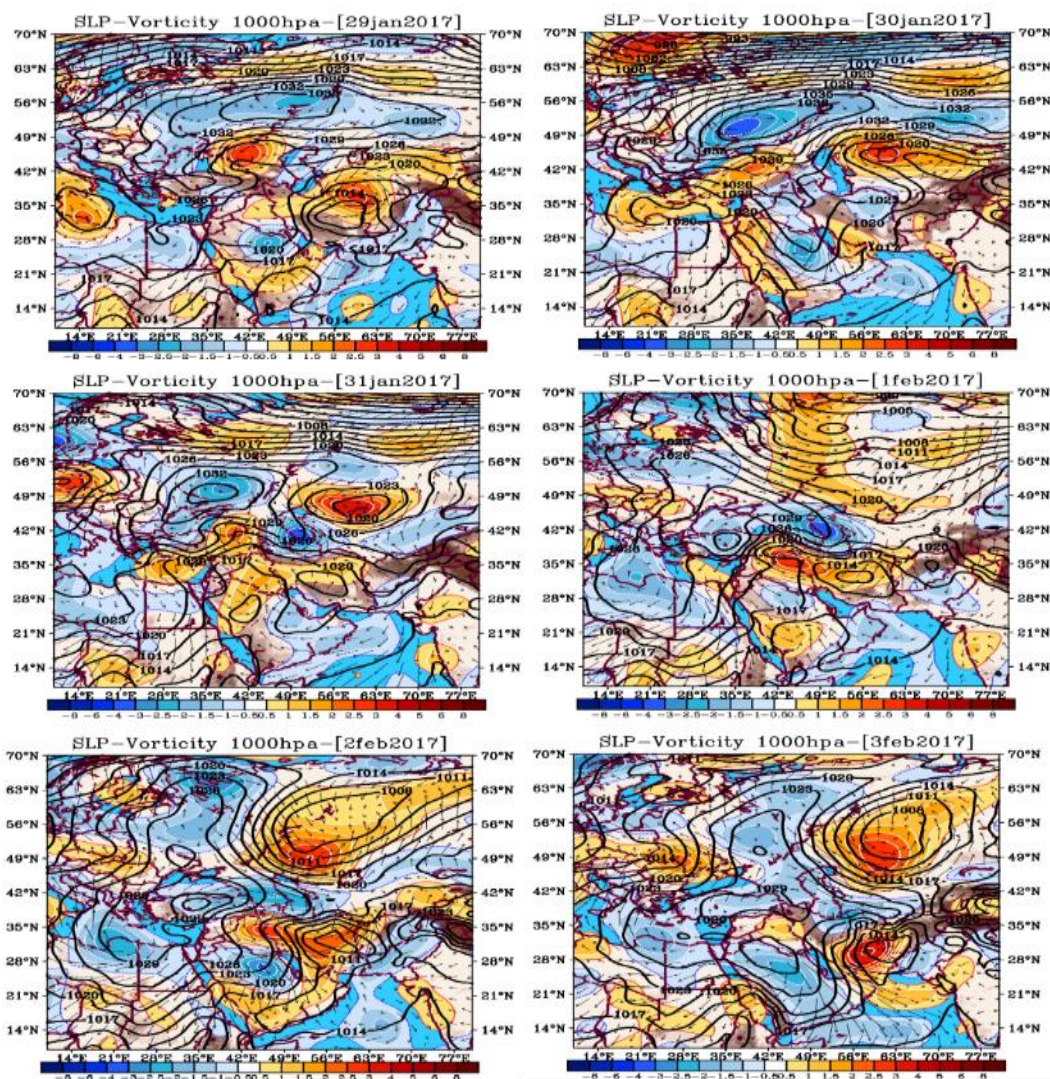


شکل ۵. نمودار مقطع قائم شاخص امکا برای عرض ۳۴ درجه شمالی از تاریخ ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷

۴-۵. بررسی وضعیت فشار تراز دریا و تاوایی نسبی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

شرایط سینوپتیکی ایران در فشار سطح دریا در ۲۹ ژانویه ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که مرکز کم‌فشار با تاوایی مثبت و واگرایی روی قفقاز قرار گرفت. همچنین مرکز کم‌فشار دیگری در شمال شرق ایران با فشار مرکزی ۱۰۱۴ ژئوپتانسیل دکامتر همراه با تاوایی مثبت و واگرایی واقع شد که زبانه‌هایی از این کم‌فشار به شمال، شمال شرق، مرکز و غرب ایران کشیده شد. مرکز پرفشار با فشار مرکزی ۱۰۳۵ هکتوپاسکال روی سیبری قرار گرفت که زبانه‌های آن در شمال دریای خزر سبب همگرایی شد. در ۳۰ ژانویه مرکز پرفشار با فشار مرکزی ۱۰۳۸ همراه با تاوایی منفی و همگرایی روی اروپا واقع شد و یک مرکز کم‌فشار روی دریایچه آرال و کم‌فشار دیگری روی دریای سیاه همراه با تاوایی مثبت و واگرایی برقرار بود که زبانه‌هایی از آن به مدیترانه و دریای سرخ وارد شد. خلیج فارس و جنوب غرب ایران هم تحت تأثیر کم‌فشار و ناپایداری با فشار مرکزی ۱۰۱۷ هکتوپاسکال قرار گرفت. شمال شرق ایران نیز تحت تأثیر پرفشار ضعیفی قرار گرفت. در ۳۱ ژانویه مرکز پرفشاری بر فراز دریای سیاه با فشار مرکزی

۱۰۳۲ هکتوپاسکال وجود داشت که زبانه‌هایی از آن روی دریای خزر کشیده شد. مرکز کم‌فشار روی دریاچه آرال و همچنین روی قسمت شرقی دریای سیاه وجود داشت که زبانه‌هایی از آن با تاوایی مثبت و واگرایی مثبت شرق مدیترانه و از غرب تا شرق ایران را تحت تأثیر قرار داد و ناپایداری ایجاد کرد. در یکم فوریه پرفشاری روی دریای خزر با تاوایی منفی و همگرایی و کم‌فشاری قوی با فشار مرکزی ۱۰۱۴ هکتوپاسکال همراه با تاوایی منفی و واگرایی در شمال غرب ایران و ترکیه قرار گرفت که نسبت به کم‌فشار ۳۱ ژانویه، همه مناطق ایران به‌جز جنوب و جنوب شرق را در بر گرفت. در دوم فوریه مرکز کم‌فشاری در شمال دریای خزر با فشار مرکزی ۱۰۰۸ هکتوپاسکال بخش شمالی دریای خزر را تحت تأثیر قرار داد. از طرفی بقیه مناطق دریای خزر تحت تأثیر مرکز پرفشار اروپا با فشار مرکزی ۱۰۲۶ هکتوپاسکال با تاوایی منفی و همگرایی قرار گرفت. کم‌فشار قوی با فشار مرکزی ۱۰۱۱ همراه با تاوایی مثبت و واگرایی در شمال غرب ایران برقرار بود که زبانه‌های آن به‌جز جنوب شرق، سراسر ایران را تحت تأثیر خود قرار داد. در سوم فوریه یک مرکز کم‌فشار قوی با تاوایی مثبت روی شرق و مرکز ایران همراه با تاوایی مثبت و واگرایی قرار گرفت و مناطق شرقی، جنوبی، جنوب شرقی و غرب را تحت تأثیر خود قرار داد. پرفشاری با فشار مرکزی ۱۰۲۹ هکتوپاسکال روی دریای سیاه وجود داشت که زبانه‌هایی از آن دریای خزر و شمال ایران را تحت تأثیر تاوایی منفی و همگرایی خود قرار داد. بررسی‌ها نشان داد که وقوع برف‌های سنگین در ایران حاصل برهم‌کنش بین تاوه قطبی و افزایش شیو تاوایی پتانسیل بوده که در این تحقیق نیز بدان اشاره شد. این یافته همسو با تحقیقات کاشکی و حاجی‌محمدی [۱۲] و حسن‌زاده و همکاران [۴] است.



شکل ۶. وضعیت فشار تراز دریا و تاوایی نسبی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال از ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷

۵. نتیجه گیری

بررسی رخداد برف سنگین در ایران در دامنه زمانی ۲۹ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۷ بیانگر این است که وجود ناهنجاری بسیار قوی در منطقه که با ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همراه بود سبب شد که جو ناپایداری در منطقه به وجود آید. بدین گونه که با تشکیل و تقویت موج راسبی روی منطقه، مقدار ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل به بیش از ۲۰۰- ژئوپتانسیل متر رسید. این کاهش و افت ژئوپتانسیل روی منطقه حاصل تشکیل سردچال و توسعه جنوب‌سوی تاوه قطبی بود. در ادامه وجود ناهنجاری قوی روی تاوه قطبی و گسیخته شدن آن سبب تأثیرپذیری جو منطقه از شرایط حاضر شد. شکسته شدن تاوه قطبی که با تشکیل دو پشته بسیار قوی یکی روی اروپا و دیگری روی اقیانوس آرام شمالی همراه بود سبب شد که پربند معرف تاوه تا عرض‌های ۳۵ درجه شمالی کشیده شود که با نفوذ آن به منطقه هوای سرد و ناپایداری حاصل از آن بر منطقه حاکم شد. افزایش تاوایی نسبی حاصل از موج کژفشار روی منطقه ابتدا در سه روز نخست با هسته‌های سردچال و ناوه حاصل از فعالیت موج تروپوسفری همراه شد که در سه روز انتهایی عمیق موج و ناوه تشکیل شده حاصل گسترش جنوب‌سوی جریان‌های شمالگان به منطقه است که در دل خود با تشکیل هسته سردچال همراه شده است. افزایش تاوایی پتانسیل روی منطقه که ابتدا به صورت افزایش بیش از ۲ واحد تاوایی پتانسیل با هسته‌های منفرد بود حاصل جریان‌های تروپوسفری بود که در اصطلاح، تاوایی پتانسیل تروپوسفری خوانده می‌شود؛ ولی پس از روز یکم فوریه با نفوذ تاوایی پتانسیل استراتوسفری حداکثر ناپایداری در منطقه رقم خورد. وجود جریان‌های بالاسوی قوی که از سطح ۱۰۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال ادامه داشت، نشان‌دهنده وجود امواج قوی همراه با ناپایداری زیاد بود که گاه مقدار این جریان‌های بالاسو به بیش از ۰/۵- پاسکال بر ثانیه رسید. شایان توضیح است که بیشینه جریان‌های بالاسو بین دو تراز ۸۰۰ تا ۴۰۰ هکتوپاسکال به وقوع پیوست. از عمده شرایط سطحی نیز می‌توان به تشکیل هسته کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۱۱ هکتوپاسکال در ایران مرکزی و در جوار بادپناه کوهستان‌های زاگرس اشاره کرد. این هسته کم‌فشار و منفرد با بیشینه تاوایی نسبی نیز همراه شد و از طرفی در قسمت رو به باد کوهستان‌های زاگرس یعنی دقیقاً در غرب این سیکلون یک جریان آنتی‌سیکلونی قوی به وجود آمد که از نظر توسعه جغرافیایی بین عرض‌های ۲۰ تا ۵۵ درجه شمالی فعالیت کرده و یک نزول دائمی را تجربه می‌کند.

منابع

- [۱]. اکبری، مهری؛ و صیاد، وحیده (۱۴۰۰). تحلیل مطالعات تغییر اقلیم در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۳۷-۷۴.
- [۲]. انفرادی، سیدسروش؛ فتاحی، مرتضی؛ و امینی، حمیده (۱۴۰۳). استفاده از سن یابی به روش لومینسانس نوری کوارتز به منظور برآورد نرخ لغزش سامانه گسلی درونه در خلیل‌آباد. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۱(۳)، ۲۱۳-۲۲۴.
- [۳]. بازگیر، سعید؛ محمدی، حسین؛ شریفی، لیلا؛ و سلیمانی، نوشین (۱۳۹۵). تحلیل مخاطره یخبندان و سرمازدگی محصولات باغی آذربایجان غربی. مدیریت مخاطرات محیطی، ۳(۴)، ۳۶۵-۳۷۸.
- [۴]. حسن‌زاده، محمد؛ مفیدی، عباس؛ و رضا دوستان (۱۳۹۷). بررسی نقش تاوه قطبی پوشن سپهری جابه‌جاشده بر بارش ایران (مطالعه موردی دسامبر ۲۰۰۵). دومین کنفرانس ملی آب‌وهواشناسی ایران، مشهد.
- [۵]. خان‌سالاری، سکینه؛ و محمدی، عاطفه (۱۴۰۲). پیش‌نگری بارش‌های فرین در ایران بر اساس رویکرد همادی مدل‌های CMIP6 در آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) با وزن‌دهی مبتنی بر رتبه. فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۳)، ۷۲۷-۷۴۶.
- [۶]. رحیمی، آرش؛ برنا، رضا؛ مرشدی، جعفر؛ و قربانیان، جبرائیل (۱۳۹۸). آسیب‌پذیری زیرساخت‌های نواحی جنوبی استان خوزستان در شرایط تغییر اقلیم. مدیریت مخاطرات محیطی، ۶(۴)، ۳۶۱-۳۷۶.
- [۷]. رضایی، محمد؛ صادقی، علی؛ و پورقیومی، علی (۱۳۹۹). تحلیل همدیدی-ماهواره ای مخاطره برف سنگین در استان کرمان. فضای جغرافیایی، ۲۰(۷۱)، ۱۲۱-۱۳۳.
- [۸]. شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ جعفری، ایوب؛ و بستانچی، حسام (۱۳۹۹). الگو‌بندی و تحلیل همدید رخداد کولاک برف‌های شدید شمال غرب ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷(۲)، ۱۶۹-۱۸۶.
- [۹]. فتاحی، ابراهیم؛ و مقیمی، شوکت (۱۳۹۸). اثر تغییرات اقلیمی بر روند برف شمال غرب ایران. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹(۵۴)، ۴۷-۶۳.
- [۱۰]. قصابی‌زاده، زهرا؛ فتحی، مائده؛ رضازاده، پرویز؛ و رنجبرسعدت آبادی، عباس (۱۳۹۹). بررسی عوامل دینامیکی و همدیدی مؤثر در رخداد بارش سنگین برف در استان تهران (مطالعه موردی: ژانویه ۲۰۱۸). نیوار، ۴۴(۱۱۰-۱۱۱)، ۲۹-۴۲.
- [۱۱]. کاشکی، عبدالرضا؛ حسینی، محمد؛ زندی، رحمان؛ و حاجی‌محمدی، حسن (۱۴۰۱). بررسی ماهواره‌ای-همدید بارش‌های فراگیر برف در غرب ایران. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۶(۸۲)، ۱۸۹-۲۱۰.
- [۱۲]. کاشکی، عبدالرضا؛ و حاجی‌محمدی، حسن (۱۳۹۶). بررسی سیستم‌های سینوپتیک جو در زمان رخداد برف سنگین در استان‌های شمالی ایران (مطالعه موردی: بارش ۳۱ ژانویه تا ۳ فوریه ۲۰۱۴). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۲)، ۱۷۰-۱۸۱.
- [۱۳]. مرادی، محمد؛ و رنجبرسعدت آبادی، عباس (۱۳۹۹). بررسی همدیدی سیلاب سیستان و بلوچستان و برف سنگین گیلان در زمستان ۱۳۹۸. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹(۳)، ۲۲۷-۲۴۳.
- [۱۴]. نخعی، امید؛ حاجی‌محمدی، حسن؛ و کوشکی، فاطمه فیضی (۱۳۹۷). بررسی مکانیسم جوی حاکم بر رخداد برف‌های سنگین استان همدان. دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۸(۳)، ۳۰۰-۳۱۰.
- [15]. Bueh, C., Peng, J., Lin, D., & Chen, B. (2022). On the two successive supercold waves straddling the end of 2020 and the beginning of 2021. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4): 591-608.
- [16]. Chen, W., Lan, X., Wang, L., & Ma, Y. (2013). The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia. *Chinese Science Bulletin*, 58: 1355-1362.
- [17]. Cohen, J., Foster, J., Barlow, M., Saito, K., & Jones, J. (2010). Winter 2009–2010: A case study of an extreme Arctic Oscillation event. *Geophysical Research Letters*, 37(17).
- [18]. Dai, G., Li, C., Han, Z., Luo, D., & Yao, Y. (2022). The nature and predictability of the East Asian extreme cold events of 2020/21. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39: 566-575.
- [19]. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.
- [20]. Eşsiz, M., & Acar, Z. (2023). Synoptic analysis of the January 2004 snowstorm: Example of Çanakkale. *International Journal of Engineering & Geosciences*, 8(1).
- [21]. Frauenfeld, O. W., & Davis, R. E. (2003). Northern Hemisphere circumpolar vortex trends and climate change implications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14).
- [22]. Iles, C., & Hegerl, G. (2017). Role of the North Atlantic Oscillation in decadal temperature trends. *Environmental Research Letters*, 12(11): 114010.

- [23]. Kanno, Y., Sugimoto, S., & Murakami, M. (2025). Synoptic-and meso-scale features of the heavy wet snow accretion event along the Okhotsk Sea coast on December 22–23, 2022. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 103(1), 45-66.
- [24]. Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., ... & Fiorino, M. (2001). The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological society*, 82(2), 247-268.
- [25]. Li, J., Xie, T., Tang, X., Wang, H., Sun, C., Feng, J., ... & Ding, R. (2022). Influence of the NAO on wintertime surface air temperature over East Asia: Multidecadal variability and decadal prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4): 625-642.
- [26]. Luo, B., Luo, D., Dai, A., Simmonds, I., & Wu, L. (2021). A connection of winter Eurasian cold anomaly to the modulation of Ural blocking by ENSO. *Geophysical Research Letters*, 48(17): e2021GL094304.
- [27]. Martin, J. E. (2007). Lower-tropospheric height tendencies associated with the shearwise and transverse components of quasigeostrophic vertical motion. *Monthly weather review*, 135(7): 2803-2809.
- [28]. Park, T. W., Ho, C. H., & Yang, S. (2011). Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia. *Journal of Climate*, 24(1): 68-83.
- [29]. Sun, F., Chen, Y., Li, Y., Duan, W., Li, B., Fang, G., ... & Feng, M. (2024). Decreasing trends of mean and extreme snowfall in High Mountain Asia. *Science of The Total Environment*, 921, 171211.
- [30]. Wang, L., & Fan, K. (2022). Synoptic and climatic conditions of an extreme snowstorm event over Northeast China and its climate predictability. *Frontiers in Earth Science*, 10: 835061.
- [31]. Yao, Y., Luo, D., Dai, A., & Simmonds, I. (2017). Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part I: Insights from observational analyses. *Journal of Climate*, 30(10): 3549-3568.
- [32]. Yao, Y., Zhuo, W., Gong, Z., Luo, B., Luo, D., Zheng, F., ... & Zhou, T. (2023). Extreme cold events in North America and Eurasia in November-December 2022: a potential vorticity gradient perspective. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39: 953-962.
- [33]. Zhang, X., Fu, Y., Han, Z., Overland, J. E., Rinke, A., Tang, H., ... & Wang, M. (2022). Extreme Cold Events from East Asia to North America in Winter 2020/21: Comparisons, Causes, and Future Implications. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39: 553-565.
- [34]. Zheng, F., Wu, B., Wang, L., Peng, J., Yao, Y., Zong, H., ... & Zhu, J. (2023). Can eurasia experience a cold winter under a third-year La Niña in 2022/23?. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39: 541-548.