



Research Article

Analyzing precipitation variability in major cities of Iran using continuous wavelet transform

Mahmoud Ahmadi^{1*} , Jamal Karami¹, Mohammad Kamangar¹

1-Department of Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 10 Apr 2025 Accepted: 19 Sep 2025

Extended Abstract

Introduction

In recent years, the impacts of climate change on water security have been extensively investigated. Evidence suggests that climate change alters precipitation and temperature patterns, thereby affecting access to water resources (Ahmed and Akter, 2024). These changes influence not only the quantity but also the quality of water (Van Vliet et al, 2023). Particularly in urban areas, variability in monthly precipitation and climatic fluctuations is considered one of the key challenges of the 21st century. In Iran, due to its arid and semi-arid climate, water resource management and precipitation pattern analysis hold special importance (Modarres and Sarhadi, 2009). International studies have shown that water accessibility indicators are most sensitive to precipitation variability (Barbosa et al, 2023). Moreover, changes in evapotranspiration can reduce net primary production, thereby influencing water security (Gao et al, 2023). The resilience of water systems has also gained attention; increasing resource diversity and managing demand can enhance resilience against climate change (Kharrazi et al, 2024; Srinivasan et al, 2024). In terms of scenario analysis, recent studies using machine learning reveal that even minor climate variations can significantly impact water security indices (Chen et al, 2024). In Iran, numerous studies have examined precipitation trends. Talaei and Tabari (2011) analyzed annual and seasonal precipitation at 41 stations between 1966 and 2005, reporting a decreasing trend in about 60% of them. Similarly, Modarres et al. (2009), based on 145 rain gauge stations, identified decreasing annual precipitation in more than half of the stations and increasing 24-hour maximum precipitation in others. These findings indicate early manifestations of climate change in Iran. Theoretically, water security is a multidimensional concept encompassing access, quality, and resilience of water resources, requiring interdisciplinary and integrated analyses. Advanced statistical and computational methods such as hydrological modeling, machine learning, and wavelet transforms provide deeper insights into climate variability and precipitation patterns. However, the application of wavelet transform in climate data analysis in Iran, especially in urban areas, remains limited. The aim of this study is to investigate the variability of monthly precipitation in urban areas of Iran using continuous wavelet transform (CWT). Adopting a multiscale approach, the study analyzes temporal-spatial precipitation trends, identifies hidden patterns, and explores periodic variations across different time scales. The novelty of the research lies in employing wavelet analysis for detailed examination of precipitation data, thereby offering deeper insights into the impacts of climate change on precipitation behavior in Iran.

Citation: Ahmadi, M. et al, 2026. Analyzing precipitation variability in major cities of Iran using continuous wavelet transform, *Res. Earth. Sci.* 16(4) (195-212) DOI: 10.48308/esrj.2025.238884.1262

* Corresponding author E-mail address: ma_ahmadi@sbu.ac.ir



Materials and Methods

This study analyzes the variability of monthly precipitation in Iran with a focus on nine synoptic stations located in Tehran, Mashhad, Isfahan, Tabriz, Karaj, Kermanshah, Arak and Ahvaz. The selection of these stations was based on the availability of long-term and continuous data, appropriate geographical distribution, and representation of the country's diverse climatic conditions. The study period from 1980 to 2020 was considered in order to cover extreme climatic fluctuations, including both dry and wet years, and to enable the assessment of long-term precipitation trends. The stations represent different climatic regimes: Tehran, Karaj, Kermanshah, and Arak are situated in a semi-arid climate with annual precipitation ranging from 250 to 500 mm, with rainfall occurring mainly in winter and spring. Mashhad and Tabriz, characterized by mountainous and semi-arid climates, experience higher winter precipitation, and precipitation variability in these regions is greater due to elevation and geographical factors. Isfahan has an arid and low-rainfall climate, while Ahvaz, located in a relatively dry and lowland region, further enriches the climatic diversity and allows for examining the influence of different climates on precipitation patterns. Monthly precipitation data were obtained from the Iran Meteorological Organization and underwent preprocessing, including the identification and replacement of missing data, removal of outliers, assessment of inhomogeneities, and normalization. Data validation was performed using statistical tests such as Pettitt, Mann-Kendall, and SNHT to ensure quality and continuity. Data analysis was carried out using Continuous Wavelet Transform (CWT) with the Morlet wavelet to explore simultaneous variations in the time–frequency domain. Wavelet power spectra were generated to identify periods with high precipitation energy, and the Cone of Influence (COI) was used to minimize boundary effects. The wavelet analysis results were validated against independent datasets and previous studies to ensure the reliability of the identified patterns. By applying the wavelet approach, this study provides a detailed temporal–spatial analysis of precipitation trends in urban areas of Iran and offers practical insights for water resources management under climate change conditions. Furthermore, the results can support decision-making in drought and flood risk management across different regions of the country. Identifying precipitation cycles at medium- and long-term scales can also play a crucial role in agricultural planning, dam management, and water resources development projects. Ultimately, the wavelet-based methodology presented here can serve as a model for similar studies in other regions of Iran and countries with comparable climatic conditions.

Results and Discussion

Wavelet analysis of precipitation data at the Isfahan, Ahvaz, Arak, Tehran, Mashhad, Karaj, Tabriz and Kermanshah stations showed that seasonal and multi-year precipitation patterns are accompanied by distinct fluctuations. At the Isfahan station, short-term seasonal patterns of about one year exhibited strong fluctuations; the minimum variability occurred in summer, while the maximum seasonal variability was observed in winter and autumn. In the multi-year cycles, the highest fluctuations occurred in the 3–4 year and 8–10 year periods. The intensity of the wavelet coefficients fluctuated across different scales from 1980 to 2005, and from 2008 to 2020 greater intensity and strength were observed at both short (seasonal) and long (multi-year) scales, indicating climate change in recent decades. At the Ahvaz station, the seasonal and multi-year precipitation patterns were irregular, but the amplitude of the fluctuations was smaller compared to high-altitude stations. The temporal analysis over the period 1980–2020 showed that the intensity of the wavelet coefficients increased in the second half of the study period, and fluctuations in seasonal, annual, and multi-year cycles continued, which is not a direct reflection of climate change but is consistent with precipitation patterns at other stations. At the Arak station, seasonal patterns exhibited strong periodicity with frequent short-term fluctuations. Multi-year cycles occurred with high intensity and were influenced by large-scale atmospheric patterns. The analysis of the period from 1980 to the first decade of the 21st century showed that the wavelet coefficients at different scales were significantly associated with precipitation variability, and short-term and multi-year variations became more pronounced under climatic transformations in the second decade of the century. At the Tehran station, one-year seasonal patterns coexisted with multi-year cycles, and the yellow and light green areas on the wavelet spectrum indicated seasonal fluctuations. Multi-year cycles of 2–4 years and 5–10 years were observed with high power, likely associated with large-scale climatic phenomena such as ENSO. Decadal changes from the early 1980s to 2010 reflected stronger or weaker variability in the intensity of the wavelet coefficients, and after 2010 a marked increase in the strength of both short- and long-term scales was observed. At the Mashhad station, seasonal and annual precipitation patterns showed distinct fluctuations during autumn and winter. Multi-year cycles of 2–5 years and 6–10 years also exhibited significant variability. The intensity of the wavelet coefficients increased from 1980 to 2010, reflecting the influence of multiple climatic factors and climate change on precipitation behavior. The Karaj station, with its arid and semi-arid climate, showed minimum

seasonal variability in summer and maximum in autumn and winter. Longer multi-year cycles, especially those of 2–3 years and 5–10 years, occurred with high intensity. From 2010 to 2020, however, the intensity of fluctuations decreased. At the Tabriz station, precipitation was more intense and frequent in winter and autumn, while summer showed weaker variability. Multi-year cycles of 2–4 and 6–10 years displayed considerable fluctuations, and the intensity of the wavelet coefficients increased from 1980 to 2020. The Kermanshah station had strong fluctuations in winter and autumn and weaker ones in summer and spring. Multi-year cycles between 2–5 and 6–10 years were observed, and the intensity of the wavelet coefficients increased after 2010. Comparison with previous studies indicated that this research, by applying wavelet analysis, examined precipitation cycles with greater accuracy and analyzed seasonal and multi-year fluctuations in several major Iranian cities. In addition to ENSO, the NAO and MO climate indices were also investigated. The results are consistent with similar international studies in Europe, China, and the Indian subcontinent, but the focus on Iran's arid climate and the spatial diversity of large cities provides an innovative perspective. Overall, wavelet analysis showed that short- and long-term precipitation fluctuations with varying intensities are evident in most stations. Stations such as Kermanshah, Tabriz, and Mashhad exhibited high-intensity wavelet coefficients in 2–10 year cycles and were influenced by large-scale climatic indices, while stations such as Ahvaz and Karaj displayed relatively uniform behavior. The increase in wavelet coefficient intensity during 2008–2020 indicates the impact of recent climate changes on precipitation patterns. Furthermore, the results of this study revealed that the intensity and extent of precipitation variability in recent decades have been accompanied by greater fluctuations. Comparative analysis among stations demonstrated that geographical location and elevation play a decisive role in the strength of seasonal and multi-year cycles. In addition, the observed trends can be applied in the management of urban and rural water resources and in the development of climate adaptation strategies. The findings also showed that integrating wavelet analysis with large-scale climate indices increases the accuracy of identifying precipitation cycles. In conclusion, this study provides a comprehensive picture of precipitation behavior in Iran and establishes a valuable foundation for future research on climate change.

Conclusion

This study applied continuous wavelet transform (CWT) to analyze temporal variability of monthly precipitation in Iranian metropolitan areas from 1980 to 2020, identifying both seasonal and multi-annual cycles. Results showed precipitation patterns were influenced by annual cycles (~1 year) and multi-annual cycles (3–10 years). Strong oscillations were particularly evident in Tehran, Kermanshah, and Mashhad, coinciding with large-scale climate indices such as ENSO and NAO. In contrast, stations like Ahvaz, characterized by lower altitude and warmer conditions, showed weaker intensities and less regular oscillations, underscoring the importance of geographic factors such as elevation, temperature, and latitude in precipitation variability. The analysis further indicated that after 2010, precipitation variability intensified at both seasonal and multi-annual scales across most stations, serving as evidence of the increasing impacts of climate change. The findings are practically valuable for water resource management, drought and flood preparedness, as well as urban and agricultural planning. Furthermore, linking results to large-scale climate indices enhances the potential for predictive modeling and early warning systems.

Keywords: Climate change, Water security, Precipitation variability, Wavelet transformation, Iran.

بررسی تغییرپذیری بارش در کلان‌شهرهای ایران با استفاده از تبدیل موجک پیوسته

محمود احمدی^{۱*}، جمال کرمی^۱، محمد کمانگر^۱

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸

چکیده گسترده

مقدمه

در سال‌های اخیر، اثرات تغییر اقلیم بر امنیت آبی به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. شواهد نشان می‌دهد که تغییر اقلیم الگوهای بارش و دما را تغییر داده و به‌تبع آن دسترسی به منابع آب را تحت تأثیر قرار داده است (Ahmed and Akter, 2024). این تغییرات نه تنها کمیت، بلکه کیفیت آب را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند (Van Vliet et al, 2023) به‌ویژه در مناطق شهری، تغییرپذیری بارش ماهانه و نوسانات اقلیمی، یکی از چالش‌های کلیدی قرن حاضر محسوب می‌شود. در ایران، با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک، مدیریت منابع آب و تحلیل الگوهای بارش اهمیت ویژه‌ای دارد (Modarres and Sarhadi, 2009). مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که شاخص‌های مرتبط با دسترسی به آب بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات بارش دارند (Barbosa et al, 2023). همچنین، تغییرات در تبخیر و تعرق می‌تواند تولید خالص اولیه را کاهش داده و بر امنیت آبی اثرگذار باشد (Gao et al, 2023). اهمیت تاب‌آوری سیستم‌های آبی نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است؛ افزایش تنوع منابع و مدیریت تقاضا می‌تواند تاب‌آوری سیستم‌ها را در برابر تغییر اقلیم بهبود دهد (Kharrazi et al, 2024). در زمینه تحلیل سناریو، مطالعات اخیر با استفاده از یادگیری ماشین نشان داده‌اند که حتی تغییرات اندک اقلیمی می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر شاخص‌های امنیت آبی داشته باشد (Chen et al, 2024). در ایران، پژوهش‌های متعددی به تحلیل تغییرات بارش پرداخته‌اند. طبری و طلایی (Talaee and Tabari, 2011) روند بارش سالانه و فصلی را در ۴۱ ایستگاه طی سال‌های ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۵ بررسی کردند و نشان دادند که در حدود ۶۰ درصد ایستگاه‌ها کاهش بارش مشاهده شده است. همچنین، مدرس و سرحدی (Modarres and Sarhadi, 2009) با بررسی ۱۴۵ ایستگاه باران‌سنجی، روند کاهشی بارش سالانه در بیش از نیمی از ایستگاه‌ها و افزایش حداکثر بارش ۲۴ ساعته در نیمی دیگر را گزارش کردند. این روندها نشان‌دهنده تأثیرات اولیه تغییر اقلیم در ایران هستند. از منظر نظری، امنیت آبی مفهومی چندبعدی است که دسترسی، کیفیت و تاب‌آوری منابع آبی را شامل می‌شود و نیازمند تحلیل‌های بین‌رشته‌ای و یکپارچه است. روش‌های نوین آماری و محاسباتی مانند مدل‌های هیدرولوژیکی، یادگیری ماشین و تبدیل موجک، بینش‌های دقیق‌تری درباره تغییرات اقلیمی و الگوهای بارش ارائه می‌دهند، اما استفاده از تبدیل موجک در تحلیل داده‌های اقلیمی ایران، به‌ویژه در مناطق شهری، هنوز محدود است. هدف این پژوهش بررسی تغییرپذیری بارش ماهانه در مناطق شهری ایران با استفاده از تبدیل موجک پیوسته است.

استناد: احمدی، م. و همکاران، ۱۴۰۴. بررسی تغییرپذیری بارش در کلان‌شهرهای ایران، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۴)، (۱۹۵-۲۱۲).
DOI: 10.48308/esrj.2025.238884.1262

E-mail: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

* نویسنده مسئول:



مطالعه حاضر با رویکرد چندمقیاسی، روندهای زمانی- مکانی بارش را تحلیل، الگوهای پنهان را شناسایی و تغییرات دوره‌ای را در مقیاس‌های مختلف زمانی بررسی می‌کند. نوآوری تحقیق در بهره‌گیری از تکنیک موجک برای تحلیل دقیق داده‌های بارش و ارائه بینشی عمیق‌تر از تأثیرات تغییر اقلیم بر رفتار بارش در ایران نهفته است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به تحلیل تغییرپذیری بارش ماهانه در ایران با تمرکز بر ۹ ایستگاه سینوپتیک تهران، مشهد، اصفهان، تبریز، کرج، کرمانشاه، اراک، شیراز و اهواز می‌پردازد. انتخاب این ایستگاه‌ها بر اساس در دسترس بودن داده‌های بلندمدت و پیوسته، پراکندگی جغرافیایی مناسب و نمایندگی اقلیم‌های مختلف کشور انجام شده است. دوره مورد مطالعه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شد تا نوسانات شدید اقلیمی شامل سال‌های خشک و تر را پوشش دهد و روندهای بلندمدت بارش قابل بررسی باشد. اقلیم ایستگاه‌ها متفاوت است: تهران، کرج، کرمانشاه و اراک در اقلیم نیمه‌خشک با بارش سالانه ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر قرار دارند و بارش عمدتاً در زمستان و بهار است. مشهد و تبریز با اقلیم کوهستانی و نیمه‌خشک، بارش زمستانه بیشتری دارند و نوسانات بارش در این مناطق به دلیل ارتفاع و جغرافیا بیشتر است. اصفهان اقلیم خشک و کم‌بارش دارد، در حالی که اهواز واقع در منطقه نسبتاً خشک و کم ارتفاع این تنوع اقلیمی امکان بررسی تأثیرات متفاوت اقلیم بر الگوهای بارش را فراهم می‌کند. داده‌های بارش ماهانه از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری و پیش‌پردازش شدند. پیش‌پردازش شامل شناسایی و جایگزینی داده‌های مفقود، حذف داده‌های پرت، بررسی ناهمگنی و نرمال‌سازی داده‌ها بود. اعتبارسنجی داده‌ها با آزمون‌های آماری مانند Pettitt, Mann-Kendall و SNHT انجام شد تا کیفیت و پیوستگی داده‌ها تضمین شود. تحلیل داده‌ها با استفاده از تبدیل موجک پیوسته (CWT) و موجک Morlet انجام شد تا نوسانات همزمان در حوزه زمان و فرکانس بررسی شود. طیف قدرت موجک برای شناسایی دوره‌های زمانی با انرژی بارش بالا تولید و محدوده Cone of Influence (COI) برای حذف اثرات مرزی مشخص شد. نتایج تحلیل‌های موجک با داده‌های مستقل و مطالعات پیشین اعتبارسنجی شدند تا از صحت الگوهای استخراج شده اطمینان حاصل شود. این مطالعه با بهره‌گیری از روش موجک، امکان تحلیل دقیق روندهای زمانی- مکانی بارش در مناطق شهری ایران را فراهم کرده و یافته‌ها بینش کاربردی برای مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم ارائه می‌دهد. افزون بر این، نتایج پژوهش می‌تواند به تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت ریسک خشکسالی و سیلاب در مناطق مختلف کشور کمک کند. همچنین شناسایی چرخه‌های بارش در بازه‌های میان‌مدت و بلندمدت می‌تواند در برنامه‌ریزی کشاورزی، مدیریت سدها و طرح‌های توسعه منابع آب نقش کلیدی ایفا کند. در نهایت، رویکرد موجکی این تحقیق الگویی برای مطالعات مشابه در سایر مناطق ایران و حتی کشورهای با شرایط اقلیمی مشابه محسوب می‌شود.

نتایج و بحث

تحلیل موجک داده‌های بارش در ایستگاه‌های اصفهان، اهواز، اراک، تهران، مشهد، کرج، تبریز و کرمانشاه نشان داد که الگوهای فصلی و چندساله بارش با نوسانات مشخصی همراه هستند. در ایستگاه اصفهان، الگوهای فصلی کوتاه‌مدت حدود یک‌ساله دارای نوسانات قوی بودند؛ کمینه نوسان در تابستان و بیشینه نوسان فصلی در زمستان و پاییز مشاهده شد. در چرخه‌های چندساله، بیشترین نوسان در دوره‌های ۳ تا ۴ ساله و ۸ تا ۱۰ ساله رخ داده است. شدت ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۵ نوسان داشت و از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰، شدت و قدرت بیشتری در مقیاس‌های کوتاه (فصلی) و بلند (چندساله) دیده شد، که نشان‌دهنده تغییر اقلیم در چند دهه اخیر است. در ایستگاه اهواز، الگوهای فصلی و چندساله بارش دارای بی‌نظمی بودند، اما دامنه نوسانات نسبت به ایستگاه‌های مرتفع کمتر بود. بررسی تغییرات زمانی در بازه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ نشان داد که شدت ضرایب موجک در نیمه دوم دوره مورد مطالعه افزایش یافت و نوسانات در چرخه‌های فصلی، سالانه و چندساله همچنان با تغییرات همراه بود، که بازتابی از تغییر اقلیم نیست، اما با الگوهای بارشی مشابه سایر ایستگاه‌ها همخوانی دارد. ایستگاه اراک نیز الگوهای فصلی با تناوب‌های قوی و نوسانات مکرر در دوره‌های کوتاه‌مدت داشت. چرخه‌های چندساله این ایستگاه با شدت بالا رخ داده و تحت تأثیر الگوهای بزرگ‌مقیاس جوی بوده است. بررسی بازه زمانی ۱۹۸۰ تا دهه اول قرن حاضر نشان داد که ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف به طور معناداری با تغییرات بارشی همراه بوده و تغییرات کوتاه‌مدت و چندساله تحت تأثیر دگرگونی اقلیمی در دهه دوم قرن حاضر محسوس‌تر بوده است. در ایستگاه تهران، الگوهای فصلی یک‌ساله با چرخه‌های

چندساله دیده شد و مناطق زرد و سبز روشن در نمودار نشانگر نوسانات فصلی بودند. چرخه‌های چندساله بین ۲ تا ۴ سال و ۵ تا ۱۰ سال با قدرت بالا مشاهده شد که احتمالاً با پدیده‌های بزرگ‌مقیاس آب و هوایی مانند ENSO مرتبط است. تغییرات دهه‌ای از اوایل ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ نشان داد که شدت ضرایب موجک نوسانات قوی‌تر یا ضعیف‌تر را منعکس می‌کند و پس از ۲۰۱۰ افزایش قابل توجهی در شدت مقیاس‌های کوتاه و بلند رخ داده است. در ایستگاه مشهد، الگوی فصلی و سالانه بارش نشان‌دهنده نوسانات مشخص در فصل‌های پاییز و زمستان بود. چرخه‌های چندساله ۲ تا ۵ ساله و ۶ تا ۱۰ ساله نیز نوسانات قابل توجه داشتند. شدت ضرایب موجک از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ افزایش یافته و نشان‌دهنده تأثیر عوامل متعدد اقلیمی و تغییر اقلیم بر رفتار بارش است. ایستگاه کرج با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، کمینه نوسان فصلی در تابستان و بیشینه نوسان در پاییز و زمستان داشت. چرخه‌های چندساله طولانی‌تر، به ویژه ۲ تا ۳ ساله و ۵ تا ۱۰ ساله، با شدت بالا رخ دادند. از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، شدت نوسانات کاهش یافته است. در ایستگاه تبریز، بارش‌ها در زمستان و پاییز با شدت و تناوب بالاتر و در تابستان کم‌نوسان بودند. چرخه‌های چندساله ۲ تا ۴ و ۶ تا ۱۰ ساله نوسانات بارش قابل توجهی داشتند و شدت ضرایب موجک از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ افزایش یافته است. ایستگاه کرمانشاه دارای نوسانات قوی در زمستان و پاییز و ضعیف در تابستان و بهار بود. چرخه‌های چندساله بین ۲ تا ۵ و ۶ تا ۱۰ ساله مشاهده شد و شدت ضرایب موجک پس از سال ۲۰۱۰ افزایش یافته است. مقایسه با مطالعات پیشین نشان داد که پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل موجک، چرخه‌های زمانی بارش را با دقت بیشتری بررسی کرده و نوسانات فصلی و چندساله را در چندین کلان‌شهر ایران تحلیل کرده است. علاوه بر ENSO، شاخص‌های اقلیمی NAO و MO نیز بررسی شدند. نتایج با مطالعات بین‌المللی مشابه در اروپا، چین و شبه‌قاره هند همخوانی دارد، اما تمرکز بر اقلیم خشک ایران و تنوع مکانی کلان‌شهرها رویکردی نوآورانه ارائه می‌دهد. به طور کلی، تحلیل موجک نشان داد که در بیشتر ایستگاه‌ها، نوسانات کوتاه‌مدت و بلندمدت بارش با شدت متفاوت مشاهده می‌شود. ایستگاه‌هایی مانند کرمانشاه، تبریز و مشهد دارای شدت بالای ضرایب موجک در چرخه‌های ۲ تا ۱۰ ساله هستند و تحت تأثیر شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس قرار دارند، در حالی که ایستگاه‌هایی مثل اهواز و کرج رفتار نسبتاً یکنواخت دارند. افزایش شدت ضرایب موجک در بازه ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ نشان‌دهنده تأثیر تغییرات اقلیمی اخیر بر الگوهای بارش است. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد که شدت و گستره نوسانات بارش در دهه‌های اخیر با تغییرپذیری بیشتری همراه بوده است. بررسی تطبیقی بین ایستگاه‌ها بیانگر آن است که موقعیت جغرافیایی و ارتفاع نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت چرخه‌های فصلی و چندساله ایفا می‌کند. علاوه بر آن، روندهای مشاهده شده می‌تواند در مدیریت منابع آب شهری و روستایی و تدوین برنامه‌های سازگاری اقلیمی به کار گرفته شود. یافته‌ها نشان داد که ترکیب تحلیل موجک با شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس دقت بالاتری در شناسایی چرخه‌های بارش ایجاد می‌کند. در مجموع، پژوهش حاضر تصویری جامع از رفتار بارش در ایران ارائه داده و بستر مناسبی برای مطالعات آینده در زمینه تغییر اقلیم فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از تبدیل موجک پیوسته^۱ (CWT) تغییرپذیری زمانی بارش ماهانه در کلان‌شهرهای ایران را در بازه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ بررسی کرد و الگوهای فصلی و چندساله بارش را شناسایی نمود. نتایج نشان داد که الگوهای بارشی تحت تأثیر چرخه‌های فصلی (حدود یک سال) و چندساله (۳ تا ۱۰ ساله) قرار دارند و دوره‌های تناوبی با شدت بالا به‌ویژه در ایستگاه‌های تهران، کرمانشاه و مشهد مشاهده شد که با تغییرات شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس مانند ENSO و NAO هم‌زمانی دارند. در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند اهواز با ارتفاع کمتر و شرایط گرم‌تر، شدت ضرایب موجک پایین‌تر و نظم نوسانات کمتری داشتند، که نشان‌دهنده نقش مهم عوامل جغرافیایی نظیر ارتفاع، دما و عرض جغرافیایی در رفتار زمانی بارش است. تحلیل‌ها همچنین نشان داد که از سال ۲۰۱۰ به بعد، شدت نوسانات بارشی در مقیاس‌های فصلی و چندساله در بسیاری از ایستگاه‌ها افزایش یافته و این روند می‌تواند شواهدی بر تأثیرات فزاینده تغییر اقلیم باشد. نتایج تحقیق کاربردی است و شناخت دقیق الگوهای زمانی بارش را برای مدیریت منابع آب، آمادگی در برابر خشکسالی و سیلاب، تصمیم‌گیری شهری و کشاورزی ضروری می‌سازد. همچنین، پیوند یافته‌ها با شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس، قابلیت استفاده از آن‌ها در مدل‌های پیش‌بینی بارش و هشدارهای زودهنگام را فراهم می‌آورد.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، امنیت آبی، تغییرپذیری بارش، تبدیل موجک، ایران.**مقدمه**

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر امنیت آبی پرداخته‌اند. تحقیقات نشان می‌دهد، تغییر اقلیم به طور قابل توجهی الگوهای بارش و دما را تغییر داده و در نتیجه بر دسترسی به منابع آب تأثیر گذاشته است (Ahmed and Akter, 2024). این تغییرات نه تنها بر کمیت آب، بلکه بر کیفیت آن نیز اثرگذار بوده است (Van Vliet et al, 2023). تغییر اقلیم و تأثیر آن بر الگوهای بارش، به ویژه در مناطق شهری، یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی قرن حاضر است. در ایران، به عنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک، مدیریت منابع آب و درک الگوهای بارش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Modarres and Sarhadi, 2009). تغییرپذیری بارش ماهانه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر منابع آب، کشاورزی و زیرساخت‌های شهری داشته باشد. باربوسا و همکاران (Barbosa et al, 2023) در مطالعه جامعی به ارزیابی حساسیت شاخص‌های امنیت آبی نسبت به تغییر اقلیم در مناطق نیمه خشک پرداختند. نتایج آنها نشان داد شاخص‌های مرتبط با دسترسی به آب، بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات در الگوهای بارش دارند. همچنین گائو و همکاران (Gao et al, 2023) با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته، نشان دادند که تغییرات در تبخیر و تعرق می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تولید خالص اولیه و در نتیجه بر امنیت آبی داشته باشد. از سوی دیگر، مطالعات اخیر بر اهمیت تاب‌آوری سیستم‌های آبی در مواجهه با تغییر اقلیم تأکید کرده‌اند. خرازی و همکاران (Kharrazi et al, 2024) در بررسی تاب‌آوری سیستم‌های آبی شهری، به این نتیجه رسیدند که افزایش تنوع منابع آبی و بهبود مدیریت تقاضا می‌تواند تاب‌آوری این سیستم‌ها را در برابر تغییر اقلیم افزایش دهد. همچنین، سرینیواسان و همکاران (Srinivasan et al, 2024) چارچوبی پویا برای ارزیابی امنیت آبی ارائه کردند که در آن، تاب‌آوری به عنوان یکی از ارکان اصلی امنیت آبی در نظر گرفته شده است. در زمینه تحلیل سناریو، چن و همکاران (Chen et al, 2024) با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، به ارزیابی تأثیرات

سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر امنیت آبی منطقه‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان داد که حتی تغییرات اندک در الگوهای اقلیمی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر شاخص‌های امنیت آبی داشته باشد. با این حال، علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه ارزیابی حساسیت و تاب‌آوری شاخص‌های امنیت آبی، هنوز خلأهایی در این حوزه وجود دارد. به عنوان مثال وندر و گوپتا (Van der Gupta, 2024) بر ضرورت ایجاد پل ارتباطی میان علم، سیاست و عمل در زمینه امنیت آبی تأکید کرده‌اند. همچنین، مطالعه تایی و کخ (Taie and Koch, 2024) با استفاده از مدل‌های ترکیبی موجک، شبکه عصبی و نگاشت چارکی، نشان می‌دهد که تحلیل دقیق روندهای بارش در مقیاس منطقه‌ای می‌تواند درک بهتری از تغییرات اقلیمی فراهم کند و زمینه را برای سیاست‌گذاری بهتر در حوزه منابع آبی فراهم سازد. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تحقیقات زیادی در زمینه تحلیل تغییرات بارش در ایران انجام شده است. به عنوان نمونه، پژوهش طلایی و طبری (Talaie and tabari, 2011) روند بارش سالانه و فصلی را در ۴۱ ایستگاه ایران طی سال‌های ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۵ با استفاده از روش‌های آماری مختلف بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که در حدود ۶۰ درصد ایستگاه‌ها روند کاهشی بارش سالانه وجود داشته و بیشترین روند منفی معنی‌دار در شمال غرب ایران و در فصل زمستان مشاهده شده، در حالی که در فصل تابستان در برخی ایستگاه‌ها مانند سمنان و مشهد افزایش بارش ثبت شده است. همچنین، مدرس و سرحدی (Modarres and Sarhadi, 2009).

در مطالعه‌ای به تحلیل روند مکانی و زمانی بارش سالانه و حداکثر بارش ۲۴ ساعته در ۱۴۵ ایستگاه باران‌سنجی ایران پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داد که بارش سالانه در ۶۷ درصد ایستگاه‌ها روند کاهشی و حداکثر بارش ۲۴ ساعته در ۵۰ درصد ایستگاه‌ها روند افزایشی دارد. این روندها از دهه ۱۹۷۰ آغاز شده‌اند که می‌تواند نشان‌دهنده مراحل اولیه تغییر اقلیم در ایران باشد. از منظر مبانی نظری، امنیت آبی مفهومی چندبعدی شامل دسترسی، کیفیت، و تاب‌آوری منابع آبی است که در برابر نوسانات اقلیمی و

نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، کوهستانی و گرم‌خشک بوده است. چنین انتخابی، امکان تحلیل مقایسه‌ای رفتار بارش در شرایط اقلیمی متفاوت را فراهم کرده و یافته‌های پژوهش را از نظر قابلیت تعمیم‌پذیری تقویت می‌کند. از نظر بازه زمانی نیز، دوره مورد مطالعه ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ به‌گونه‌ای انتخاب شده که شامل دهه‌های دارای نوسانات شدید اقلیمی (از جمله سال‌های خشک و تر) باشد و بدین ترتیب روندها و تغییرات محتمل بارش در یک دوره معنادار اقلیمی بررسی‌پذیر گردد. منطقه مورد مطالعه، شامل ایستگاه‌های سینوپتیک تهران، مشهد، اصفهان، تبریز، کرج، کرمانشاه، اراک و اهواز است که هر کدام نماینده اقلیم‌های متفاوتی در ایران می‌باشند. به طور کلی تهران، کرج، کرمانشاه و اراک در اقلیم نیمه‌خشک با بارش سالانه متوسط حدود ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر واقع شده‌اند. این مناطق دارای فصل‌های بارانی مشخص، عمدتاً در زمستان و بهار هستند. مشهد و تبریز به‌عنوان مناطق با اقلیم کوهستانی و نیمه‌خشک سردتر، بارش نسبتاً بیشتری در فصل زمستان دارند و نوسانات بارش در این مناطق به دلیل ارتفاع و جغرافیا بیشتر است. اصفهان اقلیم خشک و بیابانی دارد و میزان بارش سالانه در آن کم و پراکنده است، که این شرایط باعث اهمیت تحلیل دقیق داده‌های بارش برای شناسایی روندها و نوسانات می‌شود. اهواز در اقلیم گرم و مرطوب جنوب غربی کشور واقع شده است و بارش سالانه در این منطقه بیشتر و به شکل باران‌های موسمی تابستانی و پاییزی است. با توجه به تفاوت‌های اقلیمی این ایستگاه‌ها، مطالعه این نقاط امکان بررسی تأثیرات اقلیمی متنوع بر پارامترهای بارش را فراهم کرده و می‌تواند نتایج جامع‌تری ارائه دهد (شکل ۱).

تغییرات بلندمدت، نیازمند تحلیل‌های ترکیبی و بین‌رشته‌ای است. چارچوب‌های مفهومی اخیر، بیش از پیش بر رویکردهای سازگاری محور و یکپارچه در مدیریت منابع آبی تأکید دارند. بر اساس مرور علمی منابع، مشخص است که روش‌های نوین آماری و محاسباتی همچون مدل‌های هیدرولوژیکی و یادگیری ماشین توانسته‌اند بینش‌های عمیق‌تری درباره تأثیر تغییر اقلیم بر الگوهای بارش و امنیت آبی ارائه دهند. با این حال، روش‌هایی مانند تبدیل موجک پیوسته که توانایی تحلیل دقیق تغییرات زمانی - مکانی را در داده‌های اقلیمی دارند، کمتر در مطالعات داخل ایران، به‌ویژه در مناطق شهری، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف این پژوهش، بررسی تغییرپذیری بارش ماهانه در مناطق شهری ایران با استفاده از تبدیل موجک پیوسته است. این مطالعه تلاش دارد با رویکردی چندمقیاسی، به تحلیل روندهای زمانی - مکانی بارش، شناسایی الگوهای پنهان و بررسی تغییرات دوره‌ای در مقیاس‌های مختلف زمانی بپردازد. نوآوری تحقیق حاضر در بهره‌گیری از تکنیک موجک برای تحلیل دقیق و جامع داده‌های بارش در مناطق شهری و ارائه بینشی عمیق‌تر از تأثیرات تغییر اقلیم بر رفتار بارش در ایران نهفته است.

منطقه‌ی مورد مطالعه

در این پژوهش، ۸ ایستگاه سینوپتیک تهران، مشهد، اصفهان، تبریز، کرج، کرمانشاه، اراک و اهواز انتخاب شده‌اند. دلیل انتخاب این ایستگاه‌ها، برخورداری از آمار بلندمدت و پیوسته بارش (با کمترین داده‌های مفقوده)، پراکندگی جغرافیایی نسبتاً مناسب در پهنه‌های مختلف کشور، و نمایندگی اقلیم‌های متنوع ایران از جمله اقلیم‌های



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های هدف در ایران

Fig. 1: Location of target stations in Iran

مواد و روشها

داده‌ها و پیش‌پردازش

داده‌های بارش ماهانه از ایستگاه‌های منتخب توسط سازمان هواشناسی کشور در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ جمع‌آوری

شدند. به منظور حفظ کیفیت داده‌ها، پیش‌پردازش جامعی روی داده‌ها انجام شد و همچنین اطلاعات بارش ماهانه از سازمان هواشناسی کشور برای ۸ ایستگاه فوق دریافت شد. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1: Characteristics of the studied stations

| Statistical Period | Elevation (m) | Longitude | Latitude | Station Name |
|--------------------|---------------|-----------|----------|--------------|
| 1980-2020 | 1191 | 51.32 | 35.69 | Tehran |
| 1980-2020 | 995 | 59.61 | 36.26 | Mashhad |
| 1980-2020 | 1550 | 51.65 | 32.63 | Isfahan |
| 1980-2020 | 1361 | 46.29 | 38.08 | Tabriz |
| 1980-2020 | 1320 | 50.94 | 35.84 | Karaj |
| 1980-2020 | 1322 | 47.06 | 34.31 | Kermanshah |
| 1980-2020 | 1758 | 49.70 | 34.10 | Arak |
| 1980-2020 | 23.5 | 48.68 | 31.32 | Ahvaz |

- فرمول اصلی تبدیل موجک پیوسته به شکل رابطه ۱ است: رابطه ۱)

$$x(t)\varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \int_{-\infty}^{\infty} = W_x(a, b)$$

که در آن:

$x(t)$ سیگنال ورودی (بارش) است،

ϕ^* تابع موجک مادر (مزدوج مختلط)،

a مقیاس است که بر فرکانس تأثیر می‌گذارد (هرچه a بزرگتر، فرکانس پایین‌تر)

b پارامتر انتقال زمانی است که موقعیت زمانی تحلیل را مشخص می‌کند.

- طیف قدرت موجک $^2(WPS)$ برای نشان دادن میزان انرژی در هر مقیاس زمانی استفاده شده است.

- محدوده $^2(COI)$ برای حذف اثرات مرزی و تفسیر نتایج در محدوده با اطمینان بالا مشخص شد.

اجرای تحلیل

- داده‌های بارش ابتدا در نرم‌افزار MATLAB وارد و پیش‌پردازش شدند، شامل جایگزینی داده‌های مفقود و

اصلاح داده‌های پرت

- سپس تبدیل موجک پیوسته با موجک Morlet برای مقیاس‌های زمانی از ماه تا چند سال اجرا شد تا بتوان الگوهای فصلی و بین‌سال را استخراج کرد،

- طیف قدرت موجک تولید و تحلیل گردید تا دوره‌های زمانی که بارش انرژی بیشتری دارند شناسایی شود

- دامنه تأثیر مشخص شد تا نتایج در نواحی با اعتبار بالا گزارش شوند،

اعتبارسنجی داده‌ها با استفاده از آزمون‌هایی مانند پتیت و من-کندال انجام شد. داده‌های پرت حذف شده و تنها ایستگاه‌هایی با داده‌های پیوسته وارد تحلیل شدند.

- شناسایی داده‌های گمشده با استفاده از روش‌های آماری مانند تحلیل روند زمانی و جایگزینی آن‌ها با میانگین متحرک چند دوره‌ای یا روش‌های پیشرفته‌تر مانند تخمین بر پایه همبستگی با ایستگاه‌های مجاور.

- شناسایی داده‌های پرت یا ناهمگون با آزمون‌هایی نظیر آزمون گرافیکی جعبه‌ای (Boxplot) و روش‌های آماری مثلاً (Z-score)

و اصلاح یا حذف آنها،

- بررسی ناهمگنی داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری مثلاً آزمون Pettitt یا (SNHT) جهت تشخیص تغییرات ناگهانی در سری‌های زمانی که می‌تواند ناشی از تغییر مکان ایستگاه، تغییر در تجهیزات یا روش‌های اندازه‌گیری باشد،
- نرمال‌سازی داده‌ها در صورت لزوم برای یکسان‌سازی مقیاس‌ها.

روش تحلیل موجک

تحلیل موجک پیوسته (CWT) ابزاری قدرتمند برای تحلیل داده‌های سری زمانی غیرایستا است که اجازه می‌دهد تغییرات همزمان در حوزه‌های زمان و فرکانس مورد بررسی قرار گیرد.

- انتخاب موجک مادر: در این مطالعه، موجک Morlet به دلیل شکل موج نوسانی و پشتیبانی تحلیلی که دارد، انتخاب شده است. این موجک امکان تحلیل فرکانس‌های مختلف را با وضوح زمانی مناسب فراهم می‌کند.

فصل تابستان چون تقریباً خشک بی بارش است کمینه نوسان در فصل تابستان بیشینه نوسان فصلی بارش در فصل زمستان و سپس پاییز مشاهده شده است. در چرخه‌های چندساله و طولانی‌تر بیشترین نوسان در دوره‌های ۳ تا ۴ ساله و ۸ تا ۱۰، با شدت و قدرت مشاهده شده است که این عامل با الگوهای آب و هوایی و بزرگ مقیاس اتمسفری در ارتباط است. ارزیابی نوسانات در شدت ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف زمانی در بازه‌ی زمانی مورد بررسی از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۰۵ شدت ضرایب موجک که دوره‌هایی از رفتارهای تناوبی قوی‌تر یا ضعیف‌تر در بارش را منعکس می‌کند در نوسان بوده اما از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۲۰ از شدت و قدرت بیشتری در مقیاس‌های کوتاه (فصلی) و بلند (چند ساله) رخ داده است؛ به طور کلی نتایج تحلیل موجک در نوسان بودن الگوهای فصلی و چندساله در ایستگاه مذکور طی بازه‌ی زمانی مشخص موید شدت تغییر اقلیم در چند دهه اخیر بوده است.

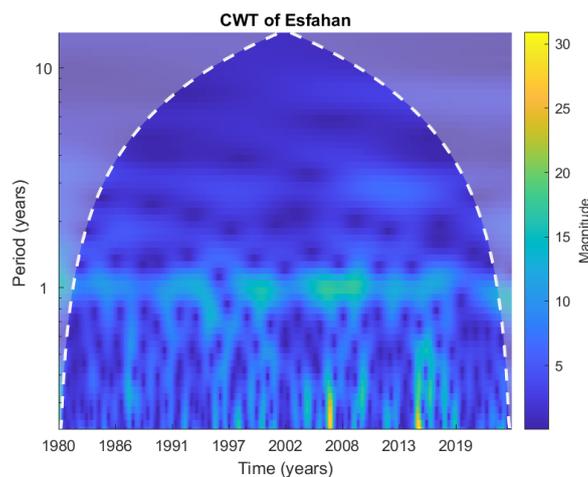
- تحلیل‌های آماری تکمیلی برای بررسی معنی‌داری نوسانات انجام گرفت.

اعتبارسنجی

- نتایج به دست آمده با داده‌های مستقل از منابع دیگر مانند تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مطالعات پیشین مقایسه و تطبیق داده شدند،
- اعتبارسنجی داخلی با استفاده از آزمون‌های آماری انجام گرفت تا اطمینان حاصل شود که الگوهای استخراج شده ناشی از داده‌های واقعی است نه خطاهای اندازه‌گیری،
- همچنین، مقایسه نتایج با تحقیقات مشابه در منطقه به ارزیابی صحت روش و یافته‌ها کمک کرد.

بحث و نتایج

مشاهدات نشان می‌دهد شکل ۲ که الگوهای فصلی بارش کوتاه‌مدت (۱ ساله) در ایستگاه اصفهان دارای نوسان و تناوب‌های قوی با توجه به اقلیم خشک ایستگاه مذکور در

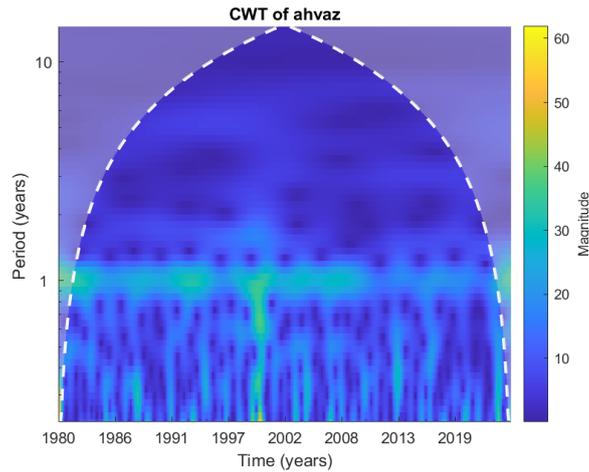


شکل ۲: نمودار تبدیل موجک ایستگاه اصفهان (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 2: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Isfahan station based on precipitation data from 1980 to 2020.

بازه‌ی زمانی را مورد مطالعه را به دو نیمه تقسیم کنیم شدت ضرایب موجک با تغییرات بوده و نوسانات در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه (۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰) و در نیمه دوم تغییرات ضرایب موجی شدت و نوسان بیشتری داشته که مستقناً از تغییر اقلیم نبوده است. به طور کلی نتایج تحلیل موجک در چند دهه اخیر در ایستگاه مذکور نیز همانند سایر ایستگاه‌ها هم در تناوب‌های فصلی، سالانه و همچنین در چرخه‌های چندساله با توجه شدت تغییر اقلیم با نوسان همراه بوده است.

ارزیابی الگوهای فصلی بارش کوتاه‌مدت حدوداً یک‌ساله همان‌طور که در شکل ۳ کاملاً مشخص است با نوسانات همراه است رفتار نوسانات فصلی و چندساله در سری‌های زمانی ایستگاه اهواز در نظر گرفته شده در این بررسی، دارای بی‌نظمی زیادی به‌ویژه در دامنه نوسانات است. اما این نوسانات بی‌نظمی بارش در الگوهای فصلی و سالانه نسبت به سایر ایستگاه‌های مرتفع از نوسان کمتری برخوردار است دلیل این امر هم به موقعیت جغرافیایی و ارتفاع کم این ایستگاه است. از لحاظ تغییرات زمانی اگر

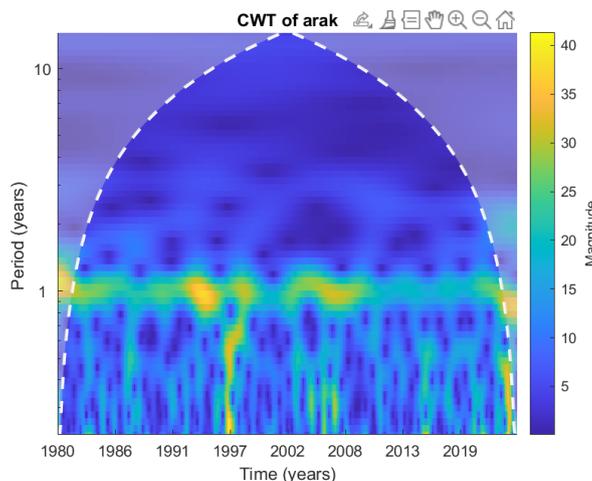


شکل ۳: نمودار تبدیل موجک ایستگاه اهواز (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 3: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Ahvaz station based on precipitation data from 1980 to 2020

در هر مقیاس و موقعیت از یک سیگنال هستند، در مقیاس‌های مختلف زمانی به‌طور معناداری با تغییرات رخ داده در الگوهای بارشی همراه بوده‌اند. پس بنابراین در ایستگاه مذکور نوسانات کوتاه مدت بارش یا همان فصلی و نوسانات بازه زمانی طولانی‌تر یا به عبارتی چندین ساله با تغییرات مواجه است که تحت تاثیر دگرگونی اقلیمی بوده که این امر در دهه دوم قرن حاضر این تغییرات ملموس‌تر بوده به‌طور کلی در ایستگاه مذکور با توجه به شواهد موجود در چند دهه اخیر می‌توان زنگ خطری باشد برای نوسانات شدید و تغییرات الگوهای فصلی و سالانه در آینده نسبت به گذشته باشد.

شواهد در شکل ۴ نشان می‌دهند که در ایستگاه اراک الگوهای فصلی بارش، شامل تناوب‌های قوی یا نوساناتی که به‌طور مکرر و با شدت مشخص در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت رخ می‌دهند، مشاهده شده است که این امر حاکی از نوسانات فصلی در ایستگاه مذکور و ناشی از چرخه‌های سالانه که در دوره‌های طولانی این اتفاق با شدت بالاتری رخ داده است. این ایستگاه نیز همانند ایستگاه تهران دارای چرخه‌های چندساله بارش است که این رویداد بی‌تأثیر از الگوهای بزرگ‌مقیاس یا همان گردش عمومی جو نمی‌باشد. بررسی تغییرات زمانی در بازه ۱۹۸۰ تا دهه‌ی اول قرن حاضر نشان می‌دهد که ضرایب موجک (Wavelet Coefficients) که بیانگر میزان انرژی یا اطلاعات موجود

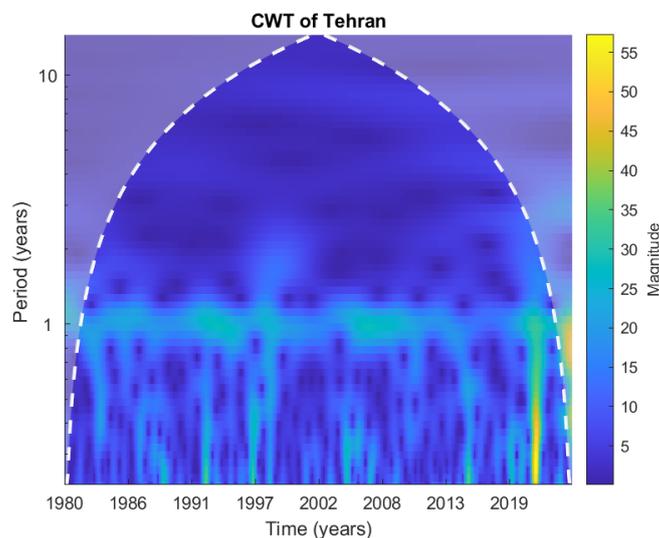


شکل ۴: نمودار تبدیل موجک ایستگاه اراک (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 4: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Arak station based on precipitation data from 1980 to 2020

ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف زمانی دیده می‌شود، که دوره‌هایی از رفتارهای تناوبی قوی‌تر یا ضعیف‌تر در بارش را منعکس می‌کند. در سال‌های اخیر (بعد از ۲۰۱۰)، به نظر می‌رسد که افزایش قابل توجهی در شدت مقیاس‌های کوتاه (فصلی) و بلند (چند ساله) رخ داده است، که احتمالاً ناشی از اثرات تغییر اقلیم در این دوره است. نتایج تحلیل موجک تهران نشان می‌دهد هم تناوب‌های سالانه (فصلی) و هم چرخه‌های چند ساله دارند و در برخی دوره‌ها، نوسانات قوی‌تری مشاهده می‌شود. سیگنال‌های قوی‌تر در چند دهه اخیر احتمالاً نشان‌دهنده تغییراتی در الگوهای بارش هستند که ممکن است با نوسانات اقلیمی یا پدیده‌های جوی بزرگ مقیاس مرتبط باشند.

در شکل ۵ الگوهای فصلی با تناوب‌های قوی در دوره‌های کوتاه‌مدت (حدود ۱ سال) که با مناطق زرد/سبز روشن در پایین نمودار نشان داده شده‌اند، مشاهده می‌شود. این مناطق نمایانگر نوسانات فصلی هستند که احتمالاً به چرخه‌های سالانه بارش مربوط می‌شوند. چرخه‌های چند ساله در دوره‌های طولانی‌تر، به‌ویژه بین ۲ تا ۴ سال و ۵ تا ۱۰ سال، نواحی با قدر بالاتر مشاهده می‌شود. این مناطق می‌توانند نشان‌دهنده وجود چرخه‌های چند ساله در بارش باشند که احتمالاً با پدیده‌های بزرگ مقیاس آب و هوایی مانند پدیده ال‌نینو-نوسان جنوبی (ENSO) یا دیگر عوامل اقلیمی طولانی‌مدت مرتبط هستند. تغییرات دهه‌ای از اوایل دهه ۱۹۸۰ تا حدود سال ۲۰۱۰، نوسانات در شدت

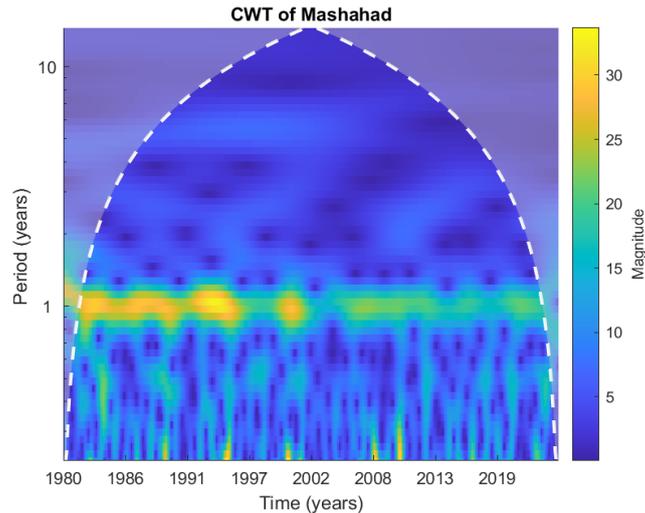


شکل ۵: نمودار تبدیل موجک ایستگاه تهران (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 5: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Tehran station based on precipitation data from 1980 to 2020

الگوهای اقیانوسی و شرایط جوی متفاوت باشد که بر رفتار بارش تأثیر می‌گذارد. در بررسی دوره زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰، داده‌ها نشان می‌دهند که شدت و قدر ضرایب موجک به طور واضح افزایش یافته است، به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی کوتاه و بلند. این نتایج به ما می‌گویند که بارش‌ها در ایستگاه مشهد تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارند و نوسانات فصلی و چندساله در این منطقه وجود دارد. تحلیل موجک می‌تواند به ما در درک بهتر روندهای آب و هوایی و مدیریت منابع آبی کمک کند.

در شکل ۶ الگوی فصلی و سالانه بارش به همراه قدر ضریب موجک در ایستگاه مشهد به تصویر کشیده شده است. بررسی این نقشه نشان‌دهنده وجود نوسانات مشخص در بارش‌ها در طول سال است. به طور خاص، فصل‌های پاییز و زمستان با شدت بارش‌های بیشتری نسبت به بهار و تابستان همراه هستند. این الگو نشان‌دهنده تأثیرات جوی متغیر و الگوهای فشار در مناطق اطراف و فراتر از آن است. در بازه‌های زمانی چندساله، به‌ویژه در چرخه‌های ۲ تا ۵ ساله و ۶ تا ۱۰ ساله، نوسانات قابل توجهی در بارش‌ها مشاهده می‌شود. این نوسانات می‌تواند ناشی از تغییر اقلیم،

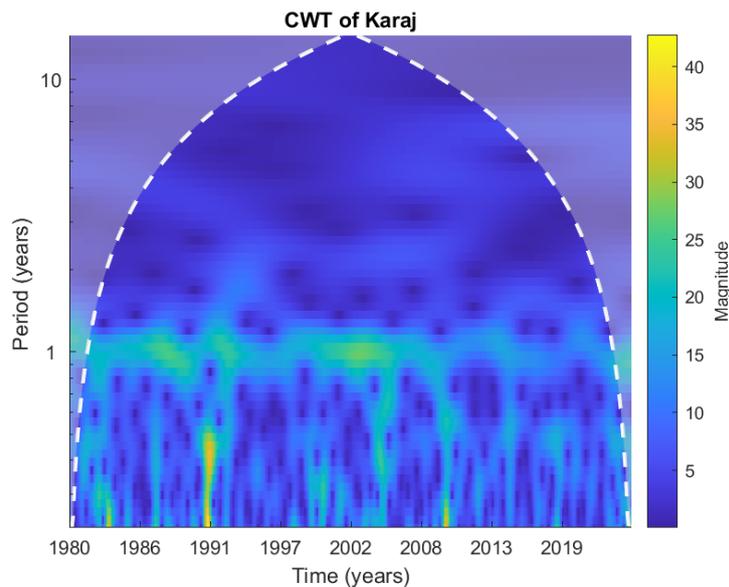


شکل ۶: نمودار تبدیل موجک ایستگاه مشهد (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 6: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Mashhad station based on precipitation data from 1980 to 2020

براساس تغییرات زمانی نوسانات در شدت ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف زمانی که دوره‌هایی از رفتارهای تناوبی قوی‌تر یا ضعیف‌تر در بارش را منعکس می‌کند. در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۱۰ نوسانات در ایستگاه مذکور با قدر بالاتر در مقیاس‌های کوتاه (فصلی) و بلند (چند ساله) رخ داده است اما از بعد سال ۲۰۱۰ تا سال ۲۰۲۰ از شدت روند این نوسانات مقداری کاهش یافته است.

شکل ۷ نتایج در الگوهای فصلی بارش (یک ساله) یا همان تناوب‌های قوی در ایستگاه کرج با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک این منطقه کمینه نوسان الگوهای فصلی بارش مربوط به فصل تابستان و بیشینه نوسان این الگو به ترتیب پاییز و زمستان مشاهده شده است. و همچنین چرخه‌های چندساله بازه‌ی زمانی طولانی‌تر بخصوص ۲ تا ۳ ساله و ۵ تا ۱۰ ساله، با شدت بالا اتفاق افتاده است که همانند سایر یاخته‌ها بی‌تاثیر از دگرگونی‌های اقلیمی نبوده. نتایج

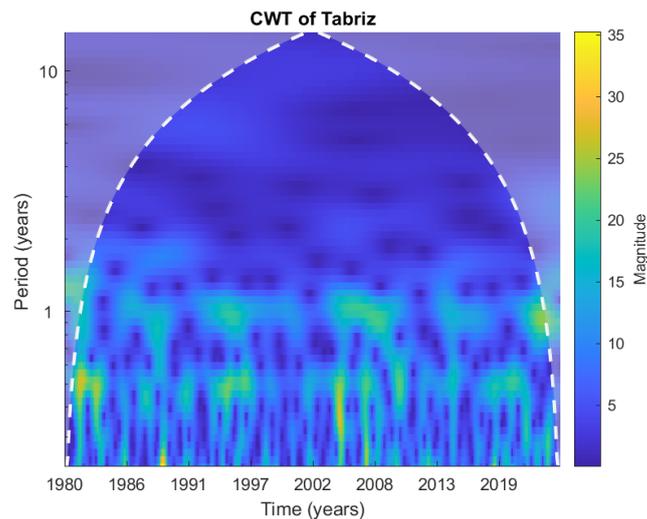


شکل ۷: نمودار تبدیل موجک ایستگاه کرج (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 7: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Karaj station based on precipitation data from 1980 to 2020

توجهی افزایش یافته است، به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی کوتاه (فصلی) که نوسانات بارش را به وضوح نمایان می‌کند. ضرایب موجک قوی در ایستگاه مشهد از ابتدای دوره تا سال ۱۹۹۷ در مقیاس سال (دوره‌های حدود ۱ تا ۲ سال) نشان‌دهنده وقوع پدیده‌هایی با چرخه‌های زمانی کوتاه‌مدت و تکرار شونده در این بازه زمانی است. این ضرایب موجک با رنگ‌های زرد و نارنجی در این مقیاس‌ها دیده می‌شوند که بیانگر شدت بالای تغییرات یا انرژی در این دوره‌ها هستند، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که ایستگاه تبریز با الگوهای بارشی پیچیده‌ای مواجه است که می‌تواند بر تأمین آب و مدیریت منابع طبیعی تأثیرگذار باشد. شناخت این نوسانات و چرخه‌ها می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتری برای مقابله با چالش‌های مربوط به آب و هوا و تغییر اقلیم کمک کند.

در شکل ۸ الگوی فصلی و سالانه بارش به همراه قدر ضریب موجک در ایستگاه تبریز نشان داده شده است. بررسی این نقشه بیانگر نوسانات بارش در طول سال است. بارش‌ها در فصل‌های زمستان و پاییز با شدت و تناوب بیشتری مشاهده می‌شوند، در حالی که تابستان‌ها معمولاً خشک‌تر و کم‌بارش‌تر هستند کمتر نوسان دارند. این الگو می‌تواند ناشی از تأثیرات جوی و الگوهای اقیانوسی خاص منطقه باشد که بر دینامیک بارش تأثیرگذارند. در بررسی چرخه‌های چندساله، به ویژه در بازه‌های ۲ تا ۴ ساله و ۶ تا ۱۰ ساله، نوسانات بارش قابل توجهی در ایستگاه تبریز مشاهده می‌شود. این نوسانات تحت تأثیر شرایط اقلیمی منطقه و تغییرات الگوهای جوی جهانی قرار دارند. تحلیل داده‌های بارش از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که شدت و مقدار ضرایب موجک در این دوره به طور قابل

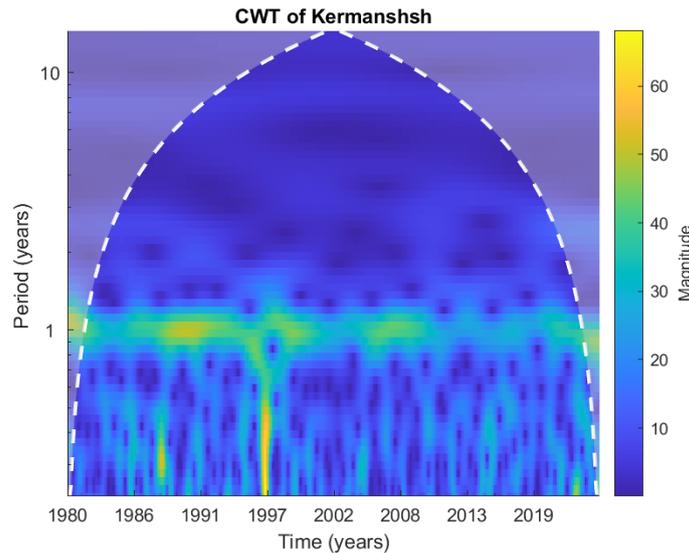


شکل ۸: نمودار تبدیل موجک ایستگاه تبریز (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 8: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Tabriz station based on precipitation data from 1980 to 2020

ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف زمانی که دوره‌هایی از رفتارهای تناوبی قوی‌تر یا ضعیف‌تر در بارش را منعکس می‌کند در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ قدر و شدت ضرایب موجک نسبت دهه‌ی دوم قرن حاضر افزایش قابل توجهی در شدت در مقیاس‌های کوتاه (فصلی) و بلند (چند ساله) رخ داده است. در نتیجه تحلیل موجک در ایستگاه کرمانشاه نشان می‌دهد هم تناوب‌های سالانه (فصلی) و هم چرخه‌های چند ساله دارند و در برخی دوره‌ها، نوسانات قوی‌تری مشاهده می‌شود.

در شکل ۹ الگوی فصلی و سالانه بارش همچنین قدر ضریب موجک را در ایستگاه کرمانشاه را نشان می‌دهد همانطور که در نقشه گویا است. در الگوی فصلی بارش دارای نوسان و تناوب‌های قوی طی فصل زمستان و پاییز و ضعیف با شدت کم طی فصل تابستان و بهار رخ داده است. در چرخه‌های چندساله و بازه‌ی زمانی بیشتر بخصوص بین چرخه ۲ تا ۵ ساله و ۶ تا ۱۰ ساله، مشاهده شده است. که این نوسانات تحت تاثیر ناهنجاری‌های الگوهای فشار در منطقه و خارج از منطقه است. از نظر تغییرات زمانی نوسانات در شدت



شکل ۹: نمودار تبدیل موجک ایستگاه کرمانشاه (CWT) از داده‌های بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰

Fig. 9: Continuous Wavelet Transform (CWT) plot of Kermanshah station based on precipitation data from 1980 to 2020

خشک‌تر تمرکز دارد که با شرایط اروپا متفاوت است. این تفاوت جغرافیایی نشان‌دهنده نوآوری پژوهش حاضر در بررسی چرخه‌های بارشی در مناطق خشک است. تورنس و همکاران (Torrence and Compo, 1998) بررسی نوسانات اقلیمی جهانی را با استفاده از تحلیل موجک مورد مطالعه قرار داده‌اند چرخه‌های زمانی مختلف را شناسایی کرده‌اند در حالی که هر دو مطالعه از روش‌های مشابه بهره برده‌اند، پژوهش حاضر با تمرکز بر ایران، به ارائه تحلیل‌های جغرافیایی و تنوع مکانی در این کشور پرداخته است، که یک تمایز مهم محسوب می‌شود. مطالعه گریستند و همکاران (Grinsted et al, 2004) ارتباط بین (ENSO) و بارش را بررسی کرد. همسویی بین این دو مطالعه در تأیید تأثیر چرخه‌های جهانی بر بارش است. با این حال، پژوهش حاضر با تمرکز بر تنوع مکانی در ایران و تحلیل تفاوت‌های اقلیمی بین کلان‌شهرهای مختلف، یک جنبه نوآورانه ارائه داده است. مطالعه ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2020) تغییرپذیری بارش در چین را با استفاده از تحلیل موجک بررسی کرد. هر دو مطالعه از تحلیل موجک برای بررسی چرخه‌های بارشی بهره برده‌اند. با این حال، پژوهش حاضر بر مناطق خشک‌تر ایران و تنوع مکانی بارش در کلان‌شهرها تمرکز دارد، در حالی که مطالعه ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2020) بیشتر بر مناطق مرطوب‌تر چین متمرکز بوده است. مطالعه کامار و همکاران (Kumar et al, 2018) نوسانات بارش در شبه‌قاره هند را با ترکیب تبدیل موجک

عزیزی و همکاران (Azizi et al, 1397) در مجله تحقیقات منابع آب ایران نشان داد که روند بارش در خراسان رضوی با استفاده از روش‌های آماری مانند من-کندال و رگرسیون خطی تحلیل شده است. برخلاف آن، مطالعه حاضر از تحلیل موجک برای بررسی جزئی‌تر نوسانات زمانی در بارش استفاده کرده است. این روش توانست چرخه‌های زمانی بارش را شناسایی کرده و عمق بیشتری به تحلیل اضافه کند. علاوه بر این، پوشش چندین ایستگاه کلان‌شهری در این پژوهش، امکان مقایسه مکانی و شناسایی تفاوت‌های منطقه‌ای را فراهم کرد، که در مطالعه عزیزی و همکاران محدود بود. و همچنین خوش‌اخلاق و همکاران (Khoshakhlagh et al, 1399) در نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی نشان داد که تأثیر نوسانات ال‌نینیو-جنوبی (ENSO) بارش‌های غرب ایران قابل توجه است. در مطالعه حاضر، علاوه بر تأثیر ENSO، ارتباط بارش با سایر شاخص‌های اقلیمی مانند نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان مدیترانه‌ای (MO) نیز تحلیل شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در مقایسه با مطالعه خوش‌اخلاق و همکاران، تحلیل هم‌زمان چندین کلان‌شهر ایران و ارائه یک دیدگاه جامع‌تر از تأثیرات اقلیمی بر الگوهای بارشی کشور است. لبات و همکاران (Labat et al, 2004) نشان داد تغییرات بارش در اروپا با استفاده از تبدیل موجک بررسی شد. اگرچه روش‌های موجک در هر دو مطالعه استفاده شده‌اند، پژوهش حاضر بر منطقه خاورمیانه با اقلیمی

مطالعات داخلی و بین‌المللی، چندین مزیت دارد: عزیزی و همکاران (Azizi et al, 1397) فقط از روش‌های آماری کلاسیک (مانند من-کندال) استفاده کرده‌اند، اما در این تحقیق با بهره‌گیری از تحلیل موجک، چرخه‌های زمانی بارش با دقت بیشتر و در چند مقیاس تحلیل شده‌اند. خوش‌اخلاق و همکاران (Khoshakhlagh et al, 1399) به تأثیر ENSO بر بارش‌های غرب کشور پرداختند، اما در این پژوهش علاوه بر ENSO، شاخص‌هایی نظیر NAO و MO نیز بررسی شده‌اند. در سطح جهانی، مطالعه (Labat et al, 2004) و همچنین ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2020) از تحلیل موجک استفاده کرده‌اند، اما تمرکز آن‌ها بر اروپا یا چین با اقلیم‌های مرطوب بوده، در حالی که این پژوهش به اقلیم خشک ایران و تنوع جغرافیایی کلان‌شهرهای آن توجه دارد. در نهایت گرینستد و همکاران (Grinsted et al, 2004) و تورنس و وبستر (Torrence and Webster, 1999) نشان داده‌اند که نوسانات اقلیمی جهانی چگونه می‌توانند بر بارش مؤثر باشند، یافته‌هایی که با الگوهای مشاهده‌شده در ایستگاه‌های ایران نیز مطابقت دارد. با این حال، پژوهش حاضر با تمرکز بر مناطق داخلی و تنوع جغرافیایی ایران، رویکردی متفاوت ارائه داده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از تبدیل موجک پیوسته (CWT) به بررسی تغییرپذیری زمانی بارش ماهانه در کلان‌شهرهای ایران پرداخت و الگوهای فصلی و چندساله بارش را در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ شناسایی و تحلیل نمود. نتایج به‌طور روشن نشان داد که الگوهای بارشی در این مناطق تحت تأثیر چرخه‌های زمانی فصلی (در حدود یک سال) و چندساله (۳ تا ۱۰ ساله) قرار دارند. دوره‌های تناوبی با شدت بالا به‌ویژه در ایستگاه‌هایی مانند تهران، کرمانشاه و مشهد ظاهر شده‌اند که با تغییرات شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس مانند نوسان جنوبی و نوسان اطلس شمالی هم‌زمانی قابل‌توجهی دارند. بررسی ضرایب موجک در این ایستگاه‌ها نیز تأثیر مستقیم و فزاینده این شاخص‌ها بر شدت نوسانات بارشی تأیید می‌کند. از سوی دیگر، در ایستگاه‌هایی مانند اهواز که ارتفاع کمتری دارند و در مناطق گرم‌تر قرار گرفته‌اند، شدت ضرایب موجک در اکثر بازه‌ها پایین‌تر بوده و نظم نوسانات کمتر است. این

و تحلیل همبستگی بررسی کرد. شباهت‌ها شامل بررسی ارتباط بارش با چرخه‌های اقلیمی و شناسایی الگوهای فصلی است. تفاوت اصلی، تمرکز پژوهش حاضر بر اقلیم خشک‌تر ایران و تحلیل بارش در مناطق کلان‌شهری است. مطالعه رودریگز و همکاران (Rodriguez et al, 2016) تأثیر نوسانات اقیانوسی بر بارش مدیترانه بررسی شد. شباهت‌ها در استفاده از تحلیل موجک و بررسی تأثیر چرخه‌های جهانی است. هر نقشه نشان‌دهنده شدت ضرایب موجک در بازه‌های زمانی مختلف است. رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز نشانگر شدت نوسانات در چرخه‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت هستند. پراکندگی زمانی و مکانی ضرایب موجک در این تصاویر می‌تواند نشانه‌ای از تأثیر شاخص‌های اقلیمی و تغییر اقلیم بر بارش باشد. در این پانل، امکان مقایسه دقیق رفتار زمانی ضرایب موجک در ایستگاه‌های مختلف کشور فراهم شده است. نوسانات کوتاه‌مدت (فصلی تا سالانه) در تمامی ایستگاه‌ها با شدت متفاوت مشاهده می‌شود. ایستگاه‌هایی مانند کرمانشاه، تبریز و مشهد دارای شدت بالای ضرایب موجک در چرخه‌های ۲ تا ۱۰ ساله هستند که می‌تواند نشانه‌ای از تأثیر شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس نظیر ENSO و NAO باشد. در مقابل، ایستگاه‌هایی مثل اهواز و کرج رفتار نسبتاً یکنواخت‌تری را در ضرایب موجک نشان می‌دهند که احتمالاً تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی خاص (ارتفاع کم، عرض جغرافیایی پایین یا اقلیم خشک‌تر) هستند. در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ افزایش چشمگیری در قدرت ضرایب موجک در برخی ایستگاه‌ها دیده می‌شود، به‌ویژه در مقیاس‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت؛ که می‌تواند با تغییرات اقلیمی اخیر هم‌راستا تلقی شود. نتایج تحلیل موجک نشان می‌دهد که شدت ضرایب موجک در بسیاری از ایستگاه‌ها، به‌ویژه در دهه دوم قرن حاضر (۲۰۱۰ به بعد)، افزایش یافته است. این افزایش ممکن است ناشی از تشدید پدیده‌های ناهنجار اقلیمی مانند نوسانات جنوبی (ENSO) یا نوسان اطلس شمالی (NAO) باشد. برای مثال، ایستگاه کرمانشاه دارای نوسانات بارشی شدیدی در چرخه‌های ۲ تا ۵ و ۶ تا ۱۰ ساله است. از طرفی، در ایستگاه اهواز، ضرایب موجک در اغلب بازه‌ها دارای شدت پایین‌تر بوده‌اند که می‌تواند بیانگر ثبات نسبی در رفتار بارش یا تأثیرپذیری کمتر از ناهنجاری‌های جوی باشد. پژوهش حاضر در مقایسه با

- از تحلیل موجک همدوسی (Wavelet Coherence) برای بررسی دقیق‌تر هم‌زمانی و علیت بین شاخص‌های اقلیمی مانند SOI، NAO، PDO و IOD و سری‌های زمانی بارش استفاده شود.

- مطالعات آینده با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی‌محور و تکنیک‌های یادگیری ماشین، به مدل‌سازی رفتار بارش در آینده با سناریوهای مختلف اقلیمی بپردازند.

- اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و فشارهای انسانی نظیر شهرنشینی، تغییر کاربری زمین، و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب بر ناپایداری بارش تحلیل شوند.

- با استفاده از خروجی این تحلیل‌ها، سامانه‌های هشدار سریع برای مدیریت بحران‌های آبی و اقلیمی در کلان‌شهرهای ایران طراحی گردد.

در نهایت، این پژوهش گامی مؤثر در درک بهتر پویایی‌های بارشی در ایران و چگونگی ارتباط آن با سیستم‌های اقلیمی جهانی بوده و می‌تواند مبنای تصمیم‌سازی در حوزه سیاست‌گذاری اقلیمی و مدیریت پایدار منابع آب قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

تفاوت‌های مکانی نشان می‌دهد که عوامل جغرافیایی مانند ارتفاع، دما و عرض جغرافیایی نقش مهمی در شکل‌گیری رفتار زمانی بارش دارند. تحلیل‌ها همچنین حاکی از آن است که از سال ۲۰۱۰ به بعد، شدت نوسانات بارشی، هم در مقیاس‌های فصلی و هم در مقیاس‌های چندساله، در بسیاری از ایستگاه‌ها افزایش یافته است. این روند می‌تواند شواهدی بر تأثیرات فزاینده تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر باشد و ضرورت برنامه‌ریزی برای مواجهه با رفتارهای ناپایدارتر و پیش‌بینی‌ناپذیرتر اقلیمی را برجسته می‌کند. از منظر کاربردی، این تحقیق نشان می‌دهد که شناخت دقیق الگوهای زمانی بارش در مقیاس‌های مختلف، ابزاری حیاتی برای مدیریت منابع آب، آمادگی در برابر خشکسالی و سیلاب، و تصمیم‌گیری در حوزه‌های شهری و کشاورزی است. تفاوت‌های مکانی و زمانی شناسایی‌شده در این پژوهش می‌تواند به تفکیک مناطق پرریسک و نیازمند مدیریت ویژه کمک کند. همچنین، پیوند یافته‌ها با شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس، قابلیت استفاده از داده‌های این شاخص‌ها در مدل‌های پیش‌بینی اقلیم و بارش را فراهم می‌آورد و پایه‌ای برای هشدارهای زودهنگام در مناطق حساس اقلیمی ایجاد می‌کند.

پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

در راستای توسعه مطالعات مشابه، پیشنهاد می‌شود:

پانوش

- 1-Continuous Wavelet Transform
- 2-Wavelet Power Spectru

- 3-Cone of Influence

References

- Ahmed, K.R. and Akter, S., 2024. Climate change and water security: A comprehensive review of impacts, adaptation strategies, and policy implications. *Water Resources Management*, v. 38(2), p. 245-270.
- Azizi, Q., Rosta, I. and Mohammadi, H., 2018. Analysis of precipitation and temperature trends in Khorasan Razavi. *Iranian Journal of Water Resources Research*, v. 14(4), p. 221-236 (In Persian).
- Barbosa, L.M. and Santos, C.A.G., 2023. Evaluating the sensitivity of water security indicators to climate variability in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, v. 618, 129001.
- Chen, X., Wang, D. and Tian, F., 2024. Machine learning approaches for assessing climate change impacts on regional water security. *Environmental Modelling & Software*, v. 161, 105568.
- Gao, H., Birkel, C., Hrachowitz, M., Teuling, A.J., Troch, P.A. and Huggenschmidt, C., 2023. Reconciling hydrological model structures with process understanding for improved water security assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 27(5), p. 1457-1476.
- Grinsted, A., Moore, J.C. and Jevrejeva, S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 11(5/6), p. 561-566.
- Kharrazi, A., Akiyama, T., Yu, Y. and Li, J., 2024. Evaluating the resilience of urban water systems under climate change scenarios. *Sustainable Cities and Society*, v. 96, 104435 (In Persian).

- Khoshakhlagh, F., Safari, B. and Mahmoodi, P., 2020. Investigating the relationship between the ENSO pattern and precipitation in western Iran. *Geography and Environmental Hazards*, v. 9(2), p. 17-35 (In Persian).
- Kumar, A., Raman, S. and Rajeevan, M., 2018. Spatiotemporal characteristics of precipitation variability over the Indian monsoon region. *Climate Dynamics*, v. 51(7-8), p. 2595-261.
- Labat, D., Ababou, R. and Mangin, A., 2004. Rainfall-runoff relations for karstic springs: Part II—Continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, v. 286(1-4), p. 59-88.
- Modarres, R. and Sarhadi, A., 2009. Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. *Research: Atmospheres*, v. 114(D3) (In Persian).
- Rodriguez-Fonseca, B., Suarez-Moreno, R. and Barroso, J., 2016. Oceanic and atmospheric variability in the Mediterranean region: A review of recent advances. *Climate Dynamics*, v. 47(3-4).
- Srinivasan, V., Konar, M. and Sivapalan, M., 2024. A dynamic framework for water security. *Water Security*, v. 15, 100112.
- Taie Semiromi, M. and Koch, M., 2024. Statistical downscaling of precipitation in northwestern Iran using a hybrid model of discrete wavelet transform, artificial neural networks, and quantile mapping. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 155(7), p. 6591-6621.
- Talaei, P.H. and Tabari, H., 2011. Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change*, v. 79(1-2), p. 1-10 (In Persian).
- Torrence, C. and Compo, G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79(1), p. 61-78.
- Torrence, C. and Webster, P.J., 1999. Interdecadal changes in the ENSO—monsoon system. *Journal of Climate*, v. 12(8), p. 2679-2690.
- Van der Zaag, P. and Gupta, J., 2024. Water security in times of global change: Bridging science, policy and practice. *Water Security*, v. 16, 100121.
- Van Vliet, M.T., Thorslund, J., Stokal, M., Hofstra, N., Flörke, M., Ehalt Macedo, H. and Mosley, L.M., 2023. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4(10), p. 687-702.
- Zhang, Y., Feng, Q., Liu, X. and Chen, J., 2020. Wavelet analysis of precipitation variability in the Yangtze River basin. *Water*, v. 12(3), 798 p.