



Investigation and Comparison of Different Methods of Trend Analysis of Rainfall in Tabriz Synoptic Station

Bahram Saeidifarzad¹ * , Vahid Nourani²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

² Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ABSTRACT: In this study, the temporal trend of monthly rainfall changes for the time period of 1951 to 2022 in Tabriz Synoptic Station was examined and compared using different methods. Nonparametric tests including Mann-Kendall test and sequential Mann-Kendall test and Şen's innovative graphical trend analysis method were used to identify the potential rainfall trend. In addition, wavelet transform and Mann-Kendall statistical tests were used to understand the main structure of the trend in rainfall as well as the time scales affecting the trend. The trend analysis methods were compared with each other to obtain a valid result. The results obtained from different methods indicate the presence of a negative trend in the precipitation changes of the Tabriz station. The results also show that the standard Mann-Kendall nonparametric test is better in this case study for producing statistically significant trends in rainfall compared to the modified Mann-Kendall test. The results of the wavelet-based analysis method and the hybrid wavelet Mann-Kendall analysis method showed that at the monthly scale, intraannual periods (2 to 8 months) with high frequency have the greatest impact on creating trends in the monthly rainfall time series of the Tabriz synoptic station. The sequential Mann-Kendall curves detected the approximate onset of a developing negative trend from 1995 to the end of the study period. The Şen graphical method also indicated a negative trend during the years 1987-2022 compared to 1951-1986, with a steeper decreasing trend for "high" rainfall values.

Review History:

Received: Apr. 27, 2023

Revised: Jun. 24, 2025

Accepted: Feb. 13, 2026

Available Online: Mar.01, 2026

Keywords:

Rainfall Trend Analysis

Mann-Kendall Tests

Wavelet Transform

Şen Graphical Method

Tabriz Synoptic Station

1- Introduction

A review of the literature indicates that various conventional methods have been employed in recent years to analyze trends in hydrological and climatic variables such as precipitation, including statistical, graphical, and wavelet-based approaches [1]. In statistical approaches, various tests are employed to identify trends in the time series of hydro-climatic variables. The Mann-Kendall test is perhaps the most widely used method for detecting monotonic trends. Its most attractive features include robustness to strongly skewed distributions, computational simplicity, and flexibility in handling nonstationary data and missing values [2]. However, a major limitation of the Mann-Kendall test is its inability to account for serial correlation [3]. Moreover, studies have shown that the Mann-Kendall test may not necessarily detect nonlinear trends [4]. Graphical methods for trend detection in time series represent simple and wellknown approaches in quantitative trend analysis and are readily accessible. However, qualitative graphical trend analysis using the Innovative Trend Analysis (ITA) method, based on the research of Şen, has been introduced more recently [5]. A graphical quantitative approach using the sequential

Mann-Kendall graphs, which allows identification of the approximate onset of an emerging trend, was proposed by Sneyers [6]. In recent years, wavelet transform has also been employed as an effective tool for trend analysis [7].

The main objective of this study is to investigate and compare potential trends and the underlying trend structure of the total monthly precipitation time series at the Tabriz synoptic station during the period 1951–2022 using various trend analysis methods. To the best of the authors' knowledge, no previous study has simultaneously applied all the aforementioned methods—together with the use of the timeseries energy parameter in two distinct applications, namely (i) a relative energy criterion for selecting the optimal wavelet and (ii) evaluating the proximity of subseries energy to that of the original time series for identifying dominant periodic components—for longterm trend analysis of monthly precipitation at a synoptic station.

2- Methodology

2- 1- Study Area and Data

In this study, long-term precipitation trends at the Tabriz synoptic station were investigated (Fig 1). Statistical records

*Corresponding author's email: b.saeidifarzad@azaruniv.ac.ir



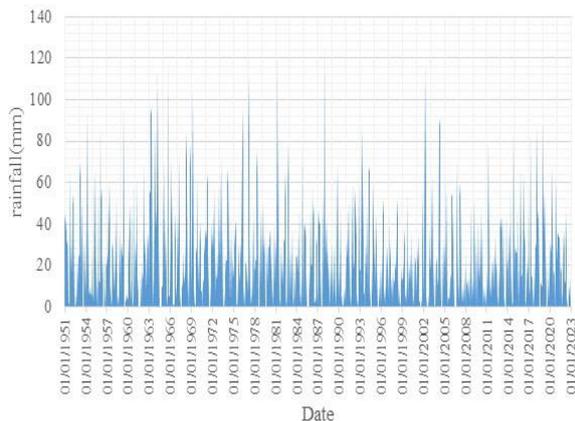


Fig. 1. Long-term variations of monthly precipitation at the Tabriz synoptic station.

over the 72-year study period indicate that the mean annual precipitation is 282 mm, with a standard deviation of 23.05 mm.

2- 2- Wavelet Transform

The continuous wavelet transform (CWT) of a continuous time signal, $x(t)$, is defined as follows [17]:

$$T(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} g^* \left(\frac{t-b}{a} \right) x(t) dt \tag{1}$$

where the symbol * denotes the complex conjugate and $g(t)$ represents the wavelet function, also referred to as the mother wavelet. By performing calculations at different scales a and in the vicinity of selected time positions b , the wavelet coefficients $T(a,b)$ are ultimately obtained. For discrete series x_p , the discrete wavelet transform is expressed as follows:

$$T_{m,n} = 2^{-m/2} \sum_{i=0}^{N-1} g(2^{-m}i - n) x_i \tag{2}$$

where m and n are integers that control the wavelet scale and translation, respectively. In the above relation, $T_{m,n}$ denotes the wavelet coefficient corresponding to the decomposed wavelet with scale parameter $a=2^m$ and translation parameter $b=2^m n$.

3- Results and Discussion

3- 1- Results of Mann–Kendall Test Analysis

To examine the autocorrelation characteristics of the dataset, the correlogram was generated using SPSS software and is presented in Figure 2. As shown in this figure, the

Table 1. Autocorrelation coefficient and Mann-Kendall test values.

ACF	Standard MK	Modified MK
0.332	-2.09	-2.39

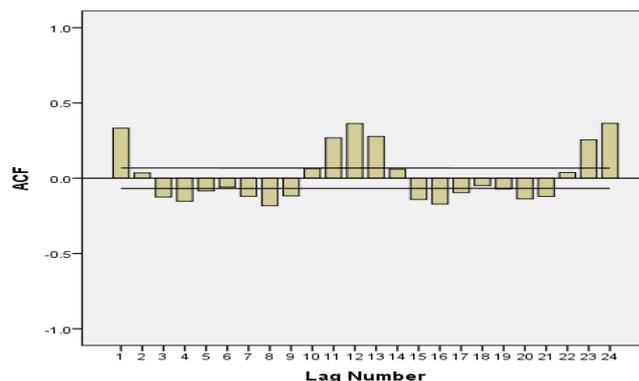


Fig. 2. Autocorrelogram of monthly precipitation data at the Tabriz Synoptic Station (1951–2022).

autocorrelation value at lag one (i.e., an ACF value of 0.332) exceeds the confidence limits and is therefore statistically significant. Accordingly, the modified Mann–Kendall test was also applied. Table 1 summarizes the autocorrelation coefficients and the results of the Mann–Kendall test (standard and modified versions) for the original time series.

3- 2- Results of Wavelet Analysis and the hybrid Wavelet–Mann–Kendall Method

To accurately analyze rainfall trends and identify the effective frequency structures at different temporal scales, the monthly rainfall time series was first decomposed using the discrete wavelet transform in the MATLAB environment. In this process, the number of decomposition levels, the treatment of signal boundary conditions, and the most suitable mother wavelet were optimally selected. Using the criterion of minimum relative energy error, the optimal wavelet for signal decomposition was identified. Among the Daubechies family, the db6 wavelet yielded the lowest relative energy error, equal to 0.48, and was therefore selected as the optimal wavelet. To determine the appropriate number of decomposition levels for the rainfall time series using the db6 wavelet, considering that the parameter $v=6$, the maximum value of $L=7$, while the minimum value of $L=2$.

The approximation and detail sub-series of the monthly rainfall time series at the Tabriz synoptic station are illustrated in Figure 3.

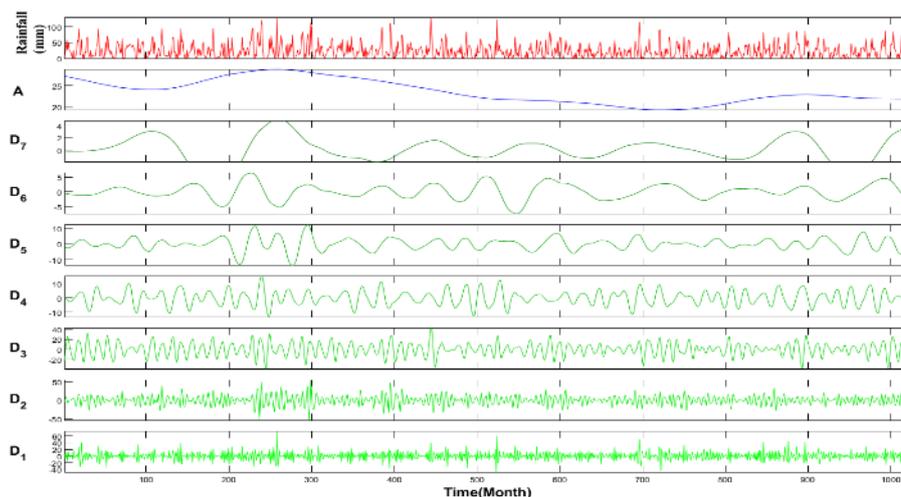


Fig. 3. Approximation (A) and detail (D) sub series of the monthly rainfall time series at the Tabriz synoptic station.

4- Conclusions

The results obtained from wavelet analysis and the hybrid wavelet–Mann–Kendall method revealed that intra-annual periods (2–8 months) with high frequency exert the greatest influence on trend formation in the monthly rainfall series of the Tabriz synoptic station. Sequential Mann–Kendall graphs demonstrated the approximate onset of a developing negative trend from 1995 to the end of the study period, as indicated by the intersection of forward and backward curves. The scatter diagram derived from Şen’s graphical method showed that all points corresponding to the annual rainfall series of the Tabriz synoptic station lie below the 5% band of the 45-degree line, indicating the existence of a negative trend during the period 1987–2022 compared to 1951–1986.

References

- [1] A.M. Ruwangika, A. Perera, U. Rathnayake, Comparison of statistical, graphical, and wavelet transform analyses for rainfall trends and patterns in Badulu Oya catchment, Sri Lanka, *Complexity*, ID 7146593, (2020) 1-13.
- [2] K. Adamowski, A. Prokoph, J. Adamowski, Development of a new method of wavelet aided trend detection and estimation, *Hydrological Processes*, 23(18) (2009) 2686-2696.
- [3] T. Partal, M. Küçük, Long-term trend analysis using discrete wavelet components of annual precipitations measurements in Marmara region (Turkey), *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(18) (2006) 1189-1200.
- [4] E. McBean, H. Motiee, Assessment of impacts of climate change on water resources – a case study of the Great Lakes of North America, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(5) (2006) 3183-3209.
- [5] Z. Şen, Innovative trend analysis methodology, *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9) (2012) 1042-1046.
- [6] R. Sneyers, On the statistical analysis of series of observations, World Meteorological Organization, Technical Note 143, WMO No. 415, (1990).
- [7] W. Wang, S. Hu, Y. Li, Wavelet transform method for synthetic generation of daily streamflow, *Water Resources Management*, 25(1) (2011) 41-57.



بررسی و مقایسه روشهای مختلف تحلیل روند بارش در ایستگاه سینوپتیک تبریز

بهرام سعیدی فرزاد^{۱*}، وحید نورانی^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران.
۲- دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰

کلمات کلیدی:

تحلیل روند بارش
آزمون های من-کندال
تبدیل موجک
روش گرافیکی شن
ایستگاه سینوپتیک تبریز

خلاصه: در این تحقیق روند تغییرات زمانی بارش ماهانه در دوره زمانی مابین سالهای ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۲ در ایستگاه سینوپتیک تبریز با استفاده از روش های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. آزمون های ناپارامتری شامل آزمون من-کندال و آزمون من-کندال دنباله ای و روش گرافیکی تحلیل روند نوآورانه شن برای شناسایی روند بالقوه بارندگی استفاده شد. علاوه بر این از تبدیل موجک و آزمون های آماری من-کندال برای پی بردن به ساختار اصلی روند در بارش و نیز مقیاس های زمانی موثر بر روند به کار گرفته شد. در تحلیل بر مبنای موجک از شاخص جدیدی به نام انرژی سری زمانی به شکل موفقیت آمیزی استفاده شد. روش های تحلیل روند با یکدیگر مقایسه شد تا نتیجه معتبری حاصل شود. نتایج حاصل از روش های مختلف نشان دهنده وجود روند منفی در تغییرات بارش ایستگاه تبریز است. همچنین نتایج نشان می دهد که آزمون ناپارامتری من-کندال استاندارد در این مطالعه موردی برای تولید روندهای آماری معنی دار بارندگی در مقایسه با آزمون من-کندال اصلاح شده بهتر است. نتایج روش تحلیل مبتنی بر موجک و روش تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال نشان داد در مقیاس ماهانه برای بارش، پریودهای درون سالانه (۲ تا ۸ ماهه) با فرکانس زیاد بیشترین تأثیر را در ایجاد روند در سری زمانی ماهانه بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز دارند. نمودارهای من-کندال دنباله ای شروع تقریبی یک روند منفی در حال توسعه از سال ۱۹۹۵ تا انتهای دوره مطالعاتی را تشخیص داد. نمودار پراکندگی روش گرافیکی شن نیز نشان دهنده وجود روند منفی طی سال های ۲۰۲۲-۱۹۸۷ نسبت به سال های ۱۹۸۶-۱۹۵۱ بوده و برای مقادیر بارش "بالا" روند کاهشی تندرتری قابل تشخیص است.

۱- مقدمه

بارش، یکی از عناصر اساسی تشکیل دهنده چرخه هیدرولوژی به شمار رفته و تغییرات آن می تواند ساختار آب و هوایی منطقه ای را دگرگون سازد، بنابراین بررسی روند بارش در مقیاس های مختلف زمانی و مکانی بخشی از تحقیقات مهندسی و مدیریت منابع آب را به خود اختصاص داده است. در حال حاضر بررسی منابع نشان می دهد انواع روش های رایج بررسی روند متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی مانند بارش در سالیان اخیر شامل روش های آماری، گرافیکی و تبدیل موجک می باشند [۱]. در روش های آماری جهت شناسایی روند در سری های زمانی متغیرهای هیدرواقلمی از آزمون های مختلفی استفاده می شود که این آزمون ها به دو دسته پارامتری و ناپارامتری تقسیم بندی می شوند. آزمون های پارامتری در تشخیص روند نسبت به آزمون های ناپارامتری از قابلیت بیشتری برخوردارند ولی هنگام

استفاده از آنها بایستی داده ها تصادفی و مستقل بوده و دارای توزیع نرمال باشند. در مقابل جهت استفاده از آزمون های ناپارامتری کافی است که داده ها تصادفی باشند و شرط نرمال بودن داده ها مطرح نیست که آزمون من-کندال نمونه ای از آزمون های ناپارامتری می باشد. آزمون من-کندال شاید گسترده ترین آزمون به کار گرفته شده در زمینه تشخیص روند یکنواخت باشد. جذاب ترین ویژگی های آن این است که در توزیع های دارای چولگی قوی بوده، محاسبه آن آسان و در مورد داده های غیرایستا و مقادیر از دست رفته انعطاف پذیر می باشد [۲]. اما یک ضعف قابل توجه آزمون من-کندال، عدم رعایت همبستگی سریالی است که اغلب موارد در داده های هیدرواقلمی مشاهده می شود [۳]. همچنین مطالعات نشان داده است که آزمون من-کندال ممکن است لزوماً روندهای غیرخطی را تشخیص ندهد [۴]. در نتیجه آزمون من-کندال اغلب در ارتباط با سایر روش ها و مدل های مربوط به مطالعات روند در هیدرولوژی به کار می رود. روش های گرافیکی تعیین روند

* نویسنده عهده دار مکاتبات: b.saeidifarzad@azaruniv.ac.ir



زیرسری‌ها براساس دو شیوه تحلیل شامل روش تحلیل مبتنی بر موجک و روش تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال مورد بررسی قرار گرفت. معیار جدیدی بر مبنای خطای نسبی انرژی بین سری اصلی و سری تقریب برای تعیین بهینه مشخصه‌های موجک به کار گرفته شد. همچنین از شاخصی به نام انرژی سری زمانی برای صحت‌سنجی مولفه‌های دوره‌ای غالب برای روند مشاهده شده مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه از روش من-کندال دنباله‌ای در خصوص تعیین موثرترین مولفه تناوبی و نیز زمان شروع روند استفاده شد و در انتها روش گرافیکی شن برای تصویرسازی کیفی از روند طولانی مدت بارش بکار گرفته شد. تاجایی که نگارندگان مقاله اطلاع دارند در یک مطالعه‌ای که در آن از تمام روش‌های ذکر شده در فوق به شکل همزمان (همراه با استفاده از پارامتر انرژی سری زمانی در دو کاربرد شامل معیار انرژی نسبی برای تعیین موجک بهینه و نیز میزان نزدیکی انرژی سری‌ها به میزان انرژی سری زمانی اصلی جهت تعیین مولفه‌های تناوبی غالب) برای تحلیل روند درازمدت بارش ماهانه در یک ایستگاه سینوپتیک استفاده شود، تاکنون انجام نگرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

در این مطالعه روند تغییرات بارندگی درازمدت ایستگاه سینوپتیک تبریز واقع در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۵ دقیقه با ارتفاع ۱۳۶۴ متر از سطح دریا که از سال ۱۹۵۱ میلادی فعال می‌باشد مورد بررسی قرار گرفت. نمودار سری زمانی بارش ماهانه این ایستگاه مطابق شکل ۱ می‌باشد. آمارهای این ایستگاه در طی ۷۲ سال نشان می‌دهد میانگین بارندگی سالانه در این ایستگاه ۲۸۲ میلی متر و انحراف از معیار آن ۲۳/۰۵ میلی متر در طی این دوره می‌باشد.

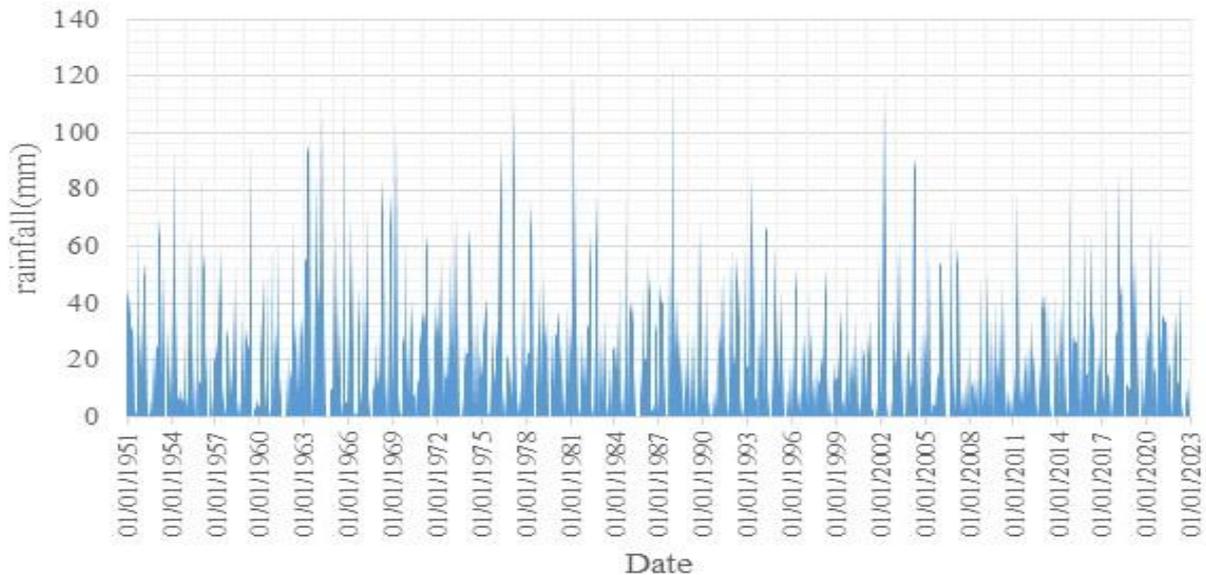
۲-۲- تبدیل موجک

تبدیل موجک^۲ یک روش جدید برای تحلیل زمان-فرکانس سیگنال‌های غیرایستا می‌باشد. این تبدیل انعطاف‌پذیری بین مقیاس زمان و فرکانس را که در تبدیل فوری وجود نداشت، فراهم می‌کند. موجک‌ها امکان تحلیل سیگنال‌ها در سطوح مختلف از مقیاس زمان را فراهم می‌آورند. تبدیل موجک یک سیگنال زمانی پیوسته، $x(t)$ ، بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

در سری‌های زمانی موضوعی ساده در تحلیل کمی روند (مانند روش استفاده از میانگین متحرک) می‌باشند که شناخته شده و در دسترس هستند ولی تحلیل کیفی از روند به صورت گرافیکی با استفاده از روش تحلیل روند نوآورانه^۱ بر مبنای تحقیق شن اخیراً مطرح گردیده است [۵]. روش تحلیل کمی به صورت گرافیکی با استفاده از نسخه نمودارهای من-کندال دنباله‌ای با امکان تشخیص شروع تقریبی یک روند در حال توسعه توسط Sney-ers پیشنهاد شده است [۶]. در سال‌های اخیر تبدیل موجک نیز که یک توسعه نسبتاً جدید در پردازش سیگنال است به عنوان ابزاری در تحلیل روند مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. تجزیه و تحلیل موجک به دلیل قابلیت آن برای نشان دادن ویژگی‌های محلی یک سری در حوزه‌های زمانی و فرکانس یکی از روش‌های موثر برای تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی است. تبدیل موجک قابلیت شناسایی مولفه‌های تناوبی موثر در ایجاد روند را دارد که از عهده سایر روش‌های تحلیل روند خارج است. این روش در سالیان اخیر مورد توجه محققین در علوم مرتبط با سری‌های زمانی و آمار در زمینه علوم محیطی قرار گرفته است [۸]. در ایران نیز مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است. در مطالعه سیگنال‌های متغیرهای هیدرواقليمی به خصوص در زمینه تحلیل روند می‌توان به تحقیقات تقوی و همکاران [۹]، توفانی و همکاران [۱۰]، عراقی و همکاران [۱۱] و نالی و همکاران [۱۲] اشاره کرد. در خصوص آنالیز روند بارش تحقیقات زیادی در تمام نقاط جهان انجام شده است و در ایران، مدرس و سرحدی [۱۳]، میرعباسی و دین پژوه [۱۴]، کتیرایی و همکاران [۱۵]، نورانی و همکاران [۱۶] و سایرین این زمینه را مورد بررسی قرار داده‌اند.

روش‌های مختلف تحلیل روند مزایا و معایب خاص خود را دارند. با این حال، استفاده از مجموعه‌ای از این روش‌ها و انجام تحلیل‌های مقایسه‌ای نتیجه بهتری را برای ذینفعان به همراه داشته و این امر بین تحلیلگران امر رایجی است [۱].

هدف اصلی از این مطالعه بررسی و مقایسه روندهای احتمالی و ساختار اصلی روندها در سری زمانی بارش کل ماهانه ایستگاه سینوپتیک تبریز بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۲ بوسیله روش‌های مختلف بررسی و تحلیل روند می‌باشد. ابتدا شرایط خود همبستگی داده‌های بارش ماهانه بررسی شد و در ادامه تحلیل روند با آزمون‌های مختلف من-کندال (استاندارد و اصلاح شده) انجام گرفت. سپس با اعمال تبدیل موجک به سری زمانی بارش، زیرسری‌های تقریب، جزئیات و نیز ترکیبات مختلف حاصل از این



شکل ۱. نمودار تغییرات درازمدت بارندگی ماهیانه در ایستگاه سینوپتیک تبریز

Fig. 1. Long-term variation of monthly precipitation at the Tabriz Synoptic Station.

که در آن m و n اعداد صحیح هستند که به ترتیب اندازه مقیاس و انتقال موجک را کنترل می‌کنند. در رابطه فوق $T_{m,n}$ ضریب موجک برای موجک تجزیه شده با پارامترهای مقیاس $a=2^m$ و انتقال $b=2^{mn}$ می‌باشد. این معادله در واقع یک سری زمانی کراندار را شامل می‌شود که x_i داده‌های آن، $i=0,1,2,\dots,N-1$ و N یک عدد صحیح با پایه دو است ($N=2^m$). با توجه به اینکه تبدیل موجک گسسته بر اساس لگاریتم‌گیری در مبنای دو شکل گرفته است، لذا دوره‌های تناوبی نتیجه‌گیری شده از آن نیز بر پایه توان‌های دو خواهد بود. تبدیل موجک گسسته، در هر مرحله سیگنال را به دو مولفه یا زیرسری تقریب و جزئیات تجزیه می‌کند که زیرسری تقریب^۲ (A) شامل فرکانس‌های کم و بلند مدت و زیرسری جزئیات^۳ (D) بر عکس آن است. برای مشخص کردن فرکانس هر زیرسری، باید به شماره مرحله تجزیه و نیز مقیاس زمانی داده‌های اصلی توجه نمود. یعنی به عنوان نمونه زیرسری D_2 برای داده‌های ماهانه معرف زیرسری ۴ ماهه (۲ به توان ۲ با پایه زمانی یک ماهه) و زیرسری D_2 برای داده‌های فصلی معرف زیرسری ۱۲ ماهه (۲ به توان ۲ با پایه زمانی سه ماهه) است.

2. Approximation
3. Details

$$T(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} g^* \left(\frac{t-b}{a} \right) x(t) dt \quad (1)$$

که نماد $*$ نشان دهنده مزدوج مختلط و $g(t)$ تابع موجک یا موجک مادر^۱ نامیده می‌شود. پارامتر a بعنوان یک عامل مقیاس عمل می‌کند در حالیکه b پارامتر انتقال زمانی تابع $g(t)$ است که امکان مطالعه سیگنال را حول b فراهم می‌کند. محاسبات با مقیاس‌های مختلف a و در نزدیکی بازه زمان انتخابی b انجام یافته و نهایتاً ضرایب موجک $T(a,b)$ بدست می‌آیند. در کاربردهای عملی، هیدرولوژیست‌ها سیگنال پیوسته-زمان فرآیند را در اختیار ندارند بلکه آن را به صورت یک سیگنال گسسته-زمان در دست دارند. برای سری‌های گسسته x_i تبدیل موجک دوتایی به صورت زیر خواهد بود:

$$T_{m,n} = 2^{-m/2} \sum_{i=0}^{N-1} g(2^{-m_i} - n) x_i \quad (2)$$

1. Mother wavelet

۲-۳- آزمون من-کندال

Z مثبت به دست آید، نشان دهنده افزایش در روند و در صورتی که مقادیر Z منفی باشد نشان دهنده کاهش در روند است. مقدار بحرانی Z برای سطح اطمینان ۹۵٪ برابر $1/96 \pm$ می‌باشد.

حامد و رائو [۱۹] و یو و وانگ [۲۰] روش آزمون من-کندال اصلاح شده را ارائه دادند. آنها پس از بررسی و اجرای آزمون من-کندال استاندارد بر روی داده‌های خودهمبسته با خصوصیات مختلف نشان دادند که وجود خودهمبستگی معنی‌دار در سری زمانی بر مقدار واریانس محاسبه شده در آزمون من-کندال تأثیر داشته و نتایج آن را دچار تغییرات غیرمنطقی می‌کند. لذا در این مطالعه وضعیت خود همبستگی در داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت و بر این مبنا در صورت معنی‌دار بودن خودهمبستگی از روش اصلاح شده و در صورت عدم وجود همبستگی از روش استاندارد آزمون من-کندال استفاده گردید. در این تحقیق محاسبات مربوط به تعیین مقادیر Z آزمون‌های من-کندال با استفاده از نرم افزار R انجام گرفته است.

آزمون من-کندال از جمله روش‌های ناپارامتری است که در خصوص روند و معنی‌داری آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. مراحل انجام آزمون من-کندال استاندارد به صورت زیر است [۱۸]:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

برای نقاط نمونه‌ای که به‌طور یکسان و مستقل بدون مقادیر همبسته با میانگین صفر توزیع شده‌اند، واریانس S را می‌توان با معادله زیر محاسبه کرد:

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

اگر مقادیر همبسته در نمونه وجود داشته باشد، واریانس S توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (6)$$

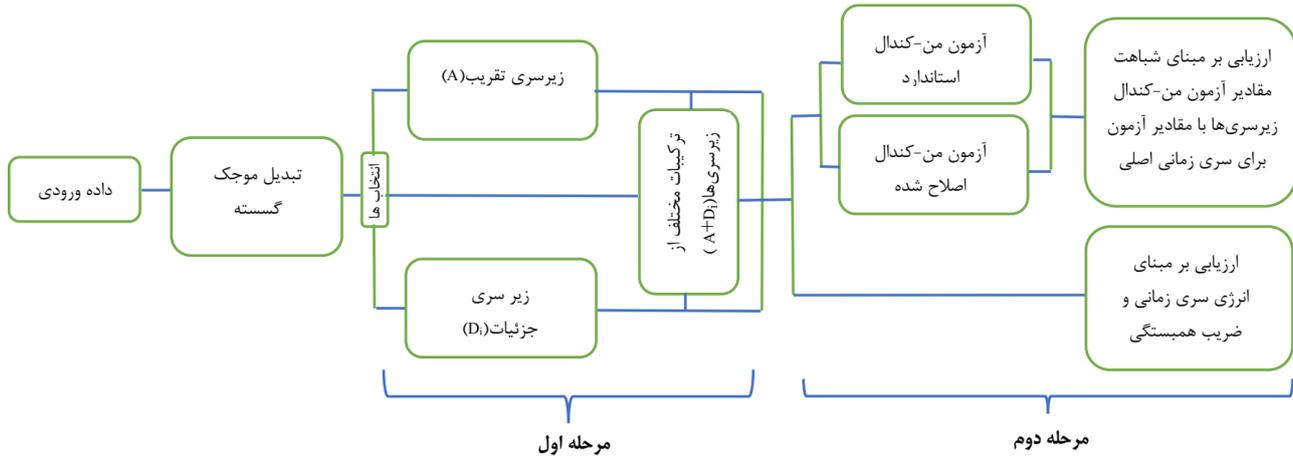
$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

۲-۴- آزمون من-کندال دنباله‌ای

نه تنها روند یکنواخت و بزرگی آن، بلکه شروع زمان روند مهم است. علاوه بر این، شناسایی تغییرات در روند در طول زمان بسیار مهم است. آزمون من-کندال دنباله‌ای^۱ که توسط Sneyers پیشنهاد شده است برای تعیین سال تقریبی شروع و یا نقاط تغییر روند در طی زمان در طول یک سری زمانی استفاده می‌شود [۶]. این آزمون دو نوع سری زمانی را تنظیم می‌کند، یکی پیش رونده $u(t)$ و دیگری عقب رونده $u'(t)$. اگر آنها از یکدیگر عبور کنند و فراتر از مقدار آستانه خاص واگرا شوند، از نظر آماری روند معنی‌داری وجود دارد. نقطه‌ای که آنها از یکدیگر عبور می‌کنند نشان دهنده سال تقریبی است که در آن روند شروع می‌شود. در اینجا، $u(t)$ یک متغیر استاندارد شده است که دارای میانگین صفر و انحراف استاندارد واحد است. بنابراین رفتار متوالی آن حول سطح صفر نوسان می‌کند. $u(t)$ همان مقادیر Z است که از اولین تا آخرین نقطه سری داده‌ها پیدا می‌شود. به‌طور مشابه، مقادیر $u'(t)$ رو به عقب محاسبه می‌شوند و از انتهای سری شروع می‌شوند. نسخه دنباله‌ای آزمون من-کندال را می‌توان به عنوان روشی موثر برای مکان‌یابی نقطه آغاز یک روند در نظر گرفت. تقاطع منحنی‌هایی که رو به جلو (u) و رو به عقب (u') را نشان می‌دهند، نشان دهنده زمانی است که یک تغییر یا روند، شروع می‌شود. چنانکه ذکر شد مقدار بحرانی برای سطح

در روابط فوق S آماره یا پارامتر آزمون من-کندال، x_i و x_j مقادیر داده‌ها در زمان‌های i و j می‌باشد که $i > j$ است، n تعداد داده سری زمانی، sgn تابع علامت، q تعداد گروه‌های همبسته و t_p نشان دهنده تعداد نقاط داده در گروه مرتبط p ام و Z مقدار عددی آزمون من-کندال می‌باشد. اگر مقدار

1. Sequential Mann-Kendall test



شکل ۲. نمودار شماتیک روش تحلیل موجک و روش تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال.

Fig. 2. Schematic diagram of the wavelet analysis method and the hybrid wavelet-Mann-Kendall analysis method.

درجه ترسیم شده با سری داده‌ها در یک ردیف شوند، روندی وجود ندارد. با این حال، اگر نقاط بدست آمده بالای ۰.۵٪ از خط ۴۵ درجه تراز شود، یک روند مثبت پیشنهاد می‌شود. در مقابل، اگر نقاط بدست آمده زیر ۰.۵٪- خط ۴۵ درجه باشد، یک روند منفی پیشنهاد می‌شود. روش گرافیکی تحلیل روند نوآورانه شن در مقایسه با روش آزمون روند من-کندال دارای چند نکته جالب توجه است. یکی این که در مقایسه با روش آزمون روند من-کندال، هیچ فرضی را شامل نمی‌شود (به عنوان مثال، رابطه همبستگی، غیرنرمال بودن و غیره). نکته دیگر این که روند داده‌های کم، متوسط و زیاد را می‌توان به راحتی با روش گرافیکی تحلیل روند شن شناسایی کرد. این روش گرافیکی می‌تواند اطلاعات مفید و بینشی قبلی (به عنوان اولین گام در جستجوی روند، پیش از تجزیه و تحلیل عددی مبتنی بر آزمون‌های آماری) را در اختیار مسئولان و طراحان قرار دهد و در سناریوهای تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق از نرم افزار Excel برای رسم نمودار گرافیکی شن استفاده شده است.

۲-۶- روش تحلیل مبتنی بر موجک و روش تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال

شکل ۲ نمودار شماتیک ساختار روش های مبتنی بر تحلیل موجک و تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال را به صورت یکجا نشان داده است. این ساختار شامل دو مرحله اصلی است. در مرحله اول با استفاده از نرم افزار

اطمینان ۰.۹۵٪ برابر $\pm 1/96$ است. از این نمودارها می‌توان برای هر ترکیبی از زیرسری جزئیات با تقریب مربوطه در مقایسه با سری زمانی اصلی جهت بررسی و مشاهده میزان نزدیکی و شباهت آنها مورد استفاده قرار داد. در این تحقیق جهت رسم نمودارهای من-کندال دنباله‌ای از نرم افزار MATLAB استفاده شده است.

۲-۵- روش گرافیکی شن

شن (Şen) یک روش گرافیکی ابتکاری اما بسیار ساده برای تشخیص روند در سری‌های زمانی معرفی کرده است [۲۱ و ۵]. روش تحلیل روند نوآورانه^۱ شن دارای مزایایی است که از مفروضات محدودکننده آزمون‌های آماری نظیر آزمون من-کندال رها شده است. این تکنیک در بسیاری از مطالعات تحقیقاتی مرتبط با اقلیم در شناسایی روندها به کار گرفته شده است. با این حال، این تکنیک تنها یک تحلیل کیفی بدون هیچ گونه مفهوم کمی یا عددی را برای روند شناسایی شده پیشنهاد می‌کند. این روش بر اساس تقسیم سری زمانی مورد نظر به دو بخش فرعی با طول مساوی به نام سریال است. هر دو سریال در ابتدا به ترتیب صعودی مرتب شده‌اند. سپس یک نمودار پراکندگی ایجاد می‌شود تا سری اول و دوم به ترتیب به عنوان نمونه‌های محور X و Y در نظر گرفته شوند. این دو مجموعه با یکدیگر مقایسه می‌شوند و اگر نقاط بدست آمده با این روش در ± 0.5 ٪ از خط ۴۵

مادر)، Log تابع لگاریتم اعشاری و n تعداد نقاط داده در یک سری زمانی ماهانه را نشان می‌دهد. بنابراین، این عدد بر اساس تعداد نقاط داده و همچنین موجک مادر بکارگرفته شده مشخص می‌شود. برای یافتن حداقل سطح تجزیه مورد نیاز M ، از لگاریتم طول هر سری زمانی که توسط وانگ و دینگ [۲۵] پیشنهاد شده است استفاده می‌شود:

$$M = INT(Log n) \quad (۹)$$

که n طول سری زمانی و INT مخفف عدد صحیح است.

آخرین انتخاب در تکمیل فرایند مرحله اول نحوه لحاظ کردن اثر مرز است. هنگام اجرای تبدیل موجک گسسته، شرایط مرزی نیز در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. بر این اساس گسترش سری زمانی در هر دو لبه مرزی مورد نیاز است. برای دستیابی به عملکرد بهینه با استفاده از ابزار تبدیل موجک علاوه بر لزوم انتخاب مناسب درجه تجزیه یک سری زمانی و نیاز به انتخاب مناسب تابع موجک مادر نیاز به انتخاب مناسب نحوه گسترش مرزی نیز می‌باشد. بر این اساس در این تحقیق از معیار خطای نسبی انرژی Er به صورت زیر استفاده شد:

$$E_r = \frac{|E_a - E_o|}{E_o} \quad (۱۰)$$

که در آن E_o انرژی کل سری زمانی اصلی و E_a انرژی کل آخرین زیرسری تقریب برای درجه تجزیه به کارگرفته شده است. انرژی کل سری زمانی نیز بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = \sum_{i=1}^n (x_i)^2 \quad (۱۱)$$

که در آن x_i سری زمانی و n طول داده‌های سری می‌باشد [۱۸]. با اعمال این انتخابها دو دسته سری با فرکانس بالا و فرکانس پایین بدست می‌آید. بر این اساس سری زمانی ورودی به دو زیرسری تقریب (A) و زیرسری جزئیات (D) تقسیم می‌شود.

MATLAB در جعبه ابزار موجک از تابع تجزیه موجک یک بعدی (با انتخاب گزینه Wavelet 1-D) برای انجام تجزیه و تحلیل موجک گسسته سیگنال‌های ورودی (سری زمانی بارش) استفاده می‌شود. روش مذکور در این مرحله با سه انتخاب شامل انتخاب موجک مادر، تعداد مراحل تجزیه و نوع برخورد با شرایط مرزی سیگنال مواجه می‌باشد.

انتخاب موجک مادر مناسب اولین مورد می‌باشد. از آنجایی که روند سری‌های زمانی هیدرولوژیکی قرار است تدریجی باشد و فرآیندهای در حال تغییر با آهستگی را نشان دهد، موجک‌های هموارتر در تشخیص رفتارهای طولانی مدت متغیر با زمان باید بهتر باشند [۲]. بر این اساس چون معمولاً موجک‌های دابچیز^۱ از موجک‌های مادر متداول به کار رفته برای تبدیل موجک گسسته در مطالعات آب و هواشناسی مبتنی بر موجک می‌باشند، بنابراین موجک‌های هموار از میان خانواده موجک مادر دابچیز برای هر مجموعه از داده‌ها امتحان شدند.

انتخاب سطح تجزیه مناسب برای سری زمانی مورد بعدی در تکمیل فرایند مرحله اول است. با توجه به اینکه در این مطالعه از تعداد نسبتاً زیادی از نقاط از مجموعه داده‌های ماهانه استفاده شده است، برای سری زمانی بارش با دوره ۷۲ ساله تعداد ۸۶۴ نقطه داده وجود دارد. لذا برای جلوگیری از سطوح غیرضروری تجزیه داده‌ها در این مجموعه داده‌های بزرگ، تعیین تعداد سطوح تجزیه مناسب لازم است. مطالعات متعددی جهت انتخاب سطح تجزیه مناسب برای سری زمانی ارائه شده است که از بین آنها می‌توان به تحقیق سانگ [۲۲] که در آن از تحلیلی بر مبنای بررسی تفاوت بین تابع انرژی سری آنالیز شده و تابع انرژی مرجع استفاده شده و یا تحقیق فتاحی و دیگران [۲۳] که بر اساس حذف نویز از سری زمانی با آنالیز غیرخطی دینامیکی ضرایب لیاپونوف می‌باشد، اشاره نمود. بر اساس مطالعات آرتیگاس و همکاران [۲۴] که شاخص‌های فعالیت ژئومغناطیسی ماهانه را تجزیه و تحلیل کردند، حداکثر سطح تجزیه L به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L = \frac{\text{Log}\left(\frac{n}{2v-1}\right)}{\text{Log}(2)} \quad (۸)$$

که در آن v تعداد لحظات محوشدگی موجک^۳ (وابسته به نوع موجک

1. Daubechies
2. Maximum Decomposition Level
3. Vanishing moments

4. Integer

شده بر روی سری زمانی اصلی بارش ماهانه نشان داد که ایستگاه تبریز مابین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۲ دارای روند منفی است.

۲-۷-۲- تایج روش تحلیل موجک و روش تحلیل ترکیبی موجک-من-

کندال

برای تحلیل دقیق روند و شناسائی ساختار فرکانسی موثر بر بارش در گام‌های زمانی مختلف، مطابق شکل ۲، در مرحله اول تجزیه سری زمانی بارش با استفاده از تبدیل موجک گسسته در محیط نرم افزار -MAT LAB انجام شد. برای انجام فرایند تجزیه سری زمانی تعداد مراحل تجزیه، نوع برخورد با شرایط مرزی سیگنال و نیز مناسب‌ترین نوع موجک مادر به صورت بهینه انتخاب شد. لذا ابتدا انتخاب وضعیت بهینه موجک مادر و سپس نحوه گسترش مرزی سیگنال انجام گرفته و نهایتاً تعداد مراحل تجزیه مشخص شد. برای انتخاب موجک مادر با توجه به توصیه‌های مطرح شده در مراجع [۱۶ و ۱۲ و ۲] از خانواده موجک مادر دابچیز برای این تحقیق استفاده شد. بر اساس معیار کمترین مقدار خطای انرژی نسبی، حالت بهینه برای انجام فرایند تجزیه سیگنال با تبدیل موجک مشخص شد. لذا موجک بهینه از میان خانواده موجک مادر دابچیز، موجک 6db (یعنی موجک ۶ از میان خانواده موجک مادر دابچیز) با کمترین میزان خطای نسبی انرژی برابر ۰/۴۸ بدست آمد. برای انتخاب تعداد مراحل تجزیه مناسب برای سری زمانی بارش بر مبنای موجک 6db، با توجه به اینکه مقدار ۱۷ برابر ۶ (چون از 6db استفاده می‌شود) است، از فرمول ۸ مقدار حداکثر L برابر ۷ و از فرمول ۹ مقدار حداقل L برابر ۲ بدست آمد. زیرسری تقریب و زیرسری جزئیات برای ورودی سری زمانی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک تبریز در شکل ۴ نشان داده شده است.

سیگنال فرعی A در هر مقیاس زمانی نشان‌دهنده روند هموارسازی

در مرحله دوم مطابق شکل ۲، از دو شیوه تحلیل بر مبنای نتایج حاصل از ابزار موجک جهت شناسائی مولفه‌های تناوبی غالب در ایجاد روند، استفاده شده است. در شیوه اول که روش تحلیل موجک می باشد هر کدام از زیرسری تقریب، زیرسری‌های جزئیات و نیز ترکیبات مختلف شامل زیرسری‌های جزئیات به همراه زیرسری تقریب از لحاظ میزان انرژی سری‌ها و ضریب همبستگی آنها ارزیابی می‌شود. در شیوه دوم که روش تحلیل ترکیبی موجک -من- کندال نامگذاری شده است، آزمون من-کندال استاندارد و آزمون من-کندال اصلاح‌شده به هر کدام از زیرسری تقریب، زیرسری‌های جزئیات و نیز ترکیبات مختلف آنها اعمال می‌شود. این ترکیبات برای روشن شدن خواص سری‌های زمانی از طریق تحلیل چندتفکیکی کمک می‌کند. در انتهای مرحله دوم نتایج هر کدام از شیوه‌های اشاره شده مورد ارزیابی قرار گرفته و نتیجه‌گیری نهایی صورت می‌گیرد.

۲-۷-۲- نتایج و تحلیل روی نتایج

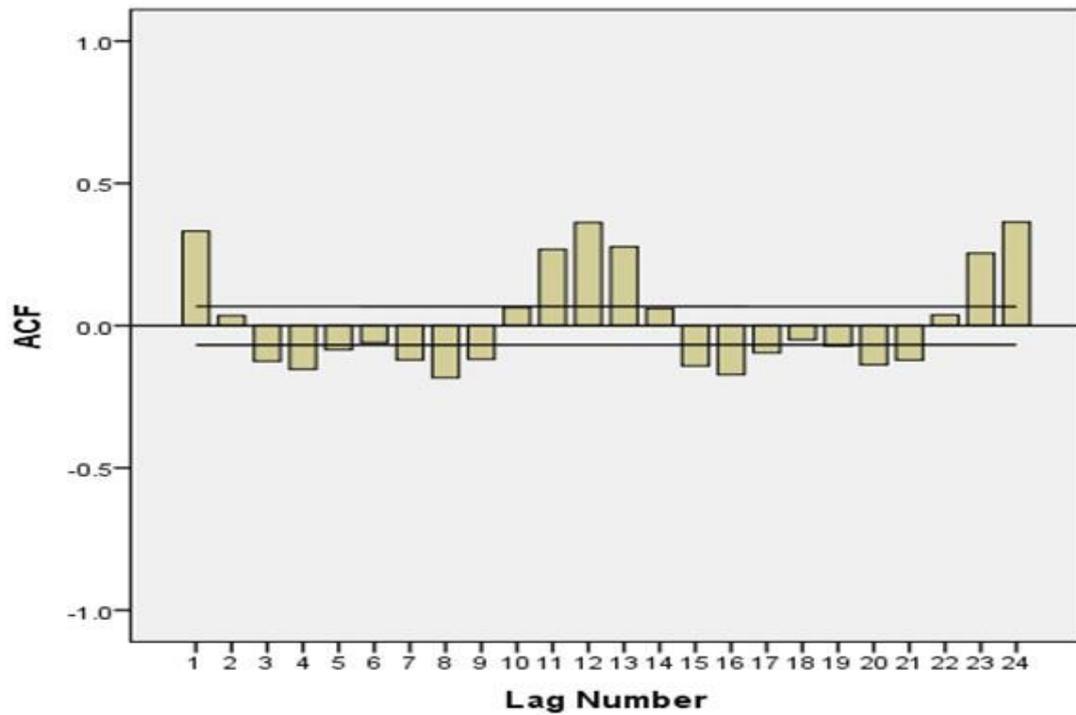
۲-۷-۱- نتایج تحلیل آزمون من- کندال

در این تحقیق سری زمانی بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز از شروع سال ۱۹۵۱ تا انتهای سال ۲۰۲۲ مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی وضعیت داده‌های مورد مطالعه از لحاظ شرایط خود همبستگی، نمودار خود همبستگی نگار با استفاده از نرم افزار SPSS در شکل ۳ رسم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار خود همبستگی در تأخیر یک (و یا به عبارت دیگر مقدار تابع خود همبستگی ACF به میزان ۰/۳۳۲)، حدود اطمینان را قطع کرده است بنابراین معنی‌دار خواهد بود. لذا آزمون من-کندال اصلاح‌شده نیز محاسبه می‌شود. جدول ۱ خلاصه مقادیر نتایج ضریب خودهمبستگی و مقادیر آزمون من-کندال (به روش استاندارد و روش اصلاح‌شده) برای سری زمانی اصلی را ارائه می‌کند. نتایج آزمون‌های ذکر

جدول ۱. مقدار ضریب خود همبستگی و مقادیر آزمون های من-کندال.

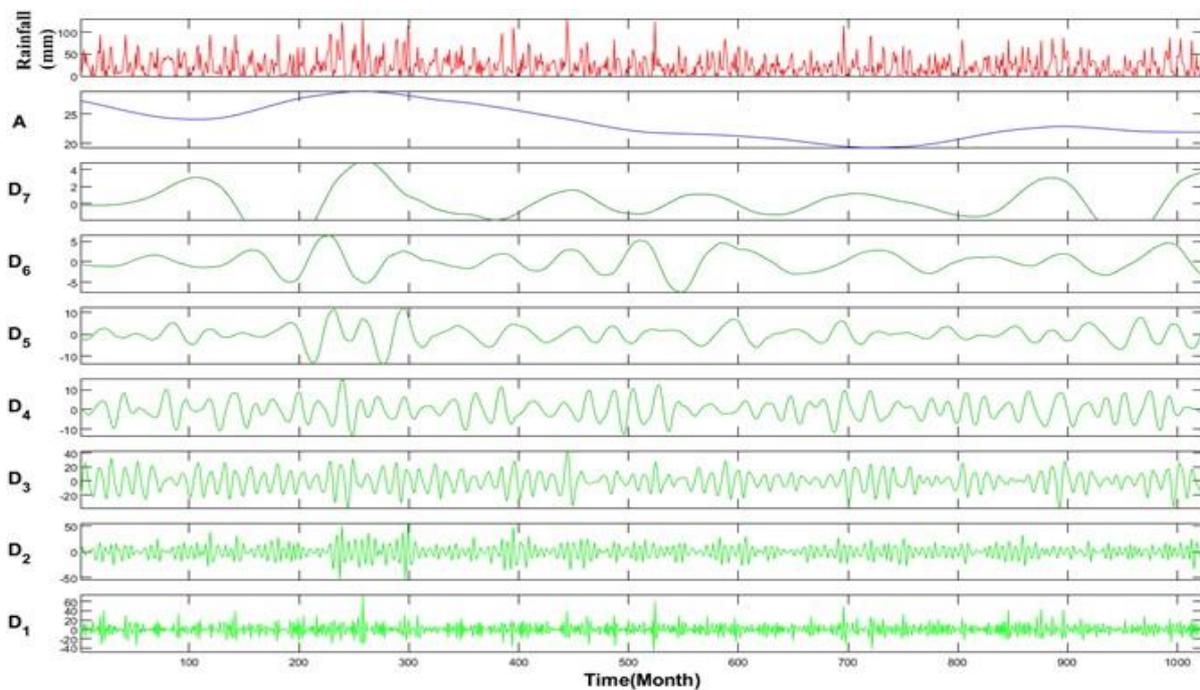
Table 1. Autocorrelation coefficient and Mann-Kendall test values.

ACF	MK استاندارد	MK اصلاح شده
۰/۳۳۲	-۲/۰۹	-۲/۳۹



شکل ۳. خودهمبستگی نگار برای داده‌های بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک تبریز (۱۹۵۱ تا ۲۰۲۲).

Fig. 3. The correlogram of monthly precipitation data at the Tabriz Synoptic Station (1951–2022).



شکل ۴. زیرسری تقریب (A) و زیرسری‌های جزئیات (D) سری زمانی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک تبریز.

Fig. 4. Approximation (A) and detail (D) sub series of the monthly rainfall time series at the Tabriz synoptic station.

سری‌های زمانی است و سیگنال‌های فرعی جزئیات D یک دوره تناوب خاص را منعکس می‌کنند. برای سری زمانی ماهانه در سطح تجزیه ۷، تعداد ۷ زیرسری جزئیات (یعنی ۷ حالت پیرودی) وجود دارد: پیرو ۲ ماهه (D_1)، پیرو ۴ ماهه (D_2)، پیرو ۸ ماهه (D_3)، پیرو ۱۶ ماهه (D_4)، پیرو ۳۲ ماهه (D_5)، پیرو ۶۴ ماهه (D_6) و پیرو ۱۲۸ ماهه (D_7). سطوح جزئیات پائین‌تر با فرکانس‌های بالاتر نشان‌دهنده تغییرات سریع مولفه سری و برعکس، سطوح جزئیات بالاتر با فرکانس‌های پایین‌تر نشان‌دهنده تغییرات آهسته مولفه سری هستند، مانند مولفه تقریبی A_7 (یا همان مولفه A) در شکل ۴. در مرحله دوم مطابق نمودار شماتیک شکل ۲، از دو شیوه عمل جهت تحلیل روند و برای پی‌بردن به اینکه کدام تناوبها بیشترین تأثیر را بر روند دارند استفاده شد.

در شیوه اول (یعنی روش تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال)، آزمون من-کندال استاندارد و آزمون من-کندال اصلاح‌شده به هر کدام از سری زمانی اصلی بارش ماهانه، زیرسری تقریب (A)، زیرسری‌های جزئیات (D) و نیز ترکیبات مختلف از زیرسری‌های جزئیات به همراه زیرسری تقریب ($A+D_i$) اعمال شد. این ترکیبات برای روشن شدن خواص سری‌های زمانی از طریق تحلیل چندتفکیکی کمک می‌کند. بر این اساس برای رسیدن به نتایج و تفسیر بهتر، آزمون بر روی ۲۶ مدل شامل سری اصلی، زیرسری تقریب، زیرسری‌های جزئیات و ترکیباتی از زیرسری تقریب و زیرسری‌های جزئیات انجام گرفت که نتایج این مرحله در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است تمام نتایج عددی مهم با حروف پررنگ در جدول ۲ نشان داده شده است.

مبنای بررسی و شناسایی دوره‌های نوسانی غالب، شباهت بیشتر مقادیر آزمون من-کندال در هر یک از زیرسری‌ها و ترکیبات آنها با نتایج آزمون برای داده‌های اصلی است. همان گونه که از جدول ۲ مشاهده می‌شود نتایج آزمون برای زیرسری‌های جزئیات به تنهایی فاقد شباهتی معنی‌دار با نتایج آزمون برای داده‌های اصلی است. یعنی به عنوان نمونه مقدار آزمون من-کندال اصلاح‌شده برای داده اصلی برابر $-2/39$ و مقداری منفی بدست آمده در حالیکه برای زیرسری‌های D_2 و D_4 مقادیر مثبتی حاصل شده است. بنابراین با توجه به اینکه معمولاً روند تغییرات در زیرسری تقریب (A_7) نمود پیدا می‌کند، لذا ترکیب این مولفه با یک و دو و یا سه زیرسری جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمون‌های من کندال حاکی از این است که از میان زیرسری‌های جزئیات زیرسری D_1 یک استثناست چرا که مقدار آن با آزمون من-کندال اصلاح شده برابر با $-2/47$ به دست

آمده است که به مقدار آن در سری اصلی ($-2/39$) نزدیک می‌باشد. اما بررسی بیشتر با اجرای ترکیبات دو مولفه‌ای، ترکیب D_3+A_7 ، بر اساس معیار بیشترین میزان نزدیکی مقدار آن به مقادیر آزمونها در سری اصلی، مقدار $-4/57$ برای آزمون من-کندال استاندارد و مقدار $-6/2$ برای آزمون من-کندال اصلاح‌شده را بدست داد که گرچه نسبت به سایر ترکیبات دو مولفه‌ای نتیجه بهتری است اما در کل نمی‌تواند نتیجه مناسبی باشد. با اجرای ترکیب $D_2+D_3+A_7$ از میان ترکیبات سه مولفه‌ای، مقادیر $-2/74$ و $-3/76$ به ترتیب برای آزمون‌های من-کندال استاندارد و آزمون من-کندال اصلاح‌شده بدست آمد که نتیجه‌ای بهتر از ترکیب قبلی است. با انجام آنالیز بیشتر با اجرای ترکیبات چهار مولفه‌ای، ترکیب $D_1+D_2+D_3+A_7$ با مقدار $-2/42$ برای آزمون من-کندال استاندارد و مقدار $-3/97$ برای آزمون من-کندال اصلاح‌شده محاسبه شد که بهترین نتیجه آزمون من-کندال استاندارد با بیشترین نزدیکی به مقدار سری اصلی ($-2/39$) را رقم زد. در حالیکه نتیجه برای آزمون من-کندال اصلاح‌شده بهتر از ترکیب قبلی بدست نیامد. با مقایسه نتایج ملاحظه می‌شود که نتایج آزمون من-کندال استاندارد بهتر از آزمون من-کندال اصلاح‌شده بدست آمده است. گرچه وجود خودهمبستگی در داده‌ها لزوم استفاده از روش آزمون من-کندال اصلاح‌شده را موجه می‌کند ولی این خود همبستگی شدید نیست و لذا آزمون من-کندال استاندارد همچنان می‌تواند قدرتمند ظاهر شود.

در شیوه دوم (یعنی روش تحلیل موجک) همان ۲۶ مدل اشاره شده در فوق بدون اعمال آزمون‌های من-کندال، بر اساس شاخص جدیدی تحت عنوان انرژی سری زمانی مورد ارزیابی قرارگرفت. بر این اساس مبنای شناسایی دوره‌های نوسانی موثر، نزدیکی مقادیر انرژی سری‌های زمانی مدل‌ها با سری زمانی اصلی نیز می‌تواند باشد [۱۸]. در جدول ۲ مقادیر انرژی ترکیب‌های مختلف (E) آمده است. در صورتیکه از شاخص جدید انرژی سری‌ها برای ارزیابی و شناسایی موثرترین مولفه تناوبی استفاده شود، مشاهده می‌شود که در میان زیرسری‌های جزئیات، زیرسری D_3 با انرژی 137070 بیشترین مقدار را در میان مولفه‌های جزئیات برخوردار است و از میان ترکیبات مختلف، ترکیب‌های D_3+A_7 ، $D_1+D_3+A_7$ و $D_1+D_2+D_3+A_7$ با انرژی‌های به ترتیب 623850 ، 759430 و 892610 بیشترین مقدار انرژی را از میان سایر ترکیبات دارا هستند.

از بین این ترکیبات نیز ترکیب $D_1+D_2+D_3+A_7$ با بیشترین میزان نزدیکی به انرژی سری اصلی (935510) که برابر $95/4$ درصد میزان انرژی سری اصلی است بهترین همخوانی را نشان می‌دهد. لذا هر کدام از

جدول ۲. مقادیر آزمون‌های من-کندال و انرژی سری زمانی.

Table 2. Mann-Kendall tests and time series energy values.

داده	من-کندال استاندارد	من-کندال اصلاح شده	ضریب همبستگی با سری اصلی (C)	انرژی (E)
اصلی	-۲/۰۹*	-۲/۳۹*	-	۹۳۵۵۱۰
A ₇	-۲/۷۱*	-۵/۲۷*	۰/۱۳	۴۸۵۷۸۰
D ₁	-۳/۹۸*	-۲/۴۷*	۰/۵۴	۱۳۵۷۹۰
D ₂	۰/۰۲۱	۲/۰۶*	۰/۵۳	۱۳۲۹۰۰
D ₃	-۰/۰۰۷۹	-۰/۰۰۸۱	۰/۵۵	۱۳۷۰۷۰
D ₄	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۲۲	۲۱۷۹۴۰
D ₅	-۰/۹۷	-۱/۸۷	۰/۱۶	۱۲۶۶۱
D ₆	-۰/۶۹	-۰/۸۹	۰/۱۲	۵۸۳۷
D ₇	-۱/۴۰	-۰/۸۴	۰/۱	۴۱۱۹
D ₁ +A ₇	-۵/۵۴*	-۸/۰۹*	۰/۵۵۹	۶۲۱۴۱۰
D ₂ +A ₇	-۴/۷۸*	-۵/۸۹*	۰/۵۵	۶۱۸۸۳۰
D ₃ +A ₇	-۴/۵۷*	-۶/۲*	۰/۵۶۳	۶۲۳۸۵۰
D ₄ +A ₇	-۱۰/۷۸*	-۶/۶۶*	۰/۲۵	۵۰۶۱۰۰
D ₅ +A ₇	-۱۳/۳۱*	-۵/۸۹*	۰/۲۱	۴۹۹۴۶۰
D ₆ +A ₇	-۱۶/۹۳*	-۵/۹۹*	۰/۱۷	۴۸۸۷۷۰
D ₇ +A ₇	-۲۰/۵۷*	-۶/۶۷*	۰/۱۶	۴۹۱۰۴۰
D ₁ + D ₂ +A ₇	-۳/۳۵*	-۵/۵۱*	۰/۷۷۶	۷۵۴۵۳۰
D ₁ + D ₃ +A ₇	-۳/۴۰*	-۶/۱۹*	۰/۷۸۳	۷۵۹۴۳۰
D ₁ + D ₄ +A ₇	-۵/۰۹*	-۸/۰۴*	۰/۱۶	۶۴۱۷۴۰
D ₂ + D ₃ +A ₇	-۲/۷۴*	-۳/۷۶*	۰/۷۷۸	۷۵۶۹۷۰
D ₂ + D ₄ +A ₇	-۴/۳۱*	-۵/۸۱*	۰/۵۹۵	۶۳۹۱۶۰
D ₃ + D ₄ +A ₇	-۴/۴۹*	-۶/۹۸*	۰/۶۰۳	۶۴۴۶۲۰
D ₁ + D ₂ + D ₃ +A ₇	-۲/۴۲*	-۳/۹۷*	۰/۹۵	۸۹۲۶۱۰
D ₁ + D ₂ + D ₄ +A ₇	-۳/۲۸*	-۵/۶۱*	۰/۸۰۷	۷۷۴۸۶۰
D ₁ + D ₃ + D ₄ +A ₇	-۳/۴۷*	-۶/۹۱*	۰/۸۱۲	۷۸۰۲۰۰
D ₂ + D ₃ + D ₄ +A ₇	-۲/۷۶*	-۴/۲۶*	۰/۸۰۸	۷۷۷۷۴۰

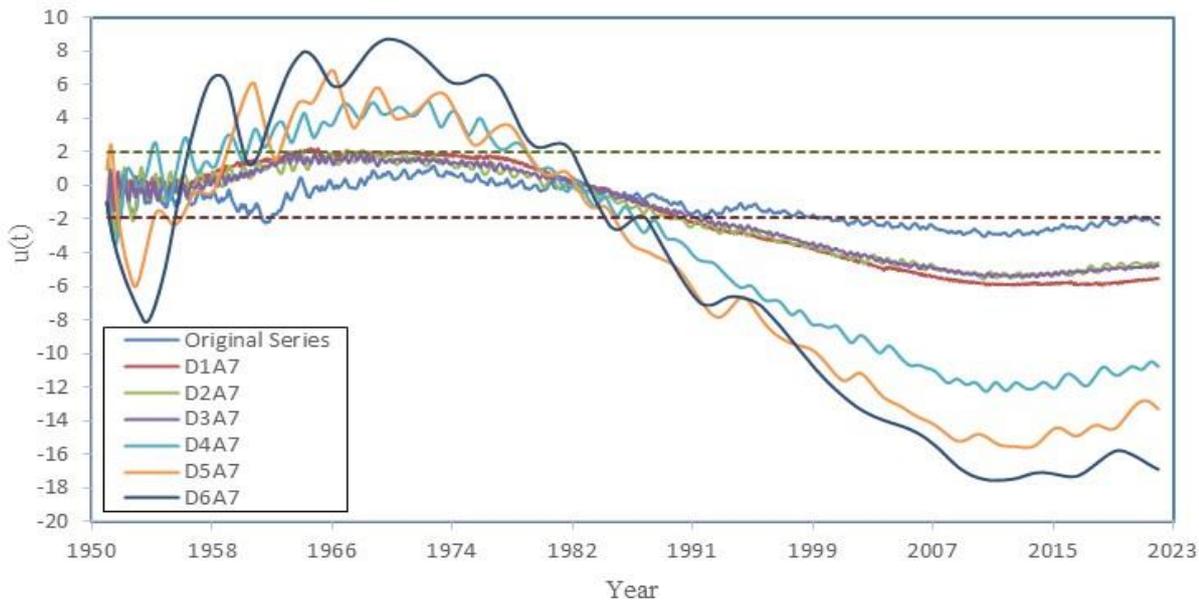
علامت* نشان دهنده معنی‌دار بودن روند است. موثرترین مولفه دوره‌ای برای روندها در فرمت Bold نشان داده شده است.

The asterisk (*) indicates a significant trend. The most influential periodic component for the trends is shown in bold.

نحوه تغییرات آنها با هم هماهنگ است. از این منظر برای بهترین ترکیب بدست‌آمده از تحلیل فوق یعنی ترکیب $D_1 + D_2 + D_3 + A_7$ بالاترین مقدار ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۵ حاصل شده است. براین اساس می‌توان گفت از میان سه مولفه غالب نیز می‌توان موثرترین زیرسری جزئیات را مشخص نمود که با مقایسه مقادیر انرژی (E) و ضریب همبستگی (C) زیرسری‌ها، مولفه D_3 با بیشترین انرژی با مقدار ۱۳۷۰۷۰ و ضریب همبستگی ۰/۵۵

زیرسری‌های D_1 ، D_2 و D_3 مولفه‌های تناوبی غالب می‌باشند. یعنی دوره تناوبی غالب در بارش ماهانه ایستگاه تبریز می‌تواند به ترتیب ۲ ماهه، ۴ ماهه و ۸ ماهه باشد.

جالب توجه است که بدانیم الگوی نتایج بدست آمده از ضریب همبستگی بین سری‌های ترکیبات مختلف با سری زمانی اصلی (C) که در جدول ۲ آمده است نیز عیناً مشابه با نتایج انرژی‌های ترکیبات مختلف است یعنی



شکل ۵. نمودارهای من-کندال دنباله‌ای بر اساس خطوط پیش رونده از زیرسری‌های جزئیات به همراه زیرسری تقریب.

Fig. 5. Sequential Mann-Kendall graphs based on progressive lines of the detail sub series together with the approximation component.

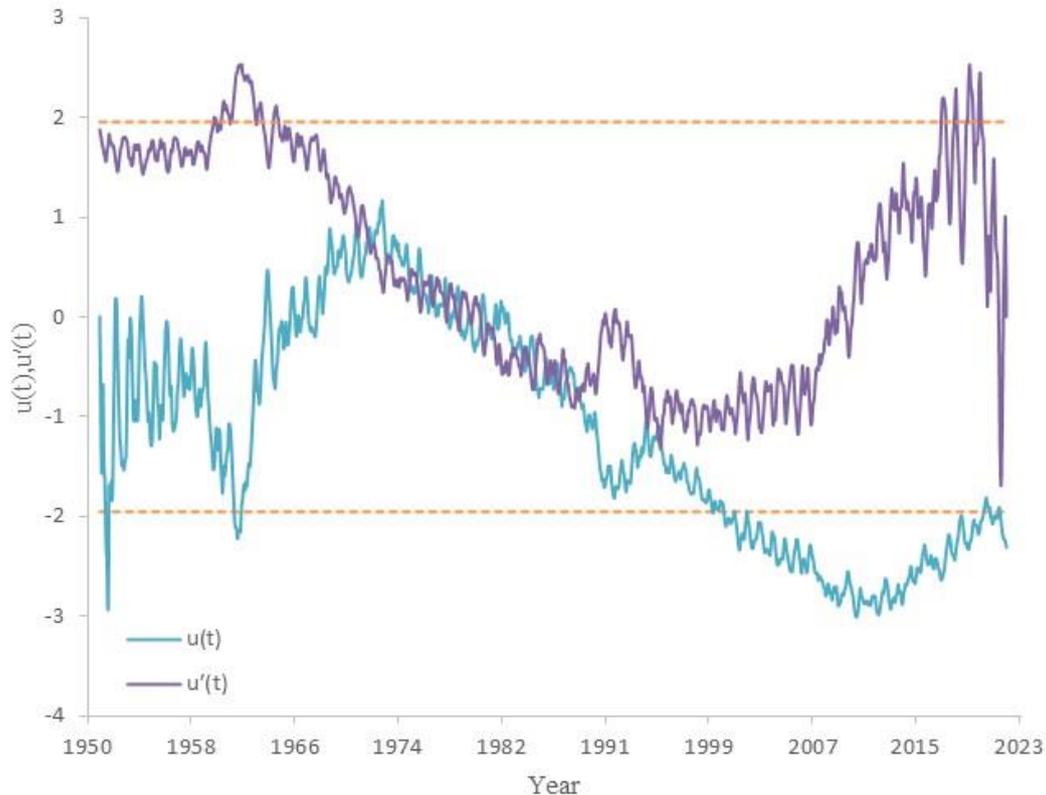
می‌باشد. البته بایستی توجه نمود که مقادیر بدست آمده برای مولفه‌های D_1 و D_2 نیز بسیار به هم نزدیک هستند لذا در مقیاس ماهانه برای بارش، سه دسته ترکیبی از فرکانس‌ها به عنوان الگوهای نوسانی غالب مطرح می‌باشند شامل فرکانس‌های ۲ ماهه، ۴ ماهه و ۸ ماهه به صورت توأم. این نتیجه بیانگر آن است که رفتار نوسانی بارش تحت تأثیر فرکانس‌های زیاد و کوتاه مدت است. همانطور که قبلاً ذکر شد، نسخه نمودارهای من-کندال دنباله‌ای امکان تشخیص شروع تقریبی یک روند در حال توسعه را توسط تقاطع منحنی‌های $u'(t)$ و $u(t)$ می‌دهد. بنابراین، روش مذکور در اینجا مورد استفاده قرار گرفت و نتایج مربوطه در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ تعداد کل نقاط برخورد دو منحنی اشاره شده در طی دوره آماری مورد مطالعه، ۳۸ نقطه می‌باشد که از این میان ۳ نقطه برخورد مهم که در آن تفاوت قابل ملاحظه‌ای در میزان نزدیک شدن و یا دور شدن منحنی‌ها از هم وجود دارد قابل مشاهده است. اولین نقطه برخورد دو منحنی مورخه ۱۹۷۱/۰۶/۰۱، دومین نقطه مهم، بعد از چندین برخورد متوالی، مورخه ۱۹۸۹/۰۲/۰۱ و سومین نقطه، آخرین نقطه برخورد دو منحنی در مورخه ۱۹۹۵/۰۸/۰۱ می‌باشد و بعد از این تاریخ تا انتهای دوره مطالعاتی برخورد دو منحنی مشاهده نمی‌شود. از نقطه برخورد مهم سوم روند منفی

بهترین نتیجه را کسب نمود لذا می‌توان ادعا نمود که مؤثرترین مولفه تناوبی مولفه D_3 می‌باشد که معرف الگوی نوسانی ۸ ماهه است.

۲-۷-۳ نتایج روش من-کندال دنباله‌ای

برای بررسی بیشتر نتایج حاصل از مطالعات فوق و نمایش دادن نقش اجزاء پررودیکی مختلف از نمودارهای من-کندال دنباله‌ای مطابق شکل ۵ برای ترکیبات دو مولفه‌ای مختلف از زیرسری‌های جزئیات به همراه زیرسری تقریب $(A+D_i)$ استفاده شد.

با مشاهده شکل ۵ ملاحظه می‌شود که خط روند D_3+A_7 شبیه‌ترین خط به روند سری اصلی است. این نتیجه با نتیجه حاصل از حداکثر مقدار انرژی سری زمانی بدست آمده برای ترکیب مذکور همخوانی دارد. علاوه بر آن چنانکه قبلاً نیز اشاره شد مقدار عددی آزمون من-کندال استاندارد نیز برای همین ترکیب از میان ترکیبات دو مولفه‌ای دیگر دارای بیشترین نزدیکی به مقدار عددی سری اصلی می‌باشد. با این نتایج منطقی است که مولفه D_3 مؤثرترین مؤلفه دوره‌ای برای روند واقعی مشاهده شده در بارندگی کل ماهانه در نظر گرفته شود. با مشاهده شکل ۵ به نظر می‌رسد ترکیبات بعدی با مشابهت نزدیک به سری اصلی به ترتیب ترکیب D_2+A_7 و ترکیب D_1+A_7



شکل ۶. نمودار من-کندال دنباله‌ای از داده‌های سری بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک تبریز.

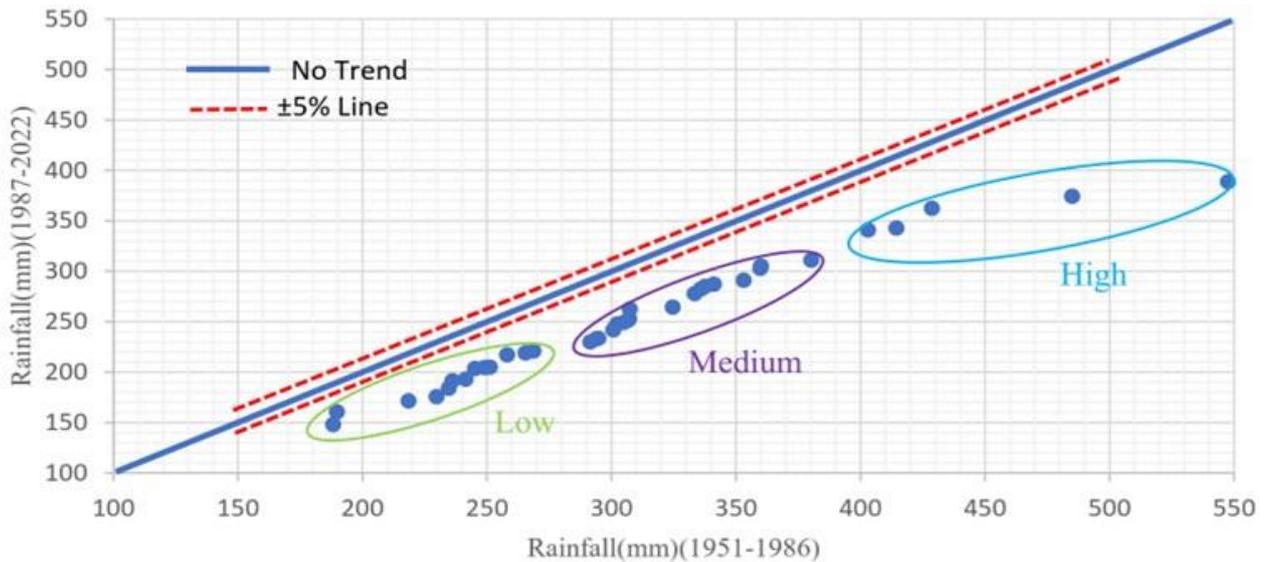
Fig. 6. Sequential Mann-Kendall graph of the monthly precipitation time series data at the Tabriz Synoptic Station

درک ویژگی‌های روند سری‌های زمانی در مقیاس سالانه استفاده شد. در واقع، این روش نشان می‌دهد که آیا تغییرات قوی در متغیرهای طبقه‌بندی شده وجود دارد یا خیر. در شکل ۷، کل سری زمانی بارندگی سالانه ایستگاه سینوپتیک تبریز از لحاظ زمانی به دو نیمه (۱۹۵۱-۱۹۸۶ و ۱۹۸۷-۲۰۲۲) تقسیم شد و هر زیر مجموعه به ترتیب صعودی مرتب شد و سپس آنها در مقابل یکدیگر ترسیم شدند. نمودار پراکندگی شن ارائه شده در شکل ۷ موقعیت تمام نقاط بدست آمده از این طریق را زیر ۵٪ خط ۴۵ درجه بدست داد که نشان دهنده وجود روند منفی می‌باشد. این نمودار موقعیت نسبی مقادیر بارش «کم»، «متوسط» و «بالا» را نیز نشان می‌دهد. از شکل مشهود است که بارش‌های «کم» (مقادیر بارش بین ۱۸۵ تا ۲۶۰ میلیمتر)، «متوسط» (مقادیر بارش بین ۲۹۱ تا ۳۸۰ میلیمتر)، و «بالا» (مقادیر بارش بین ۴۰۳ تا ۵۴۷ میلیمتر)، در ایستگاه سینوپتیک تبریز طی سال‌های ۱۹۸۷-۲۰۲۲ نسبت به سالهای ۱۹۵۱-۱۹۸۶ کاهش یافته است. علاوه بر آن

شروع شده و بعد از آن به شکل تدریجی مقدار $u(t)$ کاهش می‌یابد تا اینکه در مورخه ۱۹۹۹/۰۹/۰۱ خط محدوده پایین اطمینان را قطع نموده و بعد از آن با نوساناتی عمدتاً در زیر خط محدوده پایین اطمینان به روند منفی خود تا پایین‌ترین نقطه در مورخه ۲۰۱۱/۰۱/۰۱ با پایین‌ترین مقدار برای $u(t)$ برابر ۳/۰۱۱- ادامه داده و بعد از آن گرچه مقادیر $u(t)$ مقدار منفی و در زیر خط محدوده اطمینان هستند اما مقدار آن تا انتهای دوره مطالعاتی افزایش یافته است. در مجموع می‌توان گفت روند کاهش میزان بارندگی در این ایستگاه از نقطه برخورد سوم همراه با نوساناتی قابل مشاهده است.

۲-۷-۴ نتایج روش تحلیل روند نوآورانه (روش گرافیکی شن)

در مطالعات تحلیل روند، این موضوع نیز جالب است که تشخیص داده شود آیا کاهش یا افزایشی در مقادیر «کم»، «متوسط» و «زیاد» متغیر مورد نظر وجود داشته است. برای این منظور، روش گرافیکی شن در اینجا برای



شکل ۷. نتایج روش تحلیل روند نوآورانه برای ایستگاه سینوپتیک تبریز.

Fig. 7. Results of the Innovative Trend Analysis (ITA) method for the Tabriz synoptic station.

توده‌های هوایی به منطقه، عبور و تأثیر سامانه‌های کم‌فشار و غیره) باشد. نمودارهای من-کندال دنباله‌ای شروع تقریبی یک روند منفی در حال توسعه از سال ۱۹۹۵ تا انتهای دوره مطالعاتی توسط تقاطع منحنی‌های رو به عقب و رو به جلو را نشان داد. نمودار پراکنندگی روش گرافیکی شن موقعیت تمام نقاط بدست آمده از سری زمانی سالانه بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز را زیر ۵٪- خط ۴۵ درجه نتیجه داد که نشان دهنده وجود روند منفی طی سال‌های ۲۰۲۲-۱۹۸۷ نسبت به سالهای ۱۹۸۶-۱۹۵۱ می‌باشد. این روش یک نمای کیفی سریع از روندها با هزینه محاسباتی کمتر بدست می‌دهد.

جمع بندی نتایج حاصل از روش های مختلف در این تحقیق حاکی از روند منفی بارش در ایستگاه سینوپتیک تبریز می‌باشد که با نتایج مطالعات صورت گرفته توسط سرحدی و همکاران [۱۳]، نورانی و همکاران [۱۶] و فرهنگی و همکاران [۲۷] همخوانی دارد.

امروزه بحث تغییر اقلیم و اثرات و پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدت هیدرولوژیکی آن به عنوان یکی از مطالب با اهمیت در زیر مجموعه مطالعات و مدیریت منابع آب مطرح می‌باشد. تشخیص دقیق روند به مسئولان این امکان را می‌دهد که پروژه‌های برنامه‌ریزی آینده را به درستی و با توجه به تأثیر تغییرات اقلیمی برنامه‌ریزی کنند.

موقعیت نسبی مقادیر بارش "کم" و "متوسط" با حالت موازی با خط ۴۵ درجه نشان دهنده وجود روند منفی کم و بیش یکنواخت و مشابه بوده در حالیکه برای مقادیر بارش "بالا" روند کاهشی تندتری قابل تشخیص است.

۲-۸- نتیجه‌گیری

روش‌های مختلف بررسی و تحلیل روند شامل روش‌های آماری (من-کندال)، روش تحلیل موجک، روش تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال، آزمون من-کندال دنباله‌ای و روش گرافیکی شن برای بررسی روند موجود به همراه ساختار اصلی آن در سری زمانی بارش ماهانه در ایستگاه سینوپتیک تبریز به کار گرفته شد. یک تحلیل مقایسه‌ای از آزمون‌های من-کندال استاندارد و آزمون من-کندال اصلاح شده انجام گرفت که نتیجه حاکی از برتری حالت استاندارد می‌باشد. این نتیجه می‌تواند ناشی از وجود خودهمبستگی پائین بین داده‌ها باشد. نتایج حاصل از روش تحلیل موجک و روش تحلیل ترکیبی موجک-من-کندال حاکی از این است که پریودهای درون سالانه (۲ تا ۸ ماهه) با فرکانس زیاد بیشترین تأثیر را در ایجاد روند در سری زمانی ماهانه بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز دارند. حضور مولفه‌های فرکانس بالا می‌تواند به دلیل فرایندهای کوتاه‌مدت جوی (از جمله ورود

- Study: Mashhad Synoptic Station), *Journal of Water and Soil*, 29(1) (2015) 239-249, (In Persian).
- [12] D. Nalley, J. Adamowski, B. Khalil, Using discrete wavelet transforms to analyze trends in streamflow and precipitation in Quebec and Ontario (1954–2008), *Journal of Hydrology*, 475 (2012) 204-228.
- [13] R. Modarres, A. Sarhadi, Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114 (2009) D03101.
- [14] R. Mirabassi, Y. Dinpazhooh, Trend analysis of precipitation of NW of Iran over the past half of the century, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 35(4) (2013) 59-73, (In Persian).
- [15] P.S. Katirai, S. Hajam, P. Irannejad, The contribution of changes in the frequency and intensity of daily rainfall in the rainfall trend in Iran during the period from 1960 to 2001, *Journal of Earth and Space Physics*, 33(1) (2007) 67-83, (In Persian).
- [16] V. Nourani, A. Danandeh Mehr, N. Azad, Trend analysis of hydroclimatological variables in Urmia Lake basin using hybrid wavelet Mann–Kendall and Sen tests, *Environmental Earth Sciences*, 77(207) (2018).
- [17] S.G. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*, second ed., Academic Press, San Diego, (1998).
- [18] Y. Chen, Y. Guan, G. Shao, D. Zhang, Investigating trends in streamflow and precipitation in Huangfuchuan basin with wavelet analysis and the Mann-Kendall test, *Water*, 8(77) (2016) 1-32.
- [19] K.H. Hamed, A.R. Rao, A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*, 204(1-4) (1998) 182-196.
- [20] S. Yue, C.Y. Wang, The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series, *Water Resources Management*, 18 (2004) 201-218.
- [21] Z. Şen, Trend identification simulation and application, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3) (2014) 635-642.
- [1] A.M. Ruwangika, A. Perera, U. Rathnayake, Comparison of statistical, graphical, and wavelet transform analyses for rainfall trends and patterns in Badulu Oya catchment, Sri Lanka, *Complexity*, ID 7146593, (2020) 1-13.
- [2] K. Adamowski, A. Prokoph, J. Adamowski, Development of a new method of wavelet aided trend detection and estimation, *Hydrological Processes*, 23(18) (2009) 2686-2696.
- [3] T. Partal, M. Küçük, Long-term trend analysis using discrete wavelet components of annual precipitations measurements in Marmara region (Turkey), *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(18) (2006) 1189-1200.
- [4] E. McBean, H. Motiee, Assessment of impacts of climate change on water resources – a case study of the Great Lakes of North America, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(5) (2006) 3183-3209.
- [5] Z. Şen, Innovative trend analysis methodology, *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9) (2012) 1042-1046.
- [6] R. Sneyers, On the statistical analysis of series of observations, World Meteorological Organization, Technical Note 143, WMO No. 415, (1990).
- [7] W. Wang, S. Hu, Y. Li, Wavelet transform method for synthetic generation of daily streamflow, *Water Resources Management*, 25(1) (2011) 41-57.
- [8] V. Nourani, A.H. Baghanam, J. Adamowski, O. Kisi, Applications of hybrid wavelet–artificial intelligence models in hydrology: a review, *Journal of Hydrology*, 514 (2014) 358-377.
- [9] F. Taghavi, A. Neyestani, H. Mohammadi, S. Rostami Jalilian, Application of wavelet analysis to investigate precipitation variability at western regions of Iran, *Iranian Journal of Geophysics*, 5(4) (2011) 13-30, (In Persian).
- [10] P. Toufani, A. Mosaedi, F.A. Fakheri, Prediction of precipitation applying wavelet network model, *Journal of Water and Soil*, 25(5) (2011) 1217-1226, (In Persian).
- [11] A.R. Araghi, M. Mousavi Baygi, M. Hashemi Nia, Using discrete wavelet transform for trend analysis and oscillatory patterns identification of temperature (Case

- [25] W. Wang, S. Ding, Wavelet network model and its application to the prediction of hydrology, *Nature and Science*, 1 (2003) 67-71.
- [26] H. Su, Q. Liu, J. Li, Alleviating border effects in wavelet transforms for nonlinear time-varying signal analysis, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 11 (2011) 55-60.
- [27] M. Farhangi, M. Kholghi, S.A. Chavoshian, Rainfall trend analysis of hydrological subbasins in western Iran, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(10) (2016) 05016004.
- [22] Y.F. Sang, A practical guide to discrete wavelet decomposition of hydrologic time series, *Water Resources Management*, 26 (2012) 3345-3365.
- [23] M.H. Fattahi, N. Talebbeydokhti, H. Moradkhani, E. Nikooee, Revealing the chaotic nature of river flow, *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction of Civil Engineering*, 37(C+) (2013) 121-130.
- [24] M.Z.D. Artigas, A.G. Elias, P.F.D. Campra, Discrete wavelet analysis to assess long-term trends in geomagnetic activity, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31 (2006) 77-80.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Saeidifarzad, V. Nourani, *Investigation and Comparison of Different Methods of Trend Analysis of Rainfall in Tabriz Synoptic Station*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(11) (2026) 1921-1938.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23138.8115](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23138.8115)

