

Original Research Article

Evaluation of the spatial structure of precipitation in relation to monthly droughts in Iran

Susan Heidari¹, Azar Beyranvand^{2*}

¹Department of Physical Geography, Faculty of Geography, Tehran University, Tehran, Iran

²Department of Physical Geography, Faculty of Geography, Tehran University, Tehran, Iran



10.22034/GRD.2025.22686.1645

Received:

January 20, 2025

Accepted:

May 19, 2025

Keywords:

Directional distribution,
Precipitation gravity, Linear
trend, Spatial modeling,
Routing

Abstract

The present study identifies the monthly precipitation gravity center and investigates the routing patterns of these centers in Iran and its relationship with drought events. In this study, ERA5 monthly precipitation data over a period of 84 years (1940 to 2023) were used. First, the spatial statistics of the dispersion and directional distribution of the precipitation gravity center were calculated, and then the movement path of the precipitation gravity center throughout the year was examined. The spatial changes in the precipitation gravity center in three time periods (the first period: 1940 to 1981, the second period: 1982 to 2023, and the third period: 1940 to 2023) were analyzed using a regression equation. Finally, the latitude and longitude of the precipitation gravity center were compared with the percentage of the drought using the RAI index. The findings show that the axis of precipitation distribution in Iran tends from northwest to southeast in all months of the year. The precipitation gravity center is located in the path of the major precipitation systems in Iran, and its movement in different time periods has had significant effects on the precipitation pattern in different months in Iran. The movement of the precipitation gravity center to the northwest in the second period (1982 to 2023) from December to March led to a significant decrease in precipitation and an increase in the percentage of drought in the eastern half of Iran. Also, the movement of the precipitation gravity center to the southeast in the months of November, April, and May during the same period led to an increase in precipitation and a decrease in drought. The results show that an increase in the latitude of the precipitation gravity center is associated with an increase in the percentage of drought, while a decrease in latitude is associated with a decrease in drought.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



* Corresponding Author: Azar Beyranvand

Address: Faculty of Geography, Tehran University

Email: beyranvandazar@ut.ac.ir

Extended Abstract

1. Introduction

In this study, an attempt is made to increase the accuracy of the spatial structure analysis of precipitation in Iran and to simulate the spatial distribution of precipitation comprehensively by using spatial statistical methods. In this regard, the spatial statistical characteristics of precipitation, especially its concentration and dispersion components in different parts of the country, are investigated. Also, the path of the precipitation gravity center changes is examined, and the trend of its changes in each month of the year in two 42-year periods (and its aggregation in an 84-year period) is analyzed. The main goal of these analyses is to investigate the relationship between the spatial changes in the precipitation gravity center and the percentage of drought in Iran. Considering the challenges arising from the vastness and geographical diversity of the country, this research is an effective step in improving the accuracy and validity of spatial precipitation analyses. It can also serve as a basis for developing analytical methods in future research. Accordingly, the research questions are as follows:

- a) Does the trajectory of precipitation intensity changes throughout the year in time intervals show specific patterns of spatial concentration and dispersion of precipitation in Iran?
- b) What is the relationship between the spatial changes in precipitation intensity and the percentage of drought in Iran?

2. Research Methodology

In this study, ERA5 precipitation grid data from the ECMWF database were used. These data have a spatial resolution of 0.25 degrees of arc and a monthly temporal resolution for the period from 1940 to 2023. To implement the research process, three steps were carried out based on the mentioned database. First, the concept of precipitation centroid was used to determine the spatial distribution of the precipitation gravity center of concentration. The directional distribution of the precipitation gravity center of concentration for each month was extracted using the GIS software. The directional distribution tool shows whether the distribution of the geographical features in space is directional or not. The RAI index was used to assess drought in different regions.

3. Results and discussion

The analysis of the spatial distribution map of monthly precipitation in Iran over the 84-year period (1940 to 2023) (Figure 2) shows the geographical and seasonal patterns of precipitation in the country. In winter (January to March), the precipitation gravity center is mainly concentrated in the western regions of the country and the Zagros mountainous region, and the precipitation pattern spreads from west to east. With the arrival of spring (April to June), the precipitation gravity center moves to the north and center of Iran. In June, it moves further south. In summer (July to September), precipitation is less and more scattered, and the precipitation gravity center remains in the northwestern regions of the Caspian Sea and the southern half. This phenomenon may indicate the dominance of high pressure in Iran and clearly shows its effects on the climate of the country during the mentioned period. In autumn (October to December), the precipitation gravity center returns to the northwest of Iran, and the precipitation pattern spreads from the northwest to the southeast. The map of changes in the precipitation gravity center in Iran in the three periods of 1940-1981, 1982-2023 and 1940-2023 shows significant shifts in the precipitation gravity center. The largest shift occurred in December in the period from 1940 to 1981 by 1.99 degrees to the northwest of the average.

4. Conclusion

This study investigated the spatial changes in the precipitation gravity center in Iran during the three time periods of 1940-1981, 1982-2023, and 1940-2023. The results show that, in recent decades, the precipitation gravity center has shifted to the northwest in the rainy months, especially December (a decrease of about two degrees in longitude and an increase of one degree in latitude) and January (a decrease of one degree in longitude and an increase of one and a half degrees in latitude). The increase in the extent of drought in January and March, which are usually considered the rainy months in Iran, could indicate a decrease in water resources and an increase in climate hazards in these periods. In contrast, the decrease in the extent of drought in November and April has provided opportunities for adjusting climate conditions and better utilization of water resources in these months.



مقاله پژوهشی

ارزیابی ساختار مکانی بارش در ارتباط با خشکسالی‌های ماهانه ایران

سوسن حیدری^۱، آذر بیرانوند^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۲ دانش‌آموخته دکتری آب و هواشناسی سینوپتیک، گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

doi 10.22034/GRD.2025.22686.1645

چکیده

با توجه به نقش تعیین‌کننده الگوهای مکانی بارش در الگوی فضایی خشکسالی‌ها، بررسی رفتار مکانی مرکز ثقل بارش و ارتباط آن با خشکسالی در ایران، یکی از خلأهای مهم پژوهشی در اقلیم‌شناسی کشور است. در این راستا، از داده‌های بازتحلیل بارش ماهانه ERA5 متعلق به مرکز ECMWF برای دوره ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۳ (به مدت ۸۴ سال) استفاده شد. ابتدا آمار فضایی پراکندگی و توزیع جهت‌دار مرکز ثقل بارش محاسبه گردید و سپس مسیر حرکتی آن در طول سال موردبررسی قرار گرفت. تحلیل تغییرات مکانی مرکز ثقل بارش در سه دوره زمانی (۱۹۴۰-۱۹۸۱، ۱۹۸۲-۲۰۲۳ و کل دوره) با استفاده از مدل رگرسیونی انجام شد. در ادامه، موقعیت عرض و طول جغرافیایی مرکز ثقل بارش با درصد گستره خشکسالی (بر اساس شاخص RAI) مقایسه شد. نتایج نشان دادند که محور توزیع بارش در ایران در تمامی ماه‌های سال گرایشی شمال‌غرب به جنوب‌شرق دارد. مرکز ثقل بارش در امتداد مسیر سامانه‌های عمده بارشی کشور قرارگرفته و جابجایی آن در دوره‌های مختلف، الگوی بارش ماهانه را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار داده است. این مرکز در بیش از ۷۰٪ ماه‌ها، به‌ویژه ماه‌های کلیدی بارشی، تغییر مکان معناداری داشته که با گسترش مناطق دارای خشکسالی هم‌راستا است. در دوره (۱۹۸۲-۲۰۲۳)، جابجایی مرکز ثقل بارش طی ماه‌های دسامبر تا مارس به‌طور میانگین ۱٫۵ درجه به سمت عرض‌های بالاتر صورت گرفته که با افزایش میانگین ۲۲ درصدی گستره خشکسالی همراه بوده است. در مقابل، جابجایی ۱٫۲ درجه‌ای به سمت جنوب‌شرق در ماه‌های نوامبر، آوریل و مه، با کاهش میانگین ۱۸ درصدی خشکسالی همبستگی داشته است.

تاریخ دریافت:

۰۱ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

توزیع جهت‌دار،

ثقل بارش،

روند خطی،

مدل‌سازی مکانی،

مسیریابی،

۱ مقدمه

تحلیل تغییرات بارش به‌عنوان یکی از جنبه‌های قابل‌توجه اقلیم، با چالش‌هایی پیچیده مواجه است. بارش که یکی از کلیدی‌ترین مؤلفه‌های چرخه آب و اقلیم است، تحت تأثیر تغییرات زمانی و مکانی قرار دارد. این تغییرات ناشی از تعاملات پیچیده عوامل اقلیمی و جوی است که باعث ایجاد الگوهای غیرثابت و نامتقارن در توزیع بارش می‌شود (بابائی فین و فرج‌زاده، ۱۳۸۱). همچنین، بارش به‌عنوان مهم‌ترین عامل در شکل‌دهی وضعیت آب‌وهوا و تغییرات در سیستم‌های زمین، خاک و جو شناخته می‌شود (زانگ و همکاران، ۲۰۱۹). درعین‌حال، بارش نتیجه فرآیندهای پیچیده جوی است که درک آن‌ها دشوار است (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۷) و خود به‌عنوان عامل محرک بسیاری از فرآیندهای دیگر نیز به شمار می‌آید.

* نویسنده مسئول: آذر بیرانوند

Email: beyranvandazar@ut.ac.ir

آدرس: گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

به همین دلیل، تغییرپذیری مکانی-زمانی بارش، محور اصلی بسیاری از پژوهش‌های علمی بوده است (دی لیما، ۲۰۰۹). به عبارتی تغییرات مکانی و زمانی بارش این متغیر را به یک مسئله علمی پیچیده و فراتر از توصیف‌های ساده تبدیل می‌کند. طبیعت چندوجهی و پویای بارش، سبب شده است تحلیل رفتار فضایی بارش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردد، زیرا این تحلیل قادر است الگوها و تغییرات پیچیده بارش را در ابعاد زمانی و مکانی به‌طور کامل و شفاف نشان دهد. این فرآیند نه‌تنها درک بهتری از تغییرات آینده بارش فراهم می‌آورد، بلکه به اتخاذ تدابیر بهینه برای مقابله با چالش‌های تغییرات اقلیمی کمک می‌کند. از این رو، تحلیل فضایی بارش به‌عنوان ابزاری اساسی، درک عمیق‌تری از ساختارها و رفتارهای این متغیر اقلیمی فراهم می‌آورد. درواقع این فرآیند به‌منظور درک دقیق‌تر از رفتار پدیده بارش و تحلیل الگوها و تغییرات زمانی و مکانی آن انجام می‌شود (عساکره و سیفی‌پور، ۱۳۹۲). با بهره‌گیری از این برآوردها، امکان مدل‌سازی و تحلیل تحولات پیچیده و چندبعدی بارش با دقت بیشتر فراهم می‌شود. اطلاعات به‌دست‌آمده از این تحلیل‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری و پیش‌بینی‌های مرتبط با شرایط آب و هوایی و تغییرات اقلیمی نقشی حیاتی ایفا می‌کند.

با توجه به اهمیت تحلیل مکانی بارش در فهم بهتر رفتار این پدیده و پیچیدگی‌های آن، پژوهش‌های متعدد در سطح جهانی به بررسی این مقوله پرداخته‌اند (مارشال، ۱۹۵۳؛ گلازیرین، ۱۹۹۷؛ سن و حبیب، ۲۰۰۰؛ آندرس و همکاران، ۲۰۰۶؛ زانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ زانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در ایران نیز به دلیل تنوع بالای اقلیمی، تحلیل فضایی بارش به‌عنوان یک چالش کلیدی و موضوعی وسیع در حوزه اقلیم‌شناسی توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرده است. این اهمیت به‌ویژه در دهه‌های اخیر به دلیل تأثیرات بارش در مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی در نقاط مختلف ایران بیشتر موردتوجه قرار گرفته است. پژوهش‌های متعددی در این زمینه در ایران انجام شده است (بابایی فینی و فرج‌زاده، ۱۳۸۱؛ عساکره، ۱۳۸۳؛ عساکره، ۱۳۸۶؛ رحیمی بندرآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۶؛ عساکره و سیفی‌پور، ۱۳۹۲؛ علیجانی و همکاران، ۲۰۰۸؛ جاوری و همکاران، ۲۰۱۶؛ فلاح قاهره و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیقات صورت گرفته عمدتاً بر بررسی تغییرات زمانی (غیور و مسعودیان، ۱۳۷۵؛ محمدی و جاوری، ۱۳۸۵؛ مفاخری و همکاران، ۱۳۹۶)، مکانی (مسعودیان، ۱۳۷۷؛ عساکره، ۱۳۸۶؛ روحبخش سیگارودی و همکاران، ۱۳۸۹؛ عساکره و سیفی‌پور، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ شامحمدی و همکاران، ۱۴۰۳) و رفتارهای بارش، شامل تغییر در شدت، فراوانی و توالی رخدادهای بارش (مسعودیان، ۱۳۸۲؛ مسعودیان، ۱۳۸۸؛ ربیعی‌غفار و همکاران، ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳) متمرکز بوده است. باوجود پیشرفت‌های گسترده در تحلیل‌های مکانی و زمانی بارش و حجم قابل‌توجه پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تغییرات رفتاری، مکانی و زمانی این پدیده، برخی از جنبه‌های بنیادین آن همچنان مورد غفلت واقع شده‌اند. به‌طور خاص، مفهوم 'ثقل بارش' یا 'مرکز وزنی بارش'، به‌عنوان شاخصی کلیدی برای شناسایی و تحلیل مسیر تغییرات بارش در طول سال و ارتباط آن با گستره خشکسالی، تاکنون نه‌تنها به‌صورت جامع موردبررسی قرار نگرفته است، بلکه ابعاد تحلیلی آن نیز به‌طور دقیق تبیین نشده‌اند. این خلأ پژوهشی نشان‌دهنده نیازی اساسی به مطالعاتی نوین و هدفمند است که بتواند ابعاد ناشناخته این موضوع را روشن کرده و درک عمیق‌تری از الگوهای بارش ایران و پیامدهای اقلیمی آن ارائه دهد.

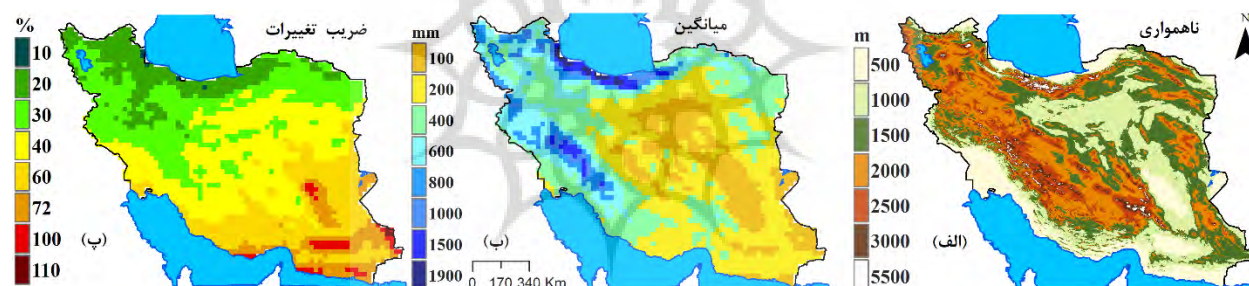
در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با به‌کارگیری روش‌های آمار فضایی، دقت تحلیل ساختار مکانی بارش در ایران افزایش یابد و توزیع مکانی بارش به‌صورت جامع شبیه‌سازی شود. در این راستا، ویژگی‌های آماری فضایی بارش، به‌ویژه مؤلفه‌های تمرکز و پراکندگی آن در نقاط مختلف کشور، موردبررسی قرار گرفته است. همچنین مسیر تغییرات ثقل بارش بررسی و روند تغییرات آن در هر ماه از سال در دو بازه‌ی ۴۲ ساله (و تجمیع آن در بازه‌ی ۸۴ ساله) تحلیل شده است. هدف اصلی از این تحلیل‌ها، بررسی ارتباط میان تغییرات مکانی ثقل بارش و درصد گستره خشکسالی در ایران بوده است. با توجه به چالش‌های ناشی از وسعت و تنوع جغرافیایی کشور، این پژوهش گامی مؤثر در ارتقاء دقت و اعتبار تحلیل‌های مکانی بارش به شمار می‌آید و می‌تواند به‌عنوان مبنایی

برای توسعه روش‌های تحلیلی در تحقیقات آینده عمل کند. بر این اساس، سؤالات پژوهش به شرح زیر مطرح می‌شوند: ۱. آیا مسیر تغییرات ثقل بارش در طول سال در بازه‌های زمانی، الگوهای مشخصی از تمرکز و پراکندگی مکانی بارش در ایران نشان می‌دهد؟ ۲. چه رابطه‌ای میان تغییرات مکانی ثقل بارش و درصد گستره خشکسالی در ایران وجود دارد؟

۲ منطقه مورد مطالعه

تقریباً دوسوم از مساحت کل کشور ایران در نواحی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد (علیزاده، ۲۰۱۰). جهت‌گیری کوه‌های اصلی ایران، از جمله البرز در شمال و زاگرس در غرب و جنوب، هم‌جواری با بیابان‌های گرم و خشک و فاصله زیاد از اقیانوس‌ها، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تنوع اقلیمی ایران هستند. الگوی بارش در ایران به دلیل نوسانات شدید و دوره‌های کوتاه بارش، ویژگی خاصی دارد (بابایی فینی و فرج‌زاده، ۱۳۸۱). موقعیت جغرافیایی ایران در عرض‌های خشک و نیمه‌خشک، همراه با تأثیر پرفشار جنب‌حاره‌ای و کمبود بارش، تضادهای چشمگیری را در رژیم بارش سالانه کشور ایجاد کرده است.

این شرایط اقلیمی، تحت تأثیر عوامل داخلی نظیر طول و عرض جغرافیایی، ویژگی‌های توپوگرافیک (شکل ۱ الف)) و فاصله از منابع رطوبتی و همچنین عوامل خارجی مانند توزیع سیستم‌های گردش جهانی قرار دارد (عساکره و همکاران، ۱۴۰۰). علاوه بر این، ضریب تغییرات بارش سالانه در ایران که در شکل ۱ (پ) نمایش داده شده است، شدت تغییرات بارش را نشان می‌دهد. ضریب تغییرات بارش می‌تواند الگوی نسبی تغییرپذیری بارش در کشور را تبیین کند (عساکره و رزمی قلندری، ۱۳۹۳).



شکل ۱. الف) ناهمواری (Dem SRTM)، ب) میانگین و پ) ضریب تغییرات بارش (داده‌های ERA5 (۱۹۴۰-۲۰۲۳)) منطقه مورد پژوهش.

۳ داده‌های و روش‌های پژوهش

در این پژوهش برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش و ارتباط آن با گسترش خشکسالی‌ها، از رویکردهای ترکیبی آماری و فضایی استفاده شد. فقدان داده‌های اقلیمی کافی، چه از نظر مکانی (ایستگاه‌ها) و چه از نظر زمانی (مشاهدات ناقص یا عدم دسترسی به آمار بلندمدت)، ارائه اطلاعات دقیق اقلیمی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است (عساکره و رزمی، ۱۳۹۰). به همین دلیل، در این پژوهش از داده‌های شبکه‌ای بارش ERA5 از پایگاه ECMWF استفاده شده است. این داده‌ها دارای تفکیک مکانی ۲۵/۰ درجه قوسی و تفکیک زمانی ماهانه، برای بازه زمانی ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۳ (۸۴ سال) هستند. دقت زمانی و مکانی این داده‌ها برای ایران در پژوهش‌های متعددی ارزیابی و تأیید شده است (نوری و همکاران، ۱۴۰۳؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳؛ بهرامی و دارند، ۱۴۰۳؛ کمالی و ترابی‌آزاد، ۱۴۰۳). داده‌های بارش با فرمت NetCDF-4 از وبسایت رسمی ECMWF

(www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5) دریافت و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB استخراج شدند. در نهایت، پایگاه داده بارش ماهانه (۱۰۰۸ ماه) شامل ۲۴۹۰ یاخته در سطح ایران ایجاد گردید.

برای اجرای فرآیند پژوهش، سه مرحله بر اساس پایگاه داده یادشده در بالا انجام گرفت که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود:

۱. ابتدا برای تعیین پراکنش مکانی مرکز ثقل بارش (Center of Concentration)، از مفهوم گرانیگاه بارش استفاده شده است (رابطه ۱). استفاده از مرکز ثقل بارش روشی مناسب برای تحلیل ساختار فضایی و مسیر جابجایی سیستم‌های بارشی است.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

در این رابطه مختصات طولی و عرض مرکز بارش (x_c, y_c) است. به‌طور کلی W مرکز میانگین وزنی (Weighted Mean Center) برای هر ماه تعریف می‌شود و نمایانگر نقطه تمرکز بارش کشور در هر بازه زمانی است. علت انتخاب این شاخص آن است که برخلاف میانگین‌های مکانی یا همبستگی‌ها، مرکز ثقل توانایی شناسایی جابه‌جایی فضایی هسته‌های بارش را دارد و از نظر مکانی قابل تفسیر است. این روش در تحلیل‌های فضایی اقلیم‌پایه از اعتبار بالایی برخوردار است (علیچانی و همکاران، ۲۰۰۸).

در مواقعی که نقاط یا موقعیت‌ها ارزش‌های مختلفی نسبت به مرکز میانگین داشته باشند، در تحلیل ماهانه داده‌های بارش، احتمال وقوع دو یا سه پهنه‌ی بارشی با ثقل‌های مختلف وجود دارد که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده نوسانات طبیعی و تغییرات در الگوی بارش منطقه باشد که به‌ویژه در مواقعی کاربرد دارد که نقاط یا موقعیت‌ها دارای ارزش‌های متفاوتی نسبت به مرکز میانگین باشند. در تحلیل داده‌های بارش به‌صورت ماهانه، امکان وقوع دو یا حتی سه مرکز ثقل خشکسالی وجود دارد. این وضعیت می‌تواند بازتاب‌دهنده نوسانات طبیعی یا تغییرات در الگوی بارش منطقه‌ای باشد و اطلاعات مفیدی درباره پراکنش مکانی بارش فراهم کند.

توزیع جهت‌دار (Directional Distribution) مرکز ثقل بارش برای هر ماه با استفاده از نرم‌افزار GIS استخراج گردید. ابزار توزیع جهت‌دار نشان می‌دهد که آیا توزیع عوارض جغرافیایی در فضا به‌صورت جهت‌دار صورت گرفته‌اند یا خیر (فلاح قاهره و کدخدا، ۱۳۹۶).

سپس برای بررسی روند تغییرات مرکز ثقل بارش در طول زمان، از روش رگرسیون خطی ساده استفاده شد. استفاده مدل رگرسیونی نیز به‌منظور ارزیابی دقیق تغییرات مکانی و روندهای زمانی مختصات مرکز ثقل (عرض و طول جغرافیایی) در توزیع بارش صورت گرفت. رگرسیون خطی یکی از روش‌های پارامتری برای ارزیابی معنی‌داری روند است که رابطه بین یک متغیر مستقل و یک متغیر وابسته را تحلیل می‌کند. به‌عبارت دیگر، این روش به ما کمک می‌کند تا مشخص کنیم آیا تغییرات متغیر مستقل بر متغیر وابسته تأثیر دارد و در صورت وجود تأثیر، میزان آن چقدر است. اگر سری زمانی Y_t برای $t = 1, 2, \dots, n$ نظاً گرفته شود، متغیر مستقل زمان است و هدف این است که تعیین کنیم آیا تغییرات زمانی باعث تغییر در پارامتر موردنظر می‌شود یا خیر (عساکره و همکاران، ۱۴۰۰). به‌طور دقیق، معادله رگرسیون به‌صورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۲):

$$Y_t = a_0 + a_1 t \quad (2)$$

برای این معادله، فرضیه‌های زیر آزمون می‌شوند:

$$\begin{cases} H_0: a_1 = 0 \\ H_1: a_1 \neq 0 \end{cases}$$

اگر فرضیه صفر در سطح اطمینان $1-\alpha$ رد شود، نتیجه گرفته می‌شود که روند معنی‌دار است. معادله رگرسیون خطی ساده بر اساس روش حداقل مربعات خطا به صورت زیر تعریف می‌شود (عساکره، ۱۳۹۰):

$$p = a + bt + et \quad (3)$$

در این رابطه t زمان، a عرض از مبدأ b شیب خط (تغییر به ازای واحد زمان) و et خطای تصادفی مدل رگرسیونی است. شیب خط و نوع رابطه را نشان می‌دهد و درواقع میزان تغییر به ازای گذر زمان (t) را برآورد می‌نماید.

لازم به ذکر است که روند مرکز ثقل در سه دوره ۱۹۴۰-۱۹۸۱، ۱۹۸۲-۲۰۲۳ و ۱۹۴۰-۲۰۲۳ (دو ۴۲ ساله و یک ۸۴ ساله) انجام شد. این تقسیم‌بندی به منظور تحلیل تفاوت‌های زمانی در بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت انجام شده است، به طوری که بازه‌های کوتاه‌مدت امکان شناسایی تغییرات مقطعی و روندهای سریع را فراهم می‌کنند، درحالی که بازه بلندمدت به شناسایی روندهای پایدارتر و بلندمدت در مرکز ثقل کمک می‌کند. این روش تحلیلی همچنین امکان مقایسه تأثیر تغییرات اقلیمی و انسانی در مقیاس‌های مختلف زمانی را فراهم می‌سازد.

۲. برای ارزیابی خشکسالی در مناطق مختلف، شاخص‌های متعددی ارائه شده است. انتخاب شاخص مناسب برای شرایط جغرافیایی و اقلیمی خاص، از مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه به شمار می‌رود. در ایران، پژوهشگران شاخص‌هایی مانند SPI (خلیقی سیگارودی، ۱۳۸۸؛ خوشخو، ۱۴۰۱)، SPEI (مصطفی‌زاده و ذبیحی، ۱۳۹۵) و RAI (حجازی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۲) را به عنوان ابزارهای کارآمد برای تحلیل خشکسالی معرفی کرده‌اند. در این مطالعه، برای پایش خشکسالی‌های ماهانه، از شاخص ناهنجاری بارش (RAI) بهره گرفته شده است. این شاخص به دلیل سادگی، عملکرد مناسب در مناطق خشک و قابلیت مقایسه با داده‌های بلندمدت انتخاب شد (وَن روی، ۱۹۶۵) که با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود (وَن روی، ۱۹۶۵).

$$RAI = 3 \left[\frac{p_i - \bar{p}}{\bar{m} - \bar{p}} \right] \quad (4)$$

$$RAI = -3 \left[\frac{p_i - \bar{p}}{\bar{x} - \bar{p}} \right] \quad (5)$$

که در آن، p_i بارش موردنظر، $\bar{p}$: میانگین بارش، $\bar{m}$: میانگین ده مورد از بیشترین مقادیر بارش رخ داده در دوره آماری، $\bar{x}$: میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارش رخ داده در دوره آماری است. طبقه‌بندی شدت خشکسالی این شاخص شامل: شدت بسیار شدید (< -3)، شدید (-2.1 - -3)، متوسط (-1.2 - -2.1)، ضعیف (-0.3 - -1.2) و عدم خشکسالی (> -0.3) است.

سپس گستره خشکسالی ماهانه برای دوره آماری ۱۹۴۰ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد. درصد مساحت تحت تأثیر خشکسالی با استفاده از رابطه زیر تعیین گردید.

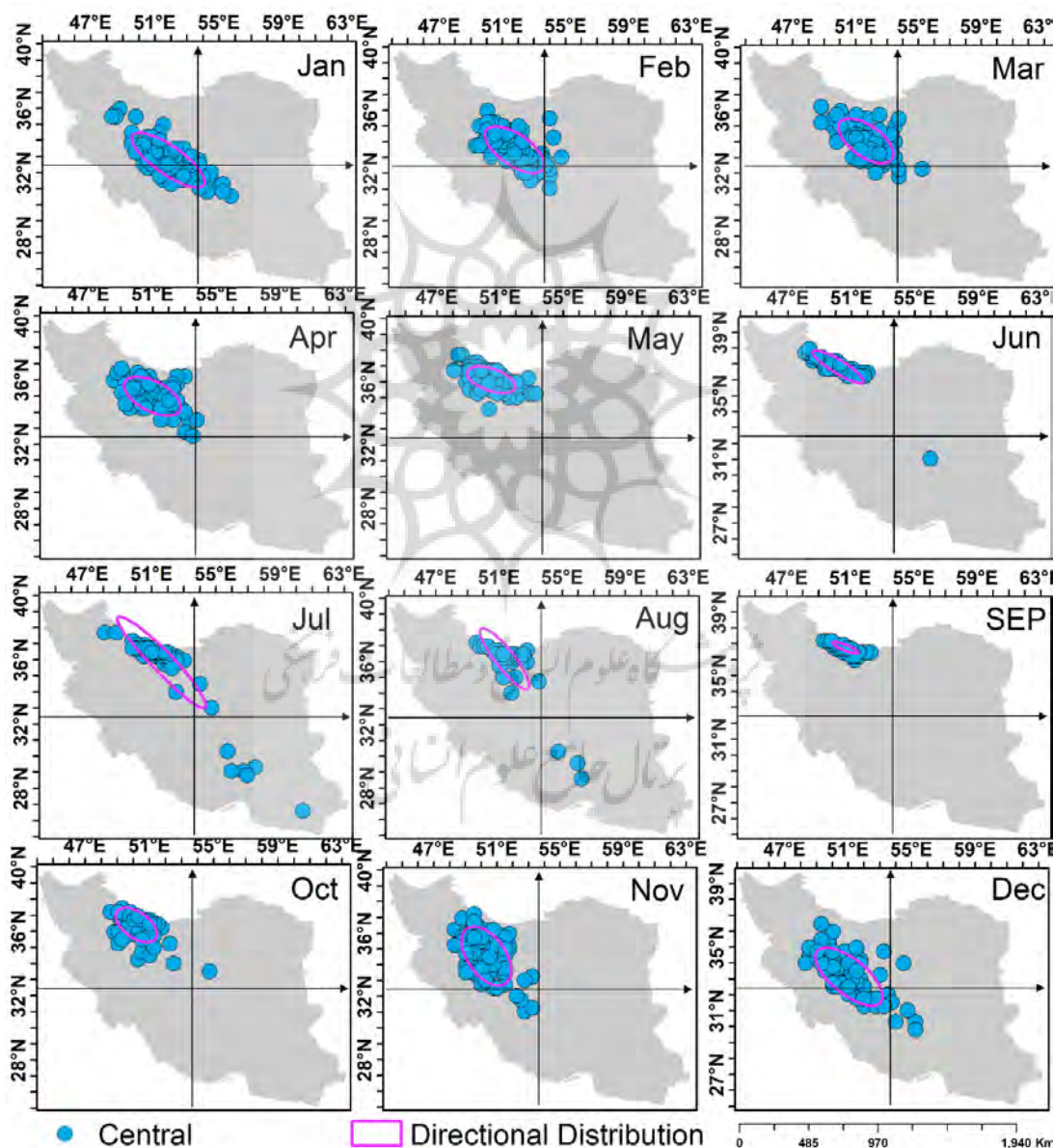
$$PDA = \frac{\sum_{i=1}^n g_n}{n} \times 100 \quad (6)$$

که در آن: PDA درصد گستره خشکسالی، g_n تعداد گره‌های تحت شرایط خشکسالی، n کل گره‌های واقع در محدوده ایران است.

استفاده از مفهوم مرکز ثقل بارش در سطح ماهانه و تحلیل ترکیبی آن با خشکسالی‌های فراگیر، پیش‌ازاین در مطالعات داخلی ایران به کار نرفته است.

۴ نتایج و بحث

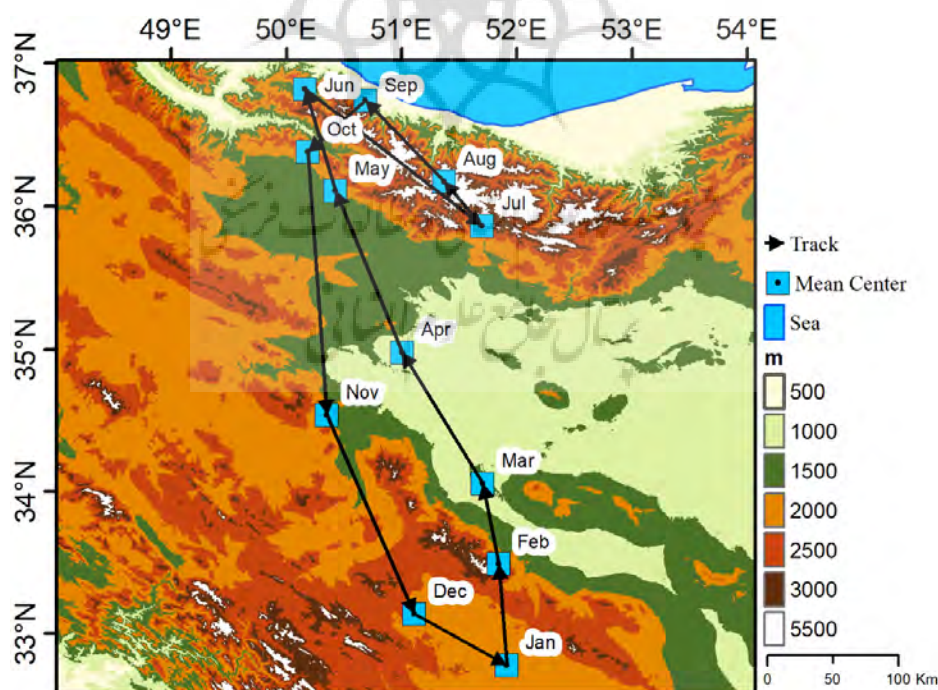
تحلیل نقشه موقعیت مکانی ثقل بارش ماهانه ایران در بازه زمانی ۸۴ ساله (۱۹۴۰ تا ۲۰۲۳) (شکل ۲) نشان‌دهنده الگوهای جغرافیایی و فصلی بارش در کشور است. در فصل زمستان (ژانویه تا مارس)، مرکز ثقل بارش عمدتاً در نواحی غربی کشور و موقعیت کوهستانی زاگرس متمرکز است و الگوی بارش از غرب به شرق گسترش می‌یابد. با ورود به بهار (آوریل تا ژوئن)، مرکز ثقل بارش به سمت شمال و مرکز ایران منتقل می‌شود و در ماه ژوئن به سمت جنوب‌تر حرکت می‌کند. در تابستان (ژوئیه تا سپتامبر)، بارش‌ها کمتر و پراکنده‌تر بوده و مرکز ثقل بارش در نواحی شمال غربی دریای خزر و نیمه جنوبی باقی می‌ماند. این پدیده ممکن است نمایانگر حاکمیت پرفشار جنب‌حاره در ایران باشد و تأثیرات آن بر اقلیم ایران در این بازه زمانی را به‌وضوح نمایش دهد. در پاییز (اکتبر تا دسامبر)، مرکز ثقل بارش دوباره به سمت شمال غربی ایران



شکل ۲. پراکنش ماهانه ثقل بارش ایران ۸۴ ساله و بیضی استاندارد در بازه زمانی (۱۹۴۰ تا ۲۰۲۳).

بازمی‌گردد و الگوی بارش از شمال غرب به جنوب شرق گسترش می‌یابد. به‌طور کلی، مرکز ثقل بارش بیشتر در نواحی شمال غربی و مرکزی ایران قرار دارد و الگوی بارش در اکثر ماه‌ها از غرب به شرق است که نشان‌دهنده ورود سامانه‌های بارشی از غرب ایران است. تغییرات فصلی و جهت‌گیری بارش‌ها نشان‌دهنده تأثیر سامانه‌های بارشی و الگوهای اقلیمی بر توزیع بارش در ایران است. بررسی تغییرات مراکز ثقل ماهانه بارش در سطح کشور می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی، مدیریت منابع آب و پیش‌بینی‌های اقلیمی مفید باشد.

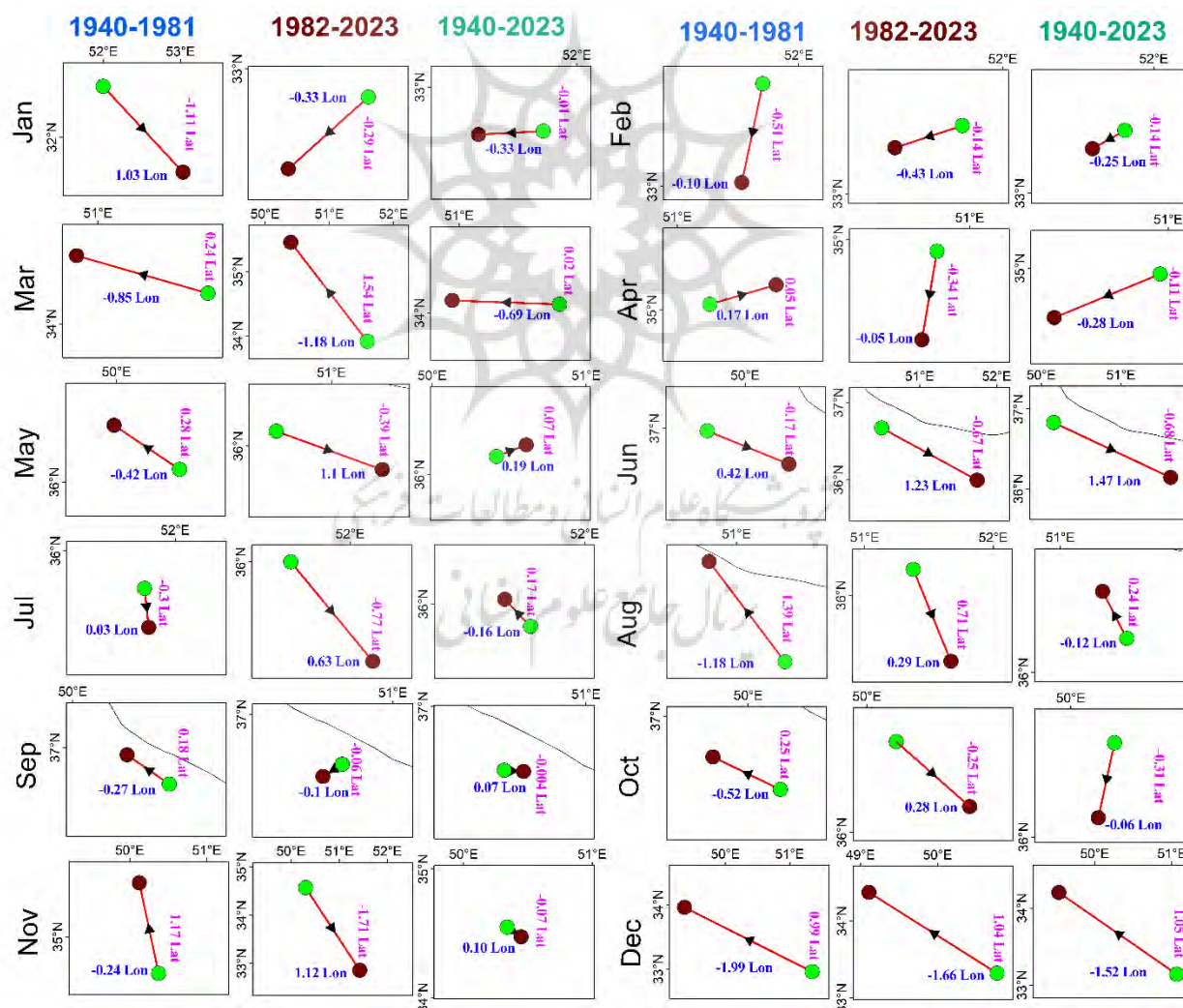
تحلیل نقشه مسیر میانگین ثقل بارش ماهانه ایران در بازه زمانی ۸۴ ساله (۱۹۴۰ تا ۲۰۲۳) نشان‌دهنده تغییرات فصلی و مکانی بارش در طول سال است. این نقشه موقعیت جغرافیایی ثقل بارش برای هر ماه سال را با نقاط آبی مشخص کرده و مسیر حرکت ثقل بارش را با خطوط سیاه نشان می‌دهد (شکل ۳). در ماه ژانویه، ثقل بارش در حدود 33°N و 50°E قرار دارد. در ماه‌های فوریه و مارس، ثقل بارش به سمت شمال و شرق حرکت کرده و به موقعیت حدود 34°N و 51°E می‌رسد. در ماه آوریل، ثقل بارش به سمت شمال غرب حرکت کرده و در حدود 35°N و 50°E قرار می‌گیرد. در ماه می، این ثقل به سمت شمال و غرب جابه‌جا شده و به حدود 36°N و 50°E می‌رسد. در ماه‌های تابستانی ژوئن تا سپتامبر، ثقل بارش عمدتاً در نواحی شمالی ایران و نزدیک به 37°N و 50°E قرار دارد. در ماه ژوئن، ثقل بارش به حدود 37°N و 50°E جابه‌جا می‌شود و تا ماه سپتامبر در همین نواحی باقی می‌ماند. در ماه اکتبر، ثقل بارش به سمت جنوب غرب و به حدود 36°N و 50°E حرکت می‌کند. در ماه نوامبر، ثقل بارش به سمت جنوب و غرب جابه‌جا شده و به حدود 35°N و 50°E می‌رسد. در نهایت، در ماه دسامبر، ثقل بارش به سمت جنوب و شرق حرکت کرده و به موقعیت اولیه در حدود 33°N و 50°E باز می‌گردد. این تغییرات مکانی نشان‌دهنده تأثیر الگوهای جوی و سیستم‌های بارشی متفاوت در طول سال است. در کل، ثقل بارش در ایران دارای یک الگوی فصلی مشخص است که از جنوب غربی در زمستان به شمال و شمال شرق در بهار و تابستان و سپس بازگشت به جنوب غربی در پاییز حرکت می‌کند.



شکل ۳. مسیر موقعیت مکانی بارش ماهانه ۸۴ ساله ایران (۱۹۴۰-۲۰۲۳)

نقشه تغییرات مرکز ثقل بارش ماهانه ایران در سه دوره ۱۹۴۰-۱۹۸۱، ۱۹۸۲-۲۰۲۳ و ۱۹۴۰-۲۰۲۳ نشان‌دهنده جابجایی‌های قابل‌توجهی در مرکز ثقل بارش است (شکل ۴). بیشترین جابجایی در ماه دسامبر در دوره ۱۹۴۰-۱۹۸۱ به میزان ۱٫۹۹ درجه به سمت شمال‌غرب میانگین رخ داده است. همچنین در دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۳، بیشترین جابجایی نیز در ماه دسامبر به میزان ۱٫۶۶ درجه به سمت شمال‌غرب میانگین مشاهده می‌شود. در دوره ۱۹۴۰-۲۰۲۳، بیشترین تغییرات در ماه ژوئن به میزان ۱٫۴۷ درجه به سمت شمال‌شرق رخ داده است. کمترین جابجایی در دوره ۱۹۴۰-۱۹۸۱ در ماه ژانویه به میزان ۰٫۳۳ درجه به سمت شمال‌غرب مشاهده می‌شود. در دوره ۱۹۴۰-۲۰۲۳، کمترین تغییرات در ماه سپتامبر به میزان ۰٫۰۷ درجه به سمت شمال‌شرق رخ داده است.

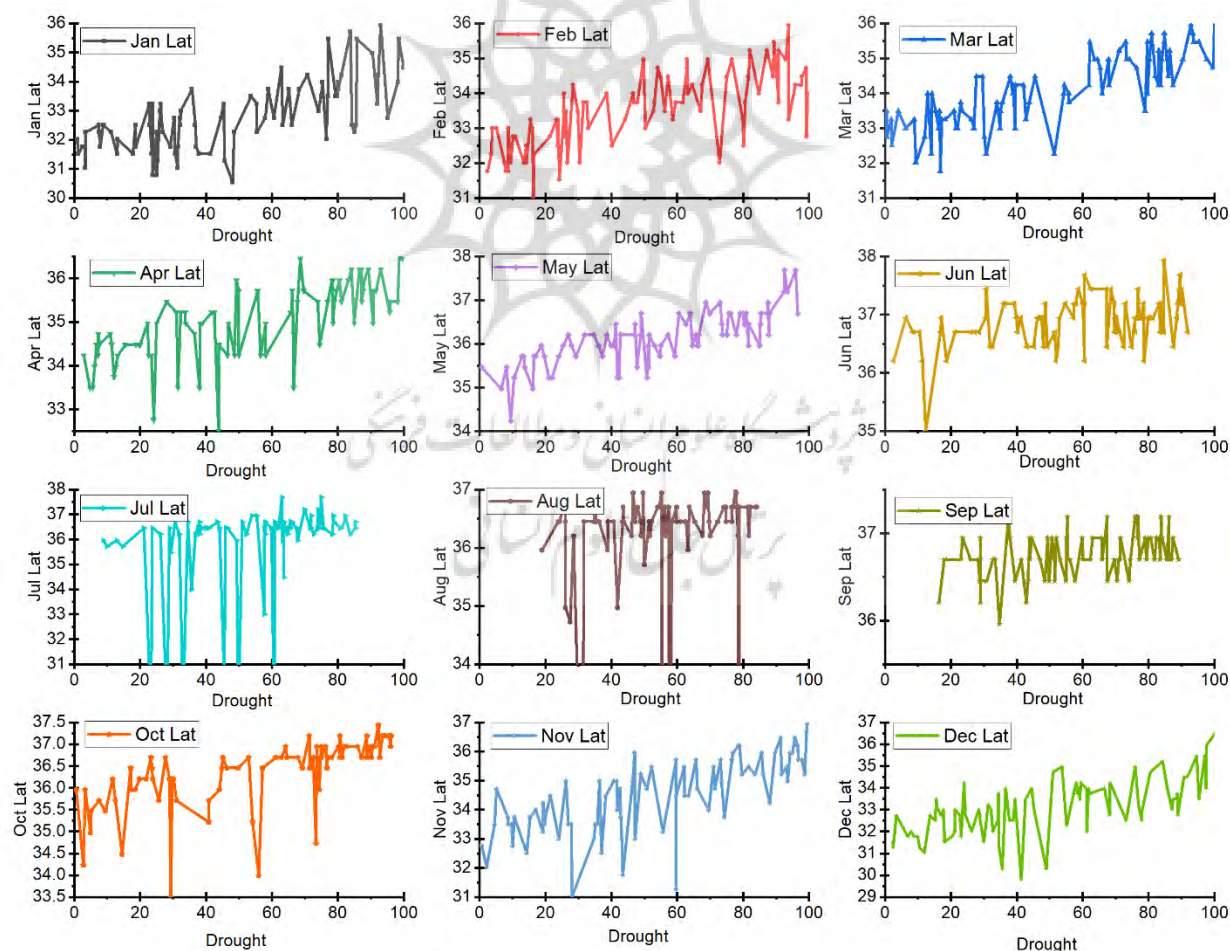
جابجایی به سمت شمال‌غرب و غرب در ماه‌های دسامبر، ژانویه و نوامبر در دوره‌های مختلف به‌نوعی نشان‌دهنده تغییر رژیم بارش کشور و تمرکز آن در عرض‌های بالاتر است، درحالی‌که جابجایی به سمت شمال‌شرق و شرق در ماه‌های ژوئن و آگوست بیانگر توزیع بیشتر بارش در سراسر ایران است. به‌طورکلی، افزایش جابجایی در دوره دوم (۱۹۸۲-۲۰۲۳) ممکن است به دلیل تغییرات اقلیمی شدیدتر یا نوسانات آب و هوایی باشد که نیاز به توجه ویژه و بررسی بیشتر دارد.



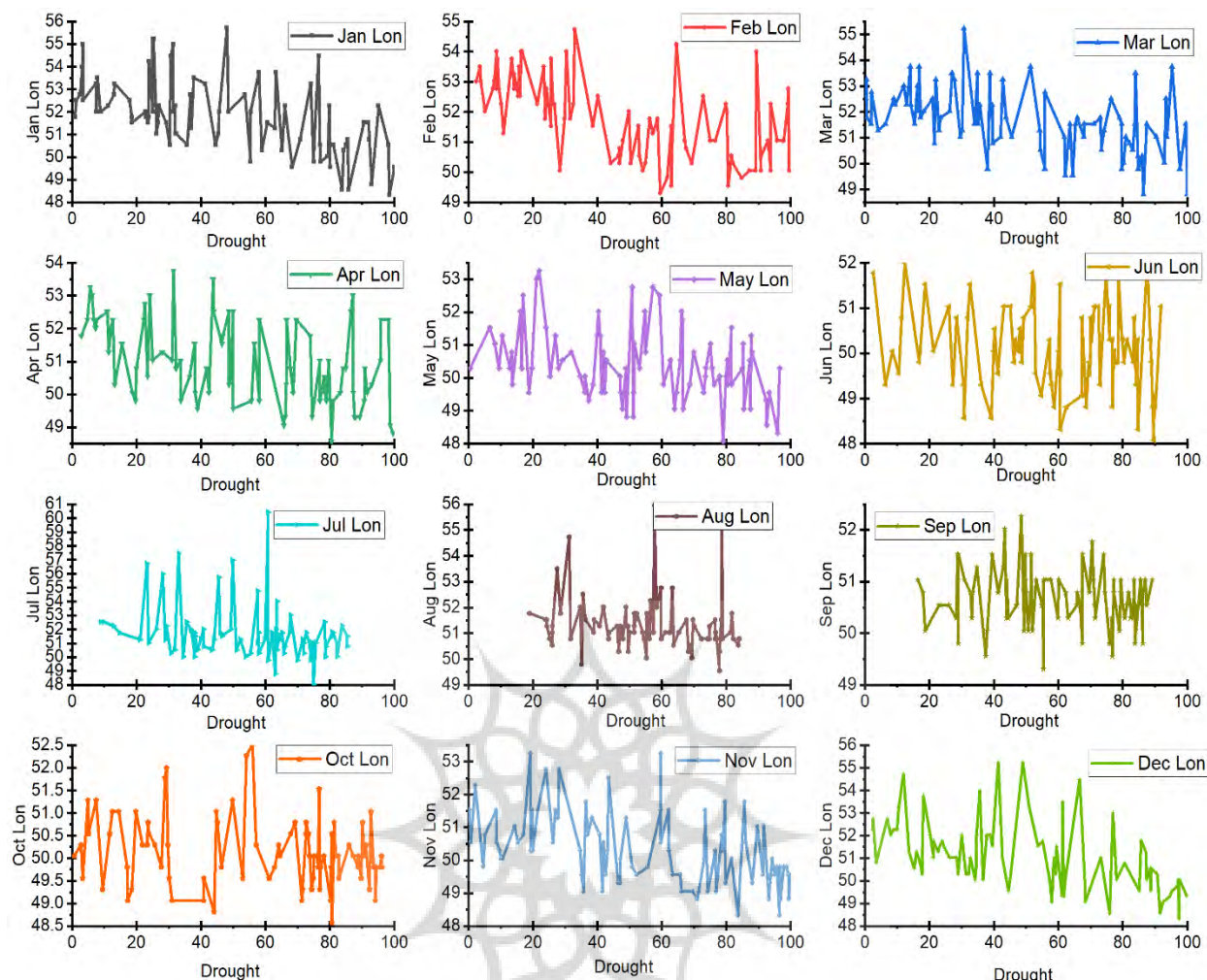
شکل ۴. تغییرات مرکز ثقل بارش ماهانه ایران در سه دوره ۱۹۴۰-۱۹۸۱، ۱۹۸۲-۲۰۲۳ و ۱۹۴۰-۲۰۲۳

شکل‌های ۵ و ۶ ارتباط میان موقعیت عرض و طول جغرافیایی مرکز ثقل بارش ماهانه در ایران و درصد گستره خشکسالی را به نمایش می‌گذارند. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عرض جغرافیایی مرکز ثقل بارش، درصد گستره خشکسالی نیز افزایش می‌یابد، درحالی‌که با کاهش عرض جغرافیایی مرکز ثقل بارش، درصد گستره خشکسالی کاهش می‌یابد. این بدین معناست که زمانی که مرکز ثقل بارش در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر قرار دارد، توزیع بارش بهبود یافته و احتمال کاهش گستره خشکسالی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش طول جغرافیایی، درصد گستره خشکسالی کاهش یافته و با کاهش طول جغرافیایی، درصد گستره خشکسالی افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه موقعیت مکانی عرض و طول جغرافیایی بر خشکسالی در ایران است. با این حال، ماه‌های جولای و آگوست به دلیل توزیع ناپایدار بارش‌ها و وجود دو هسته بارش، الگوهای متفاوتی نشان می‌دهند. در این ماه‌ها، بارش‌ها در شمال کشور و جنوب‌شرقی متمرکز هستند و کمبود نواحی بارشی بین این دو هسته مشاهده می‌شود.

یافته‌ها نشان می‌دهند که مرکز ثقل بارش در ایران طی دوره موردبررسی جابه‌جایی قابل‌توجهی در هر دو بعد طولی و عرضی داشته است. به‌ویژه در بازه ۱۹۸۲-۲۰۲۳، شاهد تغییرات چشمگیرتری در موقعیت مرکز بارش هستیم که می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی منطقه‌ای باشد. این جابه‌جایی‌ها در ماه‌هایی مانند ژانویه و مارس (که از ماه‌های کلیدی بارشی کشور هستند) هم‌زمان با افزایش شدید گستره خشکسالی بوده و نشان‌دهنده یک بازآرایی اقلیمی بنیادین است.



شکل ۵. ارتباط بین موقعیت عرض جغرافیایی ثقل بارش ماهانه و درصد گستره خشکسالی ماهانه ایران (۱۹۴۰-۲۰۲۳)



شکل ۶. ارتباط بین موقعیت طول جغرافیایی ثقل بارش ماهانه و درصد گستره خشکسالی ماهانه ایران (۱۹۴۰-۲۰۲۳)

درهم‌تنیدگی عناصر و عوامل اقلیمی منجر به پیچیدگی رفتار اقلیم می‌شود و تأثیرات گوناگونی که بر آن اعمال می‌گردند، تغییرات زمانی و مکانی متعددی در اقلیم ایجاد می‌کنند (امیری، ۱۳۸۶؛ بابایی فینی و همکاران، ۱۳۸۱). این پیچیدگی، نیازمند توجه ویژه به توصیف، تحلیل و مدل‌سازی مکانی اقلیم و عناصر آن، به‌ویژه بارش است. به همین دلیل، بررسی توزیع مکانی بارش به‌عنوان یک مسئله پیچیده و چالش‌برانگیز اهمیت بسیاری دارد.

یکی از مسائل کلیدی در این حوزه، پراکندگی مکانی بارش است. توزیع زمانی-مکانی بارش در ایران با ویژگی‌های خاص خود، نشان‌دهنده کمبود و درعین‌حال تنوع مکانی بارش است. این ویژگی‌ها عدم همگنی و تغییرات قابل‌توجهی را در توزیع بارش کشور آشکار می‌کنند. نکته مهم آن است که مرکز ثقل بارش ماهانه در ایران هرگز به‌طور کامل در حوضه‌های شمال‌شرق، شرق، یا مناطق تحت تأثیر سامانه‌های موسمی جنوب‌شرق کشور متمرکز نشده است.

این تغییرات و عدم همگنی در توزیع بارش ناشی از تأثیرات پیچیده اقلیمی بوده و نیازمند تحلیل دقیق فرایندهای اقلیمی خاص است. به‌طورکلی، محور توزیع بارش در ایران در تمام ماه‌های سال از شمال‌غرب به جنوب‌شرق متمایل است. این روند به آرایش مکانی ایران بازمی‌گردد. همان‌طور که مسعودیان (۱۳۹۰) نشان داد، رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز نقش تعیین‌کننده‌ای در آرایش مکانی بارش ایران دارند. به‌این‌ترتیب، بارش‌های

ماهانه ایران عمدتاً تابع عوامل مکانی مانند طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع هستند (عساکره و همکاران، ۱۳۹۳).

این مطالعه به بررسی تغییرات مکانی مرکز ثقل بارش در ایران طی سه دوره زمانی ۱۹۴۰-۱۹۸۱، ۱۹۸۲-۲۰۲۳ و ۱۹۴۰-۲۰۲۳ پرداخته است. نتایج این پژوهش با تأکید بر رابطه مستقیم میان الگوهای فضایی بارش و گستره خشکسالی، شواهد ارزشمندی برای شناخت بهتر چرخه آب ایران فراهم می‌آورد. نتایج نشان می‌دهند که در دهه‌های اخیر، جابه‌جایی مرکز ثقل بارش در ماه‌های پربارش، به‌ویژه دسامبر (حدود دو درجه کاهش در طول جغرافیایی و یک درجه افزایش در عرض جغرافیایی) و ژانویه (یک درجه کاهش در طول جغرافیایی و یک و نیم درجه افزایش در عرض جغرافیایی)، به سمت شمال‌غرب مشاهده شده است. مطالعات پیشین درباره روند بارش در ایران کاهش بارش در ماه‌های دسامبر، ژانویه و مارس و افزایش آن در ماه‌های نوامبر و آوریل را نشان می‌دهند (حلبیان، ۱۳۹۵؛ کریمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ خورسندی و همکاران، ۱۴۰۲؛ امیدوار و همکاران، ۱۴۰۳). این نکته حائز اهمیت است که ژانویه و مارس از پربارش‌ترین ماه‌های سال در ایران محسوب می‌شوند (رضیئی، ۱۳۹۶؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳). علاوه بر این، تحقیقات مرتبط با خشکسالی در ایران حاکی از افزایش گستره خشکسالی در ماه‌های ژانویه و مارس و کاهش آن در ماه نوامبر است (کریمی و حیدری، ۱۴۰۲؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳).

این جابه‌جایی‌ها تأثیر چشمگیری بر شرایط اقلیمی و توزیع مکانی بارش در ایران داشته‌اند. بررسی جابه‌جایی مرکز ثقل بارش نشان داده است که در دوره دوم (۱۹۸۲-۲۰۲۳)، مرکز ثقل بارش به سمت شمال‌غرب متمایل شده است. این تغییر موجب کاهش قابل‌توجه بارش در نیمه شرقی ایران و افزایش گستره خشکسالی در این ناحیه شده است. تغییر در رژیم بارشی منطقه و جابجایی مراکز ثقل بارش قطعاً ناشی از تغییر رفتار بازیگران اصلی تأثیرگذار در بارش کشور است. گردش هذلی گسترش شمال‌سو داشته است (نوئن و همکاران، ۲۰۱۳؛ هو و فو، ۲۰۰۷) از طرفی شدت و گستره آن نیز دچار تغییر شده است که این تغییر و جابجایی در ابر سلول اقلیم جهان می‌تواند نشان از تغییرات مهمی در جو باشد، کما اینکه اثر آن بر تغییر بارش مناطق مختلف تأیید شده است (فو، ۲۰۱۵).

بررسی تاوه قطبی در سطوح ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال در نیمه دوم قرن ۲۰ در مطالعه فروانفیلد و دیویس در سال ۲۰۰۳ نتایج جالبی در پی داشته است، بررسی روندها در این مطالعه وجود دو رژیم را قبل و بعد از ۱۹۷۰ آشکار نموده است. از ابتدای دوره موردبررسی تا سال ۱۹۷۰، تاوه قطبی از نظر آماری گسترش قابل‌توجهی را نشان می‌دهد، اما از آن زمان به‌طور قابل‌توجهی در همه سطوح کاهش یافته است. انبساط قبل از ۱۹۷۰ و انقباض متعاقب آن در عرض‌های جغرافیایی پایین قوی‌ترین و در عرض‌های جغرافیایی بالاتر ضعیف‌ترین است. اندازه و موقعیت تاوه می‌تواند شاخص خوبی از تغییرات آب و هوایی باشد. بررسی‌ها همچنین نشان داد که قبل از ۱۹۷۰ گرادیان نصف‌النهاری ارتفاع (فشار) ضعیف‌تر بوده است اما از ۱۹۷۰ این گرادیان شدت یافته است. در زمان گسترش تاوه قطبی جریانات غربی ضعیف‌تر بود و در طول انقباض تاوه جریانات غربی در نیمکره شمالی شدت یافتند (فروانفیلد و دیویس، ۲۰۰۳). حال آنکه مطالعات نشان داده تغییرات اخیر در قدرت و موقعیت بادهای غربی نیمکره جنوبی با خشکسالی‌های قاره‌ای و آتش‌سوزی‌های جنگلی، تغییرات در مخزن کربن اقیانوس جنوبی، گستره یخ دریا و گردش اقیانوس مرتبط دانسته شده‌اند (پرن و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی بلندمدت بادهای غربی در نیمکره جنوبی نشان داد که در دوره‌های سرد، مانند عصر یخبندان کوچک (حدود ۱۴۰۰ تا ۱۸۷۰ میلادی)، بادهای ضعیف شده و به سمت استوا می‌رفتند و در دوره‌های گرم شدت می‌گرفتند و به سمت قطب مهاجرت می‌کردند. این نتایج حاکی از آن است که تغییرات در گرادیان دمای عرضی، مهاجرت‌های بادهای غربی نیمکره جنوبی در مقیاس قرن را هدایت می‌کند و تشدید تأثیرات را می‌توان در قرن آینده پیش‌بینی کرد (پرن و همکاران، ۲۰۲۰).

از دیگر سو مطالعات انجام گرفته بر روی روند تغییرات در سرعت و محور رودباد جنب حاره، نشان از تغییرات معنی دار شمال سوی محور این رودباد در فصول بهار و پاییز داشته است (عساکره و همکاران، ۱۳۹۴) و این در حالی است که نقش دینامیکی هسته‌ی رودباد در رشد سامانه‌های باران‌زا اهمیت چشمگیری دارد، به این معنا که با تغییرات شمال سوی رودباد پتانسیل ایجاد سامانه‌های باران‌زا در مناطق جنوبی‌تر تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرد. همچنین روند پشته پرفشار جنب حاره نیز نشان از تداوم پشته مزبور بر روی منطقه در سال‌های ۱۳۳۰ تا ۱۳۸۹ داشته و سبب روند افزایشی معنی دار فعالیت این سامانه در منطقه شده است (عساکره و همکاران، ۱۳۹۶).

در ماه‌های نوامبر، آوریل و مه مرکز ثقل بارش به سمت جنوب شرق جابه‌جا شده و بارش در این مناطق افزایش یافته است. این نتایج با مطالعات پیشین که کاهش بارش در ماه‌های دسامبر، ژانویه و مارس و افزایش بارش در نوامبر، آوریل و مه را گزارش داده‌اند، هم‌خوانی دارد (خزیمه‌نژاد و نظری تهرودی، ۲۰۱۹؛ کریمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۱؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳).

برخی از پژوهش‌ها این تغییرات را تحول مهمی در رژیم بارشی کشور معرفی کرده‌اند (حیدری و همکاران، ۱۴۰۳). این تغییرات نه تنها بر توزیع مکانی بارش، بلکه بر شرایط اقلیمی و الگوهای آبیاری مناطق مختلف ایران نیز تأثیرات قابل توجهی داشته‌اند. به نظر می‌رسد جابه‌جایی مرکز ثقل بارش از دسامبر تا مارس، نقش تعیین کننده‌ای در شکل‌گیری الگوهای بارش ماه‌های پربارش ایران داشته باشد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل دینامیکی مرکز ثقل بارش، ابزاری دقیق برای شناسایی مناطق در معرض خطر خشکسالی و فهم بهتر از انتقالات فضایی بارش طی بلندمدت است. جابه‌جایی مکرر مرکز ثقل بارش در برخی ماه‌ها (خصوصاً در فصل زمستان) هم‌زمان با گسترش خشکسالی، می‌تواند به منزله شاخص هشدار اولیه برای مدیریت منابع آب در نظر گرفته شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که مناطق تأمین کننده آب تجدیدپذیر در حال جابه‌جایی هستند. با توجه به تقارن برخی از این تغییرات با افزایش تغییرات اقلیمی و تأثیرات انسانی، توصیه می‌شود در برنامه‌ریزی‌های ملی مدیریت آب، از تحلیل‌های فضایی-زمانی مشابه استفاده شود تا سیاست‌های سازگار با شرایط اقلیمی متحول طراحی گردد.

۵ نتیجه‌گیری

تحلیل تغییرات مکانی مرکز ثقل بارش در ایران نشان دهنده روندهای قابل توجهی در جابه‌جایی این مرکز طی دوره‌های زمانی مختلف بوده است. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که مرکز ثقل بارش در ایران عمدتاً تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و سامانه‌های جوی منطقه‌ای و جهانی قرار داشته و الگوی جابه‌جایی آن منعکس کننده ترکیبی از عوامل مکانی و زمانی است.

موقعیت یابی مرکز ثقل بارش نشان داد که این مرکز طی سال‌های اخیر به سمت مناطق شمالی و شمال غربی ایران جابه‌جا شده است، به‌ویژه در ماه‌های پربارش مانند ژانویه و مارس. این جابه‌جایی با افزایش گستره خشکسالی در برخی نواحی جنوبی و شرقی ایران همراه بوده است. از سوی دیگر، در ماه‌های نوامبر و آوریل، مرکز ثقل بارش به سمت جنوب شرق متمایل شده که با کاهش شدت و گستره خشکسالی در این مناطق هم‌زمان بوده است.

نتایج نشان می‌دهد که مرکز ثقل بارش در بیش از ۷۰ درصد ماه‌های سال، دارای روند جابه‌جایی معنادار در دوره اخیر (۱۹۸۲-۲۰۲۳) بوده است. روند تغییرات مرکز ثقل بارش حاکی از وجود الگوهای نوسانی بوده که به تغییر در شدت و گستره خشکسالی در ماه‌های مختلف سال منجر شده است که این روندها در دو دهه اخیر

تغییر محسوسی یافته است. این تغییرات بیانگر افزایش خشکسالی در ماه‌های پربارش (ژانویه و مارس) و کاهش آن در ماه‌های نوامبر و آوریل است. این الگوها نشان می‌دهند که توزیع زمانی و مکانی خشکسالی به شدت تحت تأثیر تغییر در سامانه‌های جوی، از جمله جابه‌جایی محور پرفشار جنب‌حاره‌ای و تغییر در شدت سامانه‌های بارشی، قرار دارد.

گستره خشکسالی نیز در ارتباط مستقیم با جابه‌جایی مرکز ثقل بارش دستخوش تغییرات مهمی بوده است. به‌طور مشخص، افزایش گستره خشکسالی در ماه‌های ژانویه و مارس که معمولاً از ماه‌های پربارش ایران محسوب می‌شوند، می‌تواند بیانگر کاهش منابع آبی و افزایش مخاطرات اقلیمی در این بازه‌ها باشد. در مقابل، کاهش گستره خشکسالی در ماه‌های نوامبر و آوریل فرصت‌هایی برای تعدیل شرایط اقلیمی و بهره‌برداری بهتر از منابع آبی در این ماه‌ها فراهم آورده است.

روند تغییرات مرکز ثقل بارش و توزیع مکانی آن نمایانگر چالش‌های جدی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی اقلیمی در ایران است. درک دقیق این تغییرات می‌تواند ابزار ارزشمندی برای تدوین استراتژی‌های کاهش مخاطرات خشکسالی و برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب فراهم کند. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده با استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر و تحلیل تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی بر این الگوها، برنامه‌های مدیریتی مناسب‌تری ارائه دهند.

تقدیر و تشکر

این مقاله حامی مالی نداشته است.

References

- 0 Alijani, B., O'Brien, J., and Yarnal, B., (2008). Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. Theoretical and Applied climatology, 94, pp.107-124. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0344-y>.
- 0 Alizadeh, A., (2010). Principals of applied hydrology, university of Imam Reza press. 912p.
- 0 Amiri, R. (2007). Analysis and prediction of precipitation fluctuations in Khorramabad city using Markov chain model, Master's thesis in Climatology, Tarbiat Moalem University. [In Persian]
- 0 Anders, A.M., Roe, G.H., Hallet, B., Montgomery, D.R., Finnegan, N.J. and Putkonen, J., 2006. Spatial patterns of precipitation and topography in the Himalaya. [https://doi.org/10.1130/2006.2398\(03\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(03))
- 0 Asakereh H, Beyranvand A, Fatahian M, Shadman H. (2017). The Analysis of Transport trend of Subtropical jet stream and High Pressure on Middle East and its relationship with Iran climate. ۳۱۵-۳۰۳: (۵۸) ۱۷ ;[In Persian]
- 0 Asakereh H, Movahedi S, Sabziparvar A, Masoodiyan A, Matyanaji Z. (2015). Climatology of Iran Precipitation by using Harmonic Analysis Method. GeoRes; 29 (4):15-26. [In Persian]
- 0 Asakereh H, Razmi Ghalandari R. (2014). Temporal Distribution and Regime of Precipitation of Northwest of Iran. GeoRes; 29 (1):145-160.

- Asakereh H, Razmi Ghalandari R. (2011). Climatology of precipitation in northwest Iran. *Geography and Development*, 9(25), 137-158. [Doi: 10.22111/gdij.2011.514](https://doi.org/10.22111/gdij.2011.514). [In Persian]
- 0 Asakereh, H. (2007). Spatio – Temporal Changes of Iran Inland Precipitation during Recent Decades. *Geography and Development*, 5(10), 145-164. [Doi: 10.22111/gdij.2007.3669](https://doi.org/10.22111/gdij.2007.3669). [In Persian]
- 0 Asakereh, H. and Seifipour, Z. (2013). Describing the spatial structure of annual precipitation in Iran. *Geographical Research*, Volume 28, Issue 4, pp. 15-30. <http://georesearch.ir/article-1-429-fa.html>. [In Persian]
- 0 Asakereh, H., Ghaemi, H. and Beyranvand, A. (2015). Trend Analysis of the Recent Seasonal Changes in Subtropical Jet Stream in Climate of Iran. *Physical Geography Research*, 47(1), 57-72. [In Persian]
- 0 Asakereh, H., Masoodian, S. A. and Tarkarani, F. (2021). A Discrimination of Roles of Internal and External Factors on the Decadal Variation of Annual Precipitation in Iran over Recent Four Decades (1975-2016). *Physical Geography Research*, 53(1), 91-107. [In Persian]
- 0 Asakereh, H., Seifipour, Z. (2012). Spatial modeling of annual precipitation in Iran, *Geography and Development*. Volume 10, No. 29, pp. 15-30. [In Persian]
- 0 Asakereh, Hossein. (2004). modeling spatial changes in climatic elements, case study: annual precipitation in Isfahan province. *Geographical Research*, Volume 19, Issue 3, pp. 213-231. [In Persian]
- 0 Babaei-Fini, U.S.; Farajzadeh, M.(2002). Patterns of spatial and temporal changes in precipitation in Iran. *Humanities Lecturer*. Volume 6, No. 4, pp. 51-70. [In Persian]
- 0 Bahrami, A. and Darand, M. (2024). Evaluation of Tempo-spatial Accuracy of Precipitation Estimation of ERA-5 Database over Iran. *Iranian Journal of Geophysics*. [Doi: 10.30499/ijg.2024.455625.1599](https://doi.org/10.30499/ijg.2024.455625.1599). [In Persian]
- 0 De Lima, J.L.M.P., (2009). Investigating the multifractality of point precipitation in the Madeira archipelago. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(2), pp.299-311. <https://doi.org/10.5194/npg-16-299-2009>
- 0 Fallah Ghalhari, G. and Kadkhoda, E. (2017). The Evaluation of the Spatial Structure of Mashhad Plain Precipitation in the Last Half-Century. *Hydrogeomorphology*, 4(11), 39-57. [In Persian]
- 0 Fallah Ghalhari, G.A., Dadashi Roudbari, A.A. and Asadi, M., (2016). Identifying the spatial and temporal distribution characteristics of precipitation in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, pp.1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2606-4>
- 0 Frauenfeld, O. W., & Davis, R. E. (2003). Northern Hemisphere circumpolar vortex trends and climate change implications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14).
- 0 Fu, R. (2015). Global warming-accelerated drying in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(12), 3593-3594.

- 0 Ghayur, H.A and Masoudian, S.A. (1996). Spatial study of the relationship between rainfall and altitude in Iran, Geographical Research, Volume 11, Number 2, pp. 124-143. [In Persian]
- 0 Glazirin, G.E., (1997). Precipitation distribution with altitude. Theoretical and applied Climatology, 58, pp.141-145. <https://doi.org/10.1007/BF00865014>
- 0 Halabian, A. H. (2022). Assessment of Spatial- Temporal Changes of Precipitation in Iran. Desert Ecosystem Engineering, 5(13), 101-116. [In Persian]
- 0 Heidari S, karimi M, Azizi G, Shamsipour A. (2023). Explaining the spatial patterns of drought intensities in Iran. Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards; 9 (4):1-20. [In Persian]
- 0 Heidari, S., Karimi, M. and Beyranvand, A. (2024). Evaluation the performance of ERA5 reanalysis data in Iran's rainfall estimation and spatial analysis of the country's precipitation regime. Researches in Earth Sciences, 15(2), 1-24. [Doi: 10.48308/esrj.2024.104225](https://doi.org/10.48308/esrj.2024.104225). [In Persian]
- 0 Heidari, S., Karimi, M., Azizi, G. and Shamsipour, A. (2023). Quantification, The first challenge of drought risk assessment and management. The Journal of Geographical Research on Desert Areas, 11(1), 192-206. [Doi: 10.22034/grd.2023.20370.1588](https://doi.org/10.22034/grd.2023.20370.1588). [In Persian]
- 0 Heidari, S., Karimi, M., Azizi, G. and Shamsipour, A. (2024). Spatial clusters and trends of change in drought co-occurrence regions in Iran. Physical Geography Research, 56(1), 83-101. [Doi: 10.22059/jphgr.2024.374275.1007820](https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.374275.1007820). [In Persian]
- 0 Hejazizade, Z., Asakare, H. and Sayadi, F. (2016). Climate change and temporal-spatial distribution of rainfall in the Iran region. Geography, 14(50), 33-54. [In Persian]
- 0 Hejazizadeh, Z., alijani, B., Saligheh, M. and nadi, S. (2024). Investigating the changes of droughts in Iran with the approach of climate change. Climate Change and Climate Disaster, 2(4), 1-23. [In Persian]
- 0 Hu, Y., and Q. Fu, (2007). Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. Atmos. Chem. Phys., 7, 5229-5236.
- 0 Javari, M., (2016). Geostatistical and spatial statistical modelling of precipitation variations in Iran. Journal of Civil & Environmental Engineering, 6(3), pp.1-30. [DOI: 10.4172/2165-784X.1000230](https://doi.org/10.4172/2165-784X.1000230)
- 0 Jiang, L., Li, N. and Zhao, X. (2017). Scaling behaviors of precipitation over China. Theoretical and applied climatology, 128, pp.63-70. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1689-2>
- 0 Kamali, M. and Torabi Azad, M. (2024). Investigating Precipitation Changes in the Southern Coast of Iran using ERA5 Data. Nivar, 48(124-125), 187-202. [Doi: 10.30467/nivar.2024.412682.1258](https://doi.org/10.30467/nivar.2024.412682.1258). [In Persian]
- 0 Karimi M, Heidari S, Rafati S. (2021). The trend of atmospheric water cycle components (precipitation and precipitable water) in catchments of Iran. Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards; 8 (2):33-54. [In Persian]

- 0 Khalighi Sigaroudi, S., Sadeghi Sangdehi, A., Awsati, K. and GHavidel Rahimi, U. (2009). The Study of Drought and Wet Year Assessment models for Stations in Mazandaran province. Iranian Journal of Range and Desert Research, 16(1), 44-54. [In Persian]
- 0 Khorsandi, M., Ghalkhani, H. and Bateni, M. M. (2023). Trend Analysis of Precipitation and Air Temperature in water basins of Iran. Journal of Agricultural Meteorology, 11(2), 51-69. [Doi: 10.22125/agmj.2023.368274.1142](https://doi.org/10.22125/agmj.2023.368274.1142). [In Persian]
- 0 Khoshkhoo, Y. (2022). Feasibility study of rainfed barley annual yield prediction based on different drought indices. Journal of Water and Soil Conservation, 29(2), 1-24. [Doi: 10.22069/jwsc.2022.20549.3579](https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.20549.3579). [In Persian]
- 0 Khozaymehnezhad, H. and Nazeri Tahroudi, M., (2019). Annual and seasonal distribution pattern of rainfall in Iran and neighboring regions. Arabian Journal of Geosciences, 12, pp.1-11.
- 0 Mafakheri, O., Saligheh, M., Alijani, B. and Akbary, M. (2017). Zonation of temporal changes and uniformity of rainfall in Iran. Physical Geography Research, 49(2), 191-205. [doi: 10.22059/jphgr.2017.62841](https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.62841) [In Persian]
- 0 Marshall, J.S., (1953). Precipitation trajectories and patterns. Journal of Atmospheric Sciences, 10(1), pp.25-29. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1953\)010<0025:PTAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1953)010<0025:PTAP>2.0.CO;2)
- 0 Masoodiyan, S. A. (2003). Investigation of Precipitation Geographical Dispersion in Iran through Rotated Factor Analysis. Geography and Development, 1(1), 79-87. [Doi: 10.22111/gdij.2003.3642](https://doi.org/10.22111/gdij.2003.3642). [In Persian]
- 0 Masoudian, S.A. (1998). Study of the system of temporal and spatial variations of precipitation in Iran, PhD thesis in the field of physical geography, climatology, supervisor: Hassan Ali Ghayyori, University of Isfahan. [In Persian]
- 0 Masoudian, S.A. (2009). Rainfall areas of Iran, Geography and Development, Volume 17, Number 13, pp. 79-91. [In Persian]
- 0 Masoudian, S.A. (2011). Iran's Climate, First Edition, Mashhad: Sharieye Tus Publications [In Persian]
- 0 Mohammadi, H. and Javari, M. (2007). Temporal changes in precipitation in Iran, Journal of Environmental Studies, No. 40, pp. 87-100. [In Persian]
- 0 Nguyen, H., A. Evans, C. Lucas, I. Smith, and B. Timbal, (2013). The Hadley circulation in reanalyses: Climatology, variability, and change. J. Climate, 26, 3357-3376.
- 0 Nouri, A., Noori, S., Omidvar, J., Banejad, H. and Modaresi, F. (2024). A Qualitative- Quantitative Evaluation of Era5 Rainfall Data in Identifying the Occurrence and Amount of Rainfall in Razavi Khorasan Province. Iranian Water Researches Journal, 18(1), 1-12. [doi: 10.22034/iwrj.2023.14295.2506](https://doi.org/10.22034/iwrj.2023.14295.2506) [In Persian]

- 0 Omidvar, K., tae, N. and Mohammadi Ravari, F. (۲۰۲۴). Revealing the temporal-spatial changes of autumn rainfall in Iran based on long-term statistics and non-parametric tests, Nivar. [Doi: 10.30467/nivar.2024.471556.1301](https://doi.org/10.30467/nivar.2024.471556.1301). [In Persian]
- 0 Perren, B. B., Hodgson, D. A., Roberts, S. J., Sime, L., Van Nieuwenhuyze, W., Verleyen, E., & Vyverman, W. (2020). Southward migration of the Southern Hemisphere westerly winds corresponds with warming climate over centennial timescales. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 58.
- 0 Rabiee Gaffar, Z., Asakereh, H. and Khosravi, U. (2024). Investigating Decadal Changes in the Probability of Iran's Precipitation Duration (1977-2016). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(131), 85-103. [Doi: 10.22131/sepehr.2023.1995956.2967](https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.1995956.2967). [In Persian]
- 0 Rabieegafar, Z., asakereh, H., & Khosravi, Y. (2024). Investigating Temporal-Spatial Changes in the Probability of Precipitation Durations in Iran. *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, 5(2), 1-19. [Doi: 10.22124/gscj.2024.24732.1245](https://doi.org/10.22124/gscj.2024.24732.1245). [In Persian]
- 0 Rahimi Bondarabadi, S. and Saghafian, B. (2007). Estimating Spatial Distribution of Rainfall by Fuzzy Set Theory. *Iran-Water Resources Research*, 3(2), 26-38. [In Persian]
- 0 Raziei, T. (2017). Identification of precipitation regimes of Iran using multivariate methods. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(3), 673-695. [Doi: 10.22059/jesphys.2017.60290](https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.60290). [In Persian]
- 0 Roohbakhsh sigaroodi H, karampoor M, Ghaemi H, Moradi M, Azadi M. (2019). Analysis of statistics and anomalies of rainfall in Iran during the Warm period (1951-2010). *JGS*. 19(55), 79-98. [Doi:10.29252/jgs.19.55.79](https://doi.org/10.29252/jgs.19.55.79). [In Persian]
- 0 Şen, Z. and Habib, Z., (2000). Spatial analysis of monthly precipitation in Turkey. *Theoretical and applied climatology*, 67, pp.81-96. <https://doi.org/10.1007/s007040070017>
- 0 Shamohamadi, Z., Yarahmadi, D., Asakereh, H. and Mirhashemi, H. (2024). Analysis of Time Groups Governing the Temporal-Spatial Changes of Iran's Annual Rainfall. *Physical Geography Research*, 56(2), 71-89. [Doi: 10.22059/jphgr.2024.375059.1007826](https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.375059.1007826). [In Persian]
- 0 Zhang, Q., Liu, C., Xu, C.Y., Xu, Y. and Jiang, T., (2006). Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China. *Journal of hydrology*, 324(1-4), pp.255-265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.023>
- 0 Zhang, X., Zhang, G., Qiu, L., Zhang, B., Sun, Y., GUI, Z. and Zhang, Q., (2019). A modified multifractal detrended fluctuation analysis (MFDFA) approach for multifractal analysis of precipitation in donating Lake Basin, China. *Water*, 11(5), p.891. <https://doi.org/10.3390/w11050891>
- 0 Zhang, Y. and Wang, K., (2023). Global precipitation system scale increased from 2001 to 2020. *Journal of Hydrology*, 616, p.128768. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128768>