



Analysis of 500 hPa Geopotential Anomalies and Their Impact on Dry and Wet Periods in Iran (1995-2024)

Abbas Ranjbar Saadat Abadi¹ ✉

1. (Corresponding Author) Department of Meteorology, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran
Email: aranjbar@gmail.com

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

Received:
2 June 2025
Revised:
1 September 2025
Accepted:
7 October 2025
Available online:
9 November 2025

Keywords:

Atmospheric circulation anomalies, precipitation variability and dry-wet episodes, Iran.

ABSTRACT

This study examines anomalies in 500 hPa atmospheric circulation and their influence on wet and dry periods in Iran during 1995–2024, with particular attention to the relationship between precipitation variability and the ENSO-Modoki index. Rainfall observations from 179 stations were integrated with reanalysis-based geopotential height fields to identify dry and wet periods and to construct composite anomaly patterns. The results indicate that the highest levels of annual precipitation occur in January, February, March, April, and December. A declining precipitation trend is observed in most months, with the most pronounced reductions occurring in December, January, and March, which poses a serious challenge to national water resources. Analysis of monthly precipitation changes reveals substantial interannual variability, including increases exceeding 100 percent (March 1996: +136 percent; December 2004: +143 percent) and decreases greater than 80 percent (January 2021: –87 percent; March 2008: –89 percent). These fluctuations are primarily associated with changes in large-scale atmospheric circulation patterns, particularly the configuration of mid-tropospheric troughs. Analysis of 500 hPa geopotential height anomalies indicates that circulation patterns over the North Pacific, North Atlantic, Europe, and western Russia exhibit distinct configurations during dry and wet periods, whereby negative anomalies are associated with dry conditions and positive anomalies with wet conditions in Iran. A statistically significant positive annual correlation is identified between the ENSO-Modoki index and national precipitation ($r \approx 0.51$), accompanied by strong negative correlations between 500 hPa geopotential heights over major oceanic regions and precipitation across Iran. These findings suggest that the integration of emerging teleconnection indices.

Cite this article: Ranjbar Saadat Abadi, A. (2025). Analysis of 500 hPa Geopotential Anomalies and Their Impact on Dry and Wet Periods in Iran (1995-2024). *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (3), 23-42.
<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.403917.1007903>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Climate variability and climate change pose significant challenges for societies that are highly dependent on water resources, agricultural systems, and environmentally sensitive ecosystems. Iran, situated within the arid and semi-arid belt of the Middle East, is particularly vulnerable to variability in precipitation patterns. Large areas of the country receive less than 250 mm of annual precipitation, rendering these regions highly sensitive to even minor changes in atmospheric circulation patterns. Over recent decades, both the frequency and intensity of drought events have increased markedly, placing substantial pressure on agricultural productivity, groundwater resources, food security, and socio-economic stability. Accordingly, a comprehensive understanding of the atmospheric mechanisms governing precipitation variability is essential for sustainable water and resource management. Among the principal indicators of large-scale atmospheric circulation, anomalies in 500 hPa geopotential heights serve as robust diagnostic tools for identifying synoptic-scale patterns associated with wet and dry periods. These anomalies reflect the dynamics of mid-tropospheric troughs, ridges, and jet streams, which play a central role in regulating moisture transport pathways and the spatial distribution of precipitation over Iran. Furthermore, the ENSO–Modoki index has emerged as an important teleconnection indicator influencing precipitation variability across the Middle East, underscoring the need to integrate mid-tropospheric diagnostics with large-scale teleconnection indices for more robust hydroclimatic assessments.

Methodology

This study integrates long-term precipitation observations with large-scale atmospheric reanalysis data to examine monthly precipitation variability over Iran during the period 1995–2024. Monthly precipitation data from 179 synoptic stations were compiled, and the spatial mean across all stations was calculated for each month to derive a national precipitation index. Monthly climatological means for the WMO

reference period (1991–2020) were calculated and used to derive precipitation anomalies and corresponding percentage changes.

Temporal variability was assessed using simple linear regression to estimate trends, standard errors, and coefficients of determination, while the statistical significance of these trends was evaluated using the Mann–Kendall test. A ranked series of monthly percentage changes was used to identify the driest and wettest months, defined respectively as the seven lowest and seven highest values.

Atmospheric circulation patterns were analyzed using monthly 500 hPa geopotential height fields derived from the NCEP/NCAR reanalysis dataset. This pressure level was selected because it represents mid-tropospheric flow patterns that govern the major synoptic systems influencing Iran. Composite anomaly maps were constructed for dry and wet months to assess shifts in the intensity and spatial configuration of large-scale circulation features. In addition, multi-month composites for the October to May period were generated to highlight dominant dynamical signals.

To investigate large-scale teleconnections, correlation analyses were conducted between precipitation, the ENSO–Modoki Index (EMI), and geopotential height anomalies over four key regions identified from spatial patterns of anomalous circulation, namely the North Pacific, North Atlantic, Europe, and western Russia. Together, these analyses provide a coherent framework for understanding the atmospheric drivers that shape precipitation variability across Iran.

Results and Discussion

The analysis indicates a strong linkage between mid-tropospheric circulation anomalies and precipitation variability across Iran. During dry periods, subtropical high-pressure systems intensify while Mediterranean troughs weaken, leading to the formation of persistent anticyclonic ridges over the Middle East that inhibit the eastward propagation of mid-latitude cyclones. As a result, large-scale subsidence dominates, convective activity is

suppressed, and widespread precipitation deficits occur. In contrast, wet periods are associated with deepened troughs and strengthened westerly flow, which facilitate the intrusion of moisture-bearing systems from the Mediterranean and Red Seas and result in more frequent and intense precipitation events.

The results further indicate that El Niño–Modoki phases, through the development of warm sea surface temperature anomalies in the central Pacific, modify subtropical pressure distributions, deepen the Mediterranean trough, and enhance the propagation of Rossby waves toward Iran, thereby creating favorable conditions for increased precipitation. Conversely, La Niña–Modoki conditions strengthen subtropical ridges and reduce moisture transport toward the region, a pattern that is closely associated with dry periods. Composite analyses reveal that 500 hPa geopotential height anomalies over the North Pacific and North Atlantic function as key centers that modulate Rossby wave patterns, thereby exerting a strong influence on precipitation variability over Iran.

Sub-monthly precipitation fluctuations are largely driven by baroclinic wave activity associated with horizontal temperature gradients, whereas intraseasonal variability is primarily controlled by the modulation of mid-latitude Rossby waves. Teleconnection patterns indicate that circulation anomalies in the North Pacific and Eurasian sectors strongly influence the intensity and eastward extension of the Mediterranean trough, thereby regulating moisture transport toward Iran. Trend analysis further demonstrates significant long-term declines in winter precipitation, particularly during December, January, and March, suggesting an increasing risk of prolonged droughts, reduced snowpack accumulation, and declining groundwater recharge.

Conclusion

This study demonstrates that precipitation variability in Iran is closely linked to mid-tropospheric circulation patterns at the 500 hPa level. The prevalence of anticyclonic ridges during dry months and intensified troughs during wet months underscores the central role of mid-tropospheric dynamics in

shaping hydroclimatic extremes. ENSO–Modoki teleconnections modulate these circulation patterns by altering subtropical pressure distributions and Rossby wave propagation, with El Niño–Modoki favoring wet conditions and La Niña–Modoki reinforcing dry conditions. Integrated analyses confirm that both 500 hPa geopotential height anomalies and the ENSO–Modoki index play critical roles in explaining and predicting precipitation variability, with mid-tropospheric anomalies acting as intermediaries that transmit Modoki-related influences to the Mediterranean and Iranian regions.

These findings underscore the value of combining reanalysis-based mid-tropospheric diagnostics with large-scale teleconnection indices to improve the skill of seasonal precipitation forecasts. Future studies are encouraged to employ higher-resolution reanalysis datasets and numerical modeling approaches to deepen mechanistic understanding and further enhance predictive capability.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

تحلیل بی‌هنجاری‌های گردش‌های جوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و تأثیر آن بر دوره‌های خشک و تر در ایران (۱۹۹۵-۲۰۲۴)

عباس رنجبر سعادت‌آبادی^۱ ✉

۱- نویسنده مسئول، گروه پیش‌آگاهی مخاطرات جوی، پژوهشکده هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: aranjbar@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۸/۱۸

واژگان کلیدی:

بی‌هنجاری‌های
گردش جوی،
تغییرپذیری بارش،
دوره‌های خشک و
تر،
ایران.

این مطالعه به بررسی بی‌هنجاری‌های گردش‌های جوی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و تأثیر آن بر دوره‌های خشک و تر ایران طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ و ارتباط تغییرات بارش با شاخص ENSO-Modoki می‌پردازد. با تلفیق داده‌های بارش ۱۷۹ ایستگاه و میدان ژئوپتانسیل بازتحلیل، دوره‌های خشک و تر شناسایی و میانگین ترکیبی بی‌هنجاری‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد بیشترین سهم بارش سالانه مربوط به ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و دسامبر است. روند بارش در اغلب ماه‌ها کاهشی بوده و بیشترین کاهش در دسامبر، ژانویه و مارس رخ داده که تهدیدی جدی برای منابع آب کشور محسوب می‌شود. تحلیل درصد تغییرات ماهانه بارش نشان داد در برخی سال‌ها نوسانات بسیار شدیدی رخ داده است؛ به‌گونه‌ای که افزایش‌هایی بیش از ۱۰۰ درصد (مارس ۱۹۹۶ با ۱۳۶+ درصد و دسامبر ۲۰۰۴ با ۱۴۳+ درصد) و کاهش‌هایی بیش از ۸۰ درصد (ژانویه ۲۰۲۱ با ۸۷- درصد و مارس ۲۰۰۸ با ۸۹- درصد) ثبت شد. این نوسانات عمدتاً ناشی از تغییر در الگوهای جوی، به‌ویژه ناهه‌های تراز میانی و ردسپهر است. بی‌هنجاری‌های ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داد در دوره‌های خشک و تر، الگوهای جوی نواحی اقیانوس آرام شمالی، اطلس شمالی، اروپا و غرب روسیه رفتار مشخصی دارند؛ به‌گونه‌ای که بی‌هنجاری‌های منفی (مثبت) در این مناطق با دوره‌های خشک (تر) ایران همراه است. همبستگی مثبت و معنادار سالانه میان انسو - مودوکی و بارش کل کشور ($r \approx 0.51$) و همبستگی منفی قوی میان ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال اقیانوس‌ها و بارش ایران نشان داد که ترکیب شاخص‌های دور پیوندی با تحلیل‌های تراز میانی جو می‌تواند مهارت پیش‌بینی فصلی را بهبود بخشد.

استناد: رنجبر سعادت‌آبادی، عباس. (۱۴۰۴). تحلیل بی‌هنجاری‌های گردش‌های جوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و تأثیر آن بر دوره‌های خشک و تر در ایران (۱۹۹۵-۲۰۲۴). *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۳)، ۴۲-۲۳.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.403917.1007903>

مقدمه

بارش به عنوان مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده اقلیم‌های خشک و تر، تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد. این عوامل شامل عرض جغرافیایی، دوری یا نزدیکی به دریاها و اقیانوس‌ها، ویژگی‌های کوهساری و بر همکنش‌های غیرخطی انواع دورپیوندهای جوی و اقیانوسی است. اثرات این عوامل در الگوهای جوی نمایان می‌شود که در طولانی‌مدت، اقلیم مناطق را شکل می‌دهند و در دوره‌های کوتاه‌مدت‌تر، بی‌هنجاری‌هایی نسبت به شرایط معمول ایجاد می‌کنند. یکی از مهم‌ترین این بی‌هنجاری‌ها، رخداد دوره‌های خشک و تر است که ناشی از بی‌هنجاری‌های رخ داده در گردش‌های جوی می‌باشد که در این مطالعه بررسی شده است.

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که از سال ۲۰۰۹ به بعد، بارش در ایران روند کاهشی قابل توجهی داشته است (معمدی و همکاران، ۲۰۲۳). بهرامی و همکاران (۲۰۲۰) نیز تأکید کردند که تغییر فازهای نوسان جنوبی ال نینو، به‌ویژه استقرار لانیای ضعیف پس از ال نینوی قوی، منجر به ایجاد بی‌هنجاری‌های فشار و گردش‌های جوی شده است که پی‌آمد آن کاهش بارش پاییزه در ایران می‌باشد. همچنین، عوامل دیگری چون گسترش پراارتفاع جنب‌حاره‌ای بر روی عربستان و شمال آفریقا، تضعیف کم‌فشار ایسلند و تقویت پرفشار سبیری، از جمله دلایل مؤثر بر کاهش بارش در این شرایط هستند. محمودی و همکاران (۱۴۰۱) نتایج نشان دادند که در دوره‌های ترسالی، استقرار کم‌فشار بر اروپا، پرفشار بر دریای عرب و کم‌فشار بر دریای سرخ، موجب تقویت انتقال رطوبت از غرب، جنوب و جنوب غرب به ایران می‌شود. در مقابل، در دوره‌های خشکسالی، شکل‌گیری پرفشار بر اروپا و کم‌فشار بر دریای عرب و دریای سرخ، سبب تضعیف چرخندزایی مدیترانه و اختلال در انتقال رطوبت از دریای عرب و اقیانوس هند به ایران می‌گردد. فرج زاده اصل و همکاران (۱۳۹۲) با بررسی وردایی الگوهای پیوند از دور و اثر آن‌ها بر بارش ایران نشان دادند که تغییر الگوی بارشی کشور زیر تأثیر تغییر برخی از الگوهای پیوند از دور می‌باشد، به طوری که تغییر در برخی نمایه‌ها نظیر الگوهای پیوند از دور در اقیانوس اطلس و اسکندیناوی سبب کاهش بارش و افزایش نمایه‌های اقیانوس آرام در جهت بهبود بارش میانگین کشور شده است.

پژوهش‌های متعدد بر روی ارتفاع ژئو پتانسیل و الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که این تراز نقشی اساسی در تبیین نوسانات دما، بارش و رخداد دوره‌های خشک و تر ایران دارد. بررسی‌های علیجانی و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که میان ناهنجاری‌های ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ناهنجاری‌های دمای ماه ژانویه ایران، انطباق بسیار بالایی وجود دارد و تغییرات این تراز به طور مستقیم رفتار دمایی کشور را کنترل می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر، رضیئی و همکاران (۱۳۸۹) با تحلیل الگوهای روزانه گردش زمستانه طی دوره ۱۹۶۵-۲۰۰۰ دریافتند که اغلب الگوهای سینوپتیکی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال فاقد روند افزایشی یا کاهشی معنادار بوده‌اند.

مطالعات مرتبط با رخداد بارش نیز اهمیت تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را به‌خوبی نشان می‌دهد. عزیززاده و همکاران (۱۳۹۱) با تحلیل داده‌های بارش ۲۱۲ ایستگاه و نقشه‌های ژئو پتانسیل طی سال‌های ۱۳۵۹-۱۳۸۷ بیان کردند که موقعیت محور فرود، عامل تعیین‌کننده گستره بارش‌های فراگیر کشور است، به‌طوری‌که قرارگیری محور فرود بر روی طول جغرافیایی ۴۷/۵ درجه شرقی می‌تواند بیش از نیمی از ایران را تحت بارش‌های گسترده قرار دهد، درحالی‌که جابه‌جایی محور فرود به سمت شرق یا کم‌عمق شدن چاله شرق مدیترانه، باعث محدود شدن گستره بارش‌ها می‌شود. از سوی دیگر، مطالعاتی در زمینه پرفشار جنب‌حاره (علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷) نشان می‌دهد که شدت و گسترش این سامانه در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از عوامل اصلی تعیین‌کننده دوره‌های خشک و مرطوب کشور است. روند افزایشی میانگین ارتفاع ژئو پتانسیل این سامانه طی دهه‌های اخیر نیز با آهنگ حدود ۵/۸۷ متر در هر دهه گزارش شده و در سال ۲۰۱۵ بیشترین مقادیر مثبت ثبت شده است. در سطحی گسترده‌تر، بررسی‌های مبتنی بر تاوایی نسبی (امیری و همکاران، ۱۴۰۰) با استفاده از داده‌های ۱۹۸۱-

۲۰۱۷ نشان داده است که سه کانون عمده تاوایی در خاورمیانه-مدیترانه شرقی، شرق اروپا و نواحی چرخندزایی ترکیه-قبرس، به طور معنی‌داری با بارش شرق ایران، سواحل جنوبی دریای خزر و شمال غرب کشور مرتبط هستند و در مجموع بیش از ۸۲ درصد واریانس مشترک بین بارش و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را توضیح می‌دهند. همچنین نتایج رضیئی و همکاران (۱۳۸۸) تأکید می‌کند که به‌جز سواحل خزری، توزیع بارش فصل سرد ایران به طور مستقیم از الگوهای گردش ۵۰۰ هکتوپاسکالی تبعیت می‌کند و این مسئله نقش تعیین‌کننده سامانه‌های میان‌تروپوسفری در اقلیم ایران را نشان می‌دهد.

مطالعه مهبد و همکاران (۲۰۲۳) با مطالعه ارتباط دوره‌های تر و خشک در ایران را با شاخص‌های اقلیمی مقیاس بزرگ نشان دادند که دوره‌های تر در جنوب کاهش و در شمال افزایش یافته‌اند، درحالی‌که شدت دوره‌های تر حدی در سراسر کشور بیشتر شده است. ایران در دوره‌های ال‌نینو مرطوب‌تر است و نوسانات بلندمدت دمای سطح دریا در اقیانوس آرام بیشترین همبستگی را با تغییرات تر و خشک نشان می‌دهند. محمودی و همکاران (۲۰۲۱) نیز با بررسی و تحلیل داده‌های ۴۱ ایستگاه طی سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷، نشان دادند که طولانی‌ترین دوره خشک در جنوب شرق ایران (۳۵۱ روز) و کوتاه‌ترین را در شمال (۳۷ روز) رخ داده است. این تفاوت‌های مکانی با نتایج لی و همکاران (۲۰۱۷) در چین همخوانی دارد که نشان می‌دهد در مناطق خشک، دوره‌های خشک طولانی‌تر سهم غالب دارند. طلوعی و همکاران (۱۴۰۰) رابطه بین الگوهای پیوند از دور نیمکره شمالی (۱۱ دورپیوند) با خشکسالی‌های شمال غرب ایران را با استفاده از داده‌های ۱۸ ایستگاه هواشناسی طی دوره ۱۹۹۸-۲۰۱۸ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حدود ۱۵ درصد همبستگی معنی‌داری با مقادیر ضریب همبستگی بین ۰/۱ تا ۰/۱۸ در بین ایستگاه‌های مختلف وجود دارد و برای بقیه ایستگاه‌ها یا همبستگی معنی‌داری وجود ندارد و یا ضرایب همبستگی کمتر از ۰/۱ است.

تحقیقات متعددی بر نقش هم‌زمان پرفشار سبیری و آزرورز در ایجاد خشکسالی‌ها بر روی ایران تأکید کرده‌اند (خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۷۶؛ خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۹۱؛ احمدی گیوی و همکاران، ۱۳۸۷؛ موسوی بایگی و اشرف، ۱۳۹۰؛ غلامی و همکاران، ۱۳۹۷). صادقی و همکاران (۱۳۸۷) در مطالعه‌ای در خراسان نشان دادند که اتصال این دو سامانه پرفشاری می‌تواند تا ۶۰ درصد کاهش بارش را توضیح دهد. رنجبر سعاد آبادی و همکاران (۱۳۹۲) با بررسی ارتباط بین بی‌هنجاری‌های الگوهای فشاری با بارش سواحل جنوبی دریای خزر نشان دادند که بی‌هنجاری مثبت فشار بر روی اروپا با افزایش بارش در این مناطق همراه است. بسیاری از تحقیقات انجام شده از قبیل سینگ و همکاران (۲۰۱۴)، زولینا و همکاران (۲۰۱۳؛ ۲۰۱۴)، و لی و همکاران (۲۰۱۶)، عمدتاً بر تغییرات مدت یا فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب تمرکز کرده‌اند، اما تغییرات در زمان‌بندی آن‌ها و نقش گردش‌های جوی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، ایران‌نژاد و همکاران (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای رابطه بین الگوهای چرخندزایی مدیترانه و بارش سالانه ایران را بررسی کردند و نشان دادند که چرخند واقع در شرق مدیترانه و کم‌فشار گرمایی واقع در شمال دریای سرخ بیشترین تأثیر را بر بارش ایران دارند. تداوم دوره‌های خشک منجر به خشکسالی شده که رخداد این پدیده خسارات ویرانگری به انسان‌ها و سلامت اکوسیستم وارد می‌کند (یانگ و همکاران، ۲۰۱۸). این خسارات در جهانی گرم‌تر، افزایش خواهد یافت (سو و همکاران، ۲۰۱۸)، جایی که انتظار می‌رود فراوانی و شدت خشکسالی‌ها تشدید شود. تغییرات قابل تمایز در خشکسالی‌ها و الگوهای جوی مرتبط با آن‌ها در مطالعاتی از قبیل آرزنی و همکاران، (۲۰۲۱)، سوین و همکاران (۲۰۱۷) و گیسون و همکاران (۲۰۱۹) بررسی شده و نشان دادند که اغلب رخداد بندال، یا گردش واپرخندی عامل اصلی رخداد این پدیده بوده که تداوم آن‌ها برای مدت زمان طولانی منجر به فصل‌های غیرعادی خشک در مناطق همسایه می‌شود.

این پژوهش با بررسی درصد تغییرات ماهانه بارش در ۱۷۹ ایستگاه همدیدی طی دوره زمانی ۳۰ ساله اخیر (۱۹۹۵-۱۹۹۵)

(۲۰۲۴) نسبت به دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰، تعیین دوره‌های خشک و تر ماهانه و تحلیل میدان‌های ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری‌های ماهانه آن نسبت به میانگین ماهانه دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰، در پی شناسایی الگوهای جوی مؤثر بر رخداد دوره‌های خشک و تر است. این مطالعه تلاش می‌کند ضمن کمک به پیش‌بینی‌های بلندمدت دوره‌های خشک و تر، شکاف تحقیقاتی موجود در زمینه تحلیل زمانی تغییرپذیری اقلیمی را پر نماید و به درک بهتر گردش‌های جوی مؤثر بر بی‌هنجاری‌های بارش در ایران کمک کند.

روش تحقیق

دوره مورد مطالعه شامل تغییرات بارش ماهانه طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۵-۲۰۲۴) است. برای سنجش میزان تغییرات، بی‌هنجاری و درصد تغییرات بارش در مقایسه با میانگین دوره اقلیمی استاندارد سازمان جهانی هواشناسی (۱۹۹۱-۲۰۲۰) محاسبه شد. در این راستا، داده‌های بارش ماهانه ۱۷۹ ایستگاه همدید طی دوره مذکور دریافت و بررسی شد. به منظور تحلیل الگوهای جوی و ارتباط آن‌ها با تغییرات بارش، از داده‌های بازتحلیل ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مرکز NCEP/NCAR (www.cpc.ncep.noaa.gov) برای دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ استفاده گردید. تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به عنوان سطح مرجع انتخاب شد، زیرا به عنوان لایه میانی وردسپهر، خیلی کم تحت تأثیر واداشتهای سطحی و ناهمواری‌های سطح زمین بوده و نمایانگر پایدارترین الگوهای دینامیکی مؤثر بر سامانه‌های بارشی ایران است. ارتباط قوی این تراز با نوسانات بارش و دما در مطالعات گذشته (از قبیل رضیعی و همکاران، ۱۳۸۸؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۹۴) نیز تأیید شده است.

انتخاب داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR به این دلیل انجام شد که هدف مطالعه، بررسی الگوهای بزرگ مقیاس و سینوپتیکی جو در یک بازه بلندمدت و بر گستره نیمکره‌ای است. این مجموعه داده با برخورداری از پوشش زمانی پیوسته، همگنی بلندمدت و تفکیک مکانی مناسب، امکان بازنمایی دقیق سامانه‌های میان عرضی و ساختارهای مؤثر در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را فراهم می‌کند و به خوبی پاسخگوی نیازهای تحلیلی این پژوهش است.

براین اساس داده‌های ماهانه بارش ۱۷۹ ایستگاه هواشناسی، برای همه ماه‌های طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۴، تهیه گردید. سپس: ۱- برای هر ماه، متوسط بارش ۱۷۹ ایستگاه در هر سال محاسبه گردید و آن را به عنوان شاخص بارش آن ماه در نظر گرفته شد. ۲- روند تغییرات ماهانه و سهم هر یک از آنها از بارش کل کشور تعیین می‌شود. ۳- متوسط ۳۰ ماهه برای هر ماه در دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ محاسبه و به عنوان متوسط اقلیمی آن ماه در نظر گرفته شد. ۴- طی دوره ۳۰ ساله اخیر، ۱۹۹۵-۲۰۲۴، برای هر یک از ماه‌های مورد مطالعه، نمایه درصد تغییر (رابطه ۱) ماهانه بارش و درصد سهم بارش ماهانه (رابطه ۲) محاسبه شد.

$$PC_i = \frac{(m_i - M)}{|M|} \times 100 \quad (1)$$

که در آن PC_i درصد تغییر، m_i مقدار ماهانه بارش، M مقدار میانگین همان فراسنج در دوه اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ برای همان ماه و $|M|$ قدر مطلق آن است.

$$MPS_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^{12} P_j} \times 100 \quad (2)$$

MPS_i ، درصد سهم بارش ماهانه و $\sum_{j=1}^{12} P_j$ مجموع بارش سالانه (جمع بارش ۱۲ ماه) می‌باشد

۵- شیب روند و ضریب تبیین با بهره‌گیری از رگرسیون خطی ساده میان سال و مقادیر بارش ماهانه و، خطای استاندارد در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد. همچنین برای تعیین مقدار p و ارزیابی معنی‌داری آماری روندها، آزمون من-کندال در

محیط نرم‌افزار Minitab اجرا گردید. ۶- مقادیر درصد تغییرات ماهانه بارش به دست آمده از رابطه (۱) از کم به زیاد مرتب شد و یک سری زمانی با ۳۰ عضو بدست می‌آید. ۷-اولین و آخرین عضو این سری زمانی، به‌عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه در نظر گرفته شد. ۸-هفت ماه خشک اول سری زمانی فوق (چارک اول) به‌عنوان ماه‌های خشک و هفت ماه تر آخر آن (چارک چهارم) به‌عنوان ماه‌های تر در نظر گرفته شد. ۹-با استفاده از داده‌های تحلیل مجدد NCEP/NCAR، نقشه‌های ماهانه ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری آنها نسبت به مقادیر مشابه دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ برای هر یک از خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه‌ها (از اکتبر تا مه) محاسبه و تحلیل شده است. ۱۰-متوسط بی‌هنجاری‌های هفت ماهه خشک و تر برای هر یک از ماه‌های اکتبر تا مه محاسبه و تحلیل گردید. برای این منظور نقشه‌های ترکیبی از میانگین اقلیمی ۳۰ ساله ماه‌های فوق، رسم، و تغییرات شدت و جابجایی مکانی الگوهای ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نسبت به شرایط معمول ارزیابی می‌شود. ۱۱- محاسبه همبستگی‌های خطی ماهانه و سالانه بین بارش با شاخص انسو - مودوکی (رابطه ۳) و همچنین با ارتفاع ژئو پتانسیل تعدادی از مناطق شناسایی شده با بیشینه بی‌هنجاری در دوره‌های خشک و تر.

$$EMI = SSTA_A - 0.5 \times SSTA_B - 0.5 \times SSTA_C \quad (3)$$

که در آن $EMI(ENSO\ Modoki\ Index)$ شاخص انسو-مودوکی، $SSTA$ ، بی‌هنجاری دمای سطح دریا، و اندیس‌های A، B و C، به ترتیب برای مساحت‌های $A(165^{\circ}E-140^{\circ}W, 10^{\circ}S-10^{\circ}N)$ ، $B(110^{\circ}W-70^{\circ}W, 15^{\circ}S-5^{\circ}N)$ و $C(125^{\circ}E-145^{\circ}E, 10^{\circ}S-20^{\circ}N)$ می‌باشد. ال‌نینو مودوکی نوعی نوسان جوی-اقیانوسی در اقیانوس آرام استوایی است که برخلاف ال‌نینوی معمول، با گرمایش در مرکز اقیانوس و سرمای دو سوی آن همراه است (آشوک و همکاران، ۲۰۰۷). ۱۲-چهار ناحیه کلیدی دورپیوندی در اقیانوس آرام شمالی (Pa: Pacific)، اقیانوس اطلس شمالی (At: Atlantic)، اروپا (Eu: Europe) و غرب روسیه (WR: West Russia)، بر اساس بیشترین بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در دوره‌های خشک و تر شناسایی شده و باکس‌های مربوطه در مختصات همان نواحی ترسیم و برای محاسبه همبستگی‌ها به کار گرفته شدند.

یافته‌ها

روند و درصد سهم بارش هر یک از ماه‌ها از بارش سالانه کشور طی دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۵-۲۰۲۴ در جدول (۱) نشان داده شده است. بررسی روند بارش نشان می‌دهد که در ۱۰ ماه از سال، روند بارش منفی است. بیشترین کاهش در ماه‌های دسامبر (۰/۶۳-)، مارس (۰/۵۵-) و ژانویه (۰/۵۳-) مشاهده شد که همگی از مهم‌ترین ماه‌های بارشی فصل سرد هستند. روند سایر ماه‌ها کم‌مقدار و عمدتاً نامعنا بوده است. پایین بودن مقادیر ضریب تبیین (R^2) در همه ماه‌ها بیانگر آن است که متغیر زمان تنها بخش کوچکی از تغییرات بارش را توضیح می‌دهد و نقش اصلی بر عهده الگوهای همدیدی، نوسانات اقلیمی و شاخص‌های دورپیوندی است، عواملی که ماهیتاً نوسانی، غیردوره‌ای و متغیر هستند.

جدول ۱. روند، مقادیر P ، معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۰ درصد، ضریب تبیین و درصد سهم بارش ماهانه از کل بارش سالانه کشور طی دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۵-۲۰۲۴، علامت‌های "+"(-) بیانگر وجود (نبود) روند معنی‌دار است.

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
درصد بارش	۱۶/۲	۱۴/۵	۱۶/۵	۱۲/۵	۶/۱	۲/۰	۲/۱	۱/۵	۱/۹	۴/۵	۱۰/۲	۱۲/۲
روند	-۰/۵۳	-۰/۰۹	-۰/۵۵	-۰/۱۴	-۰/۲	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۹	-۰/۰۷	-۰/۳	-۰/۶۳
R^2 (ضریب تبیین)	۰/۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۱۳	۰/۰۰۹	۰/۰۶	۰/۱۱
P-value	۰/۰۸۸	۰/۴۳	۰/۱۱	۰/۳۱	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۶۹	۰/۱۱	۰/۰۱۱	۰/۳۳	۱/۲۵	۰/۰۶۹
Z	-۱/۳۶	-۰/۱۸	-۱/۲	-۰/۵	۰/۹۶	-۱/۰۷	-۰/۵	-۱/۲	-۲/۲۸	۰/۴۳	۰/۱۰۶	-۱/۴۸
معنی‌داری روند	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
خطای استاندارد	۳/۱	۲/۵	۳/۵	۲/۷	۱/۱	۰/۷	۰/۶	۰/۴	۰/۴	۱/۱	۲	۳

نتایج آزمون من-کندال نیز این الگو را تأیید می‌کند، به‌طوری‌که بیشتر ماه‌ها فاقد روند معنادار هستند. با این حال، سه ماه ژانویه، سپتامبر و دسامبر روند کاهشی معناداری را نشان می‌دهند. مقدار منفی آماره Z در این ماه‌ها کاهش نظام‌مند بارش در طول دوره مطالعه را تأیید می‌کند، در حالی که در سایر ماه‌های دوره بارشی (از جمله فوریه، مارس و آوریل) روند معناداری مشاهده نشد. در مجموع، نتایج بیانگر کاهش تدریجی بارش در ماه‌های کلیدی آغاز و پایان فصل بارش (اکتبر - دسامبر و مارس - مه) و افزایش نوسانات بارشی در ماه‌های پربارش است. این وضعیت احتمال کوتاه‌تر شدن فصل بارش، تأخیر در آغاز بارش‌های پاییزه و کاهش بارش‌های انتهایی فصل را مطرح می‌کند.

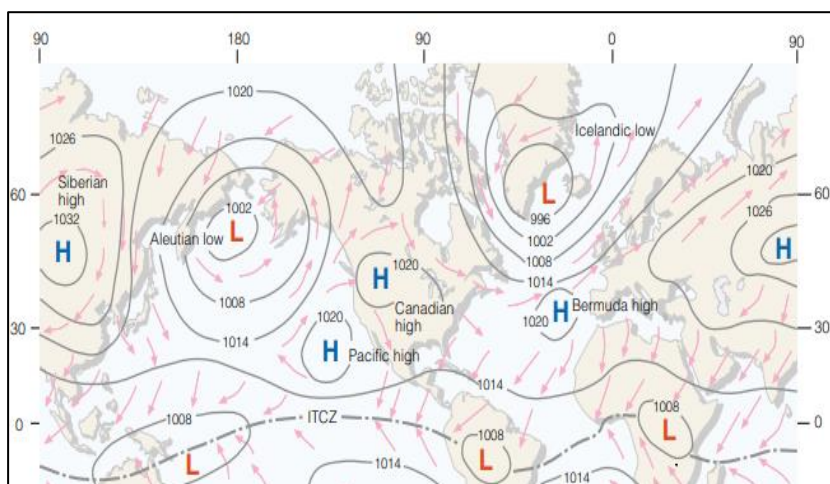
برای تعیین دوره‌های خشک و تر ماهانه، درصد تغییرات بارش ماهانه، بر اساس فرمول (۱) برای هریک از ماه‌ها طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۴) محاسبه گردید. سپس برای هر ماه سری زمانی ۳۰ عضوی از مقادیر کم به زیاد مرتب شد و ۷ ماه اول (تقریباً چارک اول)، که کمترین درصد تغییرات بارش را داشته به‌عنوان ماه‌های خشک و ۷ ماه آخری (تقریباً چارک چهارم)، که بیشترین درصد تغییرات بارش را داشته به‌عنوان ماه‌های مرطوب در نظر گرفته شده است (جدول ۲). درصد تغییرات بارش در ماه‌های مارس، مه، و اکتبر و دسامبر به بیش ۱۰۰ درصد رسیده در حالی که در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل و دسامبر به بیش از ۸۰ درصد رسیده است. ماه‌های مارس و دسامبر رخداد بیشینه درصدهای افزایشی و کاهشی را داشته‌اند.

جدول ۲. درصد تغییرات بارش (حسب %) مرطوب‌ترین و خشک‌ترین ماه‌ها طی دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۵-۲۰۲۴

ماه	مرطوب‌ترین ماه‌ها											خشک‌ترین ماه‌ها
ژانویه	۹۴/۵	۷۹/۶	۶۱/۸	۵۷/۵	۵۳/۸	۴۶/۳	۴۰/۴	-۸۷	-۶۴	-۵۸/۶	-۵۱/۱	-۴۳/۱
سال	۲۰۰۴	۱۹۹۸	۱۹۹۶	۲۰۲۲	۲۰۲۰	۲۰۰۵	۲۰۰۰	۲۰۲۱	۱۹۹۵	۲۰۱۸	۲۰۰۱	۲۰۰۹
فوریه	۸۷/۲	۶۲	۶۱	۵۱/۹	۵۱/۸	۴۶/۴	۴۴/۹	-۶۳/۸	-۵۶/۳	-۵۲/۲	-۴۹/۹	-۴۲/۴
سال	۲۰۱۷	۱۹۹۶	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۱۹۹۵	۲۰۱۶	۲۰۰۱	۲۰۰۸	۲۰۰۰	۲۰۲۱
مارس	۱۳۶/۶	۱۰۰/۵	۸۸/۱	۶۰	۴۶/۲	۴۴/۷	۳۳/۱	-۸۹/۱	-۶۹/۳	-۶۱/۵	-۵۹/۲	-۴۱/۴
سال	۱۹۹۶	۲۰۱۹	۱۹۹۷	۱۹۹۸	۲۰۰۷	۲۰۲۰	۱۹۹۹	۲۰۰۸	۲۰۱۸	۲۰۲۱	۲۰۲۲	۲۰۱۳
آوریل	۹۳/۱	۹۳/۱	۷۸/۶	۷۶/۵	۵۵/۸	۴۹/۲	۴۴/۹	-۸۳/۹	-۷۹/۳	-۷۲/۹	-۷۲/۵	-۵۶/۶
سال	۲۰۰۲	۲۰۲۰	۱۹۹۵	۲۰۱۹	۲۰۰۹	۲۰۰۷	۲۰۰۴	۲۰۲۱	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۸	۱۹۹۹
مه	۱۳۶/۳	۱۰۰/۷	۵۶/۱	۴۱/۹	۴۰/۳	۲۳/۹	۱۷	-۷۵/۸	-۵۹	-۵۵/۷	-۳۳/۵	-۲۷
سال	۲۰۲۴	۲۰۱۸	۲۰۱۳	۲۰۱۰	۱۹۹۵	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۰	۲۰۰۸	۱۹۹۹	۲۰۰۹	۲۰۱۵
اکتبر	۱۷۰/۴	۹۶/۲	۹۰/۸	۸۵	۷۸/۸	۷۵	۷۱/۱	-۷۷/۲	-۶۶/۵	-۶۱/۵	-۵۷/۶	-۴۸/۸
سال	۲۰۱۵	۲۰۱۱	۲۰۱۸	۲۰۱۴	۲۰۰۶	۲۰۰۸	۲۰۱۹	۲۰۰۷	۲۰۰۵	۲۰۲۰	۲۰۱۰	۲۰۱۳
نوامبر	۸۸/۴	۸۲/۷	۶۹/۴	۶۳/۳	۶۰/۷	۶۰/۲	۵۵/۷	-۷۸/۱	-۷۵/۲	-۶۸	-۶۶/۳	-۴۶/۳
سال	۲۰۱۸	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۲۰	۱۹۹۷	۲۰۰۹	۲۰۱۳	۱۹۹۸	۲۰۱۰	۱۹۹۶	۱۹۹۵	۲۰۱۷
دسامبر	۱۴۳/۷	۱۱۶/۸	۷۸/۵	۷۴/۸	۶۷/۸	۵۶/۸	۴۷/۱	-۸۴/۸	-۷۷/۲	-۷۵/۵	-۷۵	-۶۲/۸
سال	۲۰۰۴	۲۰۰۱	۲۰۰	۲۰۰۶	۱۹۹۵	۲۰۰۹	۲۰۱۹	۲۰۱۱	۲۰۱۷	۱۹۹۸	۲۰۱۰	۱۹۹۶

گردش‌ها و الگوهای همدیدی

آهرنس در سال ۲۰۱۱، با استفاده از میانگین‌گیری بلندمدت از فشار سطح دریا و بادهای سطحی برای ژانویه، به‌عنوان نماینده فصل سرد، و جولای، به‌عنوان نماینده فصل گرم، نشان داد که در فصل سرد نیمکره شمالی، چهار سامانه پرفشار و دو سامانه کم‌فشار غالب هستند (شکل ۱). این سامانه‌ها در طول سال به طور مداوم وجود دارند و نمایانگر گردش‌های اقلیمی نیمکره شمالی می‌باشند. هرچند شدت و گستره نفوذ آنها متغیر است، مراکز این سامانه‌ها تنها به طور جزئی حرکت می‌کنند.



شکل ۱. میانگین توزیع فشار سطح دریا و الگوهای جریان باد سطحی برای ژانویه، حروف H و L، به ترتیب سامانه‌های پرفشار و کم‌فشار، خط-نقطه چین نشان دهنده موقعیت منطقه همگرایی بین حاره‌ای (ITCZ1) است (آهرنس، ۲۰۱۱)

در شرق اقیانوس اطلس، بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ و ۳۵ درجه شمالی، سامانه پرفشار برمودا-آزورز و در اقیانوس آرام، پرفشار اقیانوس آرام به‌عنوان واچرخنده‌های جنب حاره‌ای شناخته می‌شوند که در پاسخ به همگرایی هوا در ترازهای فوقانی ایجاد می‌شوند.

تحلیل خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه‌های سال در ارتباط با بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به دلیل محدودیت حجم مقاله، تنها نقشه‌های سه ماه پربارش ارائه شده و برای بقیه ماه‌های مورد مطالعه فقط تحلیل نقشه‌ها، (بدون نمایش شکل‌ها) آورده شده است. بررسی الگوهای ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال در خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه‌های اکتبر تا مه نشان می‌دهد که تغییر آرایش پشته‌ها و ناوه‌های بزرگ مقیاس نقش اصلی را در تفاوت بارش این ماه‌ها دارد.

اکتبر :

در اکتبر خشک، پشته‌های قوی و بی‌هنجاری‌های مثبت گسترده بر فراز روسیه، شمال اطلس و کانادا موجب پایداری شدید جو و کاهش بارش ایران می‌شود. در مقابل، در اکتبر مرطوب الگوها وارونه بوده و ناوه‌ها در غرب روسیه و شرق چین تقویت شده‌اند؛ تفاوت اصلی دو وضعیت جابه‌جایی محور پشته-ناوه در اطلس و روسیه است.

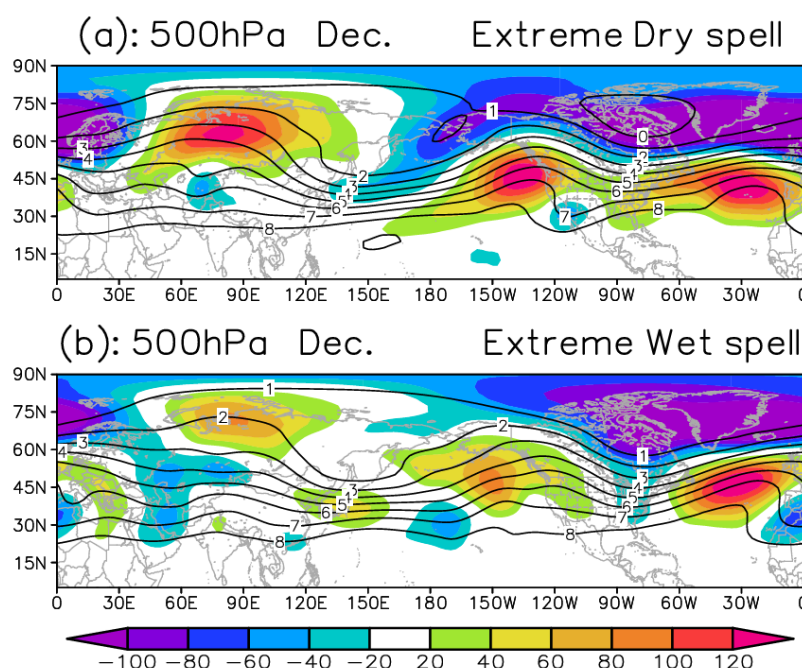
نوامبر :

در نوامبر خشک، بی‌هنجاری‌های مثبت قوی در عرض‌های بالا و الگوی دوقطبی اطلس شمالی باعث تقویت پشته و

سیطره شرایط پایدار بر ایران می‌شود. در نوامبر مرطوب، الگوی دوقطبی در اروپا، آمریکای شمالی و اطلس سبب تقویت ناوه مدیترانه و افزایش بارش ایران می‌گردد.

دسامبر:

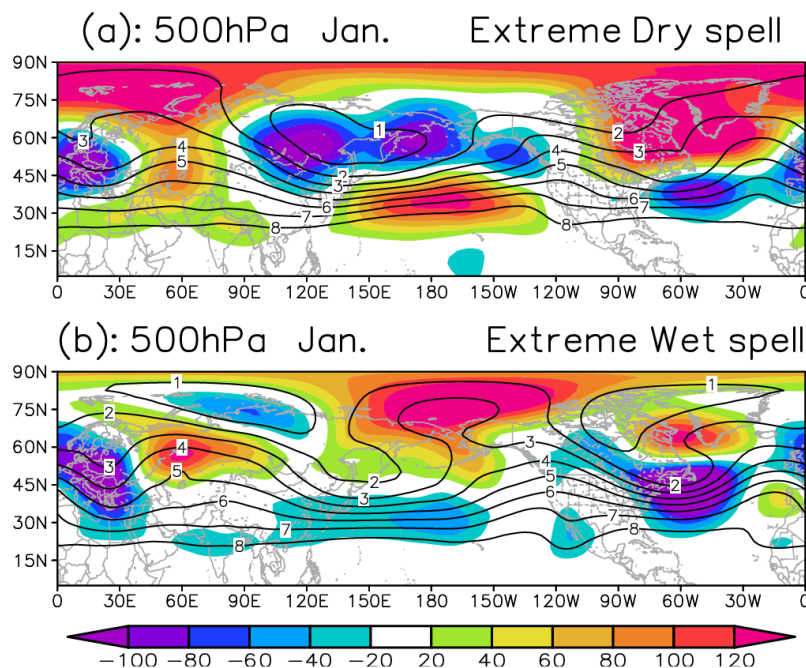
دسامبر خشک با استقرار بی‌هنجاری‌های مثبت گسترده بر روسیه، اطلس شمالی و آرام شمالی، همراه با تضعیف ناوه‌های بارشی غرب آسیا مشخص می‌شود. در دسامبر مرطوب، ناوه‌های غرب آسیا و جنوب شرق اطلس تقویت شده و بی‌هنجاری‌های منفی گسترده بر فراز این نواحی شرایط لازم برای عبور امواج باروکلینیک و افزایش بارش ایران را فراهم می‌کنند. تفاوت اصلی، تضعیف سامانه‌های پرفشار عرض‌های بالا و تقویت ناوه‌های فعال در مسیر غرب تا جنوب غرب آسیاست.



شکل ۲. میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری‌های آنها نسبت به دوره اقلیمی (دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰) برای خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه دسامبر (به ترتیب دسامبر ۲۰۱۱ و دسامبر ۲۰۰۴) دوره مورد مطالعه، و ژانویه ۲۰۲۱، پربندهای سیاه، میانگین ماهانه و سطوح رنگی شده بی‌هنجاری‌های ماهانه را نشان می‌دهند. اعداد ۱، ۲ تا ۸ آورده شده روی پربندهای، به ترتیب نشان دهنده مقادیر ۵۱۰، ۵۲۰ تا ۵۸۰ دکامتر می‌باشند.

ژانویه:

در خشک‌ترین ژانویه، بی‌هنجاری‌های شدید ارتفاعی در اقیانوس آرام شمالی به صورت دوقطبی نصف‌النهاری ظاهر شده‌اند؛ به گونه‌ای که در بخش مرکزی بی‌هنجاری‌های مثبت تا بیش از ۱۲۰ متر و در بخش شمالی بی‌هنجاری‌های منفی تا بیش از ۱۰۰- متر مشاهده می‌شود (شکل ۳a). در مرطوب‌ترین ژانویه، الگوی بی‌هنجاری‌ها نسبت به دوره خشک کاملاً معکوس شده است؛ بر فراز اقیانوس اطلس، دوقطبی نصف‌النهاری با بی‌هنجاری‌های شدید مشاهده می‌شود و ناوه‌ای از اروپای مرکزی تا شرق مدیترانه تقویت شده است. هم‌زمان، پشته‌ای بر فراز غرب و مرکز روسیه گسترش یافته است (شکل ۳b). در اقیانوس اطلس شمالی، این وضعیت به صورت معکوس دیده می‌شود؛ به طوری که پشته ارتفاعی در شرق و شمال شرق اطلس تقویت شده و دو ناوه در دو سوی آن شکل گرفته‌اند. در خاورمیانه و شمال شرق آفریقا، بی‌هنجاری‌های مثبت ارتفاعی همراه با تقویت پشته‌ای از شرق دریای خزر تا دریای بارتز دیده می‌شود. این ساختار جوی، موجب پایداری جو و کاهش نفوذ سامانه‌های باران‌زا به داخل ایران در دوره‌های خشک و افزایش آن در دوره‌های مرطوب می‌گردد.



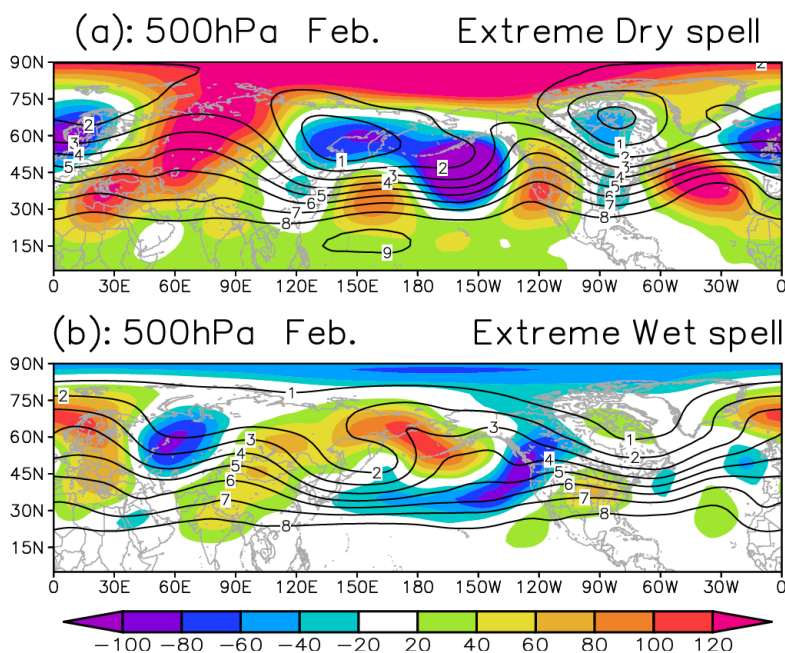
شکل ۳. میانگین ماهانه ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری‌های آنها نسبت به دوره اقلیمی (دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰) برای خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه ژانویه (به ترتیب ژانویه، ۲۰۲۱ و ژانویه ۲۰۰۴) دوره مورد مطالعه، پربندهای سیاه، میانگین ماهانه و سطوح رنگی شده بی‌هنجاری‌های ماهانه را نشان می‌دهند. اعداد ۱، ۲ تا ۸ آورده شده روی پربندهای، به ترتیب نشان دهنده مقادیر ۵۱۰، ۵۲۰ تا ۵۸۰ دکامتر می‌باشند.

فوریه:

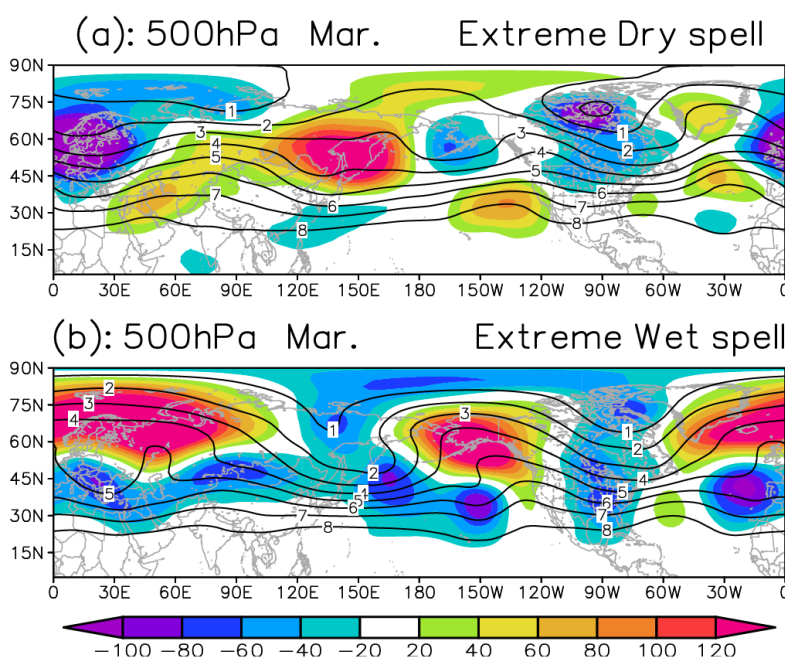
در خشک‌ترین فوریه، بی‌هنجاری‌های بسیار شدید ارتفاعی در نواحی مجاور قطب شمال همراه با گسترش پشته‌ای بر فراز روسیه، شرق مدیترانه، شمال اطلس و نیمه غربی آمریکا مشاهده می‌شود. بی‌هنجاری‌های منفی ارتفاع در ایسلند، بخش‌هایی از اروپای شمالی، شمال شرق اقیانوس آرام تا شرق روسیه، و نیمه شرقی کانادا و آمریکا دیده می‌شود (شکل ۴a). در مرطوب‌ترین فوریه، آرایش بی‌هنجاری‌های ارتفاعی در روسیه، آرام، کانادا، آمریکا و اروپا نسبت به دوره خشک کاملاً معکوس است. ناوهای عمیق از روسیه تا شرق مدیترانه شکل گرفته که با تقویت پشته‌ای بر فراز اروپا همراه است. این الگو شرایط دینامیکی لازم را برای صعود هوا و افزایش بارش در نواحی شرقی ناوه، از جمله ایران، فراهم می‌سازد (شکل ۴b).

مارس:

در خشک‌ترین مارس، پشته‌ای قوی از شرق مدیترانه و ایران تا آسیای میانه و بخش‌هایی از سیبری گسترش یافته است. بیشینه بی‌هنجاری‌های مثبت ارتفاع (تا بیش از ۱۲۰ متر) در شرق روسیه و بر روی دریای اُختسک مشاهده می‌شود. بی‌هنجاری‌های مثبت ضعیف‌تری نیز بر فراز اقیانوس آرام (نواحی غربی آمریکا)، اطلس شمالی و گرینلند دیده می‌شود، در حالی که بی‌هنجاری‌های منفی گسترده و شدیدی بر روی اروپا و با شدت کمتر بر کانادا و آمریکا مستقر است (شکل ۵a). در مرطوب‌ترین مارس، دو ناحیه با بی‌هنجاری‌های مثبت بسیار قوی قابل تشخیص است: یکی در نواحی شمالی اطلس، از شرق کانادا تا غرب روسیه، و دیگری بر فراز شمال اقیانوس آرام و آلاسکا در سایر نواحی، از جمله بر روی مدیترانه، ایران، آسیای میانه، نواحی مرکزی آرام شمالی، جنوب شرق اطلس، و نیز نیمه غربی کانادا تا آمریکای شمالی، بی‌هنجاری‌های منفی ارتفاع غالب است. این الگو بیانگر استقرار ناوهای وسیع و فعال بر فراز غرب آسیا و افزایش بارش در ایران طی این ماه است (شکل ۵b).



شکل ۴. میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری‌های آنها نسبت به دوره اقلیمی (دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰) برای خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه فوریه (به ترتیب فوریه ۱۹۹۷ و فوریه ۲۰۱۷) دوره مورد مطالعه، پربندهای سیاه، میانگین ماهانه و سطوح رنگی شده بی‌هنجاری‌های ماهانه را نشان می‌دهند. اعداد ۱، ۲ تا ۸ آورده شده روی پربندهای، به ترتیب نشان دهنده مقادیر ۵۱۰، ۵۲۰ تا ۵۸۰ دکامتر می‌باشند.

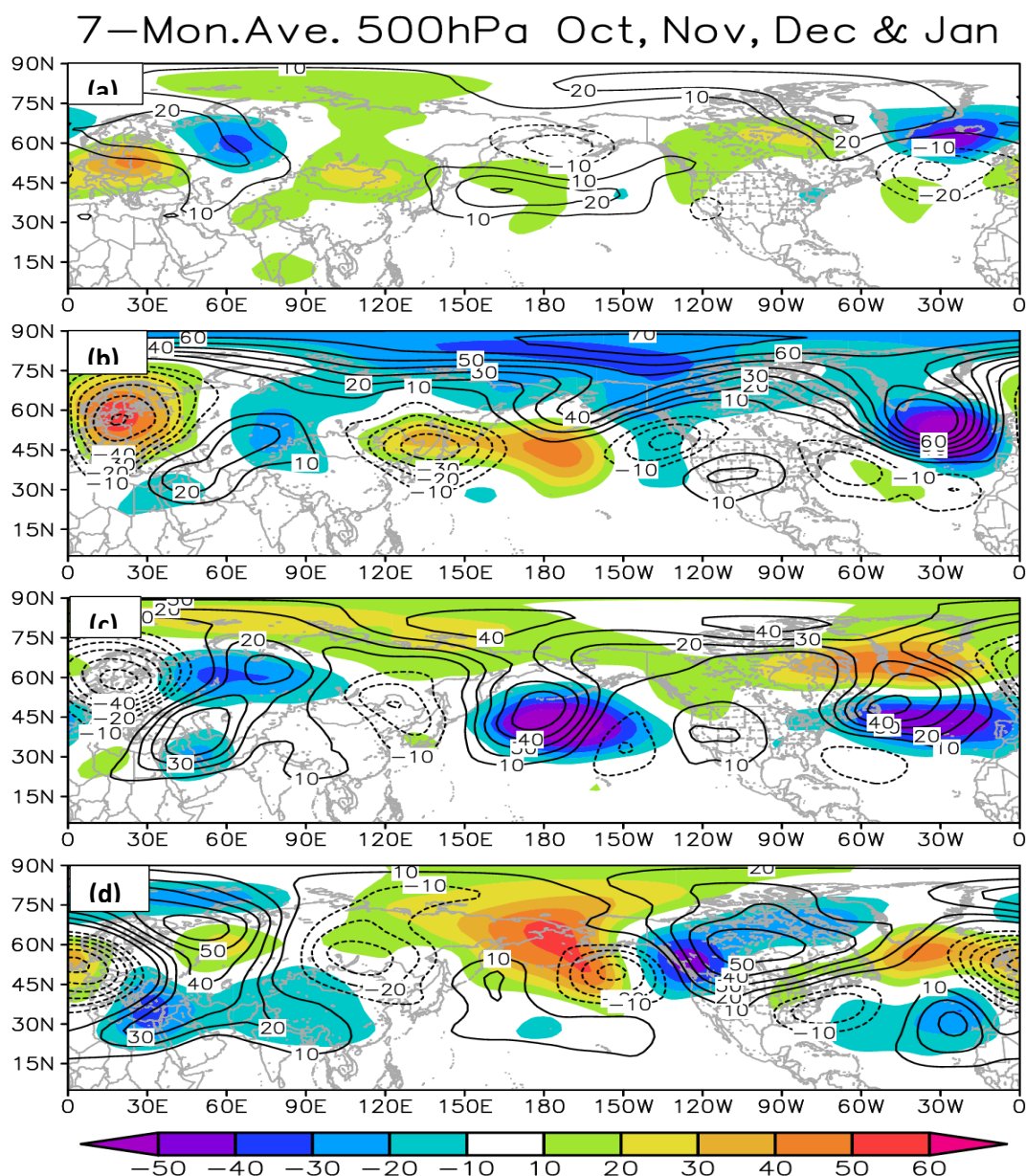


شکل ۵. میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری‌های آنها نسبت به دوره اقلیمی (دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰) برای خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه مارس (به ترتیب مارس ۲۰۰۸ و مارس ۱۹۹۶) دوره مورد مطالعه، پربندهای سیاه، میانگین ماهانه و سطوح رنگی شده بی‌هنجاری‌های ماهانه را نشان می‌دهند. اعداد ۱، ۲ تا ۸ آورده شده روی پربندهای، به ترتیب نشان دهنده مقادیر ۵۱۰، ۵۲۰ تا ۵۸۰ دکامتر می‌باشند.

اکتبر:

مقایسه بی‌هنجاری‌های ارتفاع در اکتبرهای مرطوب و خشک (شکل ۶a) نشان می‌دهد که در اکتبرهای مرطوب، بی‌هنجاری‌های مثبت گسترده‌ای بر اروپا، قزاقستان، شمال روسیه، بخش‌هایی از کانادا، مرکز اطلس و شمال غرب آرام شمالی حاکم است و هم‌زمان بی‌هنجاری‌های منفی بر غرب روسیه و جنوب شرق ایسلند دیده می‌شود.

در مقابل، در اکتبرهای خشک، بی‌هنجاری‌های مثبت بر اروپای شمالی تا غرب روسیه، شمال ایران، پهنه وسیعی از آرام شمالی و شمال کانادا تا گرینلند مسلط است و دو ناحیه با بی‌هنجاری منفی برجسته در جنوب غرب آلاسکا و شمال اطلس شمالی شکل می‌گیرد. این آرایش نشان می‌دهد که در اکتبرهای خشک، در اطلس و آرام شمالی یک الگوی دوقطبی تشکیل می‌شود؛ به‌طوری‌که در آرام، هسته منفی در شمال و هسته مثبت در جنوب قرار دارد، درحالی‌که این الگو در اطلس شمالی وارونه است.



شکل ۶. میانگین هفت ماهانه بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای خشک‌ترین و مرطوب‌ترین هر یک از ماه‌های اکتبر تا ژانویه دوره مورد مطالعه که به ترتیب از بالا به پایین آورده شده است، پربندهای خط چین و توپر سیاه رنگ، بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل ماه‌های خشک و سطوح رنگی شده بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل ماه‌های تر را نشان می‌دهند.

نوامبر:

مقایسه متوسط بی‌هنجاری‌های ارتفاع چارک بالا (ماه‌های نوامبر مرطوب) با متوسط بی‌هنجاری‌های ارتفاع چارک پایین (ماه‌های نوامبر خشک) در دوره مورد مطالعه (شکل ۶b) نشان می‌دهد که ماه‌های نوامبر مرطوب بی‌هنجاری‌های مثبت شدید ارتفاعی بر روی اروپا، نواحی شرقی چین و بخش‌های مرکزی و شمال غربی اقیانوس آرام شمالی قرار داشته در حالی که بی‌هنجاری‌های منفی ارتفاعی در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی دریای مدیترانه، نواحی نزدیک قطب، به‌ویژه در محدوده عرض‌ها و طول‌های جغرافیایی 65°N – 90°N و 80°E تا 20°W به‌گونه‌ای غالب شده است که به نظر می‌رسد سه‌زانه بی‌هنجاری منفی ارتفاعی (یکی در شمال شرق روسیه، دیگری در روی آلاسکا و شمال غرب آرام شمالی و دیگری بر روی اطلس شمالی) به سمت عرض‌های جنوبی کشیده شده است.

دسامبر:

مقایسه متوسط بی‌هنجاری‌های ارتفاع چارک اول (ماه‌های دسامبر خشک) با متوسط بی‌هنجاری‌های ارتفاع چارک چهارم (ماه‌های دسامبر مرطوب) در دوره مورد مطالعه (شکل ۶c) نشان می‌دهد که ماه‌های دسامبر خشک (مرطوب) بی‌هنجاری‌های شدید مثبت (منفی) ارتفاعی بر روی روسیه تا ایران، آرام شمالی و اطلس شمالی بسیار بارز است علاوه بر این در دسامبرهای خشک بی‌هنجاری‌های شدید منفی ارتفاعی بر روی شمال غرب اروپا نواحی شرقی چین و بخش‌های مرکزی و شمال غربی اقیانوس آرام شمالی قرار داشته است (شکل ۶c).

ژانویه:

مقایسه بی‌هنجاری‌های ارتفاع در ژانویه‌های خشک و مرطوب (شکل ۶d) نشان می‌دهد که در ژانویه خشک، بی‌هنجاری‌های مثبت از شمال غرب روسیه تا شرق مدیترانه و شرق آسیا گسترش یافته و هم‌زمان بی‌هنجاری‌های منفی بر اروپا حاکم است. بی‌هنجاری‌های مثبت بسیار شدید نیز بر مرکز کانادا و با شدت کمتر بر جنوب شرق اطلس و شمال غرب آرام دیده می‌شود. در ژانویه مرطوب، آرایش بی‌هنجاری‌ها در بسیاری از نواحی، از جمله اروپا، شرق مدیترانه، جنوب شرق اطلس و غرب کانادا، تقریباً وارونه می‌شود. در مجموع، الگوی ژانویه خشک با توالی نواروار بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی از مغولستان تا آرام، آمریکای شمالی، اطلس و اروپا مشخص می‌شود که در ژانویه مرطوب، این الگو با جابه‌جایی و وارونگی نسبی همراه است.

فوریه:

مقایسه الگوی بی‌هنجاری‌ها در فوریه‌های خشک و مرطوب (شکل ۷a) نشان می‌دهد که در دوره‌های خشک، بی‌هنجاری‌های مثبت بسیار شدید در مجاورت قطب و سه الگوی دوقطبی نصف‌النهاری در مدیترانه-اروپا، آرام شمالی و اطلس شکل می‌گیرد. در فوریه مرطوب، این الگوها وارونه شده و بی‌هنجاری‌های منفی قوی بر قطب، شمال شرق آرام و جنوب غرب روسیه غالب می‌شوند، در حالی که بی‌هنجاری‌های مثبت از شرق کانادا تا غرب انگلستان گسترش می‌یابد.

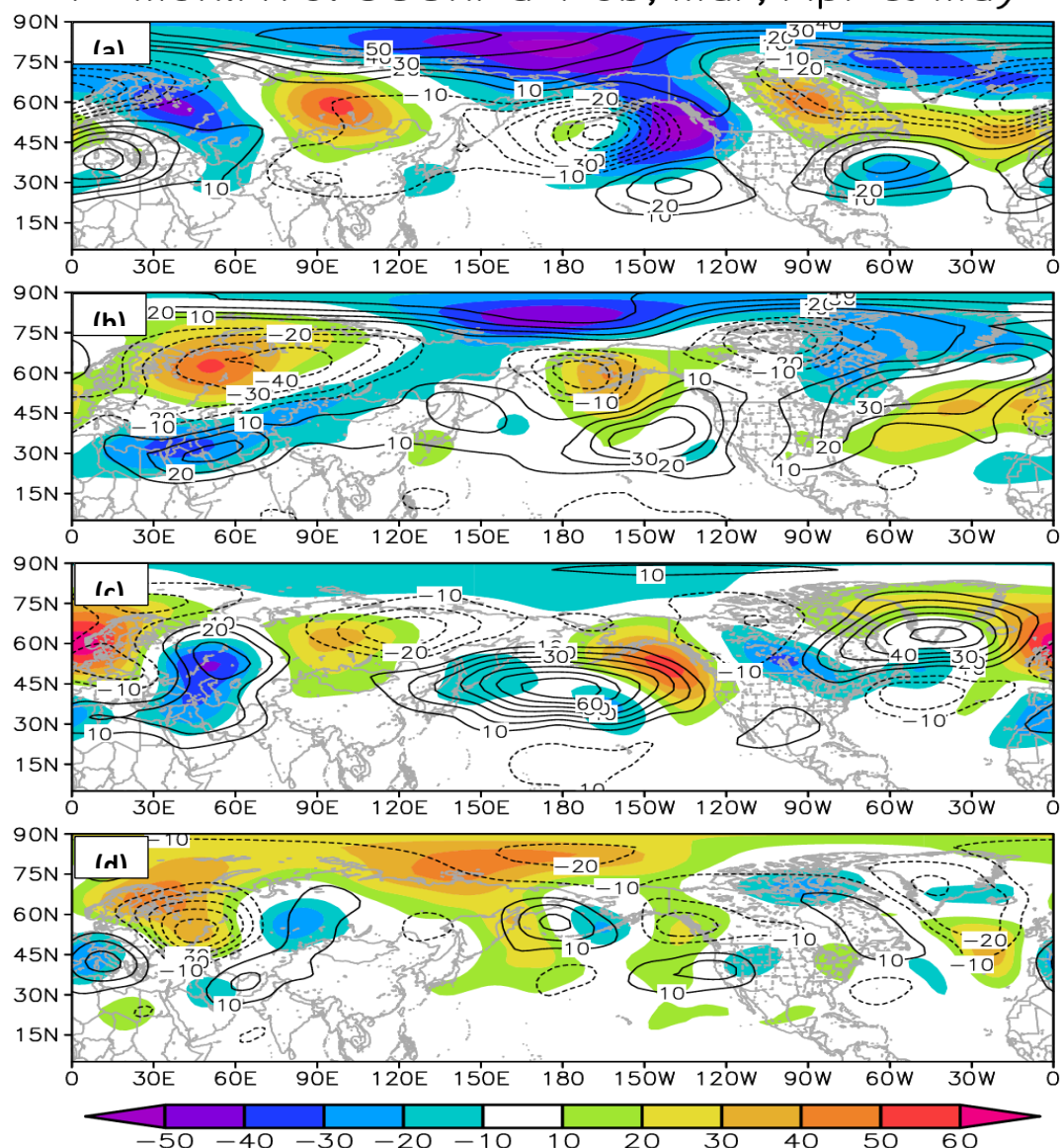
مارس:

در مارس خشک و مرطوب (شکل ۷b)، الگوی دوقطبی نصف‌النهاری در غرب آسیا، غرب روسیه و شمال آرام شمالی برجسته است؛ به‌گونه‌ای که بی‌هنجاری‌های مثبت در عرض‌های جنوبی و منفی در عرض‌های شمالی قرار می‌گیرد. تقویت پشته‌ها (بی‌هنجاری مثبت) موجب کاهش بارش و تقویت ناو‌ها (بی‌هنجاری منفی) سبب افزایش بارش می‌شود.

آوریل:

در آوریل خشک (شکل ۷c)، بی‌هنجاری‌های مثبت گسترده در شمال آرام، شمال غرب اطلس و از جنوب غرب روسیه تا شرق مدیترانه غالب است. در آوریل مرطوب، بی‌هنجاری‌های مثبت شدید عمدتاً در اسکاندیناوی، اروپای شمالی، شمال شرق آرام و نیمه شرقی روسیه رخ می‌دهد.

7—Mon.Ave. 500hPa Feb, Mar, Apr & May



شکل ۷. میانگین هفت ماهانه بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای خشک‌ترین و مرطوب‌ترین هر یک از ماه‌های فوریه تا مه دوره مورد مطالعه که به به ترتیب از بالا به پایین آورده شده است، پربندهای خط چین و توپر سیاه رنگ، بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل ماه‌های خشک و سطوح رنگی شده بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل ماه‌های تر را نشان می‌دهند.

مه:

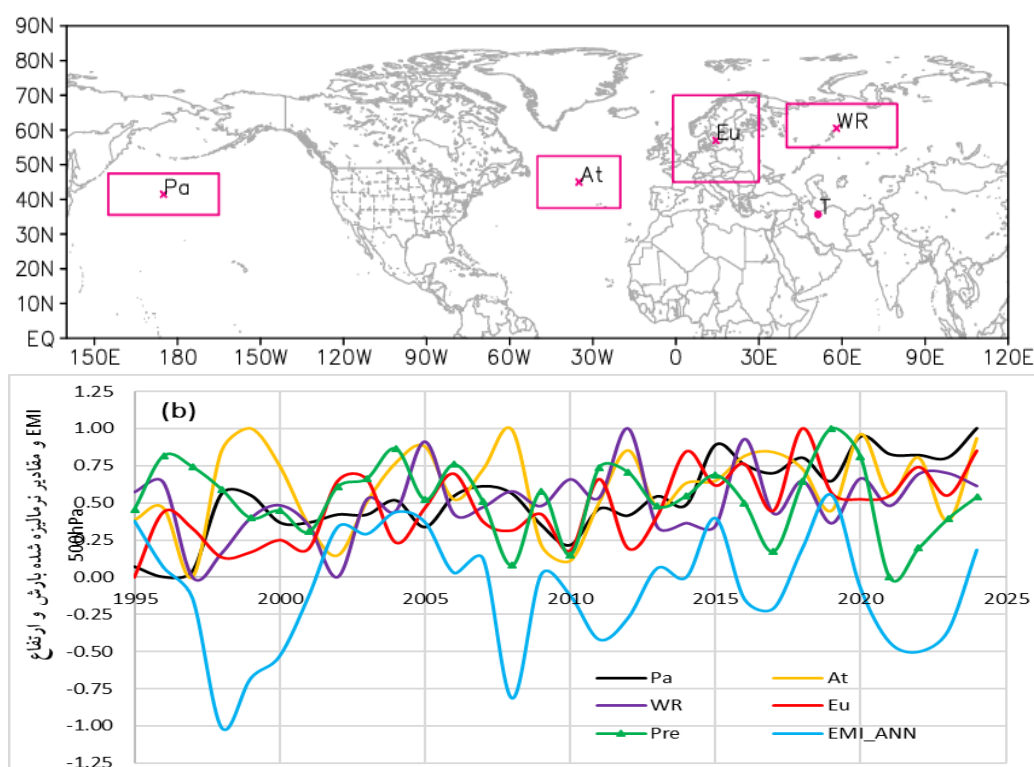
الگوی بی‌هنجاری‌ها در مه خشک و مرطوب (شکل ۷d) نشان می‌دهد که در دوره خشک، بی‌هنجاری‌های مثبت در جنوب غرب اروپا و بی‌هنجاری‌های منفی در شمال خزر و غرب روسیه دیده می‌شود؛ درحالی‌که در دوره مرطوب، این الگو وارونه شده و بی‌هنجاری‌های مثبت بر شمال خزر و غرب روسیه و همچنین بر غرب اطلس و غرب کانادا غالب می‌گردد.

بررسی ارتباط بارش با شاخص انسو - مودوکی و ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

تغییرات بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل جوی، اقیانوسی و توپوگرافی قرار دارد. از جمله مهم‌ترین این عوامل می‌توان به بر همکنش‌های جوی-اقیانوسی، فاصله از منابع آبی، ویژگی‌های ناهمواری، عرض

جغرافیایی و قرارگیری در مسیر سامانه‌های طوفانی اقیانوس‌های اطلس و آرام شمالی اشاره کرد. پیچیدگی رفتار بارش ناشی از تعامل‌های غیرخطی میان این عوامل است که تحلیل‌های اقلیمی را دشوار می‌سازد. در میان عوامل جوی-اقیانوسی، شاخص‌های دورپیوندی به‌عنوان بیانگر الگوهای بزرگ‌مقیاس تغییرپذیری جوی، نقش مهمی در نوسانات اقلیمی مناطق مختلف ایفا می‌کنند. یکی از شاخص‌های شناخته‌شده در این زمینه، شاخص انسو است که نوسانات آن عموماً دارای تناوبی در حدود دو تا پنج سال بوده و تأثیر قابل توجهی بر تغییرات بارش در مناطق مختلف جهان دارد. باین‌حال، در نواحی دور از ناحیه گرمسیری اقیانوس آرام، از جمله ایران، همبستگی این شاخص با بارش ماهانه معمولاً ضعیف بوده؛ ولی در مقیاس سالانه اثرات معنادارتری از خود نشان می‌دهد.

با ظهور مفهوم جدیدتری از نوسانات انسو، موسوم به انسو - مودوکی (ENSO-Modoki)، توجه پژوهش‌ها به الگوهای متفاوت این پدیده جلب شده است. این شاخص به دلیل تفاوت در مکان وقوع بی‌هنجاری‌های دمای سطح دریا نسبت به انسو کلاسیک، الگوهای متفاوتی از گردش‌های جوی و الگوهای بارشی را ایجاد می‌کند. در پژوهش حاضر، ارتباط میان تغییرات ماهانه و سالانه بارش ایران با شاخص انسو - مودوکی طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در فاز لاینیای مودوکی بارش کشور گرایش به کاهش، و در فاز ال‌نینوی مودوکی تمایل به افزایش دارد (شکل ۸b). ضریب همبستگی بارش سالانه و ماهانه کشور با شاخص انسو - مودوکی به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۱۵ به دست آمد که بیانگر اثرگذاری این شاخص بر تغییرات بارش در مقیاس سالانه است.



شکل ۸. در نقشه (a): چهارضلعی‌های قرمز بیانگر محدوده‌هایی است که همبستگی متوسط ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی آنها با بارش ایران محاسبه شده است. (b): تغییرات شاخص EMI با مقادیر نرمالیزه شده بارش و متوسط سطحی ارتفاع تراز ۵۰۰ hPa در چهارضلعی‌های مشخص شده در نقشه (a). حروف Pa (35.5-47.5°N, 155°E-165°W), At (37.5-52.5°N, 20-50°W), Eu (45-70°N, 0-30°E), WR (55-67.5°N, 40-80°E) با مختصات: Pa: Pacific، اقیانوس اطلس شمالی (At: Atlantic)، اروپا (Eu: Europe)، و غرب روسیه (WR: West Russia) می‌باشد.

از آنجاکه هدف اصلی این پژوهش تمرکز بر دوره‌های خشک و تر ماهانه بوده است، و باتوجه به تنوع زمانی و مکانی شاخص‌های دورپیوندی، امکان بررسی هم‌زمان همه شاخص‌ها وجود نداشت. از این رو، در ادامه تمرکز بر بررسی بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئو پتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی وضعیت عمومی جو صورت گرفته است. باتوجه به اینکه تحلیل بی‌هنجاری‌های این تراز نشان داد که در دوره‌های خشک و تر ایران، بیشترین تغییرات ارتفاعی در مناطقی از اقیانوس آرام (Pa)، اقیانوس اطلس شمالی (At)، اروپا (Eu) و غرب روسیه (WR) رخ داده است، ضرایب همبستگی میان بارش ایران و متوسط ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این نواحی طی دوره مطالعه شده محاسبه شد که مقادیر این ضرایب به ترتیب برای داده‌های ماهانه (و در پرانتز برای داده‌های سالانه) برابر با -0.73 - (-0.13) ، برای ناحیه Pa، -0.68 - (-0.09) ، برای ناحیه At، -0.64 - (0.17) ، برای ناحیه Eu و -0.69 - (-0.13) برای ناحیه WR به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که بین ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بارش ایران رابطه‌ای منفی و نسبتاً قوی وجود دارد، به گونه‌ای که افزایش (کاهش) ارتفاع این تراز در این مناطق به طور میانگین منجر به کاهش (افزایش) بارش در ایران می‌شود.

در نتیجه، می‌توان گفت که شاخص انسو - مودوکی و ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال هر دو نقش مهمی در تغییرپذیری بارش ایران دارند، اما در مقیاس‌های زمانی متفاوت عمل می‌کنند. شاخص انسو - مودوکی در مقیاس سالانه اثرگذارتر است، در حالی که بی‌هنجاری‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همبستگی قوی‌تری در مقیاس ماهانه با تغییرات بارش نشان می‌دهند.

بحث

تحلیل الگوهای گردش جوی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داد که تغییرات بارش در ایران به شدت تحت تأثیر سامانه‌های بزرگ مقیاس جوی، به ویژه الگوهای PNA و NAO قرار دارد. نحوه استقرار و شدت پشته‌ها و ناوه‌ها بر فراز مدیترانه، خاورمیانه و اوراسیا نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع دوره‌های خشک و تر کشور ایفا می‌کند. در دوره‌های خشک، پشته‌های واچرخندی قوی و بی‌هنجاری‌های مثبت ارتفاع ژئو پتانسیل بر فراز روسیه و خاورمیانه، سبب پایداری جو، واگرایی در لایه‌های میانی و انحراف مسیر چرخنده‌های مدیترانه‌ای می‌شود. در مقابل، در دوره‌های تر، تعمیق ناوه مدیترانه و گسترش بی‌هنجاری‌های منفی ارتفاع ژئو پتانسیل، شرایط صعودی و ناپایدار را بر فراز ایران تقویت کرده و موجب نفوذ سامانه‌های بارشی و افزایش بارش‌های زمستانی می‌گردد.

بررسی بارش‌های ماهانه طی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بیش از ۷۰ درصد بارش سالانه در پنج ماه زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد و روند کاهشی در ماه‌های پرباران (به ویژه دسامبر، ژانویه و مارس) نگران‌کننده است. دامنه نوسانات بارش نیز بسیار زیاد بوده و در برخی سال‌ها افزایش یا کاهش بیش از ۱۰۰ درصد مشاهده شده است. این نوسانات بیانگر افزایش فراوانی پدیده‌های حدی اقلیمی است که می‌تواند بر کشاورزی، منابع آب و زیرساخت‌ها اثر منفی بگذارد.

از دیدگاه همدیدی، در ماه‌های خشک استقرار پرفشارهای جنب‌حاره‌ای و ضعف ناوه‌های مدیترانه‌ای موجب کاهش بارش می‌شود، در حالی که در دوره‌های تر، تعمیق ناوه‌ها و تقویت امواج غربی، بارش را افزایش می‌دهد. بنابراین، تغییرات گردش عمومی جو و اثرات گرمایش جهانی می‌توانند شدت خشکسالی و بارش‌های سنگین را در ایران تشدید کنند. این یافته‌ها بر لزوم تقویت نظام‌های پایش اقلیم و برنامه‌ریزی تطبیقی برای مدیریت منابع آب تأکید دارند.

نتایج نشان می‌دهد که ال‌نینو-مودوکی، با ایجاد بی‌هنجاری‌های گرمایی در مرکز اقیانوس آرام، توزیع فشارهای جنب‌حاره‌ای را تغییر داده، ناوه مدیترانه را تعمیق و نفوذ امواج راسبی به سمت ایران را تقویت می‌کند، که شرایط افزایش بارش را فراهم می‌آورد. در مقابل، فاز لائینا-مودوکی سبب تقویت پشته‌ها و کاهش انتقال رطوبت می‌شود که با دوره‌های خشک ایران همبسته است.

تحلیل ترکیبی همچنین نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در نواحی شمال اقیانوس آرام و اطلس شمالی به‌عنوان مراکز کلیدی عمل، نقش مهمی در تنظیم امواج راسبی دارند و در شکل‌دهی تغییرپذیری بارش ایران مؤثر هستند. این نتایج مکانیزم‌های دورپیوندی انسو - مودوکی را در تنظیم خشکسالی‌ها و بارش‌های شدید منطقه‌ای روشن کرده و اهمیت استفاده از تحلیل‌های تراز میانی جو در پیش‌بینی فصلی بارش را برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بررسی بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئو پتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال و بارش ایران طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ نشان داد که تغییرات الگوهای جوی عامل اصلی وقوع دوره‌های خشک و تر در کشور است. بیشترین کاهش بارش در ماه‌های دسامبر، ژانویه و مارس رخ داده که می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی بر منابع آب و بخش کشاورزی داشته باشد. در دوره‌های خشک، تقویت پشته‌های واچرخندی بر خاورمیانه، روسیه و شرق مدیترانه و تضعیف ناوه‌های مدیترانه‌ای موجب پایداری جو و کاهش بارش ایران می‌شود. در مقابل، در دوره‌های تر، تعمیق ناوه‌ها در غرب آسیا و گسترش بی‌هنجاری‌های منفی ارتفاع بر روی ایران باعث افزایش نفوذ سامانه‌های بارشی می‌گردد. نتایج همچنین نشان داد که شدت و گستره بی‌هنجاری‌های ارتفاعی در اطلس شمالی، آرام شمالی، اروپا و روسیه ارتباط نزدیکی با تغییرپذیری بارش ایران دارد و نقش پیوندهای دور و جابه‌جایی امواج راسبی را برجسته می‌کند. الگوهای جوی در طول فصل سرد به‌تدریج تغییر کرده و با جابه‌جایی پرفشارهای قطبی و مسیر امواج باروکلینیک، تفاوت‌های فصلی مشخصی در الگوهای بی‌هنجاری ارتفاعی پدید می‌آید. با این حال، برخی نواحی مانند اطلس و آرام شمالی به طور پیوسته در شکل‌گیری این الگوها نقش غالب دارند.

در تحلیل‌های سینوپتیکی، دو الگوی اصلی بی‌هنجاری در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال اقیانوس آرام شمالی شناسایی شد:

۱. الگوی دوقطبی نصف‌النهاری در عرض‌های میانی (۳۵ تا ۶۵ درجه شمالی) که در بخش شمالی با بی‌هنجاری‌های منفی و در بخش جنوبی با بی‌هنجاری‌های مثبت همراه است. الگوی دوقطبی مورب با محور جنوب غربی - شمال شرقی که در آن بی‌هنجاری‌های مثبت (منفی) در بخش شرقی (غربی) حاکم می‌شود. در دوره‌های خشک، این بی‌هنجاری‌ها الگوی مشخصی از واچرخندی شدن بر فراز آرام شمالی و انتقال آن به اطلس شمالی را نشان داده‌اند، که نهایتاً با تضعیف ناوه شرق مدیترانه، موجب کاهش نفوذ سامانه‌های بارشی به ایران می‌شود. در مقابل، در دوره‌های تر، تغییر علامت این بی‌هنجاری‌ها و تقویت ناوه مدیترانه‌ای، شرایط لازم برای افزایش بارش در ایران را فراهم ساخته است.

از منظر آماری، نتایج نشان داد که بارش ماهانه ایران طی سه دهه اخیر دچار تغییرات قابل‌توجهی شده است. سهم بارش در ماه‌های کلیدی زمستان و اوایل بهار، یعنی ژانویه و مارس، همچنان بیشترین مقدار را دارد (به ترتیب ۱۶/۲ و ۱۶/۵ درصد از کل بارش سالانه)، اما روندهای منفی بارش در همین ماه‌ها (حدود ۰/۵۳- تا ۰/۵۵-) زنگ خطری جدی برای آینده منابع آبی کشور است. همچنین دامنه نوسانات بین سالی بارش در برخی ماه‌ها به بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یا ۸۰ درصد کاهش رسیده است (برای نمونه، مارس ۱۹۹۶ با ۱۳۶٪ افزایش و مارس ۲۰۰۸ با ۸۹٪ کاهش). این نوسانات شدید

در ماه‌های اکتبر و دسامبر نیز مشاهده شده است. چنین تغییراتی نشانگر افزایش نااطمینانی اقلیمی و دشواری در مدیریت منابع آب است.

تحلیل تلفیقی نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های ۵۰۰ هکتوپاسکال و شاخص انسو - مودوکی هر دو در تغییرپذیری بارش ایران نقش دارند. این شاخص عنوان یک شاخص دورپیوندی نوین توانایی پیش‌نگری در مقیاس سالانه را داراست و بی‌هنجاری‌های تراز میانی جو نقش واسطه‌ای در انتقال اثرات مودوکی به منطقه مدیترانه و ایران را ایفا می‌کند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از باز تحلیل‌های با وضوح بالاتر و روش‌های عددی برای تعمیق تحلیل‌ها استفاده گردد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ایران با دو چالش اصلی روبه‌روست: کاهش تدریجی بارش در ماه‌های کلیدی و افزایش نوسانات بین سالی، که مدیریت آب و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و توسعه‌ای را دشوارتر می‌سازد. بنابراین، پایش مداوم تغییرات اقلیمی، بهبود مدل‌سازی سامانه‌های همدیدی و تدوین سیاست‌های سازگار با کم‌آبی ضروری است. این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های ارتفاعی تراز میانی جو می‌توانند شاخص‌های مؤثری برای پیش‌بینی دوره‌های خشک و تر باشند و با دقت بالاتر پیش‌نشانگر مناسبی برای بهبود مدل‌های اقلیمی و مدیریت منابع آب محسوب می‌شوند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- احمدی گیوی، فرهنگ و پرهیزکار، داود. (۱۳۸۷). بررسی نقش انسو در بارش سالانه ایران در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۲(۲)، ۲۵-۳۷.
- آزیتا امیری، آزیتا؛ علیجانی، بهلول و ابراهیم، فتاحی. (۱۴۰۰). شناسایی کانون‌های فعالیت تاوایی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مؤثر بر بارندگی در ایران. *نشریه پژوهش‌های اقلیمی*، ۱۴۰۰(۴۶)، ۱۷-۲۸.
- ایران‌نژاد، پرویز. احمدی گیوی، فرهنگ و محمدنژاد، علیرضا. (۱۳۸۸). اثر مراکز چرخندزای مدیترانه بر بارش سالانه ایران در دوره ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۲. *ژئوفیزیک ایران*، ۱، ۹۱-۱۰۵.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ قائمی، هوشنگ و زاهدی، مجید. (۱۳۷۶). بررسی الگوهای ماهانه خشکسالی و ترسالی در ایران، تحقیقات جغرافیایی، ۴۵، ۱۵۴-۱۳۶.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ عزیزی، قاسم و رحیمی، مجتبی. (۱۳۹۱). الگوهای همدید خشکسالی و ترسالی زمستانه در جنوب غرب ایران. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۵، ۵۷-۷۷.

رضیی، طیب؛ عزیزی، قاسم. محمدی، حسین و خوش‌اخلاق، فرامرز. (۱۳۸۹). الگوهای روزانه گردش جوی زمستانه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر روی ایران و خاورمیانه. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۲(۴)، ۱۷-۳۴.

رضیئی، طیب؛ مفیدی، عباس و آذر زرّین، آذر. (۱۳۸۸). مراکز فعالیت و الگوهای گردش جو زمستانه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روی خاورمیانه و ارتباط آنها با بارش ایران، *نشریه فیزیک زمین و فضا*، ۳۵(۱)، ۱۲۱-۱۴۱.

رنجبر سعادت‌آبادی، عباس؛ اسدی تلوکی، احمد و مرادی، محمد. (۱۳۹۲). تأثیر ناهنجاری‌های ماهانه الگوهای فشاری بر شرایط بارشی پاییزه در سواحل شمالی ایران. *نشریه فیزیک زمین و فضا*، ۳۵، ۱۲۱-۱۴۱.

صادقی، سلیمان؛ علیجانی، بهلول؛ سلیقه، محمد؛ حبیبی نوخندان، مجید و قهرودی تالی، منیژه. (۱۳۸۷). تحلیل هم‌مدیدی و اچ‌رخندها بر خشکسالی‌های فراگیر خراسان، *مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۱۰، ۱۰۵-۱۱۸.

طلوعی، یوسف؛ گندمکار، امیر و باقری بدآغ‌آبادی، محسن. (۱۴۰۰). طلوعی بررسی رابطه بین الگوهای پیوند از دور نیمکره شمالی با خشکسالی‌های شمال غرب ایران. *فصلنامه جغرافیای طبیعی*، ۱۳(۵۱)، ۷۴-۵۵.

علیجانی، بهلول؛ رضایی، محمد؛ جعفری، فرزانه و پژوه، فرشاد. (۱۳۹۴). تغییرپذیری ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و نقش آن در نوسانات دمای ماه ژانویه ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۲۰(۲)، ۳۴-۴۵.

علی‌پور، یوسف؛ حجازی‌زاده، زهرا؛ اکبری، مهری و سلیقه، محمد. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات پرفشار جنب حاره تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیوار ایران با رویکرد تغییر اقلیم، *فصلنامه مخاطرات محیط طبیعی*، ۷(۱۸)، ۱-۱۶.

علیزاده، تیمور؛ عزیزی، قاسم و روستا، ایمان. (۱۳۹۱). واکاوی الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جو هنگام رخداد بارش‌های فراگیر و غیرفراگیر در ایران. *نشریه آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۱۶(۴)، ۱-۲۴.

غلامی رستم، مهدی؛ ساداتی‌نژاد، سید جواد و ملکیان، آرش. (۱۳۹۷). بررسی مطالعات انجام شده درباره تأثیر الگوهای دور پیوندی بر اقلیم ایران (۱۳۸۳-۱۳۹۷). *مجله علمی و ترویجی نیوار*، ۱۰۳-۱۰۲، ۸۸-۷۳.

فرج‌زاده اصل، منوچهر؛ احمدی، محمد؛ علیجانی، بهلول؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ مفیدی، عباس و بابائیان، ایمان. (۱۳۹۲). بررسی وردایی الگوهای پیوند از دور و اثر آن‌ها بر بارش ایران. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۵، ۳۱-۴۵.

محمودی، پیمان. طاوسی، تقی. و کردی تمندانی، صابر. (۱۴۰۱). شناسایی الگوهای ناهنجاری‌های هم‌مدیدی منجر به خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۱)، ۱-۲۰. [Doi:10.22059/JPHGR.2022.267431.1007286](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.267431.1007286)

موسوی بایگی، محمد. و اشرف، بتول. (۱۳۹۰). مطالعه الگوهای سینوپتیکی منجر به خشکسالی‌های پاییزه و زمستانه در استان خراسان رضوی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۴، ۱۶۷-۱۸۴.

References

- Ahrens, C. D. (2011). *Essentials of meteorology: An invitation to the atmosphere*. Brooks/Cole
- Arażny, A., Bartczak, A., Maszewski, R., et al. (2021). The influence of atmospheric circulation on the occurrence of dry and wet periods in Central Poland in 1954–2018. *Theor Appl Climatol* 146, 1079–1095. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03780-0>
- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., & Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection, *J. Geophys. Res.*, 112, C11007, [doi:10.1029/2006JC003798](https://doi.org/10.1029/2006JC003798)
- Bahrami, F., Ranjbar Saadatabadi, A., Meshkatee, A. M., & Kamali, Gh. (2020). Autumn rainfall anomalies and regional atmospheric circulation along establishment of weak La Nina after strong El Nino in Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 13(4), 1–15. [doi: 10.30499/ijg.2020.104779](https://doi.org/10.30499/ijg.2020.104779)
- Caloiero, T., & Coscarelli, R. (2020). Analysis of the characteristics of dry and wet spells in a Mediterranean region. *Environ. Process.*, 7, 691–701. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00454-3>
- Fall, C. M. N., Lavaysse, C., Drame, M. S., Panthou, G., & Gaye, A. T. (2021). Wet and dry spells in Senegal: Comparison of detection based on satellite products, reanalysis, and in situ estimates. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 1051–1069. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1051-2021>

- Gibson, P-B., Waliser, D-E., Guan, B., Deflorio, M-J., Ralph, F-M. & Swain, D-L., (2019). Ridging associated with drought across the Western and Southwestern United States: characteristics, trends and predictability sources. *J. Clim.* 33, 2485-508. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0439.1>
- Jamshidi Khezeli, T., Ranjbar Saadat Abadi, A., Nasr-Esfahany, M. A., Tajbakhsh Mosalman, S., & Mohebalhojeh, A. R. (2022). Autumn and Winter Extreme Precipitation Events and their Relationship with ENSO, NAO and MJO Phases over the West of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(4), 201-218. doi: 10.22059/jesphys.2021.316961.1007280
- Li, X., Meshgi, A., & Babovic, V. (2016). Spatio-temporal variation of wet and dry spell characteristics of tropical precipitation in Singapore and its association with ENSO. *Int. J. Climatol.*, 36, 4831–4846. <https://doi.org/10.1002/joc.4672>
- Li, Z., Li, Y., Shi, X., & Li, J. (2017). The characteristics of wet and dry spells for the diverse climate in China. *Global and Planetary Change*, 149, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.12.015>
- Mahbod, M., Mashayekhi, S., Rafiee, MR. & Parnian, A. (2023). Spatio-temporal variations of wet and dry spells in Iran and their association with large-scale climatic indices. *International Journal of Climatology* 43 (6), 2754-2775. <https://doi.org/10.1002/joc.8000>
- Mahmoudi, P., Amir Jahanshahi, S., Daneshmand, N., et al. (2021). Spatial and temporal analysis of mean and frequency variations of dry spells in Iran. *Arab J Geosci*, 14, 478. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06861-6>
- Motamedi, A., Gohari, A., & Haghighi, A. T. (2023). Three-decade assessment of dry and wet spells change across Iran, a fingerprint of climate change. *Sci Rep*, 13, 2888. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-20040-0>
- Singh, D., Tsiang, M., Rajaratnam, B., & Diffenbaugh, N. S. (2014). Observed changes in extreme wet and dry spells during the South Asian summer monsoon season. *Nat. Clim. Change*, 4, 456–461. <https://doi.org/10.1038/nclimate2208>
- Su, B., Huang, J., Fischer, T., Wang, Y., Kundzewicz, Z-W., Zhai, J., Sun, H., Wang, A., Zeng, X. & Wang, G. (2018). Drought losses in China might double between the 1.5 C and 2.0 C warming. *Proc. Natl Acad. Sci.* 115 10600–5. <https://doi.org/10.1073/pnas.1802129115>
- Swain, D., Horton, D., Singh, D., & Diffenbaugh, N. (2016). Trends in atmospheric patterns conducive to seasonal precipitation and temperature extremes in California. *Science Advances*, 2(4), e1501344. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501344>
- Swain, D. L., Singh, D., Horton, D. E., Mankin, J. S., Ballard, T. C., & Diffenbaugh, N. S. (2017). Remote linkages to anomalous winter atmospheric ridging over the northeastern Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 12,194–12,209. <https://doi.org/10.1002/2017JD026575>
- Yang, S., Li, Z., Yi, J-Y., Hu, X., Dong, W. & He, S. (2018). El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate, *National Science Review*, 5(6). 840–857, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy046>
- Zolina, O., Simmer, C., Belyaev, K., Gulev, S. K., & Koltermann, P. (2013). Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years. *J. Clim.*, 26, 2022–2047. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00498.1>
- Ahmadi-Givi, F., & Farhang, P. (2009). The role of ENSO in annual precipitation variability of Iran during 1971–2000. *Iranian Journal of Geophysics*, 2(2), 25–37. [In Persian]
- Amiri, A., Alijani, B., & Fattahi, E. (2021). Identification of relative vorticity activity centers at the 500 hPa level affecting precipitation in Iran. *Climatic Research Journal*, 46, 17–28. [In Persian]
- Irannejad, P., Ahmadi-Givi, F., & Mohammadzadeh, A. (2009). Effects of Mediterranean cyclogenetic centers on annual precipitation of Iran during 1960–2002. *Iranian Journal of Geophysics*, 1, 91–105. [In Persian]
- Khosh Akhlagh, F., Ghaemi, H., & Zahedi, M. (1997). Analysis of monthly drought and wetness patterns in Iran. *Geographical Research*, 45, 136–154. [In Persian]
- Khosh Akhlagh, F., Azizi, G., & Rahimi, M. (2012). Synoptic patterns of winter drought and wet periods in southwest Iran. *Applied Research of Geographical Sciences*, 25, 57–77. [In Persian]

- Raziei, T., Azizi, G., Mohammadi, H., & Khosh Akhlagh, F. (2010). Daily circulation patterns of wintertime 500 hPa level over Iran and the Middle East. *Natural Geography Research*, 42(4), 17–34. [In Persian]
- Raziei, T., Mofidi, A., & Azar-Zarrin, A. (2009). Centers of action and wintertime atmospheric circulation patterns at the 500 hPa level over the Middle East and their relationship with precipitation in Iran. *Journal of Earth and Space Physics*, 35(1), 121–141. [In Persian]
- Ranjbar Saadatabadi, A., Asadi Telouki, A., & Moradi, M. (2013). Effects of monthly pressure pattern anomalies on autumn precipitation conditions along the northern coasts of Iran. *Journal of Earth and Space Physics*, 35, 121–141. [In Persian]
- Sadeghi, S., Alijani, B., Saligheh, M., Habibi Nokhandan, M., & Gharoudi Tali, M. (2008). Synoptic analysis of anticyclones associated with widespread droughts in Khorasan. *Journal of Regional Geography and Development*, 10, 105–118. [In Persian]
- Tolouei, Y., Gandamkar, A., & Bagheri Badagh Abadi, M. (2021). Relationship between Northern Hemisphere teleconnection patterns and droughts in northwestern Iran. *Quarterly Journal of Physical Geography*, 13(51), 55–74. [In Persian]
- Alijani, B., Rezaei, M., Jafari, F., & Pajouh, F. (2015). Variability of geopotential height at the 500 hPa level and its role in January temperature fluctuations in Iran. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 6(20), 34–45. [In Persian]
- Alipour, Y., Hejazi-Zadeh, Z., Akbari, M., & Saligheh, M. (2018). Variations of the subtropical high-pressure system at the 500 hPa level over Iran under climate change conditions. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(18), 1–16. [In Persian]
- Alizadeh, T., Azizi, G., & Rusta, I. (2012). Analysis of atmospheric circulation patterns at the 500 hPa level during widespread and non-widespread precipitation events in Iran. *Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 16(4), 1–24. [In Persian]
- Gholami Rostam, M., Sadati-Nejad, S. J., & Melikian, A. (2018). Review of studies on the impacts of teleconnection patterns on Iran's climate (2004–2018). *Nivar Scientific-Promotional Journal*, 88–73. [In Persian]
- Farajzadeh Asl, M., Ahmadi, M., Alijani, B., Ghoveydil Rahimi, Y., Mofidi, A., & Babaeian, I. (2013). Variability of teleconnection patterns and their impacts on precipitation over Iran. *Climatological Research*, 15, 31–45. [In Persian]
- Mahmoudi, P., Tavousi, T., & Kordi Tamandani, S. (2022). Identification of synoptic anomaly patterns leading to widespread droughts and wet periods in Iran. *Natural Geography Research*, 54(1), 1–20. [Doi:10.22059/JPHGR.2022.267431.1007286](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.267431.1007286). [In Persian]
- Mousavi Baygi, M., & Ashraf, B. (2011). Synoptic patterns leading to autumn and winter droughts in Khorasan Razavi Province. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 4, 167–184. [In Persian]