



Institute of Geography



Research Paper

Analysis of the temporal and spatial trend of the atmospheric circulation patterns and its effects on Iran's rainfall in the last two decades

Zahra Mahavarpour ^a, Javad Khoshhal Dastjerdi ^{a*}, Seyed Abolfazl Masoudian ^a, Mohammad Ali Nasresfahani ^b

^a. Department of Natural Geography, Faculty of Geographical Sciences and Environmental Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

^b. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Mann-Kendall Test,
Circulation Pattern,
Geopotential Height,
Principal Component
Analysis,
Sen's Slope Estimator.



Received:

3 September 2022

Received in revised form:

2 December 2022

Accepted:

2 February 2023

pp.513-532

ABSTRACT

In this research, the daily data of geopotential height of 500 hPa with a spatial resolution of 1 degree from the ECMWF database for Southwest Asia and rainfall station data from the National Meteorological Organization (1979 to 2018) have been exerted. The technique used the principal component analysis and cluster analysis. With these analyses, nine circulation patterns were identified. The changes in the patterns were tested at the 95% significance level by the non-parametric Mann-Kendall test, and Sen's slope estimator was exerted to estimate the number of changes. The significance test of the trend for the winter patterns in Iran's rainy season revealed the significant trend of increasing the height of the geopotential, which has led to a decrease in the pressure gradient and a decrease in instability, and finally, a weakening of the winter precipitation patterns. Significant positive trends of geopotential height showed the continuation of these conditions for summer patterns (increasing stability, decreasing rotation, and decreasing precipitation). Of the nine known patterns, only one seasonal pattern showed a significant negative trend in the country. This pattern, with a slight increase in rainfall, indicates the formation of unstable conditions, which can lead to moderate-season rains if moisture is available. The findings showed that a rainy winter pattern had been eliminated in the last two decades, and a summer pattern had appeared instead.

Citation: Mahavarpour, Z., Khoshhal Dastjerdi, J., Masoudian, S. A., & Nasresfahani M. A. (2022). Analysis of the temporal and spatial trend of the atmospheric circulation patterns and its effects on Iran's rainfall in the last two decades. *Physical Geography Research Quarterly*, 54 (4), 513-532.



<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.353619.1007739>

* . Corresponding author (Email: j.khoshhal@geo.ui.ac.ir)

Copyright © 2022 The Authors. Published by University of Tehran. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Atmospheric circulation patterns play an essential role in the emergence of environmental phenomena, which is why the classification of weather systems is one of the main goals of synoptic climatology. With the advent of computers and advanced mathematical algorithms, such as principal component analysis (PCA) and cluster analysis (CA) methods, as well as the availability of digital data, quantitative methods replaced manual methods. Most methods used and discussed for classifying circulation patterns are based on using multivariate statistics, principal component analysis, and clustering techniques. This research uses the same method to classify atmospheric circulation patterns. Due to a large amount of data, MATLAB software was used in this research.

Methodology

The statistical population of this research includes the rainfall station data of the National Meteorological Organization from 1979 to 2018, which have been converted into grid data (2491 cells) with a resolution of 0.25 degrees using the kriging interpolation technique. For typification of daily data of geopotential height level of 500 hectopascals (hPa) for the frame (coordinates) zero to seventy degrees east longitude and ten to sixty degrees north latitude from ECMWF European Center for Medium-term Atmospheric Forecasting, ERA-INTERIM project from 1/1/1979 to 12/31/2018 has been used for 14610 days. The data were divided into two 20-year periods for a two-decade comparison. This framework was considered significant enough to represent the circulation patterns affecting Iran's climate properly.

Finally, the data matrix was prepared with two matrices with dimensions of 3621 x 7305. Then principal component analysis was performed on these two matrices. The purpose of this analysis is, on the one hand, to reduce the amount of data and, on the other hand, to classify and identify the most important patterns and changes in geopotential height of 500 hectopascals (hPa) in the last two decades. Twelve

components of the S matrix with a level of 500 hectopascals (hPa) were used as the required input for the following classification step to identify the types of air and classify them. Then, nine patterns or weather types were identified by cluster analysis. With the help of the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator, pattern changes were done on time and places (pixels).

Results and discussion

The correlation coefficient parameter was used to identify similar patterns in two periods. In this way, three winter patterns, three temperate season patterns, and two summer patterns were determined. Pattern 3 from the first period is a winter pattern, and pattern seven from the second period is a pattern with the features of the warm season, and no suitable pair was identified. These two patterns had the lowest correlation coefficient with each other. It is seen that the CTA3 pattern, a winter pattern with heavy rainfall, was removed in the second period, and the CTB7 pattern, a spring-summer pattern with little precipitation, was born instead.

The Mann-Kendall trend test on the patterns did not show a negative trend in the time series for any pattern. Two pairs of winter patterns have a significant positive trend, and pattern number 3 was removed. Two pairs of the temperate season pattern and two pairs of the summer pattern showed a significant positive trend, and the seven summer patterns appeared in the second period.

The trend test on the pixels of the region for the pattern of one winter showed all of Southwest Asia with significant positive trends, which indicates the weakening of this pattern with warmer winters. The second winter pattern in the country's eastern half shows the weakening of the second cold season with wide positive trends. Another noteworthy point is the significant negative trends for the pair of moderate CTA5B4 patterns significantly and widely over our country, which can lead to rain if other conditions are available. The two pairs of the summer pattern have covered almost the same range in terms of

the significance of the trend and its values. Significant positive trends (increase in geopotential height) for summer patterns provide conditions for increasing stability, reducing rotation, and reducing precipitation.

The conducted analyses show that under the influence of climate change, the rule of a hotter and drier climate in our country in the last two decades is quite evident. The expansion of low rainfall areas can be clearly seen for all patterns. The comparison of the rainfall maps of the country related to the pair of winter patterns PA1, PB1, and PA2, PB2, and PA9, PB3 shows that in addition to the decrease in the rainfall of these patterns, their spatial distribution has also undergone significant changes. The core of the maximum rainfall from the country's west to the southwest side has been moved.

Conclusion

A side-by-side comparison of the models showed significant changes in the models. The patterns associated with high-altitude and ridge settlements on all or a large part of Iran are more frequent, consistent with Masoudian's research (2006). The significant positive trend in the Sudan and Mediterranean circulation systems, which play an essential role in the rains of our country's winter and autumn seasons, revealed the weakening of these systems in the last two decades. These results are in harmony with the research of Alizadeh (2013) and Darand (2014). Another result of this research is that the patterns of Iran's rainy seasons (winter and autumn) have weakened significantly in the past two decades. Significant positive high-altitude trends for summer patterns showed increasing stability and strengthening of these patterns. Significant positive high-altitude trends for summer patterns showed increasing stability and strengthening of these patterns. Also, the CTA4B5 transition pattern pair showed significant negative trends over a wide part of the country; the nature of this pattern determined that with the establishment of the CTB5 pattern (the second-period pair) if moisture is available, it can provide the possibility of widespread

rains in the country. Correlation coefficients identified two inconsistent patterns. The CTA3 pattern is a winter pattern with heavy rainfall that has not occurred in the last two decades and can be said to have disappeared, and instead, the CTB7 pattern is a summer pattern that has appeared with a frequency of 10.7% in the last two decades.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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



تحلیل روند زمانی و مکانی الگوهای گردشی جو و اثرات آن بر بارش‌های ایران در دو دهه اخیر

زهرا ماه اورپور - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
جواد خوشحال دستجردی^۱ - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
سید ابوالفضل مسعودیان - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
محمدعلی نصرافهانی - استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش از داده‌های روزانه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک مکانی ۱ درجه از پایگاه داده ECMWF برای جنوب غرب آسیا و داده‌های ایستگاهی بارش از سازمان هواشناسی کشور (۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸) بهره‌جویی شده است. تکنیک بکار رفته تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای است. با این تحلیل‌ها ۹ الگوی گردشی شناسایی شدند. تغییرات الگوها در سطح ۹۵ درصد معناداری، بوسیله آزمون ناپارامتری من‌کندال آزموده و برای برآورد میزان تغییرات از تخمین گر شیب سن بهره گرفته شد. آزمون معناداری روند برای الگوهای زمستانی در فصل بارش‌های ایران، روند معنادار افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل؛ که منجر به کاهش شیو فشار و کاهش ناپایداری و نهایتاً تضعیف الگوهای بارشی زمستانی گردیده است را آشکار ساخت. روندهای معنادار مثبت ارتفاع ژئوپتانسیل، تداوم این شرایط را برای الگوهای تابستانی (افزایش پایداری، کاهش چرخندگی و کاهش بارش) نشان دادند. از ۹ الگوی شناخته‌شده تنها برای یک الگوی فصل گذار روند معنادار منفی بر روی کشور مشاهده شد. این الگو با اندکی افزایش بارندگی بیانگر شکل‌گیری شرایط ناپایدار است که در صورت مهیا بودن رطوبت می‌تواند منجر به بارش‌های فصل معتدل گردد. یافته‌ها نشان دادند که یک الگوی زمستانی بارش‌زا در دو دهه اخیر حذف شده و بجای آن یک الگوی تابستانی ظاهر گردیده است.

واژگان کلیدی:

آزمون من‌کندال، الگوی گردشی، ارتفاع ژئوپتانسیل، تحلیل مؤلفه اصلی، تخمین گر شیب سن.



تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۶/۱۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۱/۱۳

صص. ۵۱۳-۵۳۲

استناد: ماه اورپور، زهرا؛ خوشحال دستجردی، جواد؛ مسعودیان، سید ابوالفضل و نصرافهانی، محمدعلی. (۱۴۰۱). تحلیل روند زمانی و مکانی الگوهای گردشی جو و اثرات آن بر بارش‌های ایران در دو دهه اخیر. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴ (۴)، ۵۱۳-۵۳۲.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.353619.1007739>

مقدمه

گرمایش جهانی پدیده‌ای است که منجر به افزایش میانگین دمای سطح زمین شده است. سازمان جهانی هواشناسی بیان کرده میزان افزایش دمای جهان بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ نسبت به میانگین آن قبل از صنعتی شدن 0.93 ± 0.07 درجه سلسیوس بیشتر و این میزان برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸، 1.04 ± 0.09 به دست آمده است (WMO ۲۰۱۹). امروزه این پدیده با تفکر تغییر اقلیم ذهن همه پژوهشگران این حوزه را به خود جلب کرده است. ذوب یخ‌های قطب شمال و بالا آمدن سطح آب دریاها، کاهش بارش‌ها و افزایش خشک‌سالی‌های پی‌درپی، افزایش وقوع سیلاب‌ها و امواج گرمایی، نشانه‌هایی از آشفتگی‌های جوی است. بنابراین پدیده تغییر اقلیم اثرات گسترده‌ای بر جوامع بشری و ساختار آن‌ها که حامی تمدن‌های بشری است، خواهد داشت. الگوهای گردش جوی نقش مهمی در پیدایش این پدیده‌های محیطی دارند، از این رو شناسایی الگوهای گردش جوی و تغییرات آن‌ها به منظور آمادگی بشر برای برنامه‌ریزی به منظور تعدیل شرایط زندگی و مقابله با مخاطرات محیطی ناشی از گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی بسیار ضروری است. بنابراین تغییرات الگوهای گردش جوی و به‌ویژه معناداری این تغییرات نمودهایی از تغییرات اقلیمی را آشکار خواهند ساخت. از این رو طبقه‌بندی الگوهای گردش جوی به منظور واکاوی این تغییرات اهمیت دارد. طبقه‌بندی روزها در قالب الگوها از گذشته مورد توجه اقلیم‌شناسان بوده است. بررسی متغیرهای اقلیم‌شناسی به‌ویژه بارش و دما در زمان و مکان معین نشان می‌دهند که این متغیرها شدیداً تحت تأثیر الگوهای گردش جوی قرار دارند. بنابراین متغیرهای مختلف آب و هوایی به انواع ویژه‌ای از الگوهای گردش جوی مربوط می‌شوند. بدین ترتیب شناسایی تداوم و یا تغییر سیستم‌ها از طریق فرآیند طبقه‌بندی یا تعیین تیپ‌های هوا ضرورت پیدا می‌کند، به همین علت طبقه‌بندی سیستم‌های هوا یکی از اهداف اصلی اقلیم‌شناسی سینوپتیک است (Huth, 1996:893).

بدون شناسایی فراوانی زمانی و تیپ‌های هوا، تبیین و چاره‌جویی مسائل محیطی امری دشوار است، زیرا هر تیپ هوایی شرایط محیطی خاص خود را ایجاد می‌کند. با شناسایی الگوهای گردش جوی می‌توان تغییرات، فراوانی، شدت و توزیع مکانی متغیرهای اقلیمی، مانند بارش را بررسی و دلایل فیزیکی آن را بیان نمود (Vicente-Serrano, 2006:1427). به همین دلیل، تلاش‌های بسیاری برای گسترش روش‌های گروه‌بندی الگوهای گردش جوی و بررسی نقش و تأثیر آن‌ها بر متغیر بارش انجام گرفته است (Santos 2005:23 et al; Romero & et al, 1999:765). با پیدایش رایانه و الگوریتم‌های پیشرفته ریاضی، مانند روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای (CA) و نیز فراهم شدن داده‌های رقومی روش‌های کمی جایگزین روش‌های دستی شدند. اغلب روش‌های بکار برده شده و مورد بحث برای طبقه‌بندی الگوهای گردشی بر روی استفاده از آماره‌های چند متغیره، تحلیل مؤلفه‌های مبنا و تکنیک‌های خوشه‌بندی استوار شده است (Bejarán & Camilloni, 2003:93; Esteban et al, 2005:319).

افرادمانند برایسون (۱۹۹۶:۲۲۸) اولین پژوهشگرانی بودند که تکنیک PCA را برای مطالعات اقلیم‌شناسی سینوپتیک به کار گرفتند. بسیاری از محققان علوم جوی هنگام برخورد با حجم گسترده‌ای از داده‌ها، راهبرد کاهش متغیرها را با استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی در پیش گرفتند. افرادی همچون گادگیل و آیینگر (۲۰۰۷:۸۷۳)؛ کالکستین و همکاران (۱۹۹۸:۱۲۲۳) از این دسته محققان هستند. ریچمن (۱۹۸۱:۱۱۴۵) با استفاده از PCA و CA به طبقه‌بندی الگوهای گردش جوی و بررسی ارتباط آن‌ها با متغیرهای اقلیمی در مقیاس روزانه پرداخت. رومرو و همکاران (۱۹۹۹) به طبقه‌بندی الگوهای گردش جوی تولیدکننده بارش‌های روزانه در ناحیه مدیترانه‌ای اسپانیا پرداختند. آن‌ها داده‌های ترازهای ۵۰۰ و ۹۲۵ را به روش تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای طبقه‌بندی کرده و ۱۹ الگوی گردش جوی را

به‌عنوان عامل بارش این منطقه شناسایی کردند که ۸ الگو بارش‌های فرین را نشان می‌داد. سانتوس و همکاران (۲۰۰۵:۳۳) الگوهای گردش روزانه بارش‌های زمستانی پرتغال را به روش تحلیل خوشه‌ای طبقه‌بندی کرده و آن‌ها را به ۵ رژیم آب و هوایی نسبت داده‌اند و بارندگی‌های زمستانی پرتغال را به‌شدت با جریان جوی بزرگ‌مقیاس در بخش اروپایی اقیانوس اطلس مرتبط دانستند. سیبرت و همکاران (۲۰۰۷:۱۳۹) الگوهای همدید بارش‌های سنگین اتریش را به روش تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای مورد واکاوی قرار داده و ۷ الگوی همدید را عامل بارش‌های سنگین در اتریش معرفی کردند. لويس و همکاران (۲۰۱۸:۹۶) تحلیل مؤلفه اصلی را برای شناسایی مناطق همگن اقلیمی در بالکان جنوبی بکار بستند. با تحلیل مؤلفه اصلی و سپس تحلیل خوشه‌ای ۶ مؤلفه اصلی (۷۴٪ از واریانس) و ۱۲ ناحیه همگن اقلیمی شناسایی کردند. هورتون و همکاران (۲۰۱۵:۴۶۵) در مورد سهم تغییرات الگوهای گردش جوی از روند گرمایش شدید، اظهار داشتند که تغییر در گردش‌های جوی احتمال وقوع پدیده‌های فرین آب و هوایی در نیمکره شمالی را تقویت کرده است.

نتیجه بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که الگوهای گردش جوی نقش بسیار مهمی در وقوع، مقدار و توزیع مکانی متغیر بارش دارند. پژوهشگران کشورمان نیز از تکنیک مؤلفه اصلی به‌منظور شناسایی تیپ‌های ویژه‌ای از الگوهای گردشی جو که مولد متغیرهای اقلیمی معینی هستند بهره‌مند شده‌اند. از جمله مسعودیان (۱۳۸۴:۳۳) به کمک تحلیل مؤلفه اصلی، تحلیل خوشه‌ای و تحلیل همبستگی ۶ الگوی گردشی پدیدآورنده سیلاب‌های بزرگ حوضه کارون را شناسایی کرده و این الگوها را به دودسته پر ارتفاع و کم ارتفاع تقسیم نموده که هر الگوی معین تمایل دارد در دوره معینی از سال ظاهر شود. غیور، مسعودیان، آزادی و نوری (۱۳۹۰:۱۷) به تحلیل زمانی و مکانی رویدادهای بارشی سواحل جنوبی دریای خزر پرداختند و برای شناسایی الگوهای بارش، از روش تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای استفاده کردند. حمیدیان‌پور و همکاران (۱۳۸۹:۱) به روش تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای ۳ الگوی کم‌فشار سودانی، کم‌فشارهای ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای و کم‌فشارهای مدیترانه را مسئول بارش‌های سنگین شمال شرق کشور معرفی کردند. حجازی زاده و فتاحی (۱۳۸۳:۸۹) با استفاده از PCA و خوشه‌بندی چندهسته‌ای ۸ تیپ هوای اصلی را برای فصل زمستان ایران شناسایی و به کمک روش تحلیل همبستگی ارتباط آن‌ها را با بارش ایران تعیین نمودند. رضیئی و همکاران (۱۳۸۹:۱۷) با استفاده از روش PCA و خوشه‌بندی چندهسته‌ای، الگوهای گردش جو زمستانه ایران را برای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال شناسایی کرد.

به‌منظور شناسایی کانون‌های کنترل‌کننده اقلیم ایران، علیچانی و دوستان (۱۳۹۱:۲۵۵) الگوهای فشار تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در دوره سرد سال در ایران را به روش تحلیل مؤلفه اصلی طبقه‌بندی کردند. آن‌ها سیبری شمالی را مهم‌ترین مرکز کنترل‌کننده اقلیم ایران و ناوه‌های عمیق و پشته‌های قوی را پدیده عمده بادهای غربی دانستند. واکاوی الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جو هنگام رخداد بارش‌های فراگیر و غیر فراگیر در ایران توسط علیزاده و همکاران (۱۳۹۱:۱) صورت گرفته است. فتاحی و شیراوند (۱۳۹۳:۹۷) نیز به‌منظور شناسایی الگوهای گردش جوی در روزهایی که در غرب کشور بارش سنگین برف رخ می‌دهد، به روش تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای الگوهای ایجادکننده برف سنگین را شناسایی کرده و ادعا کرده‌اند که این الگوها می‌توانند در امر پیش‌بینی روزهای همراه با برف سنگین کارایی داشته باشند. در پژوهش دیگری رسولی و همکاران (۱۳۹۱:۷۷) با تحلیل سری‌های زمانی فشار تراز دریا و الگوهای سینوپتیکی مؤثر بر بارش‌های فصلی ایران شامل پرفشار سیبری و کم‌فشارهای مدیترانه، دریای سیاه و سودان در فصول بارشی زمستان و بهار و کم‌فشارهای مونسون و خلیج فارس در فصل تابستان ادعا کردند که اکثر

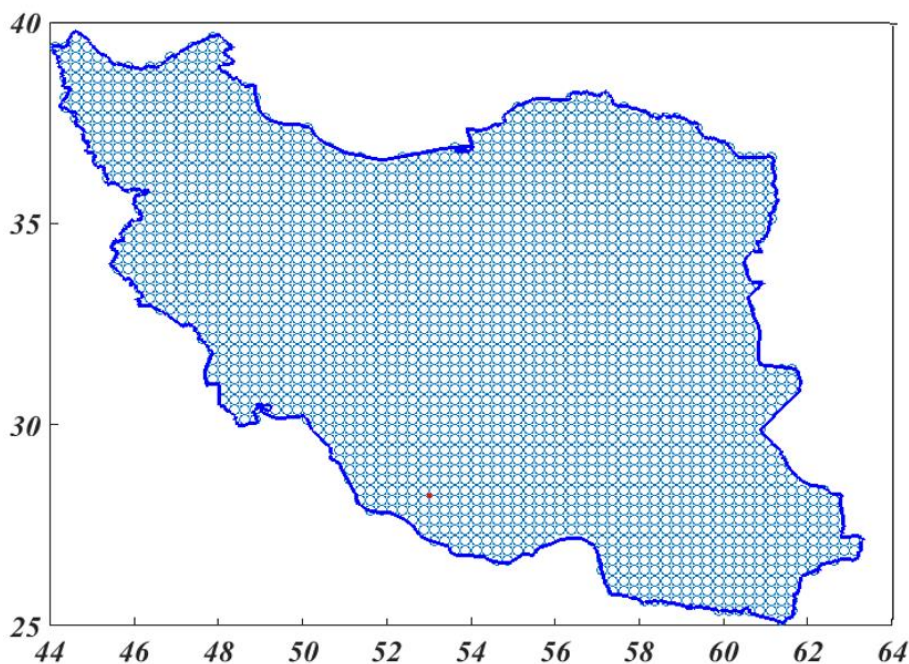
الگوهای سینوپتیکی به‌استثنای پرفشار سیبری در فصل بهار، در حال تضعیف هستند. وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های انجام‌شده تقسیم دوره مطالعاتی به دو دوره ۲۰ ساله به‌منظور آشکارتر شدن اثر تغییرات اقلیمی بر الگوهای گردشی جو در دو دهه اخیر است. تغییرات الگوها می‌تواند تغییرات متغیرهای اقلیمی که در این پژوهش تأکید بر بارش‌های کشور می‌باشد را بازنمایی کند. وجه تمایز دیگر این مطالعه انجام آزمون روند به دو شکل آزمون بر روی سری زمانی میانگین‌گیری شده از کل یاخته‌ها و آزمون بر روی سری زمانی یاخته به یاخته و تبدیل آن به نقشه است که باهدف پیش‌بینی مناسب‌تر تغییرات آب و هوایی آینده صورت گرفته است.

روش پژوهش

جامعه آماری این پژوهش شامل داده‌های ایستگاهی بارش سازمان هواشناسی کشور از ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ است که با تکنیک میان‌یابی کریجینگ به داده‌های شبکه‌ای (۲۴۹۱ یاخته) با تفکیک ۰/۲۵ درجه تبدیل شده‌اند (شکل ۱)؛ و داده‌های روزانه (میانگین گرفته از داده‌های ۶ ساعته) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای چهارچوب (مختصات) صفر تا هفتاد درجه طول شرقی و ده تا شصت درجه عرض شمالی از مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپا ECMWF پروژه ERA-INTERIM از ۱۹۷۹/۱/۱ تا ۲۰۱۸/۱۲/۳۱ به مدت ۱۴۶۱۰ روز می‌باشد. به‌این‌ترتیب داده‌های چهل‌ساله (دو دوره ۲۰ ساله) برای شناسایی الگوها تهیه گردید. این چهارچوب به‌اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شد تا الگوهای گردشی مؤثر بر آب و هوایی ایران را به‌خوبی بازنمایی کند. تفکیک مکانی این داده‌ها ۱×۱ درجه است، بنابراین برای هرروز در راستای عرض جغرافیایی ۵۱ یاخته و در راستای طول جغرافیایی ۷۱ یاخته وجود داشته است. به‌این‌ترتیب آرایش خطوط ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای هرروز با ۳۶۲۱ مقدار مشخص شد. درنهایت آرایه داده‌ها با دو آرایه از ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۸ و از ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸ به ابعاد ۳۶۲۱×۷۳۰۵ تهیه گردید. درواقع هر یک از این آرایه‌ها ارتفاع ژئوپتانسیل ۳۶۲۱ مکان را طی ۷۳۰۵ روز در برمی‌گیرد. سپس تحلیل مؤلفه اصلی بر روی این دو آرایه انجام گرفت.

هدف از این تحلیل از یک‌سو کاهش حجم داده‌ها و از سوی دیگر تیپ بندی و شناسایی مهم‌ترین الگوها و تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در دو دهه گذشته است. برای انجام تحلیل مؤلفه اصلی برحسب هدف انجام پژوهش ساختار آرایه ورودی داده‌ها می‌تواند station (سطرها زمان و ستون‌ها مکان) و یا Time (سطرها مکان و ستون‌ها زمان) باشد. اگر هدف تیپ بندی توده‌های هوا باشد ساختار آرایه داده‌ها S و اگر هدف پهنه‌بندی مکانی مناطق آب و هوایی باشد ساختار آرایه داده‌ها T می‌باشد. چون هدف از این پژوهش شناسایی الگوهای گردش جوی و طبقه‌بندی تیپ‌های هوا می‌باشد ساختار آرایه داده‌ها S به‌عنوان ورودی تحلیل بکار رفته است. این طبقه‌بندی بدون چرخش مؤلفه‌ها انجام شده است. زیرا دوران مؤلفه‌ها برای تیپ بندی هوا سودی در بر ندارد (Yarnal, 1993). خروجی تحلیل مؤلفه اصلی شامل سه آرایه مقادیر مؤلفه‌ها ۱ بردارهای ویژه ۲ و مقادیر ویژه یا ترتیب پراش مؤلفه‌ها ۳ (L) می‌باشد (Yacine & Dacheng, 2015). برای کاهش حجم داده‌ها مؤلفه‌هایی که کمتر از ۱ درصد پراش ۴ را دارند حذف و مؤلفه‌های اصلی که بیشترین پراش (بیش از ۱ درصد) را به خود اختصاص داده‌اند انتخاب گردیدند (Jolliffe, 2002). به‌طوری‌که آرایه L تحلیل انجام‌گرفته؛ نشان داد برای ۳۶۲۱ مؤلفه بکار گرفته‌شده تنها با دوازده مؤلفه اول می‌توان ۸۴٪ از تغییرات را برای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال توضیح داد (شکل ۲). این شکل نشان می‌دهد برای هر دو دوره، مؤلفه اول حدود ۶۰ درصد از تغییرات را تبیین می‌کند و سایر مؤلفه‌ها به ترتیب کمترین میزان پراش را به خود

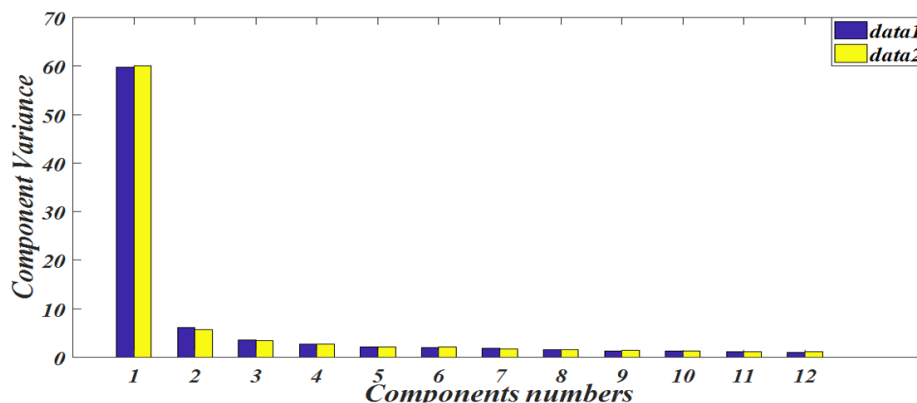
اختصاص داده‌اند. با استفاده از این روش مؤلفه‌های وابسته به هم ادغام شده و ابعاد ماتریس کاهش می‌یابد به طوری که کمترین تعداد مؤلفه می‌تواند بیشترین میزان پراش را توضیح دهد و این از نقاط شاخص این تحلیل چند متغیره است. بدین ترتیب برای شناسایی تیپ‌های هوا و طبقه‌بندی آن‌ها دوازده مؤلفه از آرایه S تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌عنوان ورودی موردنیاز برای گام بعدی طبقه‌بندی بکار گرفته شد. در جدول ۱ نتیجه تحلیل مؤلفه‌ها و مقادیر ویژه هریک از دوازده مؤلفه قرار گرفته است. ذکر این نکته لازم است که تحلیل مؤلفه اصلی یکی از مراحل تجزیه و تحلیل داده‌ها است و در واقع هدف آن فراهم آوردن ورودی‌های مناسب برای تحلیل‌های تکمیل‌کننده بعدی است.



شکل ۱. پراکنش شبکه‌ای بارش بر روی ایران با تفکیک ۰/۲۵ درجه

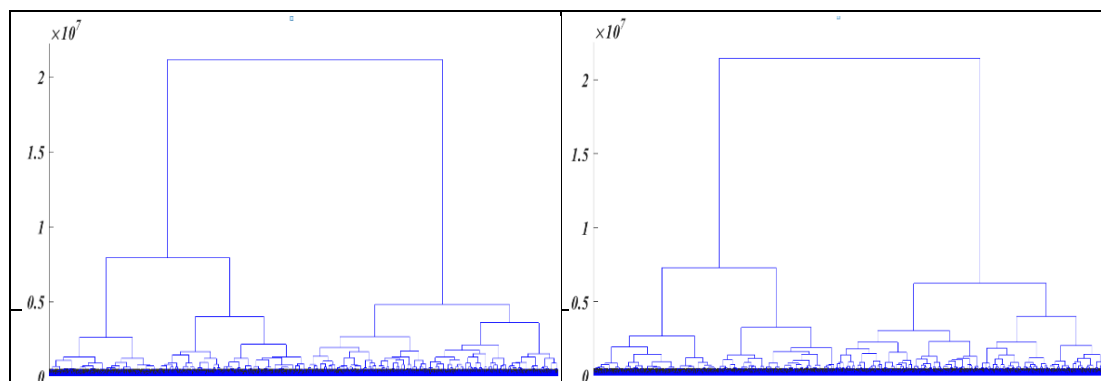
جدول شماره ۱. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی داده‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (دو دوره مورد مطالعه)

شماره	ارزش ویژه CTA	ارزش ویژه CTB	درصد واریانس CTA	درصد واریانس CTB	درصد تجمعی واریانس CTA	درصد تجمعی واریانس CTB
۱	۴۰۷/۴	۳۹۳/۹	۵۹/۸	۶۰/۱	۵۹/۸	۶۰/۱
۲	۴۱/۶	۳۷/۱	۶/۱	۵/۷	۶۵/۹	۶۵/۸
۳	۲۴/۱	۲۲	۳/۵	۳/۴	۶۹/۴	۶۹/۲
۴	۱۸/۹	۱۸/۱	۲/۸	۲/۸	۷۲/۲	۷۲/۰
۵	۱۴/۹	۱۴/۴	۲/۲	۲/۲	۷۴/۴	۷۴/۲
۶	۱۳/۷	۱۳/۷	۲/۰	۲/۱	۷۶/۴	۷۶/۳
۷	۱۲/۶	۱۱/۲	۱/۹	۱/۷	۷۸/۳	۷۸/۰
۸	۱۰/۳	۱۰/۱	۱/۵	۱/۵	۷۹/۸	۷۹/۵
۹	۹/۰	۹/۱	۱/۳	۱/۴	۸۱/۱	۸۰/۹
۱۰	۸/۸	۸/۴	۱/۳	۱/۳	۸۲/۴	۸۲/۲
۱۱	۷/۴	۷/۷	۱/۱	۱/۲	۸۳/۵	۸۳/۴
۱۲	۶/۸	۷/۲	۱/۰	۱/۱	۸۴/۶	۸۴/۵



شکل ۲. درصد تبیین ۱۲ مؤلفه اصلی

برای مشخص کردن تعداد الگوها نیز تحلیل خوشه‌ای به‌عنوان یک روش تکمیلی بکار گرفته شد. در تحلیل خوشه‌ای ابتدا محاسبه فواصل که در این پژوهش به روش اقلیدسی انجام گرفته است بر روی مؤلفه‌های اصلی (دوازده مؤلفه از آرایه S) که بیشترین پراش را به خود اختصاص داده‌اند انجام گرفت و سپس ادغام کمترین فواصل؛ که در این پژوهش با تکنیک وارد ۱ صورت گرفته است. بدین ترتیب با ۱۲ مؤلفه مینا ۹ الگوی اصلی برای هر دوره ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۸ (CTA) و ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸ (CTB) شناسایی شد. شکل ۳ دارنمای این الگوها را نشان می‌دهد. بر اساس ۱۲ مؤلفه مینا، ۹ الگوی مهم برای هر دوره قابل شناسایی می‌باشد. به دلیل حجم زیاد داده‌ها کلیه محاسبات آماری در نرم‌افزار متلب انجام گرفته و کدهای موردنیاز در سیستم برنامه‌نویسی متلب نوشته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود الگوهای بیشتر از ۹ الگو در سطوح پایین‌تر دارنما برش زده می‌شوند که بیان می‌کند شباهت الگوها بسیار بیشتر و تفاوت‌های آن‌ها کمتر است. بنابراین مناسب‌ترین خوشه‌بندی ۹ خوشه‌ای تشخیص داده شد. به‌منظور مقایسه، می‌بایست الگوهای مشابه و متناظر دو دوره که همبستگی بیشتری با یکدیگر دارند، شناسایی شوند؛ به همین دلیل از پارامتر ضریب همبستگی ۲ استفاده گردید. بدین ترتیب ضریب همبستگی تک‌تک الگوهای دوره اول با تک‌تک الگوهای دوره دوم محاسبه و الگوهای نظیر مشخص گردیدند. منظور از الگوهای نظیر یا همزاد الگوهایی هستند که هم از نظر شباهت ماهانه و فصلی وقوع و هم از نظر نوع و محل قرارگیری سیستم‌ها و شدت و ضعف آن‌ها بیشترین همبستگی را با هم دارند و این همبستگی بیشتر بزرگ‌ترین عددی است که الگوی مورد آزمایش با سایر الگوها به دست می‌دهد (جدول ۲). به‌منظور اختصار از نوشتن همبستگی‌های هر الگو با الگوهایی که همبستگی کمتر داشته‌اند خودداری گردیده است.



شکل ۳. دارنمای الگوهای دو دوره

جدول شماره ۲. ضریب همبستگی الگوهای متناظر دو دوره به درصد

۳ با ۹	۸ با ۸	۹ با ۷	۶ با ۶	۴ با ۵	۵ با ۴	۲ با ۲	۱ با ۱	زوج‌های متناظر الگوی دوره اول با الگوی دوره دوم همبستگی به درصد
۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۳۶	۰/۹۹۳۱	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۷۳	

به‌منظور مشاهده اثر تغییرات اقلیمی در دو دهه اخیر بر بارش‌های ایران، آزمون معناداری روند من‌کنندال به دو شکل سری زمانی دوره‌ای (نمودار) و سری زمانی یاخته‌ای (نقشه) الگوها در سطح ۹۵ درصد برای هر الگو انجام گرفت. محاسبه آزمون ناپارامتری من‌کنندال در چند گام به این شرح انجام می‌گیرد: گام اول) به کمک آماره S، اختلاف بین تک‌تک مشاهدات را با همدیگر حساب می‌کنیم (رابطه ۱).

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad j > k \quad \text{رابطه ۱}$$

که $j > k$ است و n تعداد کل مشاهدات، x_j و x_k به ترتیب مقادیر j ام و k ام سری هستند. خروجی تابع بالا علامت هر سری را به‌صورت زیر مشخص می‌کند (رابطه ۲).

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۲}$$

گام دوم) واریانس هر یک از مشاهدات را حساب می‌کنیم (رابطه ۳).

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، n تعداد مشاهدات، g بیانگر تعداد سری‌هایی است که دست‌کم یک داده تکراری دارد و t فراوانی مشاهدات باارزش یکسان است.

گام سوم) آماره Z را به‌وسیله رابطه ۴ به دست می‌آوریم (Hirsch et al, 1982; Gibbons & Chakraborti, 2003).

$$Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \quad \text{if } S > 0 \quad Z_{MK} = 0 \quad \text{if } S = 0 \quad Z_{MK} = \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \quad \text{if } S < 0 \quad \text{رابطه ۴}$$

گام چهارم) آزمون فرض است که به‌وسیله رابطه ۵ به دست می‌آید. فرض صفر بر عدم وجود روند و تصادفی بودن آن دلالت دارد. فرض مقابل یا فرض یک بر وجود روند دلالت دارد و به این معناست که Z به لحاظ آماری معنادار است. زمانی این فرض تأیید می‌شود که $Z < -Z_{\alpha/2}$ یا $Z > Z_{\alpha/2}$ باشد. اگر Z کوچک‌تر از صفر باشد، روند منفی را تأیید می‌کنیم و اگر Z بزرگ‌تر از صفر باشد، روند مثبت را رد نمی‌کنیم (Gan, 1998).

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این پژوهش سطح معناداری $\alpha=0/05$ در نظر گرفته‌شده و با توجه به دوطرفه بودن آزمون، مقدار Z جدول برابر با ۱/۹۶ می‌باشد. بعد از شناسایی معناداری روند، نرخ تغییرات و شیب آن نیز به کمک تخمین‌گر شیب سن محاسبه شد. این تخمین‌گر بر پایه محاسبه اختلاف تک‌تک مشاهدات از یکدیگر و رتبه آن‌ها به دست می‌آید (رابطه ۶).

$$Q = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه x_j و x_k به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در زمان‌های j و k است. میانه Q به‌دست‌آمده برابر با شیب سری زمانی داده‌ها خواهد بود (Banda et al, 2021).

یافته‌ها و بحث

همان‌گونه که در بخش داده‌ها و روش پژوهش بیان شد، برای دو بخش از داده‌های تفکیک‌شده CTA و CTB، با ۱۲ مؤلفه مبنا ۹ گروه الگوی گردش جوی متمایز مشخص گردید. بدین ترتیب داده‌های موردنیاز برای ادامه پژوهش فراهم گردید.

شناسایی فصلی الگوهای گردش جوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

شناسایی الگوهای فصلی از طریق زمان رخداد هر الگو در طی سال امکان‌پذیر است. همچنین منحنی هم‌ارتفاع ۵۷۰۰ بر روی نقشه‌ها نیز می‌تواند به شناسایی الگوهای فصلی کمک کند. این منحنی محدوده فعالیت بادهای غربی را نشان می‌دهد این بادهای فصل زمستان قوی‌تر و به سمت جنوب و در فصل تابستان ضعیف‌تر و به سمت شمال پیشروی و عقب‌نشینی می‌کنند (علیچانی ۱۳۹۰:۱۲۷). جابجایی این منحنی می‌تواند گویای فصل رخداد هر الگو باشد. منحنی هم‌ارتفاع ۵۷۰۰ بر روی نقشه الگوهای زمستانی از جنوب سواحل خلیج فارس، بر روی نقشه الگوهای فصل‌های گذار (بهار و پاییز) از سواحل شمالی خلیج فارس و تا حدودی تا میانه ایران و بر روی نقشه الگوهای تابستانی از جنوب دریای خزر تا میانه آن عبور می‌کند. بر این اساس الگوهای فصلی شناسایی و با توجه به ضریب همبستگی آن‌ها (جدول ۲) به صورت جفت زوج‌های متناظر دسته‌بندی شدند. بدین ترتیب سه زوج الگوی زمستانی (CTA1، CTB1) و (CTA2، CTB2) و (CTA9، CTB3) و (CTA4، CTB5) و (CTA5، CTB4) و (CTA6، CTB6) و (CTA7، CTB9) و (CTA8، CTB8) شناسایی شدند. الگوی ۳ از دوره اول CTA3 یک الگوی زمستانی و الگوی ۷ از دوره دوم CTB7 الگویی با ویژگی‌های فصل گرم می‌باشد که زوج مناسبی تشخیص داده نشدند. به عبارت دیگر این دو الگو با یکدیگر کمترین ضریب همبستگی را داشتند. آشکارا مشاهده می‌شود الگوی CTA3 که یک الگوی زمستانی پر بارش بوده در دوره دوم حذف و بجای آن الگوی CTB7 که یک الگوی بهاری-تابستانی با بارش ناچیز می‌باشد، متولد گردیده است.

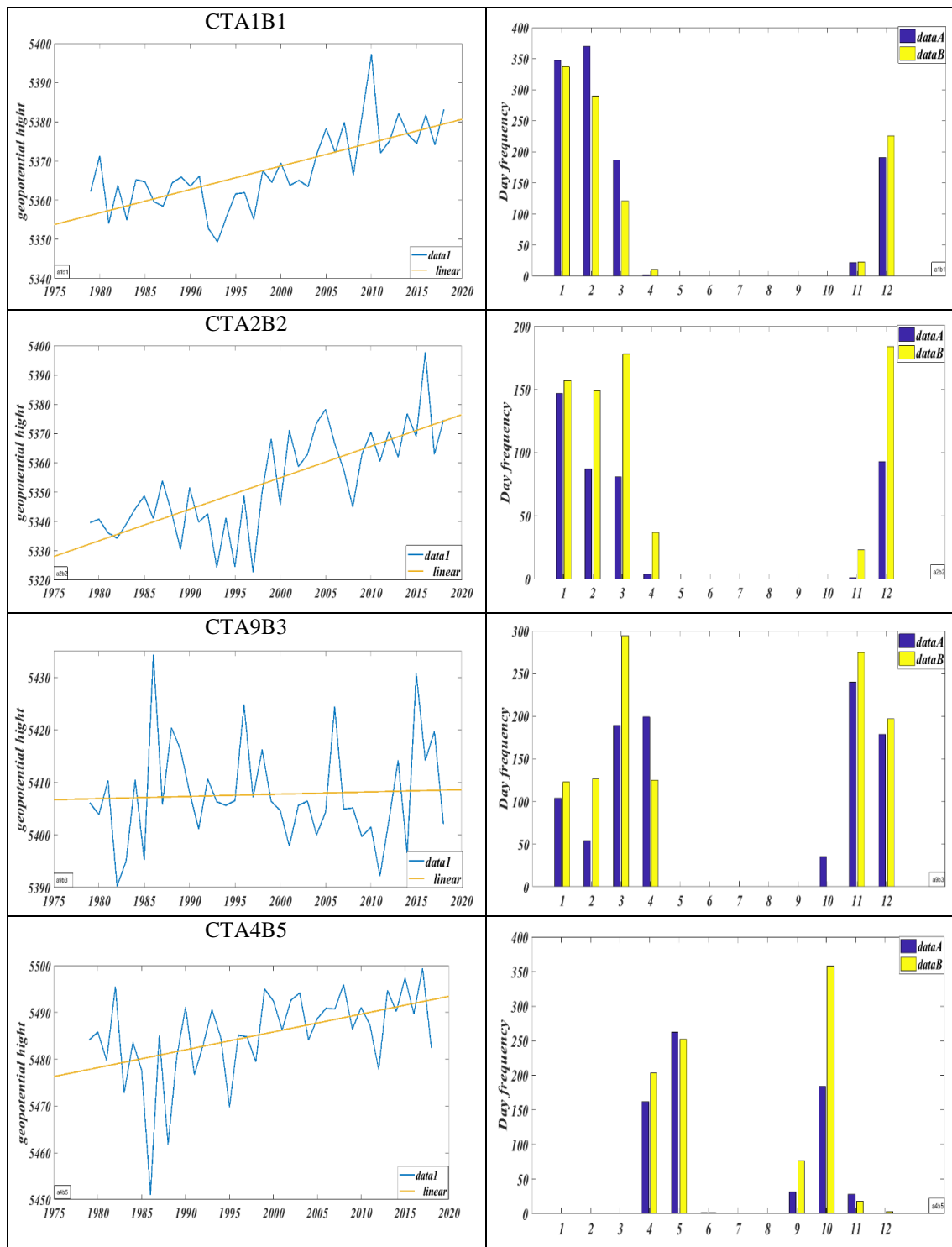
روند تغییرات دوره‌ای (زمانی) الگوهای گردش جوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

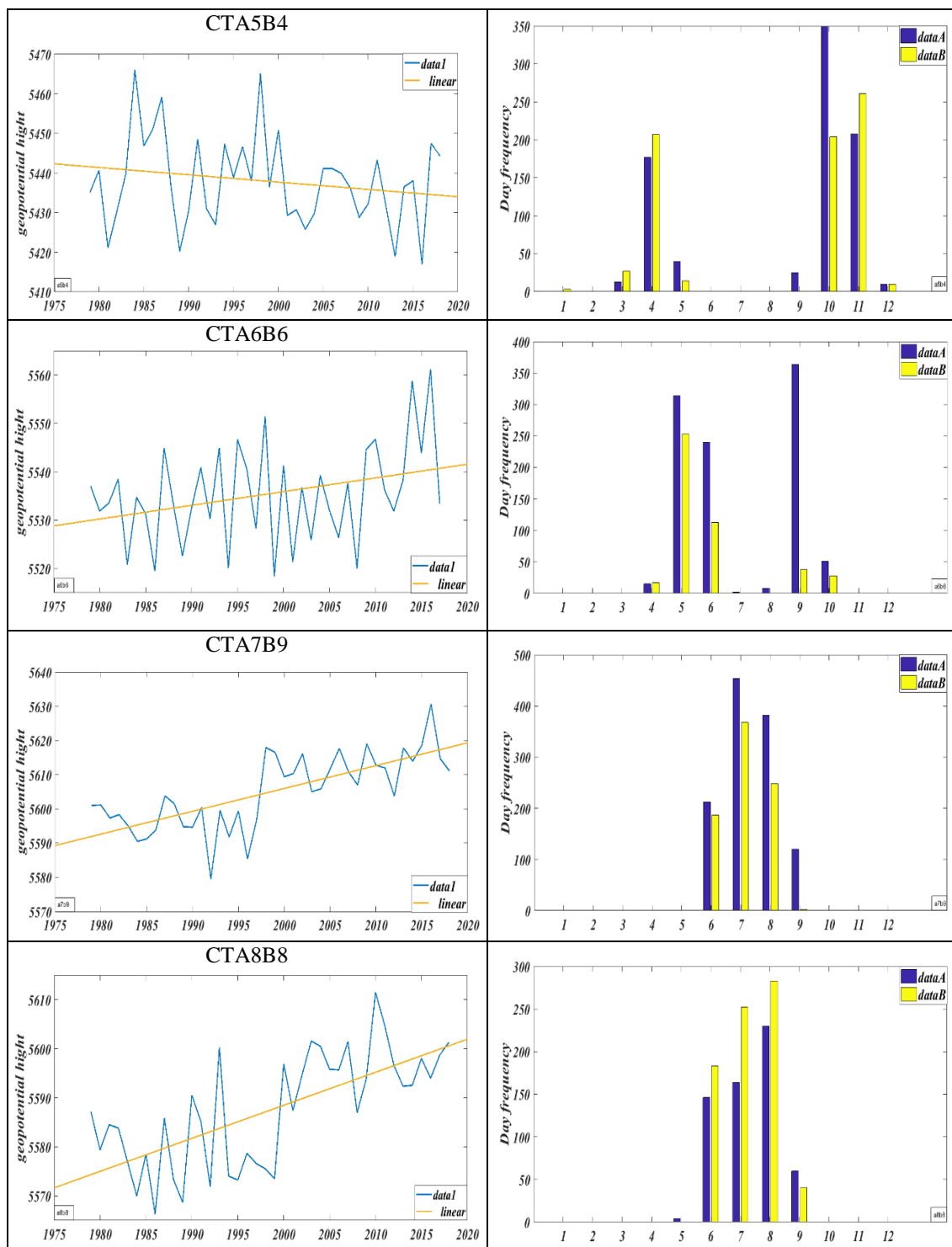
در جدول ۳ نتایج آزمون معناداری من‌کنندال بر روی سری زمانی سالانه الگوهای متناظر دیده می‌شود. این آزمون نشان داد از بین ۸ زوج الگو، ۵ زوج روند معنادار مثبت پیدا کرده‌اند که دو مورد مربوط به الگوهای زمستانی است.

جدول ۳. نتایج آزمون معناداری روند من‌کنندال بر روی سری زمانی الگوهای متناظر

معناداری	کران پایین	کران بالا	شیب خط	Z	CT
مثبت	۰/۳۹۸۳	۰/۷۹۶۸	۰/۵۹۷۵	۴/۸۳۵۲	CTA1B1
مثبت	۱/۰۷۵۰	۱/۶۹۷۷	۱/۳۸۶۳	۵/۷۶۷۳	CTA2B2
ندارد	-۹/۶۱۱۸	۹/۴۳۵۴	-۰/۰۸۸۸۲	۰/۱۶۲۲	CTA3
مثبت	۰/۱۴۳۸	۰/۶۱۹۱	۰/۳۸۱۵	۳/۱۱۰۸	CTA4B5
ندارد	-۰/۴۹۸۹	۰/۱۳۰۰	-۰/۱۸۴۵	-۰/۸۵۰۵	CTA5B4
ندارد	-۴۲/۶۸۴۰	۳/۷۰۶۱	-۱۹/۹۸۹۰	۰/۹۴۲۷	CTA6B6
مثبت	۰/۴۵۶۹	۰/۸۷۹۱	۰/۶۶۸۰	۴/۵۵۵۶	CTA7B9
مثبت	۰/۴۳۲۵	۰/۹۱۵۴	۰/۶۷۳۹	۴/۰۱۹۶	CTA8B8
ندارد	-۰/۲۳۳۵	۰/۳۱۹۳	۰/۰۴۲۹	-۰/۴۳۱۱	CTA9B3
ندارد	-۰/۳۵۶۹	۰/۷۷۶۰	۰/۲۰۹۵	۰/۸۱۱۱	CTB7

شکل ۴ نمودارهای فراوانی رخداد ماهانه الگوهای دو دوره؛ و روند سری زمانی تغییرات الگوها را نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود اکثر الگوهای جوی در دو دهه گذشته تغییرات معنادار مثبت قابل توجهی داشته‌اند. برای تهیه نمودارهای روند، ابتدا برای هر سال از کل یاخته‌ها میانگین گیری شد بدین ترتیب برای هر سال یک میانگین سالانه به دست آمد و سپس از سری زمانی ۴۰ میانگین تهیه شده روند سالانه گرفته و به صورت نمودار ارائه شد.



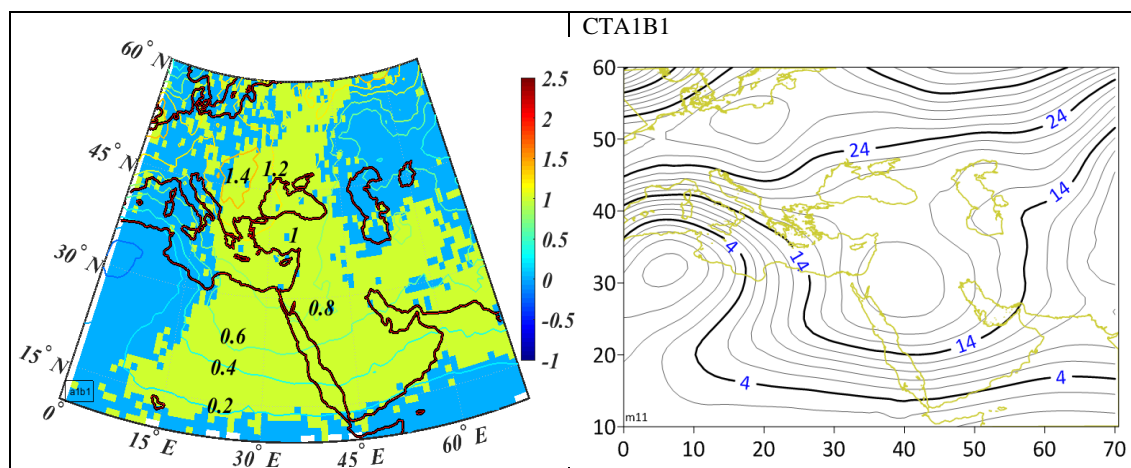


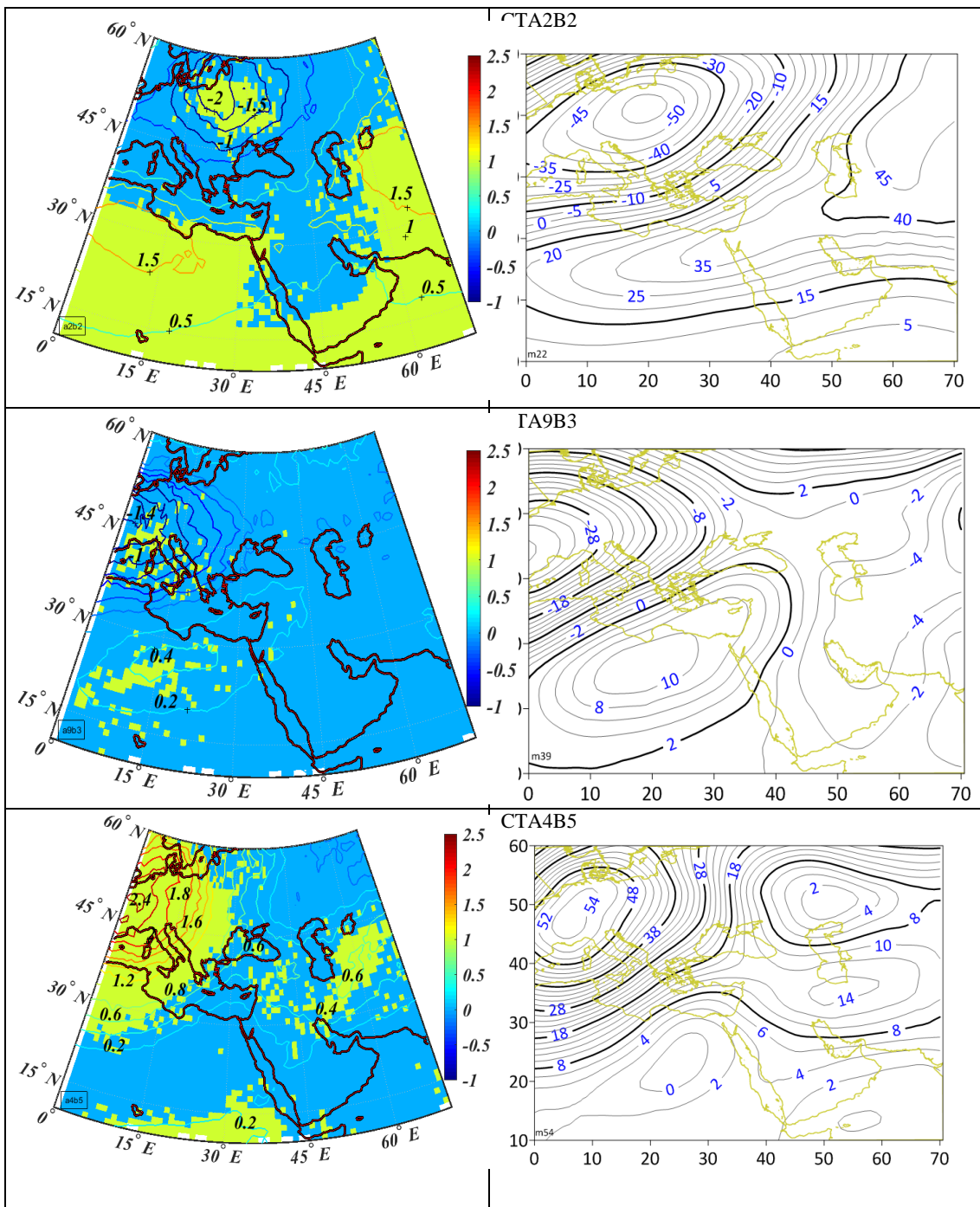
شکل ۴. سمت راست نمودار فراوانی رخداد ماهانه الگوها (دو دوره). سمت چپ نمودار روند تغییرات (سری زمانی سالانه)

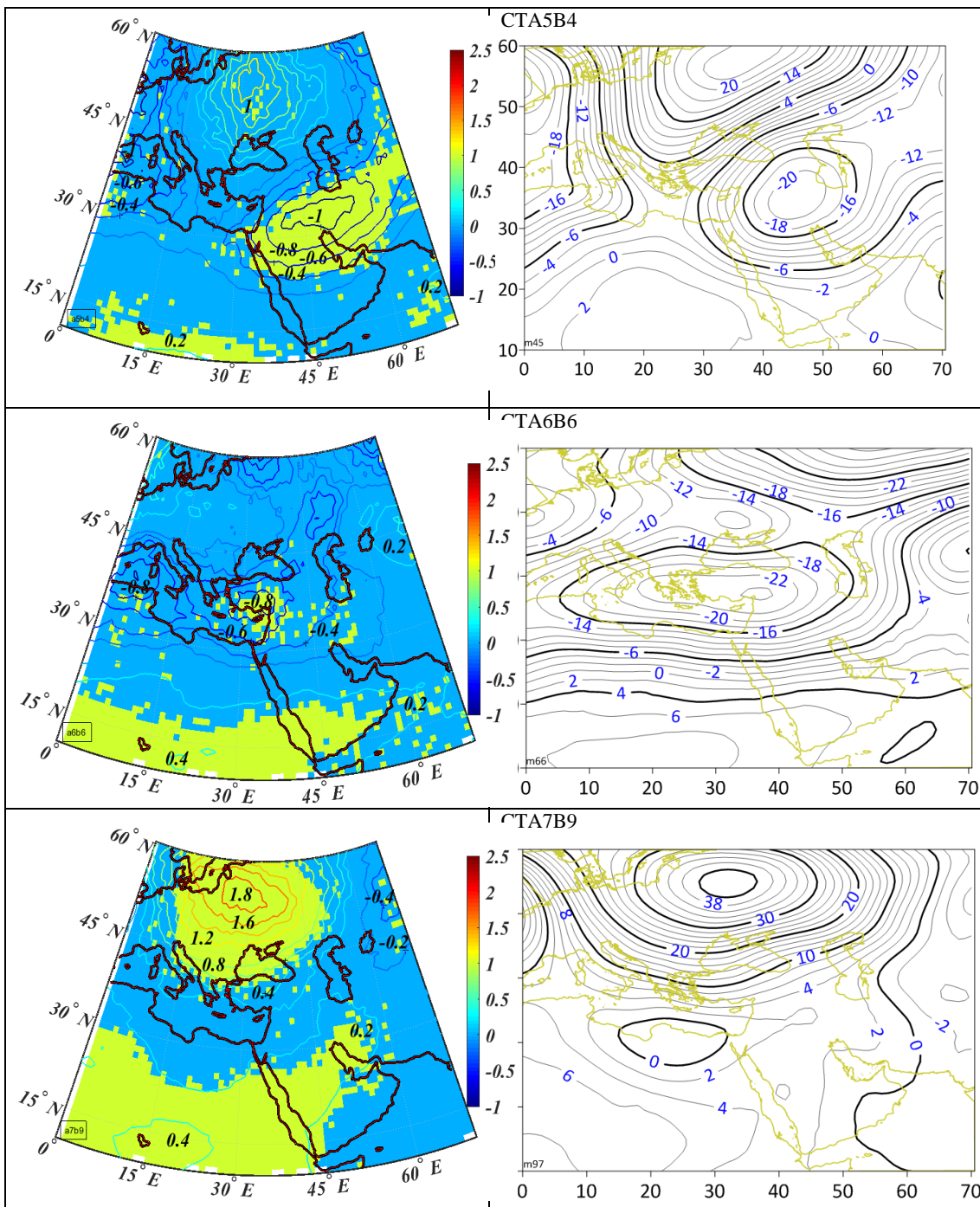
روند تغییرات یاخته‌ای (مکانی) الگوهای گردش تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

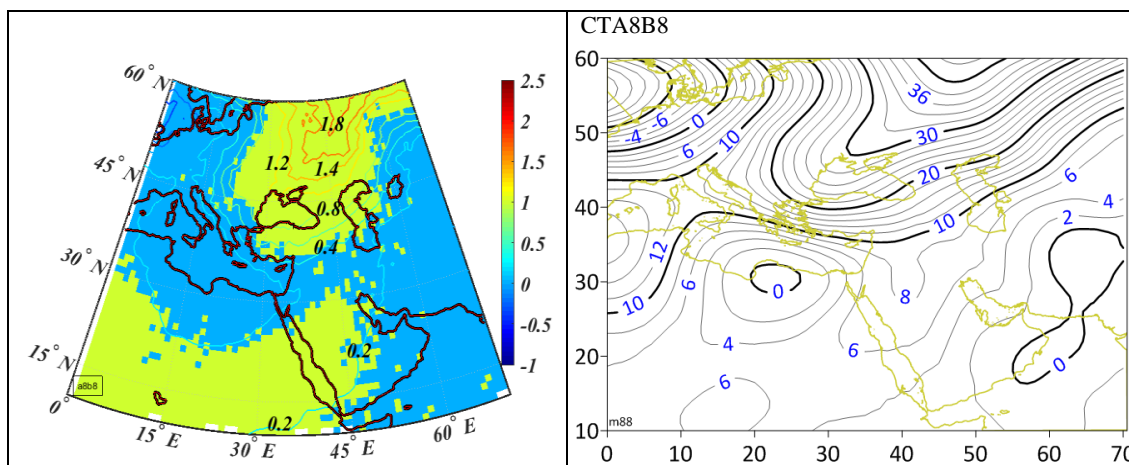
پژوهش‌های انجام‌شده بر روی الگوهای گردش، بیشترین تغییرات یاخته‌ای را نیز بر روی الگوهای زمستانی نشان می‌دهد. برای تحلیل دقیق‌تر تغییرات، بجای نمایش نقشه الگوها، الگوهای نظیر از یکدیگر کسر و نقشه‌های تفاضلی آن‌ها کشیده شده است. در کنار این نقشه‌ها؛ نقشه‌های معناداری روند و میزان شیب آن‌ها که حاصل روندیابی بر روی

سری زمانی سالانه هر یک از یاخته‌ها می‌باشد، ترسیم‌شده است. شکل ۵ نقشه‌های حاصل از تفاضل الگوهای متناظر و روند تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۵ با تفاضل زوج الگوی CTA1B1 افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل در دو دهه اخیر در جنوب غرب آسیا مشهود است. روندهای معنادار مثبت به‌طور گسترده‌ای تقریباً در تمام محدوده جنوب غرب آسیا نمود پیدا کرده، که بیانگر تضعیف این الگوی زمستانی است. این الگو افزایش معنادار ارتفاع ژئوپتانسیل بر نیمه شرقی مدیترانه و بر روی سامانه چرخندی سودان را به‌خوبی نشان می‌دهد. این افزایش منجر به کاهش چرخندی، کاهش شیب فشار، کاهش ناپایداری گردیده که در نهایت کاهش بارش‌های فصل سرد کشورمان را به همراه داشته است. کاهش مقادیر بارش این الگو در دوره دوم (CTB1) گواه این ادعاست. تفاضل الگوی زمستانی CTA2B2 افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل تا سه برابر الگوی CTA1B1 را نشان می‌دهد. روندهای معنادار مثبت و قوی‌تر این الگو به‌صورت مترامک و فشرده در نیمه شرقی کشور و به‌طور پراکنده در نیمه غربی کشورمان دیده می‌شود. در جنوب شبه‌جزیره عربستان و سواحل جنوبی دریای مدیترانه نیز تضعیف این الگوی زمستانی قابل‌مشاهده است. تضعیف سامانه چرخندی سودان که یکی از بازیگران بارش‌های فصل سرد کشورمان می‌باشد، با استقرار این الگو همچنان مشهود است. کاهش بارش الگوی CTB2 که نماینده دومین الگوی بارشی زمستانی در دوره دوم مورد مطالعه است این موضوع را تأیید می‌کند. برای الگوهای فصول میانه، الگوی CTA4B5 نیز افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل تا ۱۴ متر بر روی کشورمان و روندهای معنادار مثبت تا ۰/۶ متر در سال به‌ویژه در شمال شرقی، مرکز و به‌طور پراکنده در سایر بخش‌های کشورمان را ارائه می‌دهد. این الگو تضعیف چرخندهای مدیترانه غربی را به‌خوبی نشان می‌دهد. هر سه الگوی فصول معتدل تضعیف سامانه چرخندی سودان را بازنمایی می‌کنند. افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل در فصول بارشی ایران (زمستان و پاییز) می‌تواند منجر به کاهش کنش چرخندی سامانه‌های بارش‌زا (مدیترانه و سودان) کاهش شیب فشار و بالاخره کاهش ناپایداری و بارش در کشور گردد (دارند ۱۳۹۳:۳۴۹). از ۸ زوج الگوی متناظر تنها الگوی فصل گذار CTA5B4 روند معنادار منفی را به‌طور گسترده در بخش وسیعی از جنوب غرب آسیا و به‌ویژه بر روی کشورمان نشان می‌دهد. تفاضل این دو الگو یک هسته کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل تا ۲۰ متر را در شمال غربی کشور نمایان ساخته است.









شکل ۵. سمت راست نقشه‌های تفاضل الگوهای همانند دو دوره (واحد متر). سمت چپ معناداری روند و میزان شیب تغییرات همان الگو در دو دهه اخیر (واحد متر در سال)

همین محدوده روند معنادار منفی ۱ متر در سال را بر روی نقشه معناداری روند ثبت کرده است. به عبارت دیگر ۲۰ متر کاهش ارتفاع در طی ۲۰ سال، روند معنادار منفی به ازای هر سال ۱ متر را معرفی می‌کند. این الگو نشان می‌دهد در صورت مهیا بودن سایر شرایط می‌تواند موجب بارندگی‌های فصل معتدل به‌ویژه بر روی کشورمان باشد. سومین الگوی فصل میانه CTA6B6 نیز به‌طور پراکنده روندهای معنادار منفی در غرب کشورمان؛ تا یک هسته کمینه -0.8 متر در سال را در شمال شرقی دریای مدیترانه نشان می‌دهد. این تغییرات می‌تواند شرایط نسبی برای چرخندزایی در بخش شرقی مدیترانه را با استقرار این الگو فراهم سازد. برای الگوهای تابستانی تفاضل زوج الگوی CTA7B9 افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل را از جنوب‌غرب‌وز کشور و خلیج فارس تا دریای سرخ و بخش مرکزی و غربی دریای سیاه را تا مدار 60° درجه نشان می‌دهد. دیگر الگوی تابستانی CTA8B8 افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل را با معناداری مثبت روند در غرب شبه‌جزیره عربستان و دریای سرخ و بخش‌هایی از شمال غربی کشور و نیمه شمالی دریای مازندران و دریای سیاه را نشان می‌دهد. هر دو زوج الگوی تابستانی محدوده تقریباً یکسانی را از نظر معناداری روند و مقادیر آن پوشش داده‌اند. روندهای معنادار مثبت (افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل) برای الگوهای تابستانی شرایط افزایش پایداری، کاهش چرخندگی و کاهش بارش را مهیا می‌سازد.

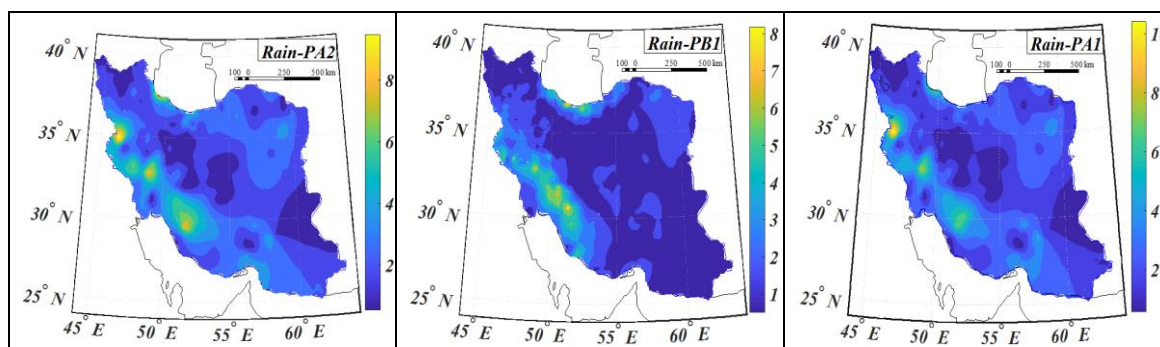
ارتباط الگوهای گردش جوی با بارش‌های ایران

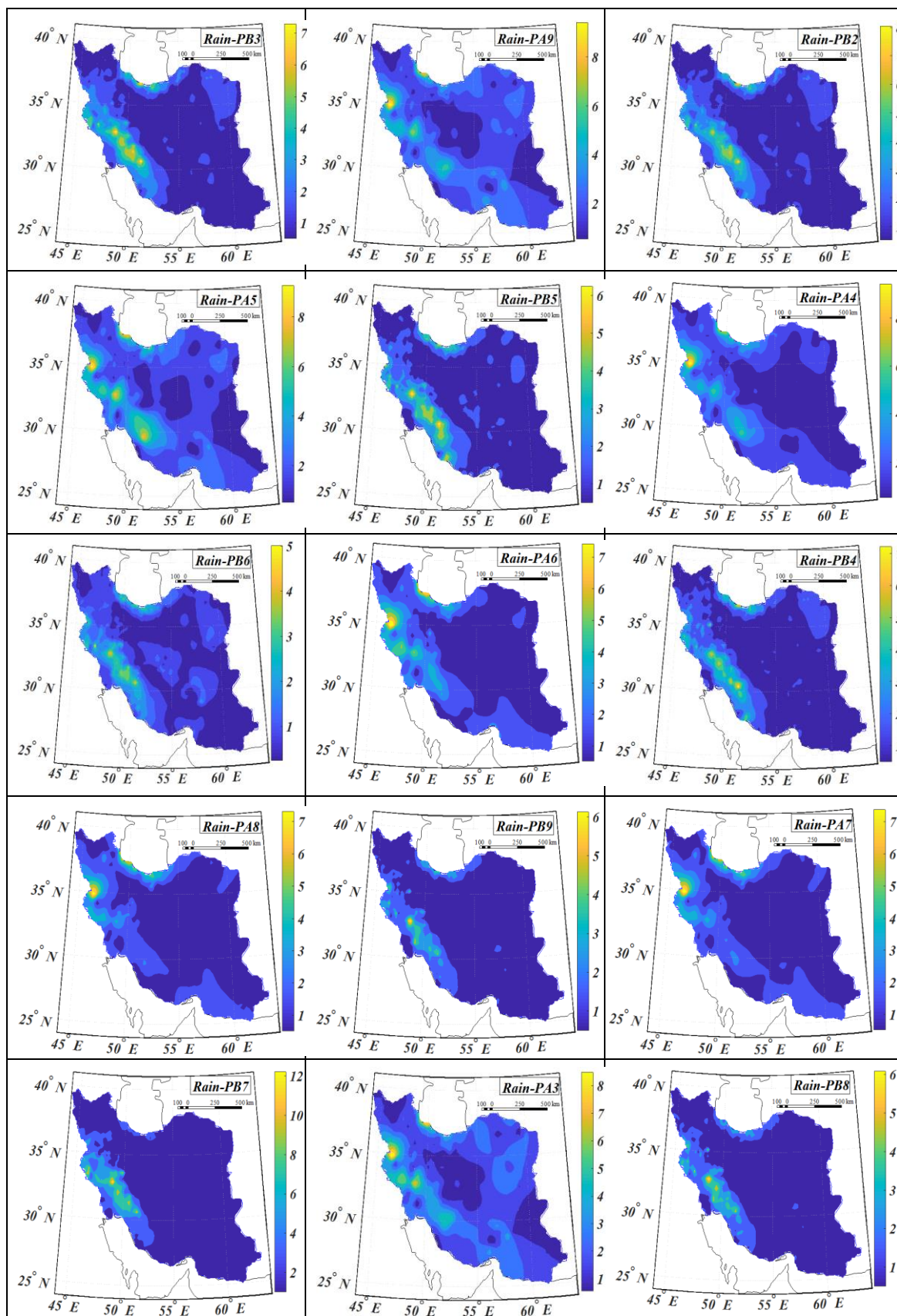
در جدول ۴ میانگین بارش هر الگو و فراوانی آن‌ها ثبت شده است. الگوی زمستانی CTA1 با میانگین بارش $1/32$ میلی‌متر و فراوانی $15/3$ میلی‌متر در دوره دوم (CTB1) با بارش $0/99$ میلی‌متر و فراوانی $13/8$ در هر دو مورد کاهش نشان می‌دهد. الگوی CTA2 در دوره دوم (CTB2) کاهش بارش اما افزایش فراوانی به دست آورده است. کمترین بارش زمستانی مربوط به الگوی CTA9 می‌باشد که در دوره دوم (CTB3) کاهش بارش و افزایش فراوانی داشته است. الگوی زمستانی CTA3 با بارش مناسب در دوره دوم حذف گردیده است. از بین سه زوج الگوی فصل‌های گذار، زوج CTA4B5 با کاهش بارش و روندهای معنادار مثبت به‌ویژه از جنوب‌غرب‌وز به شمال شرقی کشور باز هم نشانه خشک‌تر شدن اقلیم ایران هستند. از میان الگوهای مورد مطالعه تنها الگویی که در دوره دوم افزایش ناچیزی در بارش نشان داده، الگوی معتدل CTB4 می‌باشد. بر روی شکل ۵ نقشه روند زوج الگوی CTA5B4 نشان می‌دهد کاهش

معنادار ارتفاع ژئوپتانسیل بر روی کشور منجر به افزایش ناپایداری و در نهایت موجب اندکی افزایش بارش (جدول ۴) با استقرار این الگو گردیده است. این الگو با روندهای معنادار منفی در دوره دوم بر روی کشورمان بیان می‌کند؛ در صورت دسترسی به رطوبت کافی می‌تواند منجر به ناپایداری، بارش و حاکمیت یک اقلیم مرطوب‌تر در فصل‌های معتدل گردد. الگوهای تابستانی خشک‌ترین الگوها هستند. نکته قابل‌ذکر در مورد الگوهای تابستانی افزایش الگوی CTB7 در دوره دوم است که بجای یک الگوی زمستانی ظاهر شده است. تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد تحت تأثیر تغییرات اقلیمی حاکمیت یک اقلیم گرم‌تر و خشک‌تر در کشورمان در دو دهه گذشته کاملاً مشهود است. شکل ۵ نقشه‌های بارش کشور مربوط به الگوهای گردشی به‌دست‌آمده در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای تمام الگوها گسترده شدن مناطق کم بارش به‌خوبی دیده می‌شود. مقایسه نقشه‌های بارندگی کشور مربوط به زوج الگوهای زمستانی PA1، PA2 و PB1، PA2 و PB2، PA9 و PB3 نشان می‌دهد علاوه بر کاهش بارش این الگوها، توزیع مکانی آن‌ها نیز دستخوش تغییرات قابل‌توجهی شده و هسته بیشینه بارش‌ها از غرب کشور به سمت جنوب‌غرب‌وز جابجا شده است. الگوی زمستانی PA3 با پتانسیل بارش بالا و توزیع یکنواخت‌تر در سطح کشور که در دوره اول رخداد داشته، در دو دهه اخیر مشاهده نشده است. از بین الگوهای فصول گذار، الگوی PB6 (دوره دوم) تنها الگویی است که توزیع یکنواخت‌تر بارش نسبت به همزاد خود (PB6) در مرکز و شمال شرقی کشور پیدا کرده است. الگوی تابستانی و نوظهور PB7 وسیع‌ترین مناطق کم بارش و خشک کشور را در دو دهه اخیر نشان می‌دهد. برای تمام الگوها در دوره دوم هسته بیشینه بارش علاوه بر جابجایی از غرب به جنوب‌غرب‌وز کشور از نظر مقادیر بارش نیز کاهش نشان می‌دهد.

جدول ۴. میانگین بارش الگوهای هر دوره در ایران و درصد فراوانی آن‌ها

نام الگوی دوره اول	میانگین بارش به میلی‌متر	فراوانی الگو به درصد	نام الگوی نظیر در دوره دوم	میانگین بارش به میلی‌متر	فراوانی الگو به درصد
CTA1	۱/۳۲	۱۳/۸	CTB1	۰/۹۹	۱۳/۸
CTA2	۱/۵۳	۱۰	CTB2	۱/۲۷	۱۰
CTA3	۱/۳۷	-	-	-	-
CTA4	۰/۵۹	۱۲/۵	CTB5	۰/۴۵	۱۲/۵
CTA5	۰/۶۳	۹/۹	CTB4	۰/۷۶	۹/۹
CTA6	۰/۲۷	۶/۱	CTB6	۰/۲۵	۶/۱
CTA7	۰/۱۱	۱۱	CTB9	۰/۱۴	۱۱
CTA8	۰/۱۳	۱۰/۴	CTB8	۰/۱۱	۱۰/۴
CTA9	۱/۱۳	۱۵/۶	CTB3	۰/۹۱	۱۵/۶
-	-	۱۰/۷	CTB7	۰/۱۳	۱۰/۷





شکل ۶. نقشه‌های بارش ایران مربوط به الگوهای CTA و CTB. نقشه‌های PA مربوط به الگوهای CTA و نقشه‌های PB مربوط به الگوهای CTB. از راست به چپ زوج‌های مناظر در کنار هم

نتیجه گیری

بررسی تغییرات روزانه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال طی دو دوره ۲۰ ساله (۱۹۷۹ تا ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸) نشان می‌دهد که الگوهای گردشی تراز میانی جو در محدوده ۰ تا ۷۰ درجه شرقی و ۱۰ تا ۶۰ درجه شمالی حاصل ترکیب ۱۲ مؤلفه مناسب است. تحلیل خوشه‌ای این دوازده مؤلفه نشان داد که در مجموع ۹ الگوی گردشی متمایز در محدوده اشاره شده حاکم هستند. مقایسه نظیر به نظیر الگوها تغییرات در خور توجهی را برای الگوها نشان داد. الگوهایی که با استقرار بر ارتفاع و فراز (ریج) روی همه یا بخش بزرگی از ایران همراهاند فراوانی بیشتری دارند که با نتایج پژوهش مسعودیان (۱۳۸۵) هماهنگ است. عطایی (۱۳۸۸) نیز ۷ الگوی گردشی شناسایی کرد که ۵ الگو نماینده حاکمیت فراز (ریج) یا پر ارتفاع بر روی ایران بوده‌اند. تعداد زیادی از این الگوها روندهای معنادار مثبت پر ارتفاع را در بخش بزرگی از کشور در ۲۰ سال گذشته نشان دادند. زوج الگوهای زمستانی CTA1B1 و CTA2B2 روندهای معنادار مثبت (افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل) را در بخش گسترده‌ای از کشور به تصویر کشاندند. روند معنادار مثبت بر روی سامانه‌های سودان و چرخندهای مدیترانه که نقش مهمی در بارش‌های فصول زمستان و پاییز کشورمان دارند تضعیف این سامانه‌ها را در دو دهه اخیر آشکار ساخت. این نتایج با پژوهش علیزاده (۱۳۹۱) و دارند (۱۳۹۳) هماهنگی دارد. بررسی ارتباط میان الگوهای گردشی جو و بارش در سطح ایران نشان داد برخی از الگوها سهم زیادی در تولید بارش کشور دارند و برخی دیگر با ایجاد هوای پایدار مانع بارش در کشور می‌شوند، به عبارت دیگر رژیم بارشی ایران تابع نوع الگوی گردشی حاکم است که رضیئی و همکاران (۱۳۸۹) نیز همین نتایج را به دست آورده‌اند. از دیگر نتایج این پژوهش آن است که الگوهای فصول بارشی ایران (زمستان و پاییز) در دو دهه گذشته به طور قابل توجهی تضعیف شده‌اند. روندهای معنادار مثبت پر ارتفاع برای الگوهای تابستانی افزایش پایداری و تقویت این الگوها را ظاهر ساخت. همچنین زوج الگوی فصل گذار CTA4B5 بر بخش گسترده‌ای از کشور روندهای معنادار منفی نشان داد، ماهیت این الگو مشخص کرد که با استقرار الگوی CTB5 (زوج دوره دوم) در صورت دسترسی به رطوبت می‌تواند امکان بارش‌های گسترده در سطح کشور را فراهم آورد. ضرایب همبستگی دو الگوی ناهماهنگ را شناسایی کرد. الگوی CTA3 یک الگوی زمستانی با بارش زیاد که در دو دهه گذشته هیچ رخدادی نداشته است و می‌توان گفت ناپدید شده است، و بجای آن الگوی CTB7 الگویی تابستانی است که در دو دهه اخیر با ۱۰/۷ درصد فراوانی وقوع پدیدار گشته است.

تقدیر و تشکر

این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) حجازی زاده، زهرا؛ فتاحی، ابراهیم. (۱۳۸۳). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های زمستانه ایران. *نشریه جغرافیا*، ۳، ۸۹-۱۰۷.
- ۲) حمیدیان پور، محسن؛ علیجانی، بهلول و صادقی، علیرضا. (۱۳۸۹). شناسایی الگوهای همدید بارش‌های شدید شمال شرق ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱، ۱-۱۶.
- ۳) دارند، محمد. (۱۳۹۳). شناسایی تغییرات ارتفاع، تاوایی و فشار تراز دریای الگوهای گردش جوی غالب مؤثر بر اقلیم ایران زمین. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۶ (۳)، ۳۷۴-۳۴۹.
- ۴) رسولی، علی‌اکبر؛ بابائیان، ایمان؛ قائمی، هوشنگ و زواررضا، پیمان. (۱۳۹۱). تحلیل سری‌های زمانی فشار مراکز الگوهای سینوپتیکی مؤثر بر بارش‌های فصلی ایران. *جغرافیا و توسعه*، ۲۷، ۷۷-۸۸.

- ۵) رضیعی، طیب؛ عزیزی، قاسم؛ محمدی، حسین و خوش‌اخلاق، فرامرز. (۱۳۸۹). الگوهای روزانه گردش جو زمستانه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر روی ایران و خاورمیانه. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۱۷، ۱-۳۴.
- ۶) علیجانی، بهلول. (۱۳۹۰). *اقلیم‌شناسی سینوپتیک*. چاپ چهارم، تهران: انتشارات سمت.
- ۷) علیجانی، بهلول و دوستان، رضا. (۱۳۹۱). شناسایی کانون‌های کنترل‌کننده اقلیم ایران و الگوهای فشار مربوط در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال جو ایران در دوره سرد سال. *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۱۹، ۲۵۵-۲۹۷.
- ۸) علیزاده، تیمور؛ عزیزی، قاسم و روستا، ایمان. (۱۳۹۱). واکاوی الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جو هنگام رخداد بارش‌های فراگیر و غیر فراگیر در ایران. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۴، ۱-۲۴.
- ۹) عطایی، هوشنگ. (۱۳۸۸). بررسی الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جو در سال‌های کم بارش در ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۱ (۳۳)، ۴۳-۵۸.
- ۱۰) غیور، حسنعلی؛ مسعودیان، سید ابوالفضل؛ آزادی، مجید و نوری، حمید. (۱۳۹۰). تحلیل زمانی و مکانی رویدادهای بارشی سواحل جنوبی خزر. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۱۰۰، ۱-۳۴.
- ۱۱) فتاحی، ابراهیم و شیراوند، هنگامه. (۱۳۹۳). بررسی الگوهای گردش جوی روزهای همراه با بارش برف سنگین در غرب ایران. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱، ۹۷-۱۰۷.
- ۱۲) مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۳۸۵). زیج سی‌ساله الگوهای گردش تراز میانی جو ایران. *مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۷، ۳۳-۵۱.

References

- 1) Ait-Sahalia, Y., & Xiu, D. (2015). Principal Component Analysis of High Frequency Data. *SSRN Electronic Journal*, 114, 287-303.
- 2) Alijani, B., & Dostan, R. (2011). Identifying the control centers of Iran's climate and related pressure patterns at the level of 500 hectopascals of Iran's atmosphere in the cold period of the year. *Geography and Regional Development*, 19, 255-297. [In Persian].
- 3) Alijani, B. (2012). *Synoptic climatology*. 4th edition, Tehran: Semit Publications. [In Persian].
- 4) Alizadeh, T., Azizi, Q., & Rosta, I. (2011). Analyzing circulation patterns at the 500 hectopascal level of the atmosphere during widespread and non-pervasive rainfall events in Iran. *Space planning and preparation*, 4, 1-24. [In Persian].
- 5) Atai, H. (2010). Investigating circulation patterns of 500 hectopascal level of atmosphere in low rainfall years in Iran. *Geography and Environmental Planning*, 1 (33), 43-58. [In Persian].
- 6) Banda, V., Dzwaito, B., Singh, S., & Thokozani, K. (2021). Trend analysis of selected hydro-meteorological variables for the Rietspruit sub-basin, South Africa. *Journal of Water and Climate Change*, 12, 123-142.
- 7) Bejarán, R. A., & Camilloni, I. A. (2003). Objective method for classifying air masses: an application to the analysis of Buenos Aires' (Argentina) urban heat island intensity. *Theoretical and Applied Climatology*, 74(1), 93-103.
- 8) Bryson, R. A. (1966). Air Masses, Streamlines, and the Boreal Forest. *Geographical Bulletin*, 8(3), 228-269.
- 9) Esteban, P., Jones, P. D., Martín-Vide, J., & Mases, M. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25(3), 319-329.
- 10) Fatahi, E., & Shiravand, H. (2013). Investigating atmospheric circulation patterns on days with heavy snowfall in western Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 1, 97-107. [In Persian].
- 11) Gadgil, S., & Iyengar, R. N. (2007). Cluster analysis of rainfall stations of the Indian Peninsula. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 873-886.
- 12) Gan, T. Y. (1998). Hydroclimatic trends and possible climatic warming in the Canadian

- Prairies. *Water Resources Research*, 34, 3009-3015.
- 13) Ghayor, H. A., Masoudian, S. A., Azadi, M., & Nouri, H. (2012). Temporal and spatial analysis of precipitation events on the southern shores of Caspian. *Geographical Research Quarterly*, 100, 17-34. [In Persian].
 - 14) Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2011). *Nonparametric Statistical Inference*. In M. Lovric (Ed.), *International Encyclopedia of Statistical Science* (pp. 977-979). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
 - 15) Hamidianpour, M., Alijani, B., & Sadeghi, A. (2011). Identifying synoptic patterns of heavy rains in northeast Iran. *Geographical Studies of Arid Regions*, 1, 1-16. [In Persian].
 - 16) Hejazizadeh, Z., & Fatahi, I. (2007). Synoptic analysis of Iran's winter rainfall. *Journal of Geography*, 3, 89-107. [In Persian].
 - 17) Hirsch, R., Slack, J., & Smith, R. (1982). Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resources Research*, 18, 107-121.
 - 18) Hoerling, M. P., Hurrell, J. W., & Xu, T. (2001). Tropical origins for recent North Atlantic. *Climate Change Science*, 292(5514), 90-92.
 - 19) Horton, D. E., Johnson, N. C., Singh, D., Swain, D. L., Rajaratnam, B., & Diffenbaugh, N. S. (2015). *Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends*. *Nature*, 522(7557), 465-469.
 - 20) HUTH, R. (1996). AN INTERCOMPARISON OF COMPUTER-ASSISTED CIRCULATION CLASSIFICATION METHODS. *International Journal of Climatology*, 16(8), 893-922.
 - 21) Jolliffe, I. T. (2002) *Principal Component Analysis*. New York, USA.
 - 22) Kalkstein, L. S., Sheridan, S. C., & Graybeal, D. Y. (1998). A determination of character and frequency changes in air masses using a spatial synoptic classification. *International Journal of Climatology*, 18(11), 1223-1236.
 - 23) Lolis, C. J., Kotsias, G., & Bartzokas, A. (2018). Objective Definition of Climatologically Homogeneous Areas in the Southern Balkans Based on the ERA5 Data Set. *Climate*, 6(4).1-12.
 - 24) Marsh, G. E. (2007). *Climate Change: The Sun's Role*.
 - 25) Masoudian, Seyyed Abulfazl. (1385). 30-year study of circulation patterns in the middle level of Iran's atmosphere. *Journal of Geography and Regional Development*, 7, 33-51. [In Persian].
 - 26) Rasouli, A. A., Babaian, I., Qaemi, H., & Zavarreza, P. (2011). Analysis of time series of central pressure of synoptic patterns affecting seasonal rainfall in Iran. *Geography and Development*, 27, 77-88. [In Persian].
 - 27) Raziie, T., Azizi, Q., Mohammadi, H., & Khoshakhlq, F. (2011). Daily patterns of winter atmospheric circulation at 500 hPa over Iran and the Middle East. *Natural Geography Research*, 74, 17-34. [In Persian].
 - 28) Richman, M. B. (1981). Obliquely Rotated Principal Components: An Improved Meteorological MapTyping Technique?. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 20(10), 1145-1159.
 - 29) Romero, R., Sumner, G., Ramis, C., & Genovés, A. (1999). A classification of the atmospheric circulation patterns producing significant daily rainfall in the Spanish Mediterranean area. *International Journal of Climatology*, 19(7), 765-785.
 - 30) Santos, J. A., Corte-Real, J., & Leite, S. M. (2005). Weather regimes and their connection to the winter rainfall in Portugal. *International Journal of Climatology*, 25(1), 33-50.
 - 31) Seibert, P., Frank, A., and Formayer, H. (2007) Synoptic and regional patterns of heavy precipitation in Austria. *Theoretical and Applied Climatology* 87, 139-153.
 - 32) They have, M. (2013). Identifying changes in altitude, altitude and sea level pressure of dominant atmospheric circulation patterns affecting the climate of Iran. *Natural Geography Research*, 46(3), 374-349. [In Persian].
 - 33) Vicente-Serrano, S., & López-Moreno, J. I. (2006). The influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a Semi-Arid

- Climatic Gradient in Northeast Spain. *International Journal of Climatology*, 26, 1-12
- 34) WMO. (2019). WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018. *World Meteorological Organization, 2019 WMO- No. 1233, P.6.*
- 35) Yarnal, B. (1994). *Synoptic Climatology in Environmental Analysis: A Primer*. London: Belhaven Press.