

Investigating changes in precipitation probability functions in Iran

Ahmad Reza Ghasemi

Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

*Corresponding Author: ar-ghasemi@sku.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Changes in precipitation characteristics can have profound impacts on natural ecosystems. Precipitation serves as a critical global variable for examining and identifying climate change within a region. As one of the most significant environmental challenges of the current century, climate change has exerted extensive effects on various components of the hydrological cycle. Under these circumstances, investigating climate change and identifying the timing of significant shifts in precipitation time series is of particular importance. One effective method for analyzing climate change involves identifying change points within hydrological and climatic datasets. A change point refers to a moment when the statistical properties of a time series, such as the mean, undergo an abrupt shift. These points can indicate alterations in precipitation regimes or changes in the probability of extreme precipitation or low-rainfall events. Consequently, identifying change points and analyzing precipitation frequency patterns before and after them serves as a powerful tool for understanding the impact of climate change on the hydrological regimes of various regions. Change points represent abrupt alterations in the distribution parameters of a dataset, effectively dividing the data into two subsets with distinct statistical characteristics. Climatic changes affect not only the average precipitation but also the statistical structure of precipitation distribution, such as the frequency of extreme events, the skewness and kurtosis of the series. Therefore, in this research, for a deeper understanding of the impact of climate change on precipitation, the change in the probability functions of the precipitation data series was investigated.

Materials and Methods

To analyze precipitation changes, data from the country's synoptic and climatological stations, featuring long-term records, were obtained from the Iran Meteorological Organization. The study utilized the entire available statistical period (1951–2025), with data analyzed at both monthly and annual scales. Following quality assessment and the exclusion of stations with incomplete records, the data were used for statistical analysis and the examination of precipitation trends. Accounting for spatial distribution, the study evaluated 87 stations across the country, each providing between 40 and 75 years of data (the latter representing the longest record available in Iran). Additionally, the study focused on the six-month period from November to April, when the majority of precipitation occurs across most regions of the country, as well as annual average precipitation. First, the change points were detected using the Pettitt method; then, the best-fitting probability distributions for the series before and after each change point were determined and analyzed. To analyze the precipitation frequency distribution, the best statistical distribution was first fitted to the precipitation time series, both before and after the change point, and the parameters for each distribution were estimated using either the maximum likelihood method or the method of moments. The fitting process was conducted using EasyFit 5.6 software, which evaluates 65 statistical distributions and reports the results; the optimal distribution was selected based on the Kolmogorov-Smirnov test. Analyzing the frequency distribution (or probability function) of the precipitation series before and after the change point allows for a comparison of the statistical structure and the frequency of low, moderate, and extreme precipitation events across the two periods. Finally, changes in the shape and characteristics of the probability distribution function curves, as well as shifts in the curves before and after the change point, were examined.

Results and Discussion

The results indicated that, with few exceptions, the precipitation probability distributions before and after the change points differed at nearly all stations and in all months with significant change points. This suggests that, in addition to changes in the mean, other statistical characteristics of the precipitation series also changed, reflecting substantial shifts in precipitation patterns. After the change points, most stations exhibited a decrease in the probability of heavy precipitation and an increase in the probability of low precipitation, indicating a rise in the frequency of weak or short-term precipitation events. In other words, the probability density in low-precipitation intervals increased significantly. This pattern suggests that the precipitation regime in most stations with significant change points has shifted toward drier conditions, with the dominant precipitation systems losing capacity to produce heavy rainfall.

An examination of the skewness and kurtosis of the precipitation distribution at Shahrekord station before and after the change point showed that the distribution remained positively skewed during both periods. However, the skewness was greater before the change point, indicating stronger asymmetry and a greater influence of heavy precipitation events during this period. In terms of kurtosis, the precipitation distribution before the change point exhibited positive excess kurtosis ($K > 0$), indicating a leptokurtic distribution with heavier tails than the normal distribution and, consequently, a greater likelihood of extreme precipitation values. After the change point, the kurtosis decreased and approached values closer to zero, suggesting a reduction in the probability of extreme precipitation events and a greater concentration of precipitation values around the central part of the distribution. Overall, the observed changes in the distributional characteristics, particularly the reduction in kurtosis accompanied by persistent positive skewness, suggest a decline in the frequency or probability of heavy precipitation events after the change point. This pattern, which is observed at most stations with significant change points, indicates a shift toward a precipitation regime characterized by fewer extreme rainfall events and a less heavy-tailed distribution.

Conclusion

Given the complexity of climate change and the challenges associated with identifying its impacts on climatic variables, the findings of this study demonstrate the importance of examining changes in the probability distribution functions of precipitation series before and after identified change points. In particular, evaluating the full distributional structure, including higher-order characteristics such as skewness and kurtosis, together with the magnitude and direction of shifts in the mean, provides a more comprehensive understanding of changes in precipitation characteristics than an analysis based solely on changes in the mean. This distribution-based approach can therefore improve the identification and interpretation of climate-induced changes in precipitation regimes, particularly those affecting the frequency and magnitude of extreme precipitation events.

Keywords: Probability functions, Precipitation, Change point, Iran.

بررسی تغییرات توابع احتمال بارش در ایران

احمد رضا قاسمی ^{1D}

دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

چکیده

تغییرات اقلیمی نه تنها میانگین بارش بلکه ساختار آماری توزیع بارش، مانند فراوانی رخدادهای حدی، چولگی و کشیدگی سری‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین در این پژوهش برای درک عمیق‌تر از تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش، تغییر در توابع احتمال سری داده‌های بارش مورد بررسی قرار گرفت. طول دوره آماری مورد مطالعه، کل دوره آماری موجود در کشور از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد و ۸۷ ایستگاه با حداقل ۴۰ سال و حداکثر ۷۵ سال داده مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از روش پتیت نقطه تغییر سری‌های بارش ماهانه و سالانه شناسایی و سپس بهترین توزیع احتمال برای سری‌های قبل و بعد از نقطه تغییر تعیین و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد به‌جز چند مورد در تمام ایستگاه‌ها و ماه‌های دارای نقاط تغییر معنی‌دار، تابع توزیع احتمال بارش قبل و بعد از نقطه تغییر با هم متفاوت است که نشان می‌دهد علاوه وجود تغییر در میانگین، خصوصیات دیگر سری‌های بارش مانند چولگی، کشیدگی و واریانس نیز دچار تغییر شده‌اند. این امر حاکی از یک تغییر الگوی عمیق در بارش بعد از نقاط تغییر معنی‌دار در این ایستگاه‌ها است. کاهش احتمال بارش‌های شدید و افزایش احتمال بارش‌های کم، بعد از نقطه تغییر در اغلب این ایستگاه‌ها قابل مشاهده است که نشان‌دهنده افزایش فراوانی رخدادهای بارش ضعیف است. این الگوی تغییرات نشان می‌دهد رژیم بارش اغلب ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر معنی‌دار پس از نقطه تغییر به سمت خشک‌تر شدن حرکت کرده و سیستم بارشی غالب، توان تولید بارش‌های شدید را کمتر دارد.

واژه‌های کلیدی: توابع احتمال، بارش، نقطه تغییر، ایران

مقدمه

بارش عنصر مهمی از چرخه هیدرولوژیکی است و تغییرات احتمالی در ویژگی‌های بارش می‌تواند تأثیرات عمیقی بر محیط ساخته دست بشر، اکوسیستم‌های طبیعی و محیط اجتماعی داشته باشد (Foufoula-Georgiou et al., 2020; Mallakpour et al., 2020, 2022). تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش دمای جهانی، تغییر الگوهای جریان جوی و افزایش نوسانات دما و رطوبت می‌تواند ساختار و روند بارش را دستخوش تغییر کند. این متغیر اقلیمی به عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای جهانی برای بررسی و شناسایی تغییرات اقلیمی در یک منطقه است. تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر، اثرات گسترده‌ای بر مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی برجای گذاشته است. افزایش دمای جهانی، تغییر الگوهای گردش جو و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای موجب تغییر در الگوی زمانی و مکانی بارش در بسیاری از مناطق جهان شده است. این تغییرات نه تنها میانگین بارندگی را تحت تأثیر قرار داده، بلکه شدت، فراوانی و توزیع رخدادهای حدی مانند سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها را نیز دگرگون کرده است. در چنین شرایطی، بررسی تغییرات اقلیمی و شناسایی زمان وقوع تغییرات معنی‌دار در سری‌های زمانی بارش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از روش‌های مؤثر در تحلیل تغییرات اقلیمی، شناسایی نقطه تغییر در داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی است (Ryberg et al., 2020; Sharma et al., 2016; Rwema et al., 2025). نقطه تغییر به زمانی گفته می‌شود که ویژگی‌های آماری یک سری زمانی، مانند میانگین به‌طور ناگهانی تغییر کند، این نقاط می‌توانند نشان‌دهنده تغییرات در رژیم بارش و یا تغییر احتمال وقوع رخدادهای شدید یا کم بارش باشند.

بنابراین، شناسایی نقاط تغییر و تحلیل الگوهای فراوانی بارش قبل و بعد از آن، ابزار قدرتمندی برای درک تأثیرات تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی مناطق مختلف محسوب می‌شود. از دیدگاه مدیریت منابع آب، درک تغییرات فراوانی بارش برای طراحی سازه‌های هیدرولوژیکی مانند سدها، سیستم‌های زهکشی و شبکه‌های شهری حیاتی است، زیرا افزایش ناپایداری یا تغییر شکل توزیع بارش می‌تواند خطر سیلاب و خشکسالی را افزایش دهد (IPCC, 2023). نقاط تغییر، تغییرات ناگهانی در پارامترهای توزیع یک مجموعه داده هستند که داده‌ها را به دو زیرمجموعه با ویژگی‌های آماری متفاوت تقسیم می‌شوند. این ویژگی‌ها شامل تغییرات در شاخص‌های گرایش مرکزی مانند میانگین یا میانه و تغییرات در مقیاس مانند واریانس و دامنه بین چارکی ... هستند (Friedman et al., 2016).

تابع توزیع احتمال بارش (Probability Distribution Function, PDF) یکی از ابزارهای اساسی در هیدرولوژی و مطالعات تغییرات اقلیمی است که اطلاعات جامع درباره شدت، فراوانی و احتمال رخدادهای بارشی فراهم می‌کند. برای تحلیل PDF

بارش، چند شاخص آماری کلیدی شامل میانگین، واریانس، چولگی (Skewness) و کشیدگی (Kurtosis) مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک ویژگی خاصی از توزیع را نشان می‌دهند. واریانس نشان‌دهنده نوسانات و پایداری بارش است و افزایش آن معمولاً نشان‌دهنده عدم ایستایی در سری بارش و تغییرات شدید بارش است که می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی یا دخالت‌های انسانی باشد. چولگی میزان عدم تقارن توزیع را نشان می‌دهد. چولگی مثبت به معنی وجود رخدادهای شدید بارشی کمتر اما پرت است در حالی که چولگی منفی نشان‌دهنده فراوانی بیشتر رخدادهای شدید کم‌بارش است. شاخص کشیدگی نیز نشان‌دهنده تمرکز داده‌ها در نزدیکی میانگین و شدت رخدادهای پرت است. کشیدگی بالا (Leptokurtic) نشان‌دهنده وقوع نادر اما شدید رخدادهای بارشی و کشیدگی پایین (Platykurtic) توزیع هموارتر با کمتر شدن رخدادهای پرت را نشان می‌دهد.

نقاط تغییر هم برای مدیران منابع آب و هم برای تحلیلگران داده‌ها نگران‌کننده هستند، زیرا نقاط تغییر ممکن است گواهی بر تغییرات طبیعی یا انسانی در فرایندهای اقلیمی یا هیدرولوژیکی مانند تغییرات ناگهانی در بارندگی، رواناب، ذخیره مخزن، انحراف آب، شهرنشینی یا شیوه‌های کشاورزی باشند. به عنوان مثال، بارش و جریان رودخانه می‌توانند نشان‌دهنده پایداری کوتاه‌مدت یا بلندمدت اقلیمی باشند (Cohn and Lins, 2005; Koutsoyiannis, 2011; Koutsoyiannis, 2006). این پایداری اقلیمی می‌تواند به طور ناگهانی از حالت‌های خشک‌تر به مرطوب‌تر و یا برعکس تغییر کند (Kolars et al., 2016).

دونات و همکاران (Donat et al., 2016) بیان نمودند با گرم شدن کره زمین، تغییرات در ویژگی‌های بارش یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تغییرات اقلیمی جهانی است. همچنین عنوان کردند که مطالعات جهانی نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی منجر به افزایش شدت رخدادهای شدید و نوسان در توزیع بارش در بسیاری از مناطق شده است و تحلیل آماری توزیع بارش تنها با شاخص‌های مرکزی (میانگین و میانه) قابل شناسایی نیست؛ بلکه نیازمند بررسی کامل تغییرات در توابع توزیع احتمال و شاخص‌های چولگی و کشیدگی می‌باشد. لی و همکاران (Shuai et al., 2024) تغییرات در بارش‌های شدید (EP) تأثیر قابل توجهی بر بوم‌شناسی و توسعه پایدار اکثر مناطق دارد، به‌ویژه هنگامی که در مقابل گرمایش جهانی در نظر گرفته شود. آنها نه شاخص بارش شدید را از دیدگاه شدت، فراوانی و مدت زمان بررسی کردند و نشان دادند که اگرچه بارش‌های شدید روند افزایشی کلی را در مقیاس جهانی نشان می‌دهند، اما در طول تقریباً ۷۰ سال گذشته روند کاهش اولیه و به دنبال آن افزایش را تجربه کرده‌اند.

ریبرگ و همکاران (Ryberg et al., 2020) در مطالعه‌ای به کارکرد روش‌های مختلف تشخیص نقطه تغییر در داده‌های هیدرولوژیکی (از جمله بارش و جریان‌های اوج) پرداختند و با هدف بررسی تغییر رژیم بارش و دبی، اهمیت تحلیل تغییر در میانگین و سایر ویژگی‌های توزیع را تشریح کردند. آنها از آزمون‌های پتیت برای یافتن نقاط تغییر در هزاران سری داده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان آب در ایالات متحده استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد جریان آب در دهه‌های اولیه نسبت به دهه‌های اخیر کاهش معنی‌دار داشته‌اند. تشخیص نقطه تغییر در داده‌های سری زمانی، یک حوزه فعال تحقیقاتی در آمار و حوزه‌ای مورد توجه در هیدرولوژی است؛ زیرا نقاط تغییر دارای پیامدهای آماری برای تحلیل‌های هیدرولوژیکی هستند. به عنوان مثال، تحلیل استاندارد فراوانی سیل در ایالات متحده فرض می‌کند که مشاهدات مستقل هستند و به طور یکسان از یک توزیع آماری خاص، مانند لگاریتم پیرسون نوع III، توزیع شده‌اند، یعنی چنین تحلیل‌هایی فرض می‌کنند که فرایندها ایستا هستند. یک نقطه تغییر در یک سری زمانی نقض این فرض است و نشان دهند غیرایستا بودن داده‌ها است (England et al., 2018). در ایران نیز از آزمون پتیت در مطالعات فراوانی استفاده شده است (مانند Sheikhmamoo and Esmaili et al., 2025; Jvan and Yahyavi, 2026 Mohseni, 2025).

تحلیل توزیع بارش در بررسی‌های جهانی نشان داده است که بسیاری از نقاط جهان در دهه‌های اخیر تغییرات معنی‌داری در ویژگی‌های توزیعی بارش تجربه کرده‌اند، از جمله افزایش ناپایداری و تغییر شکل فراوانی رخدادهای بارشی که با تغییرات اقلیمی مرتبط است (Nazeri, 2025). گیمچی و همکاران (Gimechi et al., 2025) روند حداکثر بارش روزانه را در دوره‌های بازگشت در استان اردبیل، تجزیه و تحلیل کردند. مقادیر حداکثر بارش روزانه برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله محاسبه شد که نشان‌دهنده تنوع منطقه‌ای قابل توجه است. این نتایج نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی و توپوگرافی منطقه‌ای به شدت بر الگوهای بارش در دوره‌های بازگشت مختلف تأثیر می‌گذارند و این نشان‌دهنده نیاز به ارزیابی‌های ریسک محلی و استراتژی‌های مدیریت آب است.

هرچند در سال‌های اخیر، استفاده از آزمون‌های من - کندال و پتیت برای تشخیص تغییرات و وجود نقاط تغییر در بارش‌های ایران، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است (مانند Behrouzi et al., 2023; Eslami and Jafarzadeh, 2026; Rezvani, et al., 2026) ولی شناسایی تغییرات بارش ناشی از تغییر اقلیم فراتر از بررسی شاخص‌های ساده‌ای مانند میانگین است؛ بنابراین با آزمون پتیت به‌تنهایی نمی‌توان تغییرات بارش را به‌صورت عمقی تحلیل و بررسی کرد و نیاز است در کنار این آزمون از روش‌های دیگر نیز استفاده شود. تحلیل‌های عمیق و دقیق‌تر تغییرات بارش در طول زمان نیازمند تحلیل‌های آماری توزیع و فراوانی سری‌های زمانی بارش می‌باشد. بر این اساس، هدف این پژوهش بررسی تغییر در شکل و خصوصیات منحنی توزیع احتمال و فراوانی بارش قبل و بعد از نقطه تغییر در سری زمانی بارش در ایران است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تغییرات فراوانی و توابع احتمال منطبق بر بارش ماهانه در کشور، قبل و بعد از نقطه تغییر مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل تغییرات بارش، داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی کشور با طول دوره آماری طولانی از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. بازه آماری مورد استفاده کل دوره آماری موجود در کشور یعنی از ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۵ و مقیاس داده‌ها ماهانه و سالانه در نظر گرفته شد. این داده‌ها پس از بررسی کیفیت و حذف ایستگاه‌های با مقادیر ناقص، برای تحلیل‌های آماری و بررسی تغییرات بارش استفاده شدند.

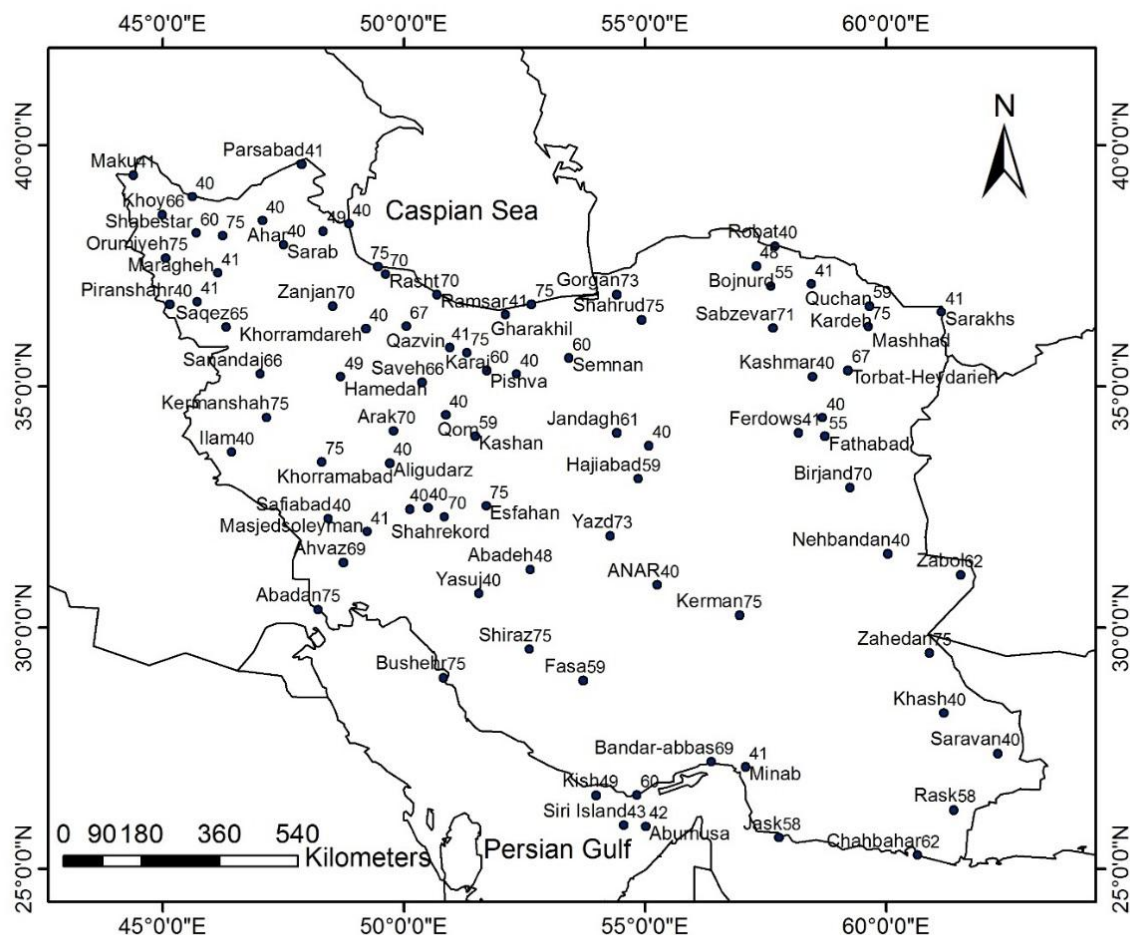
تعیین نقطه تغییر و برازش توابع توزیع احتمال بر داده‌ها می‌تواند تحت تأثیر طول دوره‌های آماری کوتاه مدت قرار گیرد. هرچه دوره آماری طولانی‌تر باشد نتایج حاصله دقیق‌تر خواهند بود، زیرا توابع احتمال بر مبنای قانون اعداد بزرگ بنا شده است که عنوان می‌کند هرچه طول دوره آماری بیشتر باشد فراوانی نسبی به‌احتمال وقوع نزدیک‌تر است.

زو و همکاران (Zhou et al., 2019) نشان دادند دقت آزمون‌های تعیین نقطه تغییر مانند پتیت با افزایش طول سری زمانی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و نقطه تغییر با دقت بیشتری برآورد می‌شود. کانت و همکاران (Conte et al., 2024) نیز بیان کردند که آزمون پتیت در نمونه‌های کوچک (۲۰، ۳۰ و ۱۰۰) توان بسیار پایینی دارد و با افزایش اندازه نمونه، قدرت تشخیص آن به طور محسوسی افزایش می‌یابد. سازمان جهانی هواشناسی (WMO) نرمال اقلیمی استاندارد را بر اساس میانگین داده‌های اقلیمی در یک دوره 30 ساله تعریف کرده است. به همین دلیل، بسیاری از مطالعات اقلیم‌شناسی و هیدرولوژی از سری‌های زمانی حداقل ۳۰ ساله به‌عنوان مبنای تحلیل استفاده می‌کنند (WMO, 2023).

بنابراین، در این پژوهش با در نظر گرفتن توزیع مکانی داده‌ها، ۸۷ ایستگاه در کشور مورد بررسی قرار گرفت که دارای حداقل ۴۰ سال و حداکثر ۷۵ سال (طولانی‌ترین دوره در ایران) داده هستند. در این پژوهش ابتدا درصد متوسط بارش در ماه‌های مختلف سال در کشور مورد بررسی قرار گرفت و ماه‌هایی که میانگین بارش آنها در کشور حداقل ۱۰ درصد متوسط بارش است انتخاب شد. بر این اساس شش ماه نوامبر تا آوریل که بارش‌های اصلی در اغلب مناطق کشور در آنها اتفاق می‌افتد، به همراه میانگین سالانه بارش‌ها در ایستگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. طول دوره آماری هر ایستگاه نیز در این شکل نمایش داده شده است.

تغییرات اقلیمی باعث بروز تحولات ساختاری در الگوهای بارش می‌شوند که می‌توانند بر منابع آب، کشاورزی و مدیریت خشکسالی تأثیر بگذارند. یکی از روش‌های کارآمد برای شناسایی و تحلیل این تحولات، بررسی سری‌های زمانی بارش قبل و بعد از نقطه تغییر^۱ است. این تغییرات تأثیر قابل توجهی بر رژیم‌های بارشی دارند که نه تنها میانگین بارش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه می‌توانند ساختار آماری توزیع بارش، فراوانی رخداد‌های شدید و کم‌بارش، واریانس، چولگی و کشیدگی توزیع را نیز تغییر دهند. تحلیل فراوانی بارش و بررسی هیستوگرام‌های آن ابزارهای کلیدی برای شناسایی این تحولات هستند، زیرا این تحلیل‌ها امکان بررسی غیرایستایی سری‌های زمانی بارش و شناسایی تغییرات ناگهانی یا تدریجی در شدت و فراوانی رخداد‌های بارشی را فراهم می‌کنند (Sun et al., 2018; Westra et al., 2013).

¹ Change Point



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد بررسی

Fig 1. Geographical location and length of the statistical period of the investigated stations

بنابراین، در این پژوهش ابتدا وجود نقطه تغییر در سری‌های بارش کشور بررسی و سپس تغییرات منحنی توزیع احتمال بارش قبل و بعد از نقاط تغییر مورد مقایسه قرار گرفت. برای شناسایی نقطه تغییر در سری زمانی بارش، از آزمون پتیت استفاده شد. این آزمون به دلیل سابقه و اعتبار آن در مطالعات هیدرولوژیکی و اقلیمی پیشین، برای تعیین زمانی که ویژگی‌های آماری یک سری اقلیمی یا هیدرولوژیکی به طور معنی‌دار تغییر می‌کند، انتخاب گردید. نقطه تغییر به عنوان مبنایی برای تقسیم سری زمانی به دو دوره قبل و بعد از تغییر در نظر گرفته شد. این روش در بسیاری مطالعات گذشته به عنوان روشی کارآمد معرفی شده است برای نمونه ویلارینی و همکاران (Villarini et al., 2009) با بررسی چهار روش شناسایی نقطه تغییر برای داده‌های دبی در آمریکا نشان دادند که نتایج حاصل از آزمون پتیت با سال‌های نقطه تغییر که از داده‌های سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) و اطلاعات سایت در ۴۷ ایستگاه اندازه‌گیری جریان رودخانه استنباط شده بود، بیشترین تطابق را دارند. ملاکپور و ویلارینی (Mallakpour and Villarini, 2016) نیز نشان دادند که آزمون‌های تشخیص نقطه تغییر مانند پتیت توانایی تشخیص زمان تغییر را دارند؛ ولی توانایی شناسایی تغییر در پارامترهایی مانند چولگی یا داده‌های پرت را ندارند. بر همین اساس برای درک عمیق‌تر از تغییرات بارش در طول زمان، تغییر در منحنی توزیع احتمال سری‌های بارش قبل و بعد از نقطه تغییر نیز مورد بررسی قرار گرفت. تغییر در منحنی توزیع احتمال می‌تواند بیانگر تغییرات در دیگر پارامترهای آماری داده‌ها مانند چولگی، کشیدگی، واریانس و... باشد. جوان و یحیوی (Javan and Yahyavi, 2026) نیز نشان دادند آزمون پتیت بالاترین کارایی را برای شناسایی نقاط تغییر بارش در ایران را دارد.

تحلیل توزیع و تابع احتمال بارش

در این بخش باهدف تحلیل توزیع فراوانی بارش ابتدا برای سری‌های زمانی قبل و بعد از نقطه تغییر، بهترین توزیع آماری بر سری‌های بارش برازش و پارامترهای هر توزیع با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی یا روش گشتاورها برآورد شدند. برازش توزیع‌های آماری بر سری‌های بارش در محیط نرم افزار EasyFite5.6 انجام شد که ۶۵ توزیع آماری شامل تمام توزیع‌های مرسوم را بررسی و نتایج را ارائه می‌دهد. بهترین توزیع آماری بر اساس آزمون کلموگروف - اسمیرنوف انتخاب شدند. این روش نسبت به روش کا - اسکوتر سخت‌گیرانه‌تر عمل می‌کند.

تحلیل توزیع فراوانی یا تابع احتمال سری‌های بارش قبل و بعد از نقطه تغییر امکان مقایسه ساختار آماری و فراوانی رخدادهای کم، متوسط و شدید بارش در دو دوره را فراهم می‌کند. در انتها تغییرات در شکل و خصوصیات منحنی تابع احتمال (Probability Distribution Function) و همچنین شیفت منحنی‌ها قبل و بعد از نقطه تغییر بررسی شد. واترسون (Watterson, 2008) در پژوهشی با بررسی توابع چگالی احتمال برای تغییرات دما و بارش تحت گرمایش جهانی، نشان داد که ارزیابی تغییرات بارش نباید تنها بر اساس میانگین تغییرات انجام شود، بلکه باید کل توزیع احتمال مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج و بحث

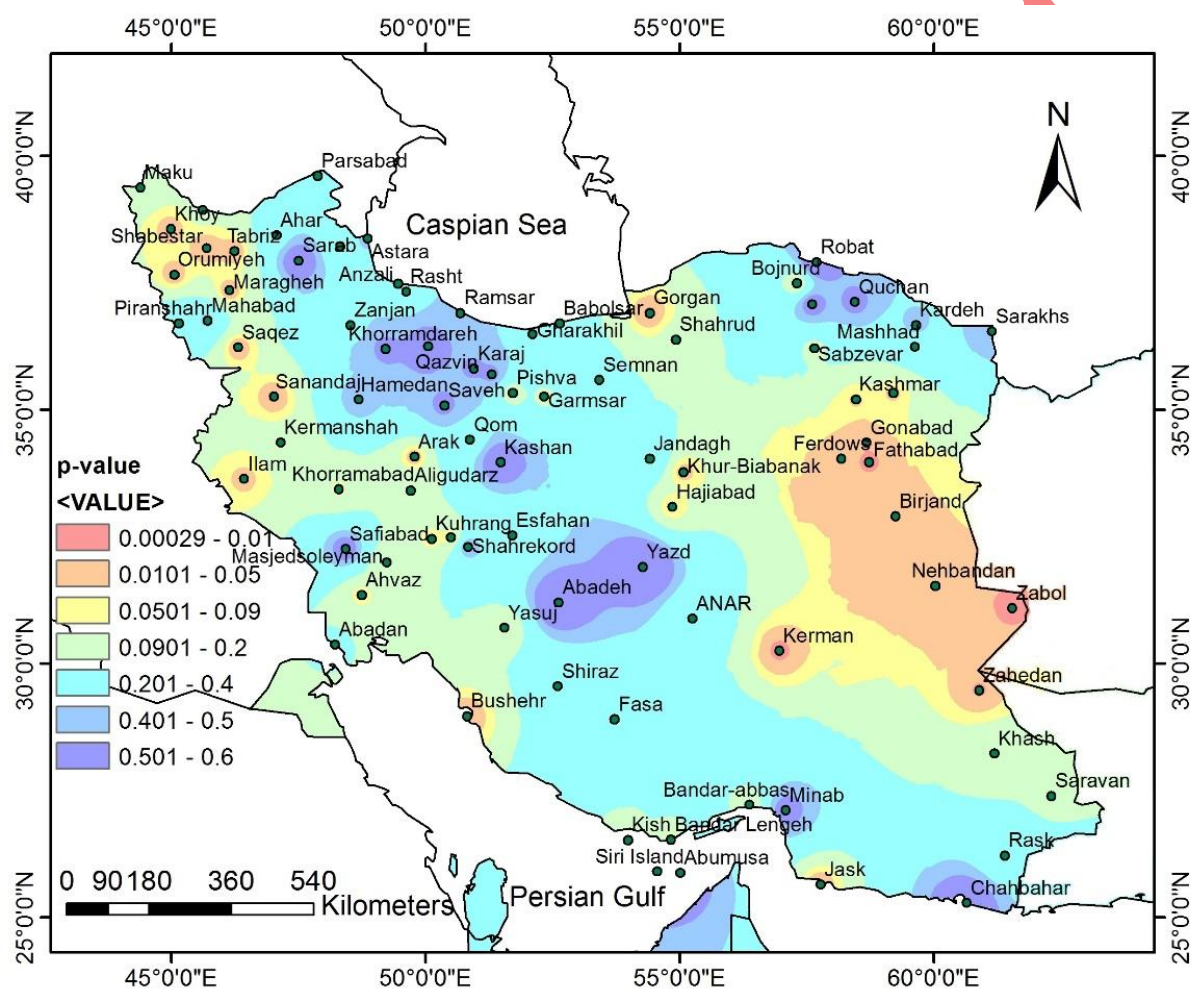
شناسایی نقاط تغییر

در ابتدا وجود نقاط تغییر در سری‌های بارش ۸۷ ایستگاه‌های مورد بررسی در مقیاس ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۱ ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۰/۱ و ۰/۰۵ را در مقیاس ماهانه و سالانه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد در هر ماه تعداد محدودی از ایستگاه‌ها مورد بررسی دارای نقاط تغییر معنی‌دار هستند. برخی مطالعات گذشته نیز نشان داده بود که متغیر بارش در بسیاری از ایستگاه‌ها از نظر آماری فاقد نقطه تغییر معنی‌دار هستند (Min Ghodoosi et al., 1992; Khosravi and Azari, 2022; Sun et al., 2021; Barbero et al., 2017; Westra et al., 2013; et al., 2011). نمونه قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2020) نیز در مطالعه یک شاخص خشکسالی مبتنی بر بارش در ایران نشان دادند به ترتیب در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان ۱۱، ۳۱، ۸ و ۱۵ درصد از مناطق دارای نقطه تغییر معنی‌دار هستند و پراکندگی ایستگاه‌های معنی‌دار در فصول مختلف متفاوت است. شیروانی (Shirvani, 2017) نیز با مطالعه ۱۸ ایستگاه سینوپتیک ایران نشان داد تنها در چهار ایستگاه کرمان، ارومیه، شاهرود و تبریز نقاط تغییر معنی‌دار وجود دارد.

در مطالعه حاضر بیشترین تعداد ایستگاه معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ در ماه دسامبر (در ۲۴٪ از ایستگاه‌ها) و کمترین در ماه فوریه (در ۸٪ از ایستگاه‌ها) مشاهده شد. در مقیاس سالانه نیز تنها ۲۹٪ ایستگاه‌های مورد مطالعه نقطه تغییر معنی‌دار نشان دادند. در مجموع از ۸۷ ایستگاه مورد بررسی ۶۷ درصد حداقل در یک ماه و یا در مقیاس سالانه نقطه تغییر معنی‌داری (در سطح ۰/۰۵) دارند و ۳۳ درصد ایستگاه‌ها فاقد نقطه تغییر معنی‌دار هستند.

تعداد نقاط تغییر معنی‌دار (در سطح معنی‌داری ۰/۰۵) در مقیاس ماهانه و سالانه در هر ایستگاه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. ایستگاه‌های گرگان، فردوس، سنندج و بوشهر با ۴ نقطه تغییر در مقیاس ماهانه و سالانه بیشترین نقاط تغییر را نشان دادند. در صورتی‌که نتایج بر اساس سطح معنی‌داری ۰/۱ گزارش شوند، درصد معنی‌داری به ۸۱ درصد افزایش می‌یابد. در این حالت از مجموع ۸۷ ایستگاه مورد بررسی ۱۷ ایستگاه نیز فاقد نقطه تغییر معنی‌دار تشخیص داده شد که اغلب آنها در شمال و شمال غرب کشور متمرکز هستند. مالکی و همکاران (Maleki et al., 2025) نیز در مطالعه‌ای در شمال غرب ایران نشان دادند از بین ۱۲ ایستگاه مورد بررسی در این منطقه، فقط بارش یک ایستگاه (مراغه) روند کاهشی معنی‌دار دارد و سایر ایستگاه‌ها فاقد تغییر معنی‌دار هستند. نقاط تغییر معنی‌دار (در سطح معنی‌داری ۰/۵) شناسایی شده در مقیاس ماهانه دارای پراکندگی زمانی نسبتاً وسیعی هستند از سال ۱۹۶۹ در بارش ماه دسامبر ایستگاه اهواز تا سال ۲۰۱۴ در ماه ژانویه ایستگاه مسجد سلیمان. در مقیاس سالانه نیز از سال ۱۹۷۶ در زاهدان تا ۲۰۰۶ در ایلام و مرغملک متغیر هستند. در مجموع بیشترین موارد نقاط تغییر معنی‌دار در دهه ۱۹۹۰ (۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹) و سپس دهه ۲۰۰۰ (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹) مشاهده شد به نحوی که ۴۲ درصد موارد معنی‌دار در دهه ۱۹۹۰ و ۴۰ درصد در دهه ۲۰۰۰ اتفاق افتاده است.

بسیار از مطالعات گذشته در ایران نیز شروع تغییرات بارش را در این دو دهه گزارش نموده‌اند برای نمونه حلبیان (Halabian, 2017) به‌منظور واکاوی تغییرات زمانی بارش ایران، از داده‌های پایگاه داده GPCC استفاده و گزارش نمودند بارش سالانه در برخی مناطق ایران از دهه ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ روند کاهشی نشان دادند. صالحی و همکاران (Salehi et al., 2020) نیز بیان کردند که نخستین تغییر عمده اقلیم بارشی ایران که با کاهش معنی‌دار بارش همراه بوده، در بسیاری از ایستگاه‌های ایران از حدود دهه ۱۹۹۰ آغاز شده است. قاسمی (Ghasemi, 2012) نیز با بررسی تغییرات پوشش ابر در ۹۰ ایستگاه کشور نشان داد که سال تغییر ناگهانی در سری‌های مقادیر پوشش ابر در اغلب این ایستگاه‌ها، در دهه ۹۰، اتفاق افتاده است. در مقیاس سالانه نیز تنها ۳۱ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای نقطه تغییر معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ هستند. شکل ۲ تغییرات مقادیر p -value را برای بررسی معنی‌داری نقطه تغییر بارش سالانه در کشور را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ایستگاه‌های با نقطه تغییر معنی‌دار در سری بارش‌های سالانه عموماً در نیمه غربی و شرقی کشور قرار دارند.



شکل ۲. مقادیر p -value برای معنی‌داری نقاط تغییر در بارش سالانه

Fig 2. P-values for the significance of change points in annual precipitation

جدول ۱. ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر معنی‌دار (۰/۱ و ۰/۰۵) به همراه سال تغییر

Table 1. Stations with significant change points (0.1 and 0.05) along with the year of change

Jan	Year	Feb	Year	Mar	Year
Arak	1984	Lengeh	1999	Maragheh	1998
Khur	2009	Sanandaj	1992	Fathabad	1999
Sanandaj	1985	Tabriz	1976	Kerman	1998
Bojnurd	2006	Chahbahar	1992	Gorgan	1976
Esfahan	2007	Qom	1996	Sanandaj	1998
Noshahr	1999	Jask	1996	Shabestar	1993
Khoy	1986	Robat	2004	Kish	1999
Kardeh	1992	Sabzevar	1970	Anar	1999
Sahneh	2006	Arak	1996	Bushehr	1999
Bushehr	2008	Maragheh	1996	Gonabad	1999
Khorramabad	1982	Khorramabad	1996	Masjedsoleyman	1999
Sabzevar	2006	Kish	1996	Ferdows	1999
Shahrekord	2006	Apr	Year	Margmalek	1998
Pishva	2005	Saqez	1996	Aligudarz	2007
Hamedan	2008	Birjand	1984	Ilam	1998
Abadan	2008	Fathabad	1998	Tabriz	1977
Kerman	2000	Shabestar	1990	Sarab	2001
Masjedsoleyman	2014	Kermanshah	1976	Nehbandan	2000
Nehbandan	2000	Maragheh	2007	Babolsar	1992
Birjand	2010	Robat	2003	Kuhrang	1998
Jandagh	2008	Gorgan	1974	Khoramd	2007
Dezful	2005	Mashhad	1993	Zabol	1997
Robat	2003	Yazd	1977	Semnan	1999
Mashhad	2006			Dezful	1999
Quchan	2005			Anzali	1991
Qom	2009				
Torbat	2006				
Kuhrang	2006				
Yasuj	2007				
Ferdows	2008				
Ahvaz	2006				
Jask	1998				
Sarakhs	2000	Quchan	2009	Shabestar	1992
Anar	2007	Fasa	2006	Kerman	1997
Kish	2004	Ferdows	2009	Tabriz	1982
Dezful	2007	Gonabad	2009	Gorgan	1983
Siri	2009	Gorgan	1994	Zabol	1999
Abadeh	2010	Sabzevar	2007	Maragheh	1998
Lengeh	1993	Bushehr	2006	Zahedan	1976
Ahvaz	1980	Torbat	1992	Gonabad	1999
Shiraz	2003	Fathabad	2009	Saqez	1994
Nehband	2010	Noshirvan	1992	Bushehr	2005
Yasuj	2003	Pishva	1981	Orumiyeh	1995
Rask	1988	Ahvaz	1969	Ferdows	1999
Khur	1998	Minab	1995	Jask	1998
Minab	1998	Esfahan	2006	Birjand	1997
Robat	2004	Kardeh	2004	Khoy	1988

Fasa	2003	Bojnurd	1992	Arak	1982
Maragheh	1995	Mashhad	2004	Khur	2004
Jandagh	1998	Sanandaj	1993	Kish	1999
Yazd	2010	Nehbandan	1995	Nehbandan	2000
Abumusa	1999	Ardebil	1993	Ilam	2006
Torbat	1992	Shiraz	2006	Torbat	1999
		Abadeh	2009	Kashmar	1999
		Ilam	2005	Hajiabad	1990
		Sahneh	1992	MarghMalek	2006
		Khur	2008	Lengeh	2000
		Zahedan	1995	Kuhrang	2007
		Shahrud	2009	Bojnurd	2005
		Sarakhs	2014	Ahvaz	1966
		Maragheh	2003	Yasuj	2006
		Kermanshah	2003	Khorramabad	1997
		Khrang	2007	Masjedsolyman	2006
		Tehran	1971	Pishva	2005
		Semnan	2008		
		Zabol	2009		
		Saravan	2009		
		Kashmar	2007		

جدول ۲. تعداد نقاط تغییر معنی دار در مقیاس ماهانه و سالانه در هر ایستگاه

Table 2. Number of significant change points on a monthly and annual scale at each station

Station	Number	Station	Number	Station	Number	Station	Number
Arak	1	Tabriz	2	Sarab	1	Kashmar	1
Anzali	2	Torbat	3	Siri	1	Kerman	2
Ardebil	1	Tehran	1	Sarakhs	2	Kermanshah	2
Abumusa	1	Jask	2	Saqez	1	Kuhrang	4
Esfahan	2	Jandagh	2	Semnan	2	Kish	4
Aligudarz	1	Chahbahar	1	Sanandaj	4	Gorgan	3
Anar	2	Khorramabad	3	Saravan	1	Gonabad	2
Ahvaz	3	Khorramdareh	1	Shahrud	1	Maragheh	5
Ilam	2	Khur	3	Shabestar	2	Marghmalek	1
Abadan	1	Khoy	1	Shahrekor	1	Masjedsolyman	2
Abadeh	2	Dezful	3	Shiraz	2	Mashhad	3
Babolsar	1	Rask	1	Fathabad	3	Minab	2
Bojnurd	2	Robat	4	Ferdows	3	Nehbandan	4
Lengeh	2	Sabzevar	3	Kardeh	2	Noshahr	2
Bushehr	3	Zahedan	1	Qom	2	Hamedan	1
Birjand	2	Saveh	2	Quchan	2	Yasuj	2
Pishva	2	Zabol	2	Fasa	2	Yazd	2

بررسی تغییرات تابع توزیع احتمال قبل و بعد از نقاط تغییر

در این بخش تابع احتمال سری داده‌های قبل و بعد از نقاط تغییر برای فهم عمیق‌تر از نحوه تغییرات مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه برازش توابع توزیع احتمال بر داده‌ها می‌تواند تحت تأثیر طول دوره‌های آماری کوتاه مدت قرار گیرد و نظر به اینکه در این بخش توزیع‌های احتمال قبل و بعد از نقطه تغییر به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرند و عملاً طول دوره آماری به دو بخش کوچک‌تر تقسیم می‌گردد، جهت کاهش عدم قطعیت نتایج در این بخش ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر معنی دار که دارای طول دوره آماری حداقل ۶۰ سال بودند مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۳ بهترین تابع چگالی احتمال (PDF) برازش یافته بر اساس روش کلموگروف-اسمیرنوف را برای ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر معنی دار را نشان می‌دهد. به جز چند مورد در تمام ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد بررسی تابع توزیع احتمال بارش قبل و بعد از نقطه تغییر با هم متفاوت است که نشان می‌دهد علاوه وجود تغییر در میانگین سری‌ها، خصوصیات دیگر شاخص‌های آماری

سری‌های زمانی بارش مانند چولگی، کشیدگی و واریانس نیز دچار تغییر شده‌اند. این امر حاکی از یک تغییر الگوی عمیق در بارش بعد از نقاط تغییر است. توزیع ویبال بیشترین فراوانی را در بین توزیع‌های آماری نشان داد و بعد از آن توزیع گاما و بتا قرار دارند. در بین ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر معنی‌دار و مقیاس سالانه و همچنین ماه‌های مارس و نوامبر، نوع توزیع‌های آمار قبل و بعد از نقطه تغییر کاملاً تفاوت کرده است. در ماه‌های دیگر مورد بررسی استثنائاتی وجود دارد مثلاً در ماه‌های فوریه و آوریل در یک ایستگاه، ماه ژانویه دو ایستگاه و ماه دسامبر در چهار ایستگاه نوع تابع توزیع احتمال قبل و بعد از نقطه تغییر، یکسان است. هرچند در این موارد میزان کشیدگی و چولگی‌ها قبل و بعد از نقطه تغییر دارای تفاوت است.

شکل ۳ تابع چگالی احتمال (PDF) متغیر بارش برای دو بازه‌ی زمانی قبل از نقطه تغییر (منحنی آبی) و بعد از نقطه تغییر (منحنی قرمز) را برای برخی از ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. تفاوت در شکل توزیع فراوانی یا احتمال وقوع و همچنین پراکندگی داده‌ها قبل و بعد از نقطه تغییر به‌خوبی قابل مشاهده است.

برخی مطالعات گذشته نیز به تغییر شکل منحنی توزیع آماری بارش در ایران اشاره کرده‌اند. سالاری‌جزی (Salarijazi, 2017) در پژوهشی در ۵ ایستگاه کشور برای تعیین تغییرات توزیع بارش سالانه بیان کرد که بررسی روند بارش برای توصیف تغییرات اقلیمی کافی نیست. وی نشان داد کل توزیع آماری بارش دچار تغییر شده است و احتمال وقوع بارش‌های سنگین نسبت به گذشته تغییر یافته است. شیروانی (Shirvani, 2017) نیز با مطالعه ۱۸ ایستگاه سینوپتیک ایران (۱۹۵۱-۲۰۱۰) نشان داد تنها در چهار ایستگاه قبل و بعد از نقطه تغییر شیف‌پارامتری در توزیع بارش رخ داده است.

بررسی تغییر در شکل توزیع و پراکندگی

ارتفاع منحنی نشان می‌دهد که وقوع یک مقدار مشخص بارش چقدر محتمل است. برای نمونه الگوی تغییرات منحنی تابع احتمال ایستگاه شهرکرد در ماه ژانویه (شکل ۳) نشان می‌دهد منحنی قبل از نقطه تغییر (آبی) توزیع پهن‌تر و چولگی مثبت دارد که نشان می‌دهد احتمال رخداد بارش‌های متوسط تا زیاد قابل توجه بوده و نه تنها از میانگین بیشتر بوده، بلکه شدت بارش‌ها هم افزایش یافته است. درحالی‌که بعد از نقطه تغییر در سال ۲۰۰۶ منحنی توزیع احتمال بارش باریک‌تر و متمرکز در مقادیر پایین است که نشان می‌دهد بیشترین احتمال وقوع مربوط به بارش‌های کم است. به عبارت دیگر بعد از سال ۲۰۰۶ احتمال بارش‌های کم افزایش یافته است. داراند (Darand, 2025) در مطالعه‌ای با برازش توزیع گاما روی داده‌های روزانه ایران نشان می‌دهد که پارامتر شکل توزیع گاما در بیشتر مناطق ایران کاهش یافته و پارامتر مقیاس افزایش یافته است. این تغییرات به معنی چولگی به راست توزیع بارش و افزایش احتمال بارش‌های کم است. ریاضی (Raziei, 2021) نیز نشان داد توزیع بارش ماهانه در اغلب مناطق ایران دارای چولگی مثبت است؛ به‌طوری‌که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مقادیر زیاد ضریب چولگی به راست نشان‌دهنده وجود تعداد زیادی رخدادهای بارش کم یا صفر و تعداد محدودی رخدادهای بارش بسیار شدید است.

تفسیر شکل ۳ بر اساس تحلیل فراوانی بارش نیز نشان می‌دهد در دوره قبل از نقطه تغییر، فراوانی نسبی بارش‌های متوسط و نسبتاً زیاد قابل توجه بوده و بخش قابل ملاحظه‌ای از رخدادهای بارشی در بازه‌های بالاتر بارش، متمرکز شده‌اند. شکل توزیع در این دوره نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر داده‌ها و سهم بالاتر رخدادهای بارشی با مقادیر بزرگ‌تر است که بیانگر نقش پررنگ‌تر بارش‌های شدید در رژیم بارش منطقه می‌باشد. در مقابل، در دوره بعد از نقطه تغییر، بیشترین فراوانی نسبی به بازه‌های کم بارش اختصاص یافته است و توزیع فراوانی به طور محسوسی در مقادیر پایین‌تر بارش متمرکز شده است. افزایش فراوانی رخدادهای بارش ضعیف و کاهش فراوانی بارش‌های متوسط و شدید نشان می‌دهد که احتمال وقوع مقادیر بزرگ بارش در این دوره کاهش یافته است. کوتاه‌تر شدن دنباله راست توزیع فراوانی نیز مؤید کاهش سهم رخدادهای حدی بارش می‌باشد.

میانگین‌های بارش (μ) نیز به‌صورت معنی‌داری دچار جابه‌جایی شده‌اند. قبل از نقطه تغییر (منحنی آبی) میانگین بارش در ایستگاه شهرکرد حدود ۶۱/۴ میلی‌متر بوده در حالیکه بعد از نقطه تغییر (منحنی قرمز) میانگین به حدود ۳۱/۲ میلی‌متر کاهش یافته است. یعنی مرکز توزیع بارش تقریباً به نصف کاهش یافته است، در این حالت از نظر احتمالاتی، مقادیر بزرگ‌تر بارش دیگر چندان محتمل نیستند.

به عبارت دیگر منحنی به سمت چپ شیف‌ت (Shift) یا منتقل شده و پرفراوانی آن کمتر شده است که نشان می‌دهد بعد از نقطه تغییر در بارش، واریانس بارش کاهش یافته است. این دقیقاً نشانه‌ی یک تغییر ساختاری در سری زمانی بارش قبل

و بعد از نقطه تغییر است. نقطه‌ی تغییر باعث شده با کاهش میانگین بارش احتمال رخداد بارش‌های شدید کمتر شده و رژیم بارشی از حالت پرباران‌تر و متغیرتر به حالت کم‌بارش‌تر و پایدارتر تغییر کرده است. به عبارت دیگر بعد از سال ۲۰۰۶ این ایستگاه با یک الگوی پایدار کم‌بارش نسبت به قبل از سال ۲۰۰۶ روبرو شده است.

جدول ۳. تابع چگالی احتمال (PDF) به همراه آماره کلموگروف-اسمیرنوف (K-S) برای قبل و بعد از نقطه تغییر معنی‌دار

Table 2. Probability Density Function (PDF) with Kolmogorov-Smirnov (K-S) statistic for before and after the significant change point

Jan	K-S	Probability Function	K-S	Probability Function
Abadan	0.08	Beta4	0.09	Weibull (3)
Bushehr	0.07	Beta4	0.10	Gamma (2)
Kerman	0.07	Weibull (3)	0.09	Weibull (3)
Khorramabad	0.08	Gamma (2)	0.05	Weibull (3)
Mashhad	0.07	Gamma (2)	0.12	Logistic
Sabzevar	0.07	Beta4	0.10	Beta4
Arak	0.13	Log-normal	0.07	Beta4
Birjand	0.09	Logistic	0.10	Gamma (2)
Shahrekord	0.07	Weibull (2)	0.12	Gamma (2)
Ahvaz	0.08	GEV	0.10	Weibull (3)
Feb				
Khorramabad	0.07	GEV	0.07	GEV
Tabriz	0.08	Logistic	0.07	Gamma (2)
Sabzevar	0.12	Exponential	0.06	Beta4
Arak	0.06	Gamma (2)	0.07	Weibull (3)
Mar				
Abadan	0.10	Weibull (2)	0.11	Normal
Babolsar	0.05	Weibull (3)	0.06	Gamma (2)
Anzali	0.07	Gamma (2)	0.08	Weibull (3)
Esfahan	0.08	Weibull (3)	0.07	GEV
Kerman	0.07	Beta4	0.12	Weibull (3)
Tabriz	0.07	Log-normal	0.07	Weibull (2)
Gorgan	0.11	Normal	0.07	Logistic
Apr				
Bushehr	0.08	Weibull (3)-	0.11	Weibull (3)
Kermanshah	0.09	Log-normal-	0.06	GEV
Mashhad	0.06	GEV-	0.08	Weibull (3)
Gorgan	0.10	Logistic-	0.09	Weibull (2)
Yazd	0.12	Beta4-	0.08	Gamma (2)
Arak	0.11	Weibull (2)-	0.08	Log-normal
Birjand	0.09	Beta4-	0.06	Weibull (3)
Dec				
Kermanshah	0.07	Normal	0.06	GEV
Mashhad	0.07	Weibull (3)	0.17	Exponential
Shahrud	0.12	Weibull (3)	0.13	Weibull (3)
Shiraz	0.08	Weibull (3)	0.16	Weibull (3)
Tehran	0.12	GEV	0.05	Weibull (3)
Zahedan	0.08	Weibull (3)	0.28	Weibull (3)
Gorgan	0.09	Gamma (2)	0.07	GEV
Sabzevar	0.07	Weibull (3)	0.09	Weibull (3)

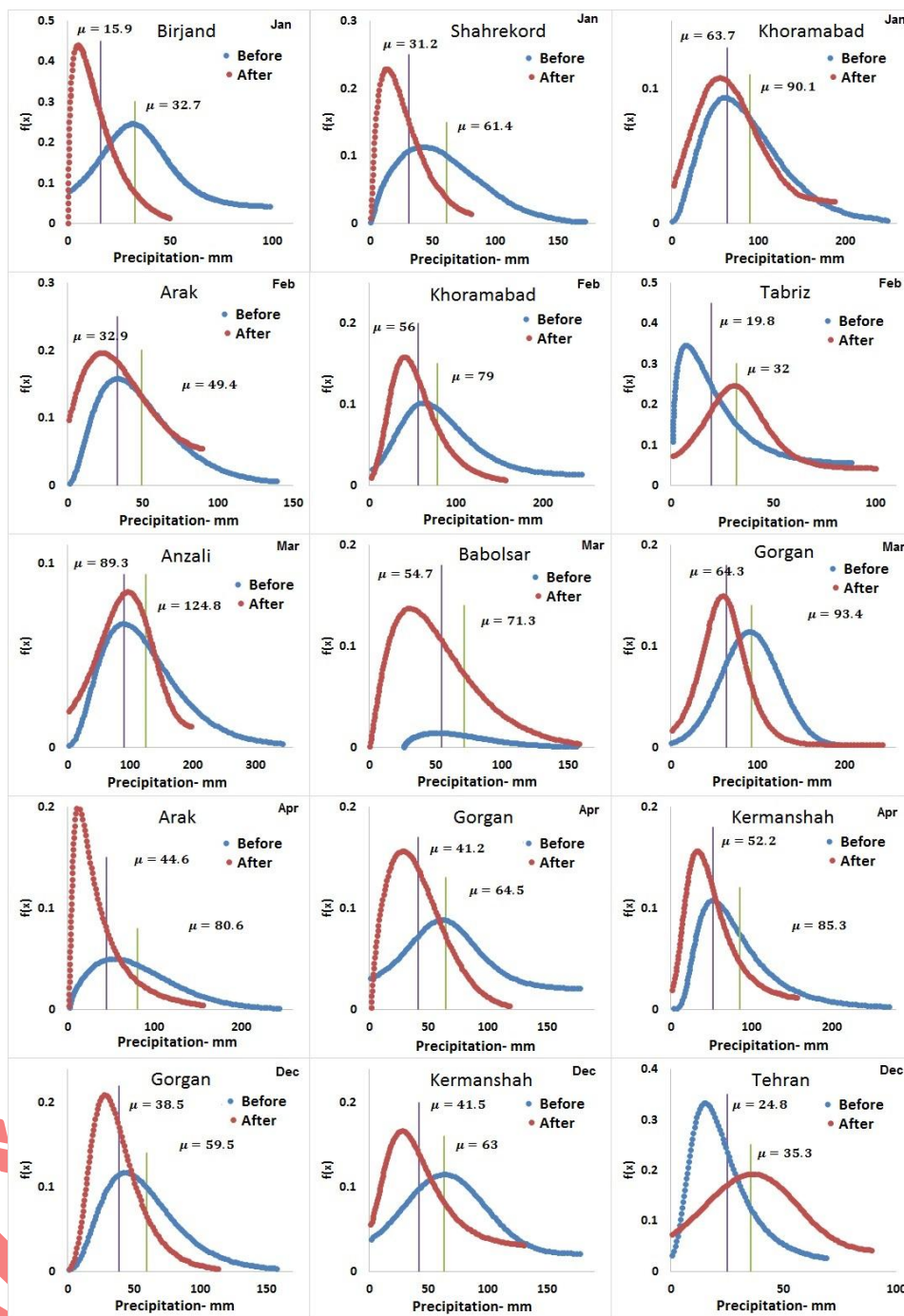
Bushehr	0.13	Weibull (3)	0.13	Gamma (2)
Shiraz	0.13	Weibull (3)	0.10	Beta4
Yazd	0.19	Weibull (3)	0.11	Gamma (2)
Ann				
Kerman	0.06	GEV	0.09	Logistic
Khorramabad	0.06	Normal	0.10	Logistic
Orumiyeh	0.07	Weibull (3)	0.06	Gamma (2)
Tabriz	0.08	Log-normal	0.05	Gamma (2)
Zahedan	0.11	GEV	0.07	Chi-square
Gorgan	0.13	Chi-square	0.09	Weibull (3)
Arak	0.08	Logistic	0.06	Beta4
Birjand	0.10	Gamma (1)	0.10	Weibull (3)

کاهش احتمال بارش‌های شدید و افزایش احتمال بارش‌ها کم بعد از نقطه تغییر در اغلب ایستگاه‌ها قابل مشاهده است (شکل ۲) که بیان‌کننده این موضوع است فراوانی رخدادهای بارش ضعیف یا بارش‌های کوتاه‌مدت افزایش یافته است. برای نمونه در ماه ژانویه ایستگاه بیرجند احتمال بارش‌های کمتر از ۱۰ میلی‌متر از حدود ده درصد قبل از نقطه تغییر به بیش از ۴۵ درصد در بعد از نقطه تغییر رسیده است (شکل ۳) به عبارت دیگر چگالی احتمال در بازه‌های پایین بارش به طور محسوسی بیشتر شده است. این الگوی تغییرات نشان می‌دهد رژیم بارش اغلب ایستگاه‌ها پس از نقطه تغییر به سمت خشک‌تر شدن حرکت کرده است و سیستم بارشی غالب، توان تولید بارش‌های شدید را کمتر دارد.

علیزاده (Alizadeh, 2023) در مطالعه‌ای با بررسی تغییرات بارش در کره زمین نشان دادند میانگین بارش سالانه نسبت به دوره مرجع کاهش یافته است. همچنین گزارش شد که تغییرات بارش تنها به میانگین محدود نیست؛ بلکه نوسان‌پذیری بارش نیز در برخی مناطق تغییر کرده است برای نمونه در عرض‌های میانی نوسان بارش کاهش یافته است، به این معنی که اختلاف بین سال‌های خشک و مرطوب کمتر شده و احتمال وقوع شرایط بسیار خشک یا بسیار مرطوب نسبت به گذشته کاهش یافته است. در انتها نتیجه گرفتند که شیف‌ت در الگوی بارش تنها به تغییر مقدار متوسط بارش محدود نیست، بلکه تغییر در میزان نوسانات بارندگی نیز نقش مهمی در افزایش یا کاهش خطر رخدادهای حدی مانند خشکسالی و سیلاب دارد.

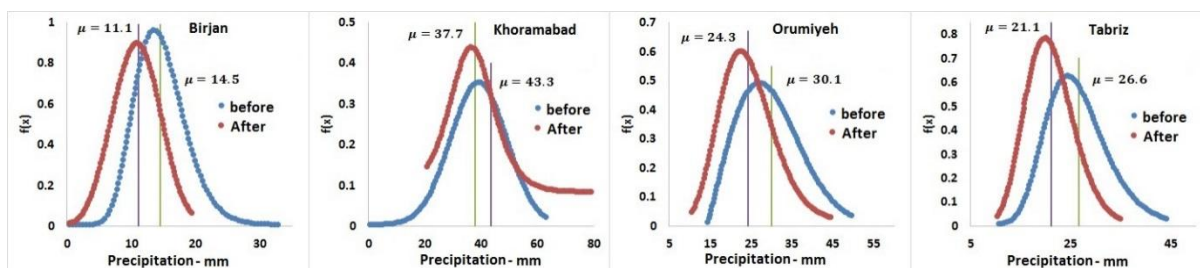
شکل ۴ نیز منحنی تابع احتمال بارش را در مقیاس سالانه برای برخی ایستگاه‌های مورد مطالعه، قبل و بعد از نقطه تغییر نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه تنها ۸ ایستگاه دارای نقطه تغییر معنی‌دار بودند و بقیه ایستگاه‌ها دارای داده‌های بارش همگن هستند (جدول ۲). مقدار بارش در مقیاس سالانه در این هشت ایستگاه نیز شاهد تغییر در نوع توزیع احتمال قبل و بعد از نقطه تغییر و شیف‌ت منحنی‌های توزیع احتمال است.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میانگین بارش در تمام این ایستگاه‌ها به صورت چشمگیری بعد از نقطه تغییر کاهش یافته است. این کاهش در بارش‌های حدی (صدک‌های بارش) نیز وجود دارد، شکل ۵ تغییرات مقادیر بارش‌های حدی در مقیاس سالانه را برای نمونه در برخی ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر نشان می‌دهد. کاهش در بارش‌های حدی در تمام صدک‌ها قابل مشاهده است. برای نمونه در ایستگاه ارومیه در دوره قبل از سال تغییر (سال ۱۹۹۵)، مقادیر بالاتر بارش یعنی صدک‌های ۹۰ و ۹۵ به ترتیب حدود ۴۵ و ۴۲ میلی‌متر بوده که بعد از نقطه تغییر این مقادیر به ترتیب به ۳۵ و ۳۴ میلی‌متر کاهش یافته‌اند. این کاهش در مقادیر پایین بارش یعنی صدک‌های ۵ و ۱۰ نیز وجود دارد به نحوی که مقادیر بارش در صدک‌های ۵ و ۱۰ قبل از سال تغییر به ترتیب ۲۸ و ۲۱ میلی‌متر بوده که به ۲۳ و ۱۶ میلی‌متر کاهش یافته‌اند. این کاهش اغلب در بارش‌های حدی بالا (صدک‌های ۹۰ و ۹۵) بیشتر از بارش‌های حدی پایین (صدک‌های ۵ و ۱۰) است.



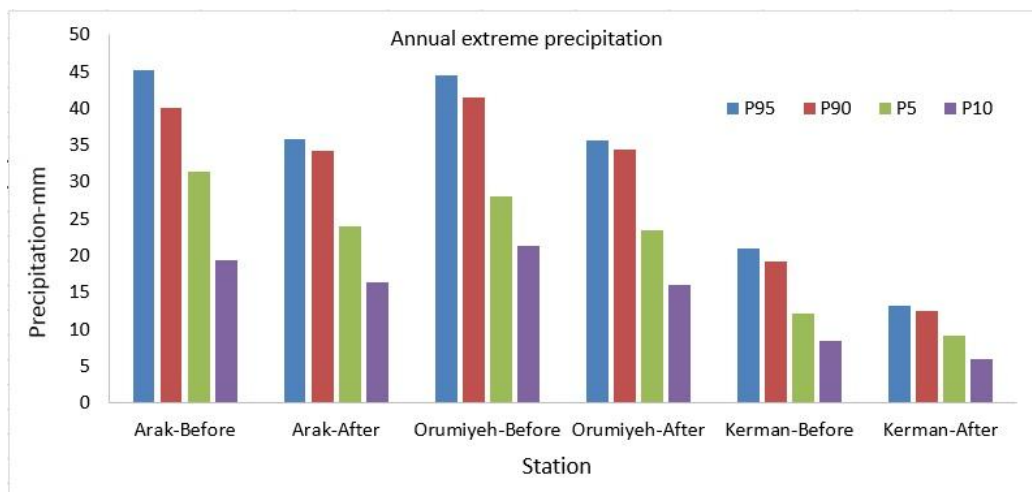
شکل ۳. منحنی تابع احتمال برای ماه‌های مورد بررسی در برخی ایستگاه‌های مورد مطالعه برای قبل (منحنی آبی) و بعد (منحنی قرمز) از نقطه تغییر (خطوط عمودی داخل شکل نشان‌دهنده میانگین بارش قبل و بعد از نقاط تغییر معنی‌دار هستند)

Fig 3. Probability function curve for the studied months at some study stations before (blue curve) and after (red curve) the change point. The vertical lines inside the Fig indicate the average precipitation before and after the significant change points.



شکل ۴. منحنی تابع احتمال در مقیاس سالانه برای برخی ایستگاه‌های مورد مطالعه، قبل (منحنی آبی) و بعد (منحنی قرمز) از نقطه تغییر (خطوط عمودی داخل شکل نشان‌دهنده میانگین بارش قبل و بعد از نقاط تغییر معنی‌دار هستند)

Fig 4. Annual-scale probability function curve for some study stations, before (blue curve) and after (red curve) the change point. The vertical lines inside the Fig indicate the average precipitation before and after the significant change points.



شکل ۵. تغییرات مقادیر بارش‌های حدی در مقیاس سالانه در برخی ایستگاه‌ها

Fig 5. Variations in extreme precipitation values on annual scale at some stations

نتیجه‌گیری

بررسی توزیع آماری بارش و تحلیل فراوانی (توابع احتمال وقوع) یکی از ابزارهای بنیادین در مطالعات اقلیمی به شمار می‌آید، زیرا بارش به‌عنوان یکی از متغیرهای اصلی هیدرولوژیکی، دارای نوسان‌های زیاد در مقیاس‌های زمانی و مکانی است و تغییرات اقلیمی می‌تواند شکل این توزیع‌ها را دستخوش تغییر کند. تحلیل توزیع احتمال بارش و فراوانی رخدادها به پژوهشگران امکان می‌دهد تا علاوه بر تغییرات میانگین، تغییرات در واریانس، چولگی (عدم تقارن) و رخدادهای حدی را نیز شناسایی کنند که اطلاعات مفیدی برای ارزیابی خشکسالی و سیلاب ایجاد می‌کند. تغییرات در ویژگی‌های آماری توزیع بارش می‌تواند اثرات مستقیم بر مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی مقابله با مخاطرات هیدرولوژیکی داشته باشد. نتایج نشان‌دهنده کاهش احتمال بارش‌های شدید و افزایش احتمال بارش‌ها کم بعد از نقطه تغییر در اغلب ایستگاه‌ها است که بیان‌کننده این موضوع است فراوانی رخدادهای بارش ضعیف یا بارش‌های کوتاه‌مدت افزایش یافته است. به عبارت دیگر چگالی احتمال در بازه‌های پایین بارش به طور محسوسی بیشتر و احتمال وقوع بارش‌های کم افزایش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده حاکم شدن یک الگوی پایدار کم‌بارش نسبت به قبل از سال تغییر در اغلب ایستگاه‌ها است که بیانگر تغییر رژیم بارش به سمت شرایط خشک‌تر می‌باشد. بررسی صدک‌های بارش نیز حاکی از کاهش بیشتر در بارش‌های حدی بالا (صدک بالا) نسبت به بارش‌های حدی پایین (صدک ۱۰) است. برای نمونه بررسی شاخص‌های چولگی و کشیدگی توزیع بارش ایستگاه شهرکرد قبل و بعد از نقطه تغییر معنی‌دار نشان داد که در هر دو دوره، توزیع بارش دارای چولگی مثبت ($Sk > 0$) بوده و از تقارن توزیع نرمال انحراف دارد. مقدار چولگی در دوره قبل از نقطه تغییر بزرگ‌تر است که بیانگر نامتقارنی شدیدتر و نقش پررنگ‌تر رخدادهای بارشی شدید در این دوره می‌باشد. از نظر کشیدگی، توزیع بارش در دوره قبل از نقطه تغییر دارای کشیدگی مثبت ($K > 0$) و از نوع کشیده‌تر از نرمال (leptokurtic) است که نشان‌دهنده وجود دم‌های ضخیم‌تر و احتمال بالاتر رخداد مقادیر حدی بارش است. در مقابل، پس از نقطه تغییر مقدار کشیدگی کاهش یافته و به مقادیر نزدیک‌تر به صفر میل می‌کند که بیانگر کوتاه‌تر شدن دم‌ها، کاهش احتمال رخداد بارش‌های حدی و متمرکزتر شدن توزیع بارش حول مقادیر کم می‌باشد. افزایش کشیدگی هم‌زمان با چولگی به راست در ایستگاه بیرجند و بعد از نقطه تغییر نیز بسیار مشهود است که نشان می‌دهد احتمال وقوع بارش‌های کم در این دوره بسیار بیشتر از بارش‌های شدید بود، به عبارت دیگر در دوره بعد از نقطه تغییر فراوانی بارش‌ها کم به شدت افزایش یافته است. به طور

کلی الگوی افزایش کشیدگی توزیع، به همراه چولگی به راست که در اغلب ایستگاه‌ها دارای نقاط تغییر معنی‌دار برای دوره بعد از نقطه تغییر مشاهده می‌گردد، بیان کنند کاهش فراوانی و یا احتمال وقوع بارش‌های شدید است. قابل ذکر است این نتایج صرفاً نشان‌دهنده تغییر ساختار آماری توزیع بارش در ایستگاه‌های دارای نقطه تغییر معنی‌دار است.

منابع

- Alizadeh, O. (2023). Changes in the mean and variability of temperature and precipitation over global land areas, *Environmental Research Climate*, 2, 035006. [In Persian]. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ace279>
- Barbero, R., Fowler, H.J., Lenderink, G. & Blenkinsop, S. (2017). Is the intensification of precipitation extremes with global warming better detected at hourly than daily resolutions, *Geophysical Research Letters*, 44(2), 974-983. <https://doi.org/10.1002/2016GL071917>
- Behrouzi, A.H., Nazemalsadat, S.M.J. & Pishvaei, M.R. (2023). Evaluating the trend of rainfall changes in the long-term time series of Shiraz, *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 19-32. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5856.1001>
- Cohn, T., & Lins, H. (2005). Nature's style: Naturally trendy. *Geophysical Research Letters*, 32(23), 1-5, <https://doi.org/10.1029/2005GL024476>
- Conte, L. C., Bayer, D. M., & Bayer, F. M. (2024). Bootstrap Pettitt test for detecting change point in hydroclimatological data: a case study for Itaipu hydroelectric plant in Brazil, 64, <https://arxiv.org/abs/2411.05233>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.05233>
- Darand, M. (2025). Probability changes of observed extreme precipitation events over Iran from 1962 to 2019, *Science of the Total Environment*, 998, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180298>
- Donat, M.G., Lowry, A.L., Alexander, L.V., O'Gorman, P.A., & Maher, N. (2016). More Extreme Precipitation in the World's Dry and Wet Regions, *Nature Climate Change*, 6, 508- 513. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>
- England, J.F., Cohn, T.A., Faber, B.A. & Stedinger, J.R., Thomas, W., Veilleux, A.G., Kiang, J.E., & Mason, R.R. (2018). Guidelines for determining flood flow frequency, *Bulletin 17C. Chap. B5, in USGS Techniques and Methods*, USGS, 148p. <https://doi.org/10.3133/tm4B5>
- Eslami, S. & Jafarzadeh, A. (2026). Analytical Comparison of Trends in Climatic Components of Semnan Province Using the Mann-Kendall and Spearman Tests, *Journal of Drought and Climate Change Research* (In press). [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2026.10886.1210>
- Esmaceli, A., Shamsipour, A.A., & Mohammadi, H. (2025). Determining the temporal and spatial trend and the change point of precipitation and maximum temperature in Tehran, *Physical Geography Research Quarterly*, 57(4), 1-22. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.399196.1007896>
- Foufoula-Georgiou, E., Guilloteau, C., Nguyen, P., Aghakouchak, A., Hsu, K.-L., & Busalacchi, A. (2020). Advancing Precipitation Estimation, Prediction and Impact Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(9), E1584-E1592. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0014.1>
- Friedman, D., Schechter, J., Baker, B., Mueller, C., Villarini, G., & White, K.D. (2016). US Army Corps of Engineers Nonstationarity Detection Tool User Guide. *User Guide, US Army Corps of Engineers: Washington, DC*. 1-57. https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/ce717/Nonstationarity_Detection_Tool_User_Guide.pdf
- Ghasemi, A. R. (2012). *Modeling the temporal and spatial changes of cloud cover, with emphasis on rainy days in Iran* (Doctoral dissertation, PhD thesis in Natural Geography, Climatology. Tabriz University. [In Persian]
- Ghodoosi, M., Morid, S., & Delavar, M. (1992). Comparison of de-trending methods for the temperature and precipitation time series, *Journal of Agricultural Meteorology*, 1(2), 32-45. [In Persian]. https://www.agrimet.ir/article_87678_d5078e6a0d7e0cf5e86a64b5121220cf.pdf
- Ghorbani, Kh., Bararkhanpour, S., Valizadeh, E., & Molaarazi, A. (2020). Regional analysis of trend and change point in seasonal series of SPEI drought index in Iran, *Water and Soil Conservation*, 27(4), 185-200. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.16525.3178>
- Gimechi, S., Mostafazadeh, R. & Alimohamadian, L. (2025). Analysis of extreme precipitation trends and probability distributions across Return Periods in Northwest Iran. *Geographical Journal*. 77(1), 43-55. <https://doi.org/10.31577/geogrcas.2025.77.1.04>
- Halabian, A.H. (2017). Assesment of Spatial-Temporal Changes of Precipitation in Iran, *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5 (13), pp. 101-116. [In Persian]. https://deej.kashanu.ac.ir/article_112596.html
- IPCC. (2023). Climate Change 2021: The Physical Science Basis, *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Javan, Kh. & Yahyavi, A. (2026). A Comprehensive Analysis of Homogeneity, Trends, and Breakpoints in Temperature and Precipitation Time Series in Iran. *Journal of Geography and Planning*. (In Press). [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/gp.2026.70885.3499>

Khosravi, A. & Azari, M. (2022). Spatio-temporal trend and change detection of temperature and precipitation of Kashafrud basin. *Quarterly Journal of Applied Research in Geographic Sciences*, 22(66), 289-306. [In Persian]. <http://doi.org/10.52547/jgs.22.66.289>

Kolars, K.A., Vecchia, A.V. & Ryberg, K.R. (2016). Stochastic model for simulating Souris River Basin precipitation, evapotranspiration and natural streamflow, *Scientific Investigations Report*, 55, <https://doi.org/10.3133/sir20155185>

Koutsoyiannis, D. (2011). Hurst-Kolmogorov dynamics and uncertainty, *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 481-495. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00543.x>

Koutsoyiannis, D. (2006). Nonstationarity versus scaling in hydrology, *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 239-254, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.022>

Maleki, R., Salahi, B., & Saber, M. (2025). Analyzing the Changes in Precipitation in Northwest Iran during the Coming Decades Based on the GCM Models, *Journal of Geography and Planning*, 28(90), 309- 327. [In Persian]. <http://doi.org/10.22034/gp.2024.59552.3212>

Mallakpour, I. & Villarini, G. (2016). A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean, *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 245-254, <http://doi.org/10.1080/02626667.2015.1008482>

Mallakpour, I., Sadegh, M., & AghaKouchak, A. (2020). Changes in the exposure of California's levee-protected critical infrastructure to flooding hazard in a warming climate, *Environmental Research Letters*, 15(6), 064032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab80ed>

Mallakpour, I., Sadeghi, M., Mosaffa, H., Asanjan, A., Sadegh, M., Nguyen, P., Sorooshian, S., & AghaKouchak, A. (2022). Discrepancies in changes in precipitation characteristics over the contiguous United States based on six daily gridded precipitation datasets, *Weather and Climate Extremes*, 36,100433, [In Persian]. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100433>

Min, S.K., Zhang, X., Zwiers, F.W. & Hegerl, G.C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes, *Nature*, 470(7334), 378-381. <https://doi.org/10.1038/nature09763>

Nazeri, M. (2025). Comprehensive global assessment of precipitation trend and pattern variability considering their distribution dynamics, *Scientific Reports*, 15, 22458. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06050-5>

Raziei, T. (2021). Performance evaluation of different probability distribution functions for computing Standardized Precipitation Index over diverse climates of Iran, *International Journal of Climatology*, 41(5), 3077–3095. <https://doi.org/10.1002/joc.7023>

Rezvani, A., Khorashadizadeh, M., & Rezaei, M. (2026). Temporal Analysis and Intensity of Meteorological Drought (Case Study: Qaen City in South Khorasan Province), *Journal of Drought and Climate Change Research*, 4(13), 105-130. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9807.1159>

Rwema, M., Sylla, M.B., Safari, B., Roininen, L., & Laine, M. (2025). Trend analysis and change point detection in precipitation time series over the Eastern Province of Rwanda during 1981–2021, *Theoretical and Applied Climatology*, 156(98). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05317-7>

Ryberg, K. R., Hodgkins, G. A., & Dudley, R. W. (2020). Change points in annual peak streamflows: Method comparisons and historical change points in the United States, *Journal of Hydrology*, 583, 124307. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124307>

Salarijazi, M. (2017). Determination of distributional changes of annual rainfall in some semi-northern stations in Iran, *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(4), 143-159. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.11808.2628>

Salehi S, Dehghani M, Mortazavi SM, & Singh V.P. (2020). Trend analysis and change point detection of seasonal and annual precipitation in Iran, *International Journal of Climatology*, 40, 308–323. <https://doi.org/10.1002/joc.6211>

Sharma, S., Swayne, D.A. & Obimbo, C. (2016). Trend analysis and change point techniques: a survey. *Energy, Ecology and Environment*, 1, 123–130. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0011-1>

Sheikhmamoo, L. & Mohseni, M. (2025). Identifying and removing point mutations in precipitation data series using homogeneity tests (case study: 18 rainfall gauge stations in Jiroft Basin), *Journal of Iranian Water Engineering Research*, 19-34. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2024.454164.1053>

Shirvani, A. (2017). Change in annual precipitation in the northwest of Iran, *Meteorological Applications*, 24, 211–218. <https://doi.org/10.1002/met.1619>

Shuai, Li, Chen, Y., Wei, W., Fang, G., & Duan, W. (2024). The increase in extreme precipitation and its proportion over global land, *Journal of Hydrology*, 628, 130456, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130456>

- Sun, F., Roderick, M. L., & Farquhar, G.D. (2018). Rainfall statistics, stationarity and climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(10), 2305-23, <https://doi.org/10.1073/pnas.1705349115>
- Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., & Alexander, L.V. (2021). A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *Journal of Climate*, 34(1), 243-258. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1>
- Villarini, G., Serinaldi, F., Smith, J., & Krajewski, W.F. (2009). On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century, *Water Resources Research*, 45(8), 1–17. <http://doi.org/10.1029/2008WR007645>
- Watterson, I.G. (2008). Calculation of probability density functions for temperature and precipitation change under global warming, *Journal of Geophysical Research*, 113, D12106, <https://doi.org/10.1029/2007JD009254>
- Westra, S., Alexander, L.V. & Zwiers, F.W. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation, *Journal of Climatology*, 26(11), 3904-3918. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- WMO. (2023). World Meteorological Organization Climatological Normals, Geneva, Switzerland. <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/climate-services/wmo-climatological-normals>
- Zhou, C., Nooijen, R.V., Kolehkina, A. & Hrachowitz, M. (2019). Comparative analysis of nonparametric change-point detectors commonly used in hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, 64(14), 1690-1710, <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1669792>