


Determining the temporal and spatial trend and the change point of precipitation and maximum temperature in Tehran

Abazar Esmaeili Mahmoudabadi¹ , Aliakbar Shamsipour²  , Hosein Mohammadi³

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

Email: abesmaili@ut.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: shamsipr@ut.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: hmmohammadi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

6 July 2025

Revised:

10 October 2025

Accepted:

19 November 2025

Available online:

23 December 2025

Keywords:

Climate change,

Climate

Parameters,

Trend,

Homogeneity tests,

Tehran.

ABSTRACT

This study aimed to analyze trends and assess the homogeneity of maximum temperature and precipitation during the cold seasons (autumn and winter) at four synoptic stations in Tehran over the period 1994–2023. The non-parametric Mann–Kendall test was employed to detect trends, and the Sen’s slope estimator was used to quantify the annual rate of change. To evaluate temporal homogeneity and identify potential structural shifts in the time series, four statistical tests—Pettitt, SNHT, Buishand, and Von Neumann—were applied. The results indicated that maximum temperature in both seasons exhibited a statistically significant increasing trend at most stations. In particular, in stations such as Shemiran and Geophysics, the average post-change temperature rose by more than 2°C. In contrast, autumn precipitation showed no significant trend, while winter precipitation at Mehrabad and Chitgar stations experienced a notable decreasing trend. The homogeneity tests also confirmed the occurrence of structural breaks in temperature data and, in some cases, in winter precipitation series. These findings reflect a clear pattern of seasonal warming, climate variability, and a relative decline in winter water resources in Tehran—issues that may have important implications for urban management, water resource planning, and climate adaptation strategies in the near future.

Cite this article: Esmaeili Mahmoudabadi, 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>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

In recent decades, climate change has become one of the major challenges for urban management in megacities such as Tehran. Rising temperatures, declining precipitation, temporal fluctuations in climatic patterns, and the expansion of urban heat islands are among the visible consequences of climate change at the urban scale. Tehran, because of its high population density, unique geographical location, and rapid physical development, is highly vulnerable to climatic variations. Particularly in the cold seasons, fluctuations in temperature and precipitation can significantly impact water resources, energy consumption, and service infrastructure.

Despite numerous global studies and some national research efforts, a precise and integrated examination of trends and homogeneity in Tehran's climatic variables (especially at the seasonal scale) has received limited attention. Furthermore, analyzing trends and the statistical structure of these data can play a critical role in climate policy-making, drought management, and water resource planning. This study aims to analyze trends and assess the homogeneity of maximum temperature and precipitation during the cold seasons (autumn and winter) at four synoptic stations in Tehran from 1994 to 2023. The main focus is to identify statistically significant trends and structural breakpoints in the time series of climatic variables to better understand the behavior of Tehran's urban climate in recent decades.

Accordingly, the research addresses the following questions: Is there a statistically significant trend in maximum temperature and precipitation during autumn and winter in Tehran? Are the time series of these variables homogeneous, or have they experienced structural breaks over time? Which stations have undergone the most significant statistical changes, and what are the implications of these changes for Tehran's climate management?

Methodology

This study employs an applied, quantitative, and analytical approach,

utilizing daily maximum temperature and precipitation data from four synoptic stations Geophysics, Shemiran, Mehrabad, and Chitgar in Tehran. The data were collected for the autumn and winter seasons over a 30-year period (1994–2023). Following rigorous quality control procedures and removal of missing or erroneous data, the datasets were organized into seasonal time series. To analyze trends, the non-parametric Mann-Kendall test was applied, a widely accepted and robust method for detecting monotonic trends in climatic time series. Additionally, Sen's slope estimator was used to quantify the annual rate of change, providing a reliable measure of trend magnitude.

To assess homogeneity and detect structural breaks in the time series, four statistical tests were employed: Pettitt, Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), Buishand, and Von Neumann tests. Pettitt and Von Neumann tests are non-parametric tests capable of identifying sudden changes and non-random structures without requiring assumptions of normality. Conversely, SNHT and Buishand tests assume normality and are designed to detect shifts in the mean and variance. These methods were applied separately for each variable, season, and station.

Results and discussion

Statistical analysis of maximum temperature and precipitation in the cold seasons at synoptic stations in Tehran revealed significant climatic changes. In autumn, the Mann-Kendall test indicated a statistically significant increasing trend in maximum temperature at most stations, with Shemiran showing the highest Kendall's tau (0.49) and Mehrabad the lowest (0.25). Sen's slope ranged from 0.04 to 0.09 °C per year. During winter, all stations exhibited significant positive trends, with p-values mostly below 0.01, confirming high confidence in these trends. Homogeneity tests, including Pettitt, SNHT, Buishand, and Von Neumann, detected structural breaks in maximum temperature data at Shemiran, Geophysics, and Chitgar. For instance, Shemiran's mean temperature increased by 1.62 °C after the autumn breakpoint, and from 8.7 to 11.2 °C

in winter, indicating a pronounced climatic shift in the 2000s (1380s SH). These increasing trends, particularly at Shemiran and Geophysics, are consistent with global warming patterns and are likely influenced by urbanization, enhanced heat islands, and changing energy consumption.

Regarding precipitation, autumn trends were largely non-significant, while winter precipitation decreased significantly at Chitgar and Mehrabad, with Sen's slopes of -2.27 and -1.85 mm/year and negative Kendall's tau values (-0.29 and -0.28). Chitgar also showed the highest winter precipitation inhomogeneity, with all tests confirming structural breaks ($p < 0.05$), potentially affecting snow storage, runoff, and water resources during dry periods.

These findings align with previous studies in Iran, including Bazgir et al. (2019) and Alipour & Malkian (2019), which reported inhomogeneity in temperature and precipitation. Overall, the simultaneous occurrence of increasing temperature trends, structural breaks, and declining winter precipitation demonstrates that Tehran is experiencing significant climate-related changes consistent with global trends.

Conclusion

This study analyzed trends and homogeneity of maximum temperature and precipitation during autumn and winter at four synoptic stations in Tehran from 1994 to 2023, identifying seasonal climate changes and structural breakpoints. Maximum temperatures showed significant increasing trends at most stations, particularly Shemiran and Geophysics, with winter averages rising over 2 °C after breakpoints. Homogeneity tests (Pettitt, SNHT, Buishand, Von Neumann) confirmed structural changes mainly in the 2000s. Autumn precipitation remained stable, while winter rainfall decreased significantly at Mehrabad and Chitgar. Given fixed station locations, uncertainty mainly arises from natural interannual variability. Overall, findings indicate warming during cold months, reduced winter precipitation, and structural changes, with implications for water, energy, public health, and urban resilience.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

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

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

تعیین روند زمانی و مکانی و نقطه تغییر بارش و دمای بیشینه تهران

اباذر اسمعیلی محمودآبادی^۱، علی اکبر شمسی پور^۲، حسین محمدی^۳

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران رایانامه: abesmaili@ut.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: shamsipr@ut.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hmmohammadi@ut.ac.ir

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|--|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی | روندها و میزان تغییرپذیری زمانی و مکانی دو عنصر اساسی جو یعنی بارش و دما، اثرات محیطی، اقتصادی و اجتماعی بسیار شدیدی دارد. پژوهش حاضر باهدف تحلیل روند و بررسی همگنی دمای بیشینه و بارش در فصل‌های سرد سال (پاییز و زمستان) در چهار ایستگاه سینوپتیک شهر تهران طی دوره آماری ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ انجام شده است. برای تحلیل روند، از آزمون ناپارامتری من کندال استفاده شد و میزان شیب تغییرات فصلی با استفاده از تخمین گر شیب سن محاسبه گردید. همچنین، به منظور شناسایی نقاط تغییر ساختاری در سری‌های زمانی، چهار آزمون آماری شامل پتی، نرمال استاندارد، بیشاند و فان نیومن به کار گرفته شد. نتایج حاصل از آزمون من کندال نشان داد که دمای بیشینه در هر دو فصل مورد مطالعه، در اغلب ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی معنادار بوده است. در برخی ایستگاه‌ها مانند شمیران و ژئوفیزیک، میانگین دما پس از نقطه تغییر تا بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. در مقابل، بارش پاییزه در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها روند معناداری نداشت، اما در زمستان، ایستگاه‌های مهرآباد و چیتگر با کاهش معنادار بارش مواجه بودند. نتایج آزمون‌های همگنی نیز وقوع شکست‌های ساختاری در داده‌های دمایی و در برخی موارد بارش زمستانه را تأیید کردند. این یافته‌ها بیانگر وجود روندهای اقلیمی معنادار در تهران طی سه دهه گذشته هستند و نشان می‌دهند که شهر تهران در معرض گرمایش فصلی و کاهش نسبی منابع آبی در زمستان قرار گرفته است؛ موضوعی که باید در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع آب و انرژی مورد توجه قرار گیرد. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵ | |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸ | |
| تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲ | |
| واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، پارامترهای اقلیمی، روند، آزمون‌های همگنی، تهران. | |

استناد: اسمعیلی محمودآبادی، اباذر؛ شمسی پور، علی اکبر و محمدی، حسین. (۱۴۰۴). تعیین روند زمانی و مکانی و نقطه تغییر بارش و دمای بیشینه تهران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۴)، ۱-۲۲.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.399196.1007896>

مقدمه

تغییرات بارش و دما تأثیرات گسترده‌ای بر جامعه انسانی دارند و در بسیاری از حوزه‌های علمی مانند هواشناسی، اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی و کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Zhao et al., 2018:156). در سال‌های اخیر، وقوع مخاطرات اقلیمی مانند امواج گرمایی، سیلاب‌های ناشی از بارش‌های شدید در ایران (اسمعیلی محمودآبادی و همکاران، ۱۴۰۴؛ ۶۵) و جهان (Fischer et al., 2019:1867) به شدت افزایش یافته و نشان داده شده که مناطق شهری به طور خاص در برابر اثرات این رخدادها آسیب‌پذیر هستند (Persiano et al., 2020).

از اواخر دهه ۱۷۰۰، فعالیت‌های انسانی به طور پیوسته باعث افزایش دمای میانگین سطح زمین شده‌اند (Pachauri et al., 2014). این روند شامل افزایش قابل توجه در حجم بارش با الگوی فصلی متغیر و روند افزایشی در نوسانات دما در مقیاس ماهانه و فصلی است. بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸، میانگین سالانه دمای سطح جهانی نسبت به دوره پیشاصنعتی بیش از ۱ درجه سلسیوس افزایش یافته است (Von Schuckmann et al., 2020: 773). روندهای بارش و دما در اثر تغییرات اقلیمی در سراسر جهان یکسان نیستند (Persiano et al., 2020). در سناریوی حداقل و حداکثر انتشار گازهای گلخانه‌ای، انتظار می‌رود دمای جهانی به ترتیب بین ۰.۳ تا ۱.۷ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (Masson et al., 2021:2391; Stocker et al., 2014:180; Pietrapertosa et al., 2018:3041). البته هرگونه تغییر در روند سری‌های زمانی را نمی‌توان به طور قطعی به پدیده تغییر اقلیم نسبت داد؛ بلکه پیش از آن، بررسی دقیق فراداده ایستگاه‌های هواشناسی ضروری است تا از ثبات شرایط مشاهده و ثبت داده‌ها اطمینان حاصل شود (خورشیددوست و همکاران، ۱۳۹۵؛ ۱۳۳). از آنجایی که پدیده تغییر اقلیم نیز به دلیل ایجاد روندهای بلندمدت بین داده‌ها، یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی ایجاد ناهمگنی در میان داده‌های اقلیمی است (مدرسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ۴۷۷). لذا، سازمان جهانی هواشناسی علاوه بر آزمون‌های تحلیل روند، آزمون‌های بررسی همگنی را نیز برای آشکارسازی پدیده تغییر اقلیم پیشنهاد کرده است (پیشگاه هادیان، ۱۳۹۵؛ ۵۰).

مطالعات متعددی در زمینه روند و یا بررسی همگنی داده‌های دما و بارش در کشور و نقاط مختلف جهان انجام شده است. فاکوزه و گروسی (Faquseh & Grossi., 2024: 18) روند بارش و دمای ماهانه و سالانه را در منطقه لومباردی ایتالیا برای دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ تحلیل کردند. آن‌ها از آزمون‌های آماری من کندال، تشخیص نقطه تغییر پتی و تخمین گر شیب سن استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که روند دما در این منطقه افزایشی و این روند در فصل‌های تابستان و پاییز معنادار است. همچنین، روند بارش نیز در این منطقه افزایشی است، ولی این روند معنادار نیست. پاکالیدو و کاراکوستا (Pakalidou & Karacosta., 2018:106) نیز با استفاده از روش من کندال روند بلندمدت بارش را در شهر تسالونیک یونان بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که روند بارش در بهار، پاییز، زمستان و کل سال مثبت است و تنها روند منفی مربوط به بارش تابستان می‌باشد. مطالعات دیگری در زمینه تغییرات دما در سراسر جهان انجام شده است که نشان می‌دهند در برخی از کشورها و در برخی فصل‌ها این افزایش و در برخی فصل‌ها کاهش داشته است. در اروپا، می‌توان به مطالعه پینسکووار و همکاران (Pińskwar et al., 2019: 773) در لهستان اشاره کرد؛ در تابستان میزان بارش افزایش یافته و در سایر فصل‌ها کاهش یافته است؛ در غرب مجارستان روند بارش، کاهش (Kocsis et al., 2020: 849)؛ و در منطقه باشقوردستان روسیه روند افزایشی (Gaponov et al., 2019) و در ایتالیا این روند کاهش می‌باشد (Buffoni et al., 1999: 33). در آسیا و در ایران؛ پژوهش عزیززی و همکاران (۱۳۹۶؛ ۲۱)، نشان داد که شاخص‌های حدی بارش در ایران دارای تغییر و روند می‌باشد. همچنین مطالعات محمدی و همکاران (۱۳۹۰؛ ۴۳) بر روی بارش نواحی جنوبی دریای خزر نشان از تغییرپذیری زیاد و عدم یکنواختی بارش در این مناطق دارد. در شمال شرق

هند، روند دمای حداقل، حداکثر و میانگین و بارش به طور معناداری افزایشی می‌باشد (Jain et al., 2013:968; Samantaray et al., 2025:44; Kabbilawsh et al., 2024:16766). در مالزی بیشترین نقاط تغییر در دماهای کمینه، میانگین و بیشینه در سال‌های ۱۹۹۶، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ رخ داده است (Suhaila & Yusop., 2018: 565). در پاکستان روند افزایش بارش بعد از دهه ۹۰، معنادار (Hamid & Samantaray., 2025:31); در شمال بنگلادش، روند کاهش بارش بعد از دهه ۱۹۹۰ کاهش و معنادار (Bari et al., 2016: 149) و در آفریقا؛ دمای حداقل و حداکثر نیجریه روند افزایشی داشته است (UU et al., 2018); همچنین مطالعه‌ای در ایالت ادو نیجریه نشان داد که نوسانات دما و بارش در طی دهه‌ها گرایش‌هایی معنادار، به‌ویژه در دهه ۱۹۸۰، داشته‌اند (Agbonaye & Izinyon., 2025:20). روند دمای حداقل و حداکثر در حوضه وولکا در شمال اتیوپی نیز افزایشی است (Asfaw et al., 2018:30). در آمریکا؛ تحلیل شاخص‌های دمایی فرین در ایالت یوتا نشان‌دهنده افزایش دما طی قرن گذشته است (Dos Santos et al., 2011:1813)، همچنین روند بارش در قرن بیستم در کانادا افزایش معناداری را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2000: 395).

در ایران نیز مطالعات زیادی در این زمینه صورت یافته است. علی پور و ملکیان (۱۳۹۸: ۹۱۷) نیز با بررسی داده‌های بارش ۸ ایستگاه هواشناسی شمال غرب نشان داد که به‌طور متوسط ۲۵.۹ درصد از آستانه‌های بارشی در منطقه، ناهمگن بوده است. مرتضی پور و همکاران (۱۳۹۹: ۱۱)، دریافتند که آزمون‌های همگنی داده‌های بارش نتایج مشابه با فراداده نداشته اما داده‌های دما و فشار همخوانی بیشتری را در محدوده تغییرات با فراداده داشته‌اند. همچنین نتایج بهاروندی و همکاران (۱۴۰۰: ۵۱) نیز، همگن بودن سری‌های دمای حداقل در ایستگاه خرم‌آباد را نشان می‌دهد. در دهه‌های اخیر، تهران نیز تغییرات قابل توجهی در دما و بارش، رخ داده‌های فرین اقلیمی و سایر شاخص‌ها تجربه کرده است که بخشی از روندهای گسترده جهانی محسوب می‌شود. اهداف اصلی این مقاله، شناسایی نقاط تغییر و نیز بررسی روندهای فصلی (فصل پاییز و زمستان) دمای بیشینه و بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک تهران با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری است.

روش پژوهش

در این پژوهش از روش تحقیق کمی و تحلیلی استفاده شده است. داده‌های اقلیمی شامل دمای بیشینه و بارش فصلی (پاییز و زمستان) ایستگاه‌های سینوپتیک تهران در دوره زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ استخراج و تحلیل شدند. برای بررسی روند تغییرات، از آزمون ناپارامتری من کندال و برای تخمین میزان شیب تغییرات از تخمین گر شیب سن استفاده گردید. همچنین به منظور شناسایی نقاط تغییر ناگهانی و ارزیابی همگنی سری‌های زمانی، چهار آزمون آماری شامل پتی^۱، نرمال استاندارد^۲، بیشاند^۳ و فان نیومن^۴ به کار گرفته شدند.

آزمون من کندال و شیب سن

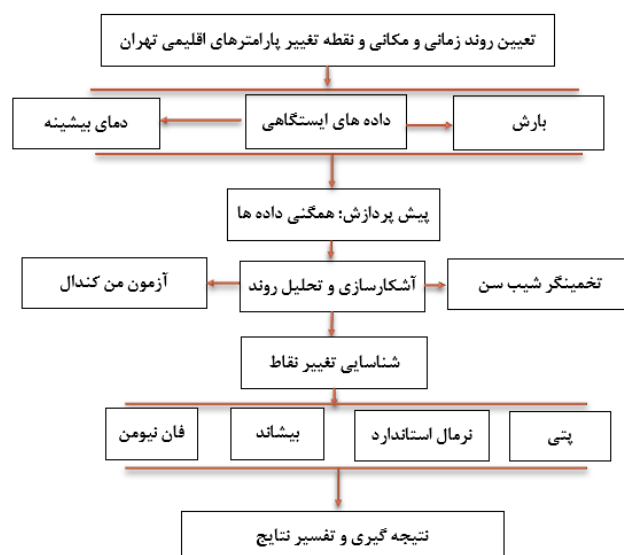
آزمون من-کندال یکی از روش‌های ناپارامتری پرکاربرد برای شناسایی روند در سری‌های زمانی است که بدون نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها، جهت تغییرات را (صعودی یا نزولی) در طول زمان بررسی می‌کند. این آزمون با مقایسه تمام داده‌های ممکن به صورت جفتی، آماره‌ای به نام S محاسبه می‌کند که جهت کلی تغییرات را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از آماره Z ، معناداری روند ارزیابی می‌شود. اگر مقدار Z مثبت و معنادار باشد، نشان‌دهنده روند افزایشی، و اگر

1. Pettitt
2. SNHT
3. Buishand
4. Von Neumann

منفی باشد، بیانگر روند کاهشی در متغیر موردبررسی است. در کنار این آزمون، معمولاً از شیب سن^۱ نیز برای تخمین نرخ تغییر سالانه استفاده می‌شود که مقدار عددی افزایش یا کاهش در واحد زمان را نشان می‌دهد.

آزمون‌های همگنی سری‌های زمانی

آزمون پتی یکی از آزمون‌های ناپارامتری پرکاربرد برای شناسایی نقطه تغییر ناگهانی در سری‌های زمانی است. این آزمون بررسی می‌کند که آیا در میانه سری، توزیع داده‌ها به‌طور معناداری دچار تغییر شده است یا خیر. اگر مقدار p به کمتر از ۰.۰۵ برسد، وجود یک شکست ساختاری آماری محتمل است. مزیت اصلی این آزمون، بی‌نیازی از فرض توزیع نرمال در داده‌هاست و به همین دلیل در تحلیل‌های اقلیمی بسیار کاربرد دارد. آزمون SNHT (آزمون همگنی نرمال استاندارد) یک آزمون پارامتری است که بر پایه تحلیل میانگین و انحراف معیار داده‌ها طراحی شده است. این آزمون مناسب شناسایی جهش در میانگین سری زمانی است و معمولاً برای یافتن یک نقطه شکست عمده استفاده می‌شود (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۹). اگر مقدار آماره آزمون (T_0) بزرگ و مقدار p کوچک‌تر از سطح معناداری باشد، می‌توان وجود یک ناهمگنی معنادار را تأیید کرد. این آزمون فرض می‌کند که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. آزمون بیشاند نیز یک آزمون پارامتری است که با استفاده از انحراف تجمعی از میانگین سری زمانی، به شناسایی نقاط تغییر در سطح داده‌ها می‌پردازد. اگر در طول سری زمانی، انحراف چشمگیری از میانگین مشاهده شود، آزمون بیشاند آن را به‌عنوان علامتی از شکست ساختاری گزارش می‌کند. این آزمون نسبت به توزیع داده‌ها حساس است و عملکرد بهتری در شناسایی تغییرات در داده‌های سالانه و فصلی دارد. در نهایت، آزمون فان نیومن، یک روش آماری برای سنجش تصادفی بودن و همگنی داده‌هاست (خسروی و آذری، ۱۴۰۱). این آزمون نسبت بین مجموع مربعات تفاضل‌های متوالی و مجموع مربعات کل را محاسبه می‌کند. اگر نسبت به عدد ۱ نزدیک باشد، داده‌ها تصادفی و همگن تلقی می‌شوند؛ اما اگر فاصله معناداری از ۱ داشته باشند و مقدار p کمتر از سطح معناداری باشد، می‌توان وجود ساختار غیرتصادفی یا روند سیستماتیک در سری زمانی را پذیرفت. فان نیومن، برخلاف دو آزمون قبلی، نیازی به فرض نرمال بودن داده‌ها ندارد و به‌عنوان ابزاری مکمل، در تقویت نتایج سایر آزمون‌ها کاربرد دارد (بازگیر و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱. روند نمای گرافیکی روش تحقیق

1. Sen's Slope

یافته‌ها

تحلیل روند دمای بیشینه ایستگاه‌های تهران در دوره سرد

نتایج آزمون من‌کندال برای فصل پاییز (جدول ۱) نشان‌دهنده وجود روند افزایشی و معنادار در دمای بیشینه ایستگاه‌های هواشناسی تهران است. مقدار آماره کندال در ایستگاه شمیران (۰/۴۹) و در ایستگاه مهرآباد (۰/۲۵) به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. سطح معناداری آزمون برای ایستگاه‌های شمیران، ژئوفیزیک و چیتگر برابر با ۰/۰۰ و برای مهرآباد ۰/۰۵ به دست آمد که در هر چهار ایستگاه نشان‌دهنده اطمینان بالای آماری نسبت به وجود روند صعودی است. بر اساس برآورد شیب سن، نرخ افزایش سالانه در ایستگاه‌های شمیران و چیتگر برابر با ۰/۰۹، در ژئوفیزیک ۰/۰۷ و در مهرآباد ۰/۰۴ درجه سلسیوس بوده است.

تحلیل روند سالانه دما نیز نتایجی مشابه را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در تمامی ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار ثبت شده است. بیشترین مقدار آماره کندال با عدد ۰/۶۹ متعلق به ایستگاه شمیران است و پس‌از آن ایستگاه‌های ژئوفیزیک (۰/۶۲)، چیتگر (۰/۵۱) و مهرآباد (۰/۳۳) قرار دارند. معناداری آماری این روند در سطح معناداری است و مقدار p در تمام ایستگاه‌ها برابر با ۰/۰۰ به دست آمده است. در خصوص نرخ تغییر نیز نتایج شیب سن نشان می‌دهد که مقدار آن در ایستگاه‌های ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر برابر با ۰/۰۹ و در مهرآباد ۰/۰۳ درجه سلسیوس در سال بوده است. در فصل زمستان نیز روند مثبت و معناداری در همه ایستگاه‌های موردبررسی مشاهده شد. مقدار آماره کندال در این فصل بین ۰/۲۰ در ایستگاه مهرآباد تا ۰/۴۳ در ایستگاه شمیران متغیر است که نشان‌دهنده میزان تفاوت اما هم‌جهت روند افزایشی دما در کل ایستگاه‌هاست. سطح معناداری آزمون در تمامی ایستگاه‌ها بالای ۹۰ درصد و در بیشتر موارد برابر با ۹۹ درصد اطمینان محاسبه شد. نتایج شیب سن نیز نرخ افزایش سالانه را برای ایستگاه‌های ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر برابر با ۰/۰۹ و برای مهرآباد ۰/۰۴ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که بیانگر افزایش قابل توجه دمای بیشینه در این فصل است.

جدول ۱. نتایج آماره کندال (T) و آماره بحرانی (t) دمای بیشینه فصل سرد تهران

| | ژئوفیزیک | شمیران | مهرآباد | چیتگر |
|----------------------|----------|--------|---------|-------|
| کندال | ۰/۴ | ۰/۴۹ | ۰/۲۵ | ۰/۴۴ |
| p-value (Two-tailed) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۰/۰۰ |
| شیب سن | ۰/۰۷ | ۰/۰۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۹ |
| کندال | ۰/۴ | ۰/۴۳ | ۰/۲ | ۰/۳۷ |
| p-value (Two-tailed) | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۲ |
| شیب سن | ۰/۰۹ | ۰/۰۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۹ |

تحلیل آزمون‌های همگنی داده‌های دمای بیشینه فصل پاییز

برای بررسی همگنی داده‌های دمای بیشینه فصل پاییز در ایستگاه‌های ژئوفیزیک، شمیران، مهرآباد و چیتگر طی دوره ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳، چهار آزمون آماری مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). در گام نخست، مقایسه میانگین دما پیش و پس از تغییرات احتمالی نشان‌دهنده افزایش مقادیر در تمامی ایستگاه‌هاست. بیشترین اختلاف در ایستگاه شمیران با ۱/۶۲ درجه سلسیوس (میانگین قبل: ۲۲/۴۹ بعد: ۲۴/۱۱) مشاهده شد. ایستگاه ژئوفیزیک نیز اختلافی برابر با ۱/۶۱ درجه (از ۲۲/۷ به ۲۴/۳۱) را ثبت کرد. در ایستگاه چیتگر این اختلاف به ۱/۸۳ درجه (از ۲۳/۸ به ۲۵/۶۳) رسید. در مقابل، در ایستگاه مهرآباد جهش قابل توجهی در میانگین دما مشاهده نشد.

نتایج آزمون پتی، بروز تغییرات معنادار آماری را در تمامی ایستگاه‌ها به جز مهرآباد تأیید می‌کند. مقدار P-value در ژئوفیزیک (۰/۰۳)، شمیران (۰/۰۱) و چیتگر (۰/۰۰) کمتر از سطح ۰/۰۵ بوده و به ترتیب تغییر اساسی در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۳ را نشان می‌دهد. در مهرآباد نیز با وجود مقدار P برابر با ۰/۰۶، که در آستانه معنی‌داری قرار دارد، احتمال وقوع تغییر به‌طور کامل قابل رد نیست.

یافته‌های آزمون نرمال استاندارد نیز این نتایج را تقویت می‌کنند. در ایستگاه‌های چیتگر (۱۲/۹۱)، شمیران (۱۲/۲۶) و ژئوفیزیک (۱۰/۸۵) مقادیر آماره بسیار بالا و سطح معنی‌داری ۰/۰۰، وقوع ناهمگنی شدید را نشان می‌دهد. در مهرآباد نیز مقدار آماره ۷/۴۹ با ارزش P برابر با ۰/۰۵ دقیقاً در مرز معنی‌داری قرار گرفت. هم‌سویی نتایج دو آزمون پتی و نرمال استاندارد شواهد محکمی مبنی بر وقوع تغییر ساختاری در رفتار دمای بیشینه پاییز فراهم می‌آورد.

بر اساس آزمون بیشاند نیز، در سه ایستگاه ژئوفیزیک ($Q = 7.68$)، شمیران (۷/۵۷) و چیتگر (۸/۳)، سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ (به ترتیب $P = 0.01$ ، ۰/۰۱ و ۰/۰۰) نشان‌دهنده ناهمگنی آشکار در سری زمانی دما است. در مهرآباد، مقدار Q برابر با ۶/۰۱ و سطح معناداری ۰/۱ به دست آمد که در محدوده غیر معنادار قرار دارد.

در نهایت، نتایج آزمون فان‌نیومن نیز یافته‌های فوق را تأیید می‌کند. در تمامی ایستگاه‌ها، به جز مهرآباد، مقادیر آماره N نزدیک به ۱ و P-value کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده ساختار غیرتصادفی و وقوع تغییر در سری‌های زمانی دما هستند. به‌ویژه در ایستگاه شمیران، مقدار $N=0.95$ و سطح معناداری ۰/۰۰ به‌وضوح بیانگر آشفتگی در توزیع داده‌هاست. در ایستگاه مهرآباد نیز اگرچه P برابر با ۰/۰۳ محاسبه شده، اما با توجه به نزدیکی به مرز معنی‌داری، نیاز به بررسی‌های تکمیلی برای تأیید قطعی تغییرات وجود دارد.

جدول ۲. نتایج آزمون‌های پتیت، نرمال استاندارد، بیشاند و فان‌نیومن برای دمای بیشینه فصل پاییز (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

| چیتگر | مهرآباد | شمیران | ژئوفیزیک | میانگین اختلاف | آزمون‌ها |
|--------------|---------|---------------|--------------|----------------|-----------------|
| ۱/۸۳ | - | ۱/۶۲ | ۱/۶۱ | | |
| (۲۵/۶۳-۲۳/۸) | (۲۴/۷۷) | (۲۴/۱۱-۲۲/۴۹) | (۲۴/۳۱-۲۲/۷) | | |
| ۲۰۱۳ | * | ۲۰۱۵ | ۲۰۱۵ | t | |
| ۱۳۰ | ۱۱۵ | ۱۳۴ | ۱۲۶ | K | پتی |
| ۰/۰۰ | ۰/۰۶ | ۰/۰۱ | ۰/۰۳ | P_value | |
| ۱۲/۹۱ | ۷/۴۹ | ۱۲/۲۶ | ۱۰/۸۵ | T ₀ | |
| ۰/۰۰ | ۰/۰۵ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | P_value | نرمال استاندارد |
| ۸/۳ | ۶/۰۱ | ۷/۵۷ | ۷/۶۸ | Q | |
| ۰/۰۰ | ۰/۱۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | P_value | بیشاند |
| ۱/۱ | ۱/۳۸ | ۰/۹۵ | ۱/۲۱ | N | |
| ۰/۰۰ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰ | ۰/۰۱ | P_value | فان نیومن |

بررسی هم‌زمان روند تغییرات و نقاط جهش دمای بیشینه فصل پاییز

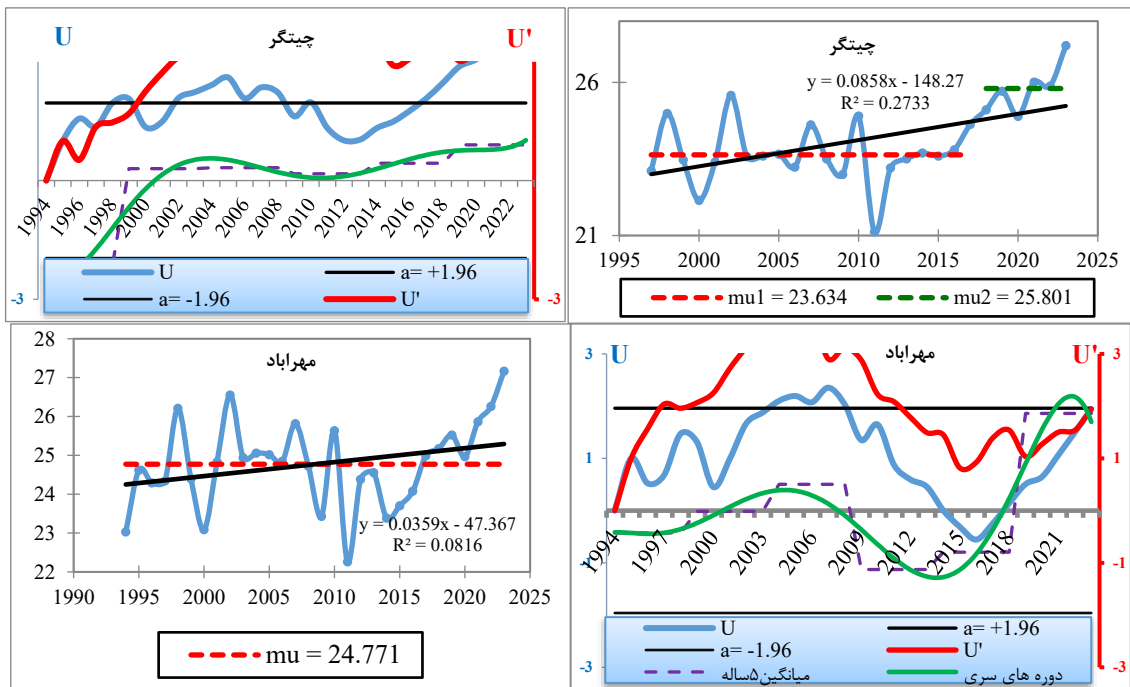
شکل (۲) روند تغییرات و نقاط جهش در میانگین سری زمانی ۳۰ ساله دمای بیشینه فصل پاییز را با استفاده از آزمون من-کندال و مقایسه با میانگین متحرک ۵ ساله (نمودارهای سمت راست) و همچنین نتایج آزمون‌های همگنی (نمودارهای سمت چپ) در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

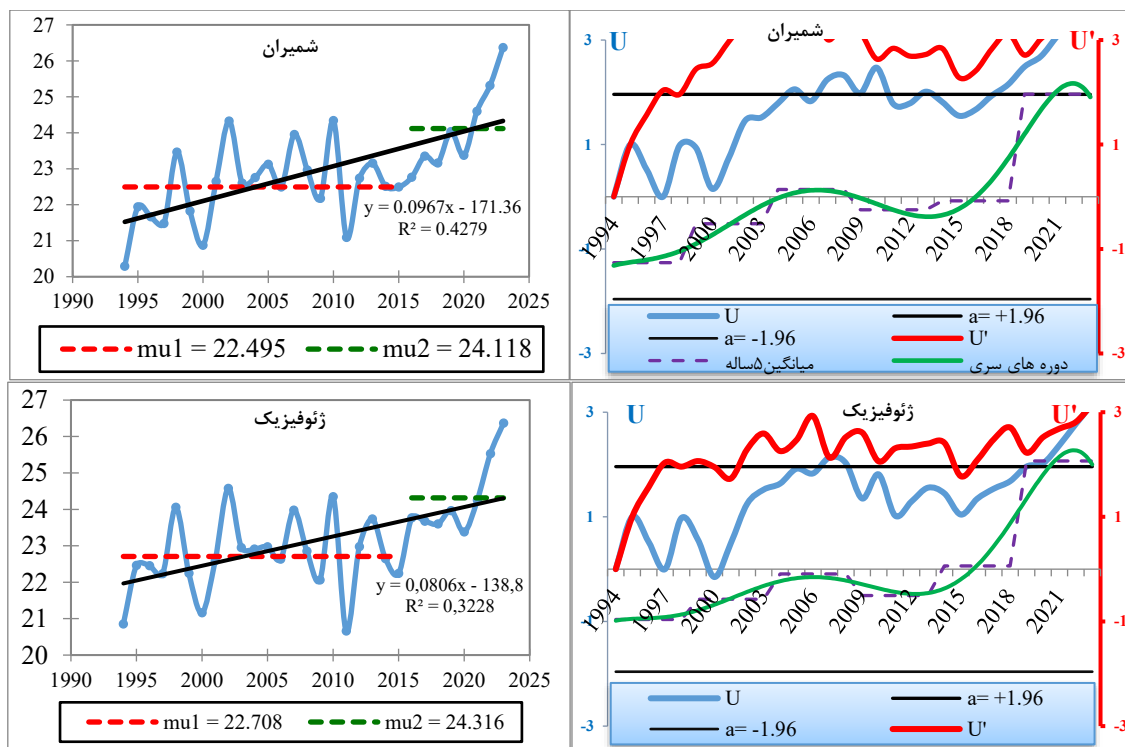
در ایستگاه ژئوفیزیک، نتایج آزمون من-کندال بیانگر یک‌روند افزایشی معنادار در دمای بیشینه پاییز طی دوره ۳۰ ساله است. میانگین‌های متحرک ۵ ساله نیز این روند افزایشی را با نوسانات اندک تأیید می‌کنند. از سوی دیگر، آزمون‌های همگنی وقوع یک نقطه جهش مشخص در حدود دهه ۱۳۸۰ (اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی) را نشان می‌دهند. بنابراین، نتایج

هر دو رویکرد وجود یک تغییر اقلیمی محسوس و پایدار در این ایستگاه را تأیید می‌کنند. در ایستگاه مهرآباد، آزمون من-کندال وجود روند افزایشی را تأیید می‌کند، هرچند شدت آن کمتر از ژئوفیزیک و همراه با نوسانات بیشتر است. میانگین‌های ۵ ساله نیز رفتار سینوسی اما در مجموع افزایشی دارند. نتایج آزمون‌های همگنی، تغییر احتمالی در ساختار داده‌ها را در میانه دوره (حدود سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰) نشان می‌دهند، هرچند این تغییر چندان قوی و معنادار نیست. بنابراین، می‌توان گفت که هر دو رویکرد تا حدی یکدیگر را تأیید کرده و بر وجود تغییر تدریجی در دمای پاییز مهرآباد دلالت دارند.

در ایستگاه شمیران، آزمون من-کندال روند افزایشی معناداری را نشان می‌دهد. میانگین‌های متحرک ۵ ساله نوسانات زیادی داشته اما جهت‌گیری کلی آن‌ها به سمت افزایش است. در مقابل، آزمون‌های همگنی وقوع تغییر ناگهانی و نقطه جهش مشخصی را تأیید نمی‌کنند و ساختار داده‌ها پایدار ارزیابی می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که روند بلندمدت در این ایستگاه بدون وقوع تغییرات ساختاری ناگهانی وجود دارد.

در ایستگاه چیتگر، نتایج من-کندال وجود روند معناداری را تأیید نمی‌کند و حتی نشانه‌هایی از کاهش خفیف مشاهده می‌شود. سری زمانی این ایستگاه نوسانات بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارد و میانگین‌های ۵ ساله نیز فاقد الگوی پایدار هستند. در آزمون‌های همگنی، یک نقطه جهش در اوایل دوره (دهه ۱۳۷۰؛ اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی) مشاهده می‌شود، اما این تغییر به صورت پایدار ادامه نیافته است. بنابراین، بین نتایج آزمون روند و آزمون‌های همگنی در این ایستگاه اختلاف وجود دارد؛ به گونه‌ای که یکی از جهش موقتی در ابتدای دوره حکایت دارد، در حالی که دیگری روند بلندمدت معناداری را نشان نمی‌دهد. این امر احتمالاً ناشی از وقوع رخداد‌های خاص در آغاز دوره است که بر کل سری زمانی اثر بلندمدت بر جای نگذاشته‌اند.





شکل ۲. بررسی روندها و نقاط جهش از میانگین سری زمانی ۳۰ ساله با استفاده از روش من-کندال و مقایسه آن با میانگین ۵ ساله سری و دوره‌های موجود (شکل‌های سمت راست) و نتایج آزمون‌های همگنی اعمال شده بر روی سری زمانی حداکثر دمای فصل پاییز (mu میانگین داده‌های مشاهده شده است) (شکل‌های سمت چپ) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

تحلیل نتایج آزمون‌های همگنی داده‌های دمای بیشینه فصل زمستان

مقایسه میانگین دماهای پیش و پس از نقطه تغییر نشان‌دهنده اختلاف قابل توجه در برخی ایستگاه‌ها است (جدول ۳). بیشترین اختلاف در ایستگاه ژئوفیزیک با مقدار ۲/۵ درجه سلسیوس مشاهده شد (میانگین پیش از تغییر: ۸/۷، پس از تغییر: ۱۱/۲). ایستگاه‌های شمیران (۱/۸۵ درجه) و چیتگر (۱/۶۷ درجه) نیز افزایش معناداری در میانگین دما نشان دادند. آزمون پتی وقوع تغییرات ناگهانی و معنادار آماری را در سه ایستگاه ژئوفیزیک (سال تغییر: ۲۰۰۸)، شمیران (۲۰۰۸) و چیتگر (۲۰۰۹) با سطح معناداری ۰/۰۰ تأیید می‌کند. در مقابل، ایستگاه مهرآباد تغییر محسوسی را تجربه نکرده و از نظر آماری نیز معنادار نبوده است. نتایج آزمون نرمال استاندارد نیز عمدتاً همسو با آزمون پتی است. در ایستگاه‌های شمیران ($P=0.00$, $T_0=13.47$) و چیتگر ($P=0.00$, $T_0=11.05$)، ناهمگنی سری زمانی به وضوح مشاهده می‌شود. در ایستگاه ژئوفیزیک، اگرچه مقدار آماره نسبتاً بالا ($T_0=7.19$) گزارش شده است، اما سطح معناداری ($P=0.17$) نشان‌دهنده عدم معناداری تغییر است. ایستگاه مهرآباد نیز فاقد شواهد آماری معنادار بوده است ($P=0.27$).

آزمون بیشاند نیز نتایج مشابهی را تأیید می‌کند. در سه ایستگاه ژئوفیزیک ($Q=7.45$ ، شمیران $Q=10.22$) و چیتگر ($Q=8.79$) تغییرات معنادار در میانگین دما مشاهده شد ($P=0.00$). تنها ایستگاه مهرآباد با مقدار P برابر با ۰/۱۲ همگنی نسبی داده‌ها را حفظ کرده است. در نهایت، آزمون فان نیومن که به منظور بررسی تصادفی بودن داده‌ها به کار می‌رود، تنها در ایستگاه شمیران ($P=0.00$, $N=1.08$) و تا حدودی چیتگر ($P=0.04$, $N=1.37$) حاکی از وجود تغییر ساختاری در سری زمانی داده‌هاست. در ایستگاه‌های ژئوفیزیک و مهرآباد، مقادیر P بالاتر از ۰/۰۵ بوده و نشانه‌ای از تغییر معنادار مشاهده نمی‌شود. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که در بیشتر ایستگاه‌ها، به‌ویژه شمیران و چیتگر، وقوع تغییرات ساختاری در دمای بیشینه فصل زمستان تأیید می‌شود، در حالی که مهرآباد کمترین تغییر را تجربه کرده است.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های پتیت، نرمال استاندارد، بیشاند و فان نیومن برای دمای بیشینه فصل زمستان (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

| آزمون‌ها | میانگین اختلاف | ژئوفیزیک | شمیران | مهرآباد | چیتگر |
|----------------|----------------|--------------|--------|---------|-----------------|
| | (۱۱/۲-۸/۷) | (۱۰/۳۳-۸/۴۸) | ۱/۸۵ | - | ۱/۸۳ |
| | (۱۱/۰۲-۹/۳۵) | | | | |
| t | ۲۰۰۸ | ۲۰۰۸ | * | ۲۰۱۷ | |
| K | ۱۸۳ | ۱۸۷ | ۹۵ | ۱۳۶ | |
| P_value | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۱۷ | ۰/۰۰ | پتی |
| T ₀ | ۷/۱۹ | ۱۳/۴۷ | ۴/۶۳ | ۱۱/۰۵ | نرمال استاندارد |
| P_value | ۰/۱۷ | ۰/۰۰ | ۰/۲۷ | ۰/۰۰ | |
| Q | ۷/۴۵ | ۱۰/۲۲ | ۵/۸۹ | ۸/۷۹ | بیشاند |
| P_value | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۱۲ | ۰/۰۰ | |
| N | ۱/۶۹ | ۱/۰۸ | ۲/۰۹ | ۱/۳۷ | فان نیومن |
| P_value | ۰/۱۴ | ۰/۰۰ | ۰/۵۹ | ۰/۰۴ | |

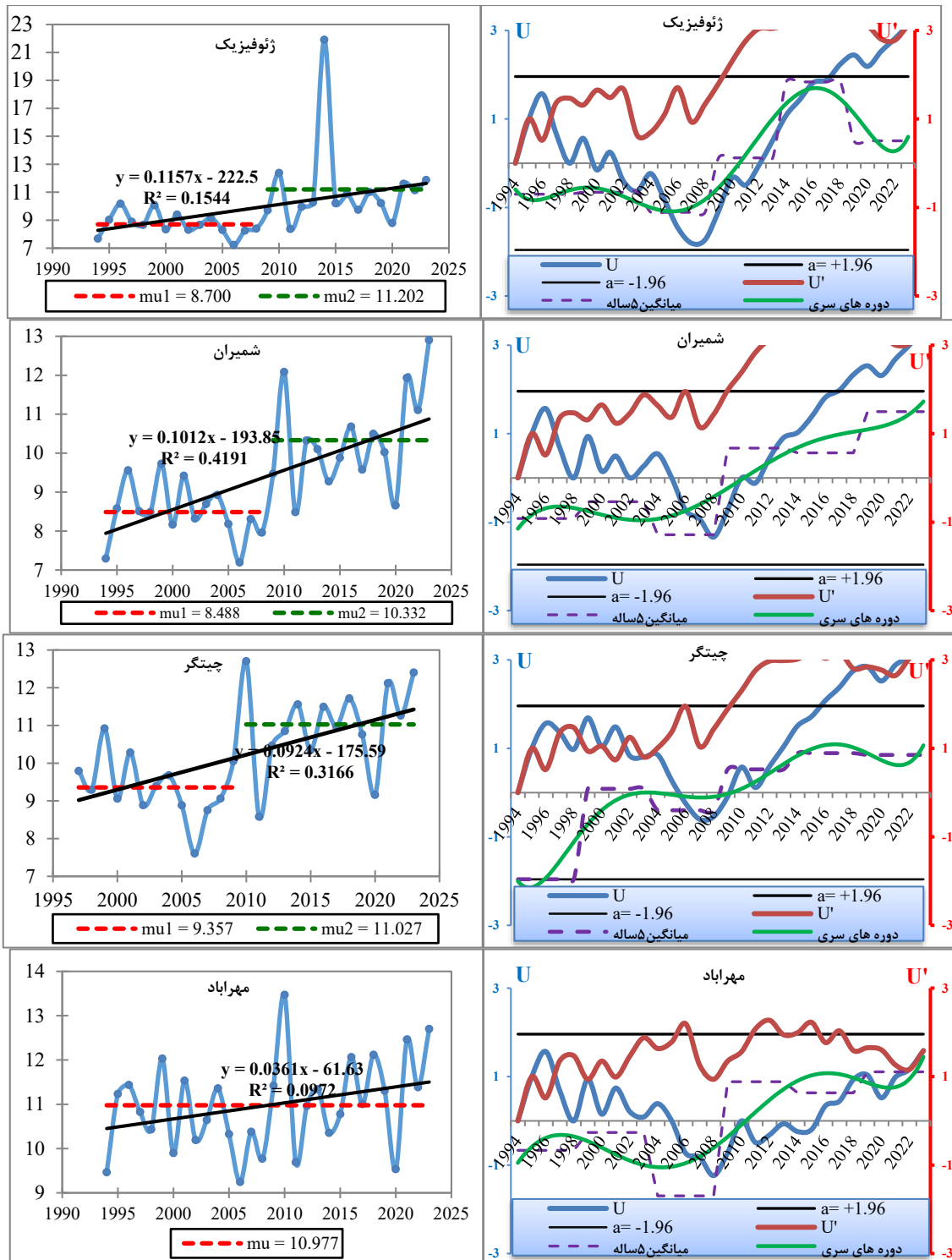
بررسی هم‌زمان روند تغییرات و نقاط جهش دمای بیشینه فصل زمستان

در ایستگاه ژئوفیزیک، بر اساس آزمون من-کندال، یک‌روند افزایشی واضح و معنادار در دمای بیشینه فصل زمستان مشاهده می‌شود (شکل ۳). شیب تغییرات مثبت بوده و میانگین‌های متحرک ۵ ساله نیز به‌روشنی روند گرم شدن زمستان را تأیید می‌کنند. این روند به‌ویژه از دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) به بعد شدت گرفته و افزایش پیوسته دما کاملاً مشهود است. نمودار همگنی نیز وقوع یک نقطه جهش مشخص در همین بازه زمانی (اوایل تا میانه دهه ۱۳۸۰) را نشان می‌دهد که بیانگر تغییر ساختاری آشکار در رفتار سری زمانی است. بدین ترتیب، نتایج روند من-کندال و آزمون‌های همگنی همسو بوده و هر دو وقوع یک تغییر اقلیمی محسوس را در زمستان‌های تهران، به‌ویژه در ایستگاه ژئوفیزیک، تأیید می‌کنند.

در ایستگاه مهرآباد نیز یک‌روند افزایشی ملایم اما معنادار در دمای زمستان شناسایی شد. میانگین‌های متحرک ۵ ساله روندی تدریجی را نشان می‌دهند، هرچند نوسانات مقطعی موجب کاهش پیوستگی آن شده است. نمودار همگنی نیز وجود یک نقطه جهش در حدود دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) را آشکار می‌سازد که هم‌زمان با روند تدریجی گرم شدن دماست. بنابراین، در این ایستگاه نیز تحلیل همگنی و آزمون من-کندال یکدیگر را تکمیل کرده و در مجموع بیانگر وقوع تغییر اقلیم در زمستان‌های اخیر هستند، گرچه شدت آن نسبت به ژئوفیزیک کمتر است.

در ایستگاه شمیران، روند افزایشی معناداری در دمای زمستان مشاهده نمی‌شود. نمودار روند نشان‌دهنده نوساناتی است که بدون شیب مشخص در طول دوره پراکنده‌اند. میانگین‌های متحرک ۵ ساله نیز رفتاری نوسانی و فاقد جهت‌گیری پایدار دارند. نتایج همگنی نیز تأیید می‌کنند که هیچ نقطه جهش ساختاری معناداری در سری زمانی وجود ندارد و داده‌ها همگنی نسبی خود را حفظ کرده‌اند. از این رو، مشابه با نتایج پاییز، تحلیل روند و همگنی در این ایستگاه یکدیگر را تأیید کرده و نشان‌دهنده پایداری نسبی اقلیم زمستانی در شمیران هستند.

در ایستگاه چیتگر، روند من-کندال وجود تغییرات معنادار در دمای زمستان را نشان می‌دهد. میانگین‌های متحرک ۵ ساله در این ایستگاه دارای نوسانات شدید بوده و الگوی ثابتی را دنبال نمی‌کنند. بر اساس نمودار همگنی، یک نقطه جهش احتمالی در ابتدای دوره (دهه ۱۳۷۰؛ ۱۹۹۰ میلادی) قابل مشاهده است، اما پس از آن سری زمانی به یک وضعیت نسبتاً پایدار بازمی‌گردد. بنابراین، مشابه الگوی فصل پاییز، نتایج آزمون‌های روند و همگنی در این ایستگاه کاملاً همسو نیستند؛ روند کلی دما افزایشی است، اما تغییرات ساختاری بیشتر به اوایل دوره محدود می‌شود.



شکل ۳. بررسی روندها و نقاط جهش از میانگین سری زمانی ۳۰ ساله با استفاده از روش من-کندال و مقایسه آن با میانگین ۵ ساله سری و دوره‌های موجود (شکل‌های سمت راست) و نتایج آزمون‌های همگنی اعمال شده بر روی سری زمانی حداکثر دمای فصل. زمستان (μ میانگین داده‌های مشاهده‌شده است) (شکل‌های سمت چپ) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

تحلیل روند بارش ایستگاه‌های تهران در فصول سرد

تحلیل داده‌های بارش فصلی در ایستگاه‌های تهران نشان داد که روند تغییرات بارش در فصول پاییز و زمستان متفاوت

بوده و بین ایستگاه‌ها نیز تفاوت‌هایی وجود دارد (جدول ۴).

در فصل پاییز، نتایج آزمون من-کندال نشان داد که هیچ‌یک از ایستگاه‌ها روند معناداری در تغییرات بارش فصلی ندارند. مقادیر آماره کندال برای ایستگاه‌های ژئوفیزیک (۰/۱۳)، شمیران (۰/۰۵)، مهرآباد (۰/۰۲) و چیتگر (۰/۲۱-) در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار نبوده و مقادیر p-value آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۳۰، ۰/۶۷، ۰/۸۶ و ۰/۱۱ گزارش شده است. با این حال، در ایستگاه چیتگر یک روند کاهشی نسبتاً محسوس مشاهده شد ($\text{Sen's slope} = -1.18$ میلی‌متر در سال) که نشان‌دهنده کاهش نسبی بارش در سال‌های اخیر است.

در فصل زمستان، نتایج تغییرات بارش قابل توجه‌تر بودند. سه ایستگاه مهرآباد، چیتگر و شمیران روند منفی در بارش نشان دادند، به طوری که روند کاهشی در دو ایستگاه مهرآباد و چیتگر از نظر آماری معنادار بود. مقدار آماره کندال در این دو ایستگاه به ترتیب برابر با ۰/۲۸- و ۰/۲۹- و مقادیر p-value معادل ۰/۰۲ و ۰/۰۳ گزارش شد، که بیانگر کاهش معنادار بارش زمستانی در طی دوره مطالعه است. شیب تغییرات بارش نیز به ترتیب برابر با ۰/۸۵- و ۰/۲۷- میلی‌متر در سال برآورد شد و شدت کاهش سالانه قابل توجهی را نشان داد. در ایستگاه شمیران، مقدار کندال برابر با ۰/۲۴- و p-value برابر با ۰/۰۵ بود که در آستانه معناداری قرار دارد و شیب منفی ۰/۵۶- میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد. تنها ایستگاه ژئوفیزیک در زمستان فاقد روند معنادار بوده و مقدار p آن برابر با ۰/۸۳ گزارش شد.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد، در حالی که پاییز عمدتاً روند پایدار یا غیر معنادار دارد، زمستان در برخی ایستگاه‌ها شاهد کاهش بارش قابل توجه و معنادار بوده است، که می‌تواند نشانه تغییر اقلیم یا کاهش منابع بارشی در این فصل باشد.

جدول ۴. نتایج آماره کندال (T) و آماره بحرانی (t) بارش فصل سرد تهران

| ژئوفیزیک | شمیران | مهرآباد | چیتگر | |
|----------|--------|---------|-------|-----------------------------|
| ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | ۰/۲۱- | کندال |
| ۰/۳ | ۰/۶۷ | ۰/۸۶ | ۰/۱۱ | p-value (Two-tailed) پاییز |
| ۰/۸۷ | ۰/۳۳ | ۰/۱۷ | ۰/۱۸- | شیب سن |
| ۰/۰۳ | ۰/۲۴- | ۰/۲۸- | ۰/۲۹- | کندال |
| ۰/۸۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۳ | p-value (Two-tailed) زمستان |
| ۰/۳۲- | ۰/۵۶- | ۰/۸۵- | ۰/۲۷- | شیب سن |

تحلیل ناهمگنی بارش پاییزه در ایستگاه‌های تهران (1994-2023)

بررسی ناهمگنی سری زمانی بارش پاییزه در ایستگاه‌های تهران شامل ژئوفیزیک، مهرآباد، شمیران و چیتگر نشان می‌دهد که در طول دوره ۱۹۹۴-۲۰۲۳، داده‌ها عمدتاً پایدار و همگن بوده‌اند (جدول ۵). در ایستگاه ژئوفیزیک، نتایج تمامی آزمون‌ها حاکی از نبود شکست معنادار در سری زمانی هستند. مقدار p-value در آزمون پتی برابر با ۰/۴۳ و در سایر آزمون‌ها نیز بالاتر از ۰/۱ گزارش شده است (نرمال استاندارد: ۰/۶۷، بیشاند: ۰/۹۶، فان نیومن: ۰/۱۹). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که روند بارش پاییزه در این ایستگاه طی سه دهه گذشته پایدار و بدون تغییر ساختاری قابل توجه بوده است. ایستگاه مهرآباد نیز الگوی مشابهی نشان می‌دهد. مقدار p در آزمون پتی برابر ۰/۷۱ و مقادیر p در سایر آزمون‌ها (نرمال استاندارد: ۰/۲۰، بیشاند: ۰/۹۶، فان نیومن: ۰/۲۰) حاکی از نبود نوسان آماری معنادار در داده‌ها هستند. در نتیجه، هیچ تغییر چشمگیر یا شکست ساختاری در رژیم بارش پاییزه مهرآباد مشاهده نشده است.

در ایستگاه شمیران، نتایج آزمون‌ها همچنان بر پایداری نسبی داده‌ها دلالت دارند. اگرچه مقدار آماره نرمال استاندارد نسبتاً بالاتر ($T_0 = 4.46$) به نظر می‌رسد، اما مقدار p آن (۰/۳۰) فراتر از آستانه معناداری است. همچنین، نتایج آزمون

بیشاند ($p = 0.78$) و فان نیومن ($p = 0.26$) نشان می‌دهند که بارش پاییزه شمیران فاقد شکست یا تغییر ناگهانی معنادار بوده است. ایستگاه چیتگر بیشترین نزدیکی به آستانه معناداری را نشان می‌دهد. در آزمون پتی مقدار $p = 0.08$ به آستانه هشدار نزدیک شده است، اما سایر آزمون‌ها همچنان معناداری را تأیید نمی‌کنند (نرمال استاندارد $p = 0.38$ ؛ بیشاند $p = 0.16$ ؛ فان نیومن $p = 0.25$). بنابراین، با وجود احتمال وجود تغییرات خفیف، نمی‌توان آن را به‌عنوان شکست ساختاری قطعی در نظر گرفت.

به‌طور کلی، نتایج آزمون‌های آماری نشان می‌دهند که هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در فصل پاییز شاهد شکست ساختاری معنادار در سری زمانی بارش نبوده‌اند. مقادیر بالای p -value در آزمون‌های مختلف تأیید می‌کنند که بارش پاییزه در تهران طی سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ از همگنی آماری برخوردار بوده و تغییر چشمگیری در الگوی بارش این فصل رخ نداده است.

جدول ۵. نتایج آزمون‌های پتی، نرمال استاندارد، بیشاند و فان نیومن برای بارش فصل پاییز (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

| آزمون‌ها | میانگین اختلاف | ژئوفیزیک | شمیران | مهرآباد | چیتگر |
|-----------------|----------------|----------|--------|---------|-------|
| | (۵۵/۱۲) | * | * | * | * |
| | (۴۳/۸۸) | | | | |
| | t | * | * | * | * |
| | K | ۷۴ | ۴۹ | ۵۹ | ۹۳ |
| پتی | P_value | ۰/۴۳ | ۰/۸۷ | ۰/۷۱ | ۰/۰۸ |
| | T ₀ | ۲/۳۷ | ۴/۴۶ | ۶/۴۳ | ۳/۶۹ |
| نرمال استاندارد | P_value | ۰/۶۷ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۳۸ |
| | Q | ۲/۳۸ | ۳/۱۴ | ۲/۳۸ | ۵ |
| بیشاند | P_value | ۰/۹۶ | ۰/۷۸ | ۰/۹۶ | ۰/۱۶ |
| | N | ۱/۷۱ | ۱/۷۹ | ۱/۷۳ | ۱/۷۸ |
| فان نیومن | P_value | ۰/۱۹ | ۰/۲۶ | ۰/۲ | ۰/۲۴ |

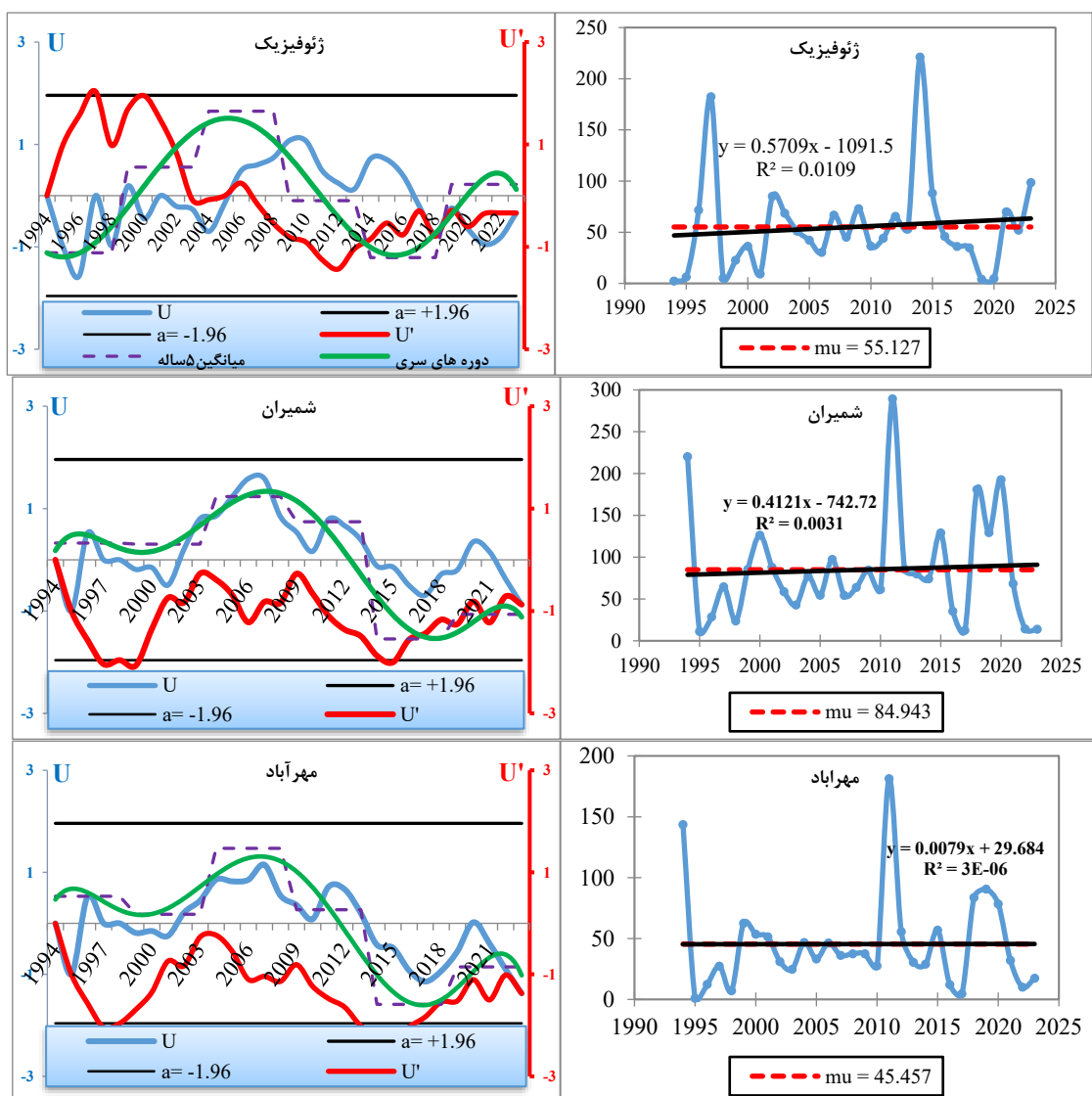
بررسی هم‌زمان روند تغییرات و نقاط جهش بارش فصل پاییز

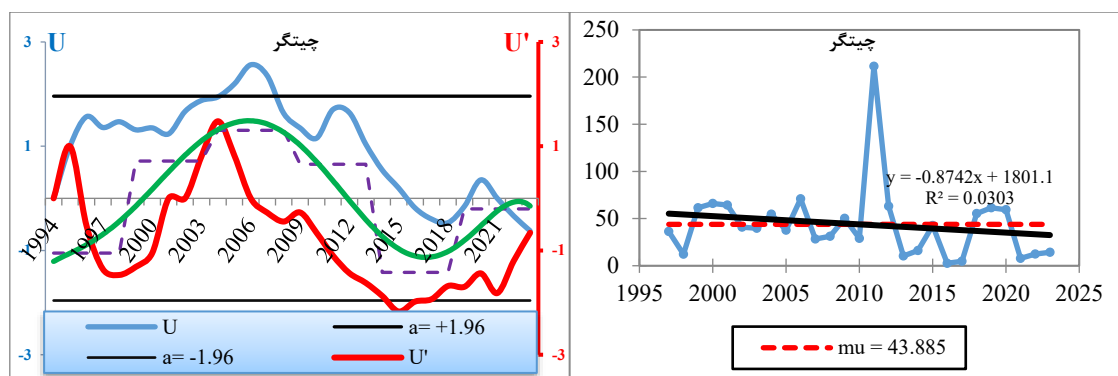
بر اساس شکل ۴، روند بارش پاییز در ایستگاه‌های تهران طی دوره ۱۹۹۴-۲۰۲۳ به شکل متفاوتی نمایان شده است. در ایستگاه ژئوفیزیک، روند مشخصی در بارش پاییز مشاهده نمی‌شود. تغییرات بارش طی ۳۰ سال اخیر به‌صورت نوسانی بوده و میانگین‌های متحرک ۵ ساله نیز بدون الگوی افزایشی یا کاهش‌ی واضح نوسان کرده‌اند. بنابراین، آزمون من کندال نشان می‌دهد که بارش پاییز در این ایستگاه تغییر جهت‌دار معناداری نداشته است. با این حال، در نمودار همگنی، یک نقطه جهش محتمل در حدود دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) مشاهده می‌شود. این جهش نشان‌دهنده وقوع یک تغییر ساختاری ناگهانی در سری زمانی بارش است که ممکن است ناشی از تغییر الگوهای گردش جو یا خشک‌سالی‌های فراگیر در آن دوره باشد. به این ترتیب، اگرچه روند کلی تأیید نشده، آزمون‌های همگنی وجود یک تغییر ناگهانی را نشان می‌دهند.

در ایستگاه مهرآباد، روند کاهش خفیفی در بارش پاییز مشاهده می‌شود، هرچند این روند از نظر آماری معنادار نیست (جدول ۴). میانگین‌های ۵ ساله نیز نوسانات نزولی خفیفی نشان می‌دهند، به‌ویژه در دهه اخیر که میزان بارش کاهش یافته است. نمودار همگنی یک نقطه جهش در اواخر دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) یا اوایل ۱۳۹۰ (۲۰۱۰ میلادی) را نشان می‌دهد که هم‌زمان با کاهش بارش هاست. بنابراین، در این ایستگاه، تحلیل روند و آزمون همگنی تا حد زیادی یکدیگر را تأیید می‌کنند و هر دو بر کاهش بارش و تغییر رفتار آماری آن در سال‌های اخیر دلالت دارند؛ پدیده‌ای که

می‌تواند با افزایش فراوانی خشک‌سالی‌ها مرتبط باشد.

در ایستگاه شمیران، روند بارش پاییز فاقد جهت مشخص است و نوسانات بالا و پایین در طول دوره وجود دارد. میانگین‌های ۵ ساله رفتاری تقریباً سینوسی داشته و گاهی با افزایش و گاهی با کاهش بارش همراه‌اند. مطابق چهار آزمون انجام‌شده در نمودار همگنی، نقطه جهش معناداری شناسایی نمی‌شود. بنابراین، سری زمانی بارش در این ایستگاه نسبتاً همگن و پایدار بوده است. در این ایستگاه، تحلیل روند و همگنی به‌طور کامل یکدیگر را تأیید می‌کنند و نشان می‌دهند که بارش پاییز در شمیران طی دوره موردبررسی یکنواخت و بدون تغییر ساختاری قابل توجه بوده است. در ایستگاه چیتگر، روند من‌کندال نشان‌دهنده یک کاهش ضعیف در بارش پاییز است که از نظر آماری معنادار نیست. میانگین‌های ۵ ساله نوسانات شدیدی دارند و گاهی افت محسوس بارش در برخی سال‌ها مشاهده می‌شود. نمودار همگنی، یک نقطه جهش قابل توجه در ابتدای دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) یا اواخر دهه ۷۰ (۱۹۹۰ میلادی) را شناسایی کرده است که نشان‌دهنده وقوع یک تغییر ساختاری در رفتار بارش است. بنابراین، در این ایستگاه، گرچه روند کلی ضعیف است، اما همراهی آن با یک جهش ساختاری در بخشی از دوره نشان می‌دهد که بارش پاییز در چیتگر تحت تأثیر شرایط اقلیمی یا منطقه‌ای دچار بی‌نظمی و تغییر موضعی شده است.





شکل ۴. بررسی روندها و نقاط جهش از میانگین سری زمانی ۳۰ ساله با استفاده از روش من-کندال و مقایسه آن با میانگین ۵ ساله سری و دوره‌های موجود (شکل‌های سمت راست) و نتایج آزمون‌های همگنی اعمال شده بر روی سری زمانی بارش فصل پاییز (μ میانگین داده‌های مشاهده شده است) (شکل‌های سمت چپ) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

تحلیل ناهمگنی بارش زمستانه در ایستگاه‌های تهران (1994-2023)

بر اساس نتایج آزمون‌های آماری، وضعیت همگنی داده‌های بارش زمستانه در ایستگاه‌های تهران متفاوت بوده است (جدول ۶). در ایستگاه ژئوفیزیک، تمامی آزمون‌ها بر پایداری آماری سری زمانی و عدم وجود شکست معنادار تأکید دارند. مقدار p در آزمون پتی برابر $0/48$ و در سایر آزمون‌ها نیز به ترتیب نرمال استاندارد ($0/8$)، بیشاند ($0/83$) و فان نیومن ($0/88$) گزارش شده است. بنابراین، داده‌های بارش زمستانه در این ایستگاه طی دوره مورد بررسی از همگنی مناسبی برخوردار بوده‌اند و هیچ تغییر ساختاری قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.

در ایستگاه مهرآباد، نتایج متفاوت است. آزمون پتی با مقدار $p=0.04$ شکست معنادار در داده‌ها را نشان می‌دهد. سایر آزمون‌ها نیز گرایشی به سمت معناداری دارند؛ بیشاند با $p=0.09$ و نرمال استاندارد با $p=0.19$ ، در حالی که آزمون فان نیومن با $p=0.28$ همچنان در محدوده غیر معنادار قرار دارد. بنابراین می‌توان گفت که داده‌های زمستانه مهرآباد دارای نشانه‌هایی از تغییر ساختاری، به‌ویژه در حدود سال ۲۰۰۹، هستند.

در ایستگاه شمیران، سه آزمون از چهار آزمون انجام شده نشانه‌هایی از احتمال شکست ساختاری را نشان می‌دهند. آزمون بیشاند با $p=0.05$ به آستانه معناداری رسیده و نرمال استاندارد با $p=0.12$ از آستانه چندان فاصله ندارد. همچنین آزمون Petit با $p=0.065$ نزدیک به آستانه 0.05 است. بنابراین، به نظر می‌رسد که در حدود سال ۲۰۰۸، داده‌های بارش زمستانه در این ایستگاه تغییر نسبی در ساختار یا رژیم بارشی را تجربه کرده‌اند.

در ایستگاه چیتگر، بیشترین ناپایداری مشاهده می‌شود. تمامی آزمون‌ها نتایج معناداری ارائه داده‌اند: پتی ($p=0.005$)، نرمال استاندارد ($p=0.02$)، بیشاند ($p=0.01$) و فان نیومن ($p=0.01$). این نتایج به‌وضوح حاکی از وقوع یک شکست ساختاری معنادار در سری زمانی بارش زمستانه این ایستگاه، حوالی سال ۲۰۱۲، هستند. کاهش قابل توجه میانگین بارش در این ایستگاه (حدود $46/54$ میلی‌متر) نیز با یافته‌های آماری همخوانی دارد و بر شدت تغییر ساختاری دلالت می‌کند.

جدول ۶. نتایج آزمون‌های پتیت، نرمال استاندارد، بیشاند و فان نیومن برای بارش فصل زمستان (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

| چیتگر | مهرآباد | شمیران | ژئوفیزیک | میانگین اختلاف | آزمون‌ها |
|--------|---------|--------|----------|----------------|-----------------|
| -۴۶/۵۴ | -۲۸/۰۸ | * | * | (۱۲۵/۵۹) | (۶۶/۵۲-۱۱۳/۰۶) |
| ۲۰۱۲ | ۲۰۰۹ | ۲۰۰۸ | ۲۰۱۱ | t | |
| ۱۲۶ | ۱۲۰ | ۱۱۵ | ۷۲ | K | پتی |
| ۰/۰۰۵ | ۰/۰۴ | ۰/۰۶۵ | ۰/۴۸ | P_value | |
| ۸/۴۱ | ۵/۱۱ | ۵/۹۲ | ۲/۰۱ | T ₀ | |
| ۰/۰۲ | ۰/۱۹ | ۰/۱۲ | ۰/۸ | P_value | نرمال استاندارد |
| ۷/۵۴ | ۶/۲۱ | ۶/۷۷ | ۳/۰۸ | Q | بیشاند |
| ۰/۰۱ | ۰/۰۹ | ۰/۰۵ | ۰/۸۳ | P_value | |
| ۱/۱۹ | ۱/۷۸ | ۱/۶۳ | ۲/۴۱ | N | فان نیومن |
| ۰/۰۱ | ۰/۲۸ | ۰/۱۵ | ۰/۸۸ | P_value | |

بررسی هم‌زمان روند تغییرات و نقاط جهش بارش فصل زمستان

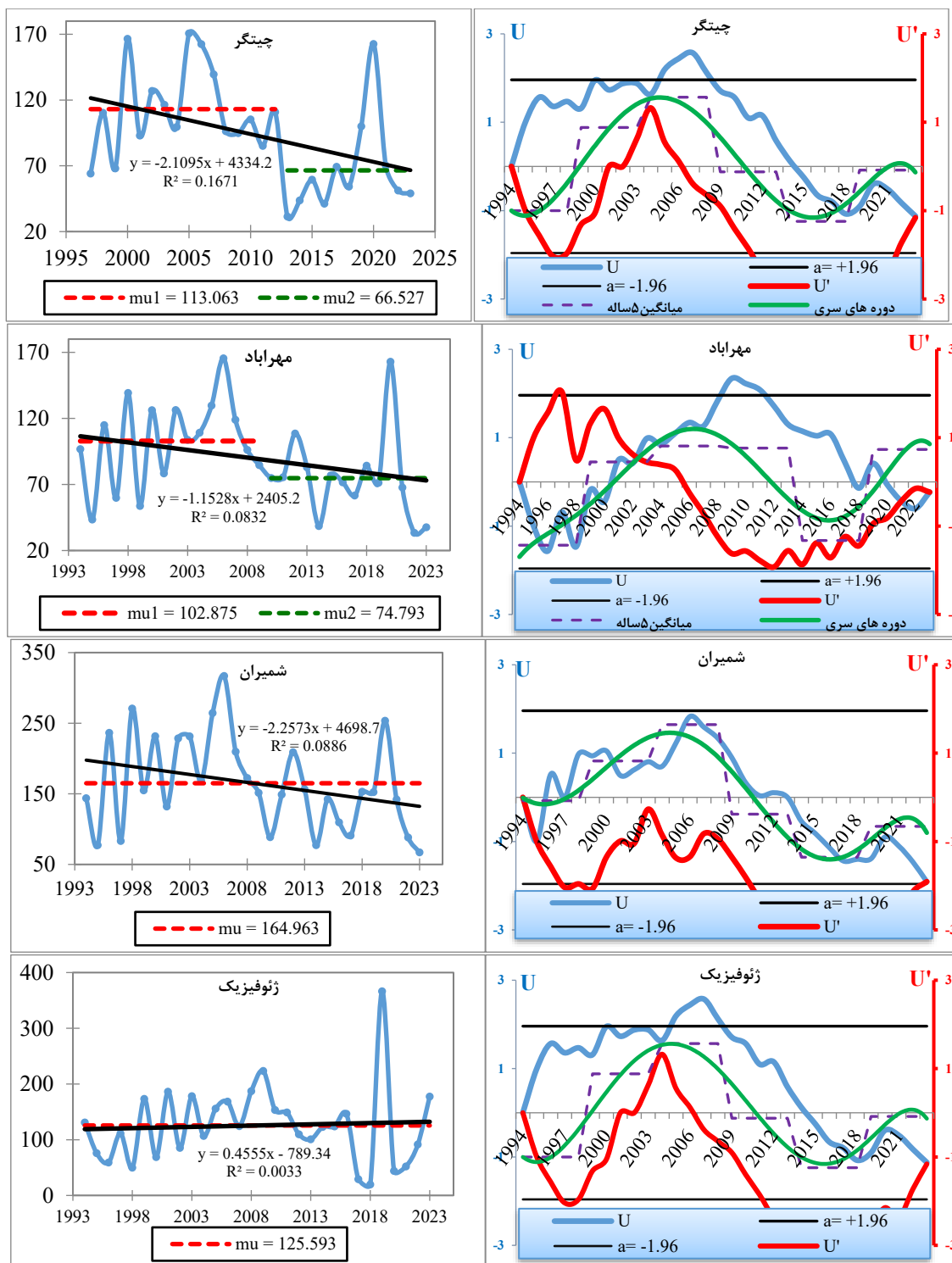
طبق شکل ۵، وضعیت بارش زمستانی در ایستگاه‌های تهران طی دوره ۱۹۹۴-۲۰۲۳ متفاوت است و نتایج تحلیل روند و آزمون‌های همگنی مکمل یکدیگر هستند.

در ایستگاه ژئوفیزیک، تحلیل من‌کندال هیچ روند افزایشی یا کاهشی معناداری در بارش زمستان نشان نمی‌دهد. سری زمانی دارای نوسانات سالانه است و میانگین‌های متحرک ۵ ساله نیز الگوی متغیری از افزایش و کاهش را نشان می‌دهند. باین‌حال، در نمودار همگنی، چهار آزمون انجام‌شده یک نقطه جهش مشخص در حوالی دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) نشان می‌دهند. این یافته حاکی از وقوع یک تغییر ناگهانی در الگوی بارشی است، هرچند که روند بلندمدت جهت‌دار ندارد. بنابراین، تحلیل روند و همگنی در این ایستگاه نشان می‌دهند که ناپایداری ساختاری وجود داشته، ولی تغییر جهت‌دار طولانی‌مدت مشاهده نشده است.

در ایستگاه مهرآباد، یک‌روند کاهشی ضعیف اما معنادار در بارش زمستان مشاهده می‌شود. میانگین‌های ۵ ساله افت‌هایی را به‌ویژه در دهه اخیر نشان می‌دهند، که بیانگر کاهش پیوسته بارش است. نمودار همگنی نیز یک نقطه جهش قابل توجه در اواخر دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) یا اوایل دهه ۱۳۹۰ (۲۰۱۰ میلادی) را شناسایی می‌کند که با کاهش بارش هم‌زمان است. بنابراین، در این ایستگاه، تحلیل روند و آزمون‌های همگنی هم‌راستا بوده و بر کاهش تدریجی و تغییر ساختاری هم‌زمان در بارش زمستانی تأکید دارند.

در ایستگاه شمیران، هیچ روند قابل توجهی در بارش زمستان مشاهده نمی‌شود. میانگین‌های ۵ ساله رفتار نوسانی دارند، اما نه افزایشی و نه کاهشی پایدار. نمودار همگنی نیز نقطه جهش معناداری نشان نمی‌دهد و سری زمانی از نظر ساختار آماری همگن باقی‌مانده است. بنابراین، تحلیل روند و همگنی در این ایستگاه کاملاً یکدیگر را تأیید کرده و بر پایداری نسبی بارش‌های زمستانی دلالت دارند.

در ایستگاه چیتگر، روند من‌کندال تغییر معنادار بلندمدت را نشان نمی‌دهد، اما سری زمانی دارای نوسانات شدید و میانگین‌های ۵ ساله بدون الگوی ثابت هستند. در نمودارهای همگنی، یک نقطه جهش در دهه ۷۰ (۱۹۹۰ میلادی) یا اوایل دهه ۸۰ (۲۰۰۰ میلادی) شناسایی شده است که نشان‌دهنده تغییر ساختاری موضعی در بارش‌هاست. بنابراین، در این ایستگاه، تحلیل روند و آزمون‌های همگنی تا حدودی متفاوت عمل می‌کنند؛ روند بلندمدت معنی‌دار نیست اما تغییر اقلیم به‌صورت ناپایدار و دوره‌ای رخ داده است.



شکل ۵. بررسی روندها و نقاط جهش از میانگین سری زمانی ۳۰ ساله با استفاده از روش من-کنندال و مقایسه آن با میانگین ۵ ساله سری و دوره‌های موجود (شکل‌های سمت راست) و نتایج آزمون‌های همگنی اعمال شده بر روی سری زمانی بارش فصل زمستان (mu میانگین داده‌های مشاهده شده است) (شکل‌های سمت چپ) در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

بحث

نتایج تحلیل آماری روند دمای بیشینه و بارش در فصول سرد سال در ایستگاه‌های سینوپتیک تهران نشان داد که

تغییرات قابل توجهی در الگوهای بارشی و دمایی این منطقه رخ داده است. در فصل پاییز، آزمون من-کندال روند افزایشی معنادار دما را در اغلب ایستگاه‌ها تأیید کرد. بیشترین مقدار آماره کندال مربوط به ایستگاه شمیران (۰/۴۹) و کمترین آن متعلق به مهرآباد (۰/۲۵) بود، درحالی که شیب سن بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۹ درجه سلسیوس در سال متغیر بود. در فصل زمستان نیز روند افزایشی دمای بیشینه در تمامی ایستگاه‌ها معنادار بود و مقادیر p-value اغلب کمتر از ۰/۰۱ و در بسیاری موارد برابر با ۰/۰۰۱ گزارش شد که نشان‌دهنده سطح معناداری بالا است.

از منظر همگنی، آزمون‌های پتی، نرمال استاندارد، بیشاند و فان نیومن در اغلب ایستگاه‌ها، به‌ویژه شمیران، ژئوفیزیک و چیتگر، وقوع تغییرات ساختاری در داده‌های دمای بیشینه پاییز و زمستان را تأیید کردند. به‌عنوان مثال، در ایستگاه شمیران اختلاف میانگین دمای پیش و پس از نقطه تغییر در پاییز ۱/۶۲ درجه و در زمستان از ۸/۷ به ۱۱/۲ درجه سلسیوس افزایش یافته است. این تغییرات نشان‌دهنده وقوع جهش اقلیمی محسوس در دهه ۱۳۸۰ (دهه ۲۰۰۰ میلادی) هستند.

به‌طور کلی، دمای بیشینه در پاییز و زمستان طی دوره ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ در اغلب ایستگاه‌های سینوپتیک تهران دارای روند افزایشی معنادار بوده است. ایستگاه‌هایی مانند شمیران و ژئوفیزیک بیشترین مقادیر آماره من-کندال و شیب سن را ثبت کردند و در برخی ایستگاه‌ها دمای زمستان پس از نقطه تغییر تا بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این روند افزایشی نه‌تنها از نظر آماری معنادار است، بلکه از منظر اقلیمی نیز اهمیت دارد و با شواهد جهانی تغییرات دما همخوانی دارد. علاوه بر آن، وقوع شکست‌های ساختاری در داده‌ها که عمدتاً در حوالی دهه ۱۳۸۰ رخ داده‌اند، احتمالاً تحت تأثیر رشد شهرنشینی، افزایش اثر جزایر حرارتی و تغییر الگوهای مصرف انرژی در تهران بوده است.

در رابطه با بارش، روندها در پاییز عمدتاً فاقد معناداری هستند، اما در زمستان، ایستگاه‌های چیتگر و مهرآباد دارای روند کاهشی معنادار می‌باشند (شیب‌های ۲/۲۷- و ۱/۸۵- میلی‌متر در سال و آماره کندال منفی ۰/۲۹- و ۰/۲۸-). ایستگاه چیتگر بیشترین ناهنجاری و کاهش بارش زمستانه را نشان داد و تمامی آزمون‌های همگنی شکست ساختاری را با p-value کمتر از ۰/۰۵ تأیید کردند. این کاهش بارش می‌تواند بر ذخیره برف، رواناب‌ها و منابع آب تهران در فصل‌های خشک تأثیرگذار باشد.

یافته‌های این مطالعه با نتایج پژوهش‌های قبلی در ایران هم‌راستا است. به‌عنوان نمونه، بازگیر و همکاران (۱۳۹۸) بیش از ۸۸ درصد داده‌های دمایی کشور را دارای ناهمگنی گزارش کردند و سال ۱۹۹۸ میلادی را به‌عنوان نقطه تغییر دمای بیشینه در بسیاری از ایستگاه‌ها شناسایی کردند؛ نتایجی که با داده‌های تهران در این پژوهش در دهه ۱۳۸۰ همخوانی دارد. همچنین، علی‌پور و ملکیان (۱۳۹۸) کاهش و ناهمگنی بارش را در شمال غرب ایران گزارش کردند که مشابه الگوهای مشاهده‌شده در چیتگر و مهرآباد تهران است. پژوهش مرتضی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داد که داده‌های دما نسبت به بارش تطابق بهتری با آزمون‌های همگنی دارند؛ نکته‌ای که در نتایج حاضر نیز مشهود است. در نهایت، هم‌زمانی روند افزایشی دما، وقوع شکست‌های ساختاری و کاهش بارش زمستانه در برخی ایستگاه‌ها، نشان‌دهنده آن است که شهر تهران نیز از روندهای جهانی تغییر اقلیم بی‌تأثیر نبوده است.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر باهدف تحلیل روند و همگنی دمای بیشینه و بارش در فصل‌های سرد سال (پاییز و زمستان) در چهار ایستگاه سینوپتیک شهر تهران طی دوره آماری ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۳ انجام شد و تغییر اقلیم فصلی و نقاط جهش ساختاری در داده‌ها شناسایی گردید. نتایج نشان داد که دمای بیشینه در هر دو فصل در اغلب ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار داشته

است. این افزایش دما در ایستگاه‌هایی مانند شمیران و ژئوفیزیک چشمگیرتر بوده و در برخی موارد، میانگین دمای زمستان پس از نقطه تغییر بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است.

آزمون‌های همگنی شامل پتی، نرمال استاندارد، بیشاند و فان‌نیومن در سه ایستگاه از چهار ایستگاه مورد بررسی، وقوع نقاط شکست معنادار در ساختار آماری داده‌های دمایی را تأیید کردند. این نقاط عمدتاً در حوالی دهه ۱۳۸۰ شمسی (دهه ۲۰۰۰ میلادی) رخ داده‌اند؛ دوره‌ای که با افزایش شهرنشینی، گسترش کاربری‌های غیرقابل نفوذ و افزایش آلودگی هوا در تهران همراه بوده است. در زمینه بارش، نتایج نشان داد که فصل پاییز در همه ایستگاه‌ها فاقد روند معنادار آماری و ساختاری بوده و بارش‌های پاییزه نسبتاً پایدار باقی‌مانده‌اند. اما در فصل زمستان، ایستگاه‌های مهرآباد و چیتگر کاهش معناداری در بارش را تجربه کردند. همچنین، آزمون‌های همگنی در چند ایستگاه، وقوع شکست‌های آماری در ساختار داده‌های بارش زمستانه را تأیید نمودند.

در این پژوهش، با توجه به ثابت بودن مکان و تجهیزات ایستگاه‌ها، منابع عدم قطعیت اصلی به نوسانات طبیعی اقلیمی سالانه و تغییرات کوتاه‌مدت جوی مربوط می‌شود. اگرچه روندهای بلندمدت و نقاط جهش به‌وضوح شناسایی شده‌اند، مقادیر دقیق دما و بارش ممکن است در هر سال تحت تأثیر نوسانات طبیعی تا حدی متفاوت باشند. این تحلیل عدم قطعیت اهمیت توجه به دامنه تغییرات طبیعی را در تفسیر نتایج آماری تأکید می‌کند و محدودیت‌های داده‌های ایستگاهی را روشن می‌سازد.

در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان‌دهنده گرمایش فزاینده در ماه‌های سرد سال، کاهش نسبی بارش زمستانی و بروز تغییرات ساختاری در داده‌های اقلیمی تهران است. این تغییرات نه تنها از منظر آماری معنادار هستند، بلکه پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب، انرژی، سلامت عمومی و تاب‌آوری شهری در تهران دارند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

اسمعیلی محمودآبادی، اباذر؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر و محمدی، حسین. (۱۴۰۴). شناسایی و تحلیل روند زمانی- مکانی امواج گرمایی در شهر تهران. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۲(۱)، ۸۰-۶۵. doi:jhsci.2025/389996/865/10/22059

بازگیر، سعید؛ عباسی، فائزه؛ اسعدی‌اسکویی، ابراهیم؛ حقیقت، مسعود و رضازاده، پرویز. (۱۳۹۸). تحلیل همگنی داده‌های دما و بارش در ایران با رویکرد اقلیمی. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۲۱(۶)، ۵۱-۷۰.

- بهاروندی، کبرا؛ خورشید دوست، علی محمد و نساجی زواره، مجتبی. (۱۴۰۰). آشکارسازی نوسانات اقلیمی با استفاده از روش آزمون همگنی نرمال استاندارد (مطالعه موردی: ایستگاه خرم‌آباد). *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵(۷۵)، ۶۳-۵۱. doi:10/22034/gp.2021/10829
- پیشگاه هادیان، پدram؛ احسان‌زاده، اقبال و معینی، رامتین. (۱۳۹۵). مقایسه عملکرد روش‌های مختلف در بررسی روند تغییرات متغیرهای اقلیمی (مطالعه موردی: سد سفیدرود). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۲(۲)، ۴۹-۶۶.
- حسین‌پور، زینب، شمسی‌پور، علی‌اکبر، کریمی احمدآباد، مصطفی و خوش‌اخلاق، فرامرز. (۱۴۰۲). تحلیل آماری امواج گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۳(۶۸)، ۸۱-۹۸. <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.23.68.81>
- خورشیددوست، علی محمد؛ رسولی، علی‌اکبر؛ سلاجقه، علی و نساجی‌زواره، مجتبی. (۱۳۹۵). ارزیابی همگنی سری‌های زمانی دمای بیشینه و کمینه سالانه و فصلی (مطالعه موردی ناحیه خزر). *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۵۷، ۱۴۹-۱۳۳.
- خسروی، آمنه و آذری، محمود. (۱۴۰۱). تعیین روند زمانی و مکانی و نقطه تعیین دما و بارش در حوزه کشف رود، *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۲(۶۶)، ۳۰۶-۲۸۹. <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.22.66.289>
- علی‌پور، حسن و ملکیان، آرش. (۱۳۹۸). تحلیل همگنی و روند بارش‌های آستانه با رویکرد آماری ناپارامتری در شمال غرب ایران. *مهندسی مدیریت آب‌خیز*، ۱۱(۴)، ۹۲۸-۹۱۷. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.109070.1256>
- محمدی، حسین؛ عزیزی، قاسم؛ تقوی، فرحناز و یوسفی، یدالله. (۱۳۹۰). تغییرپذیری زمانی و مکانی بیشینه بارش ماهانه در بخش‌های جنوبی دریای خزر. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۴۳(۷۵)، ۱-۱۸.
- محمدی، حسین؛ عزیزی، قاسم؛ خوش‌اخلاق، فرامرز و رنجبر، فیروز. (۱۳۹۶). تحلیل روند شاخص‌های حدی بارش روزانه در ایران. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۴۹(۱)، ۲۱-۳۷. doi:10.22059/jphgr.2017.61577
- مدرسی، فرشته؛ عراقی‌نژاد، شهاب؛ ابراهیمی، کیومرث و خلقی، مجید. (۱۳۸۹). بررسی منطقه‌ای پدیده تغییر اقلیم با استفاده از آزمون‌های آماری (مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگانرود - قره‌سو). *نشریه آب‌و‌خاک*، ۲۴، ۴۸۹-۴۷۶.
- مرتضی‌پور، سامان؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم و عباسی، فائزه. (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی چند آزمون همگنی در شناسایی جهش در داده‌های اقلیمی دما، بارش و فشار؛ مطالعه موردی: ایستگاه فرودگاهی رشت. *نیوار*، ۴۴(۱۰۸-۱۰۹)، ۳۰-۱۱. Doi:10.30467/nivar.2020.188070.1132

References

- Agbonaye, A.I., Okogbue, C.O. & Igbokwe, J.I. (2023). Trend analysis of climate extremes in the coastal region of Nigeria using the ETCCDI climate change indices. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 1387-1405. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01510-9>
- Alipour, H. & Malkian, A. (2019). Spatial analysis of climate change using rainfall and temperature extreme indices (case study: Iran). *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 405-421. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2384-y>
- Alipour, H. & Malekian, A. (2019). Homogeneous analysis and extremes precipitation trend with non-parametric statistical on northwest of Iran, *Basin management engineering*. 11(4), 917-928. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.109070.1256>. [in Perian]
- Asfaw, A., Simane, B., Hassen, A. & Bantider, A. (2018). Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. *Weather and Climate Extremes*, 19, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.12.002>
- Baharvandi, K., Khorshidoost, A. M. & Nassaji Zavareh, M. (2021). Analysis of the frequency of hot and cold extreme temperature events in Lorestan province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(2), 373-388. <https://doi.org/10.22059/IJE.2021.315142.1627>. [In Persian]
- Bari, S.H., Rahman, M.T.U., Hoque, M.A. & Hussain, M.M. (2016). Analysis of seasonal and annual rainfall trends in the northern region of Bangladesh. *Atmospheric Research*, 176, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.008>
- Bazgeer, S., Abbasi, F., Asadi Askouei, E., Haghigat, M. & Rezazadeh, P. (2019). Drought monitoring using the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Reconnaissance

- Drought Index (RDI) in the northwest of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4355-2>
- Bazgeer, S., Abbasi, F., AsaadiOskouei, E., Haghghat, M. & RezaZadeh, P. (2019). Precipitation and Temperature data homogenous analysis in Iran via Climate approach. *Spatial analysis of Environment hazards*, 21(6), 51-70. <https://www.magiran.com/p2001693>. [in Perian]
- Bharath, A.L., Sabale, R. & Venkatesh, B. (2024). Spatio-temporal variability of extreme precipitation indices over India. *Natural Hazards*, 121, 2561–2587. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06255-6>
- Buffoni, L., Maugeri, M. & Nanni, T. (1999). Precipitation in Italy from 1833 to 1996. *Theoretical and Applied Climatology*, 63, 33–40. <https://doi.org/10.1007/s007040050093>
- Dos Santos, C.A., Neale, C.M., Rao, T.V. & Da Silva, B.B. (2011). Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation over the Ceara State, Northeast Brazil. *Journal of Climate*, 24(15), 1901–1912.
- Esmaili Mahmoudabadi, A., Shamsipour, A.A. & Mohammadi, H. (2025). Trend analysis of rainfall and temperature extreme indices using Mann-Kendall and Sen's slope estimator (Case Study: Selected stations in Iran). *Physical Geography Research Quarterly*, 57(1), 129–149. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.343047.1007576>. [In Persian]
- Esmaili Mahmoudabadi, A., Shamsipour, A.A. & Mohammadi, H. (2025). Identification and analysis of the temporal-spatial trend of heat waves in Tehran. *Environmental Management Hazards*, 12(1), 65-80. <https://doi:10.22059/jhsci.2025.389996.865>. [in Perian]
- Faquseh, H. & Grossi, G. (2024). Urban resilience and climate adaptation in Mediterranean cities. *Sustainability*, 16(2), 701. <https://doi.org/10.3390/su16020701>
- Fischer, S., Schumann, A. & Bühler, P. (2019). Climate change impact on hydrological extremes in the Ruhr river basin, Germany. *Hydrology Research*, 50(2), 356–373. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.108>
- Gaponov, V.M., Elizaryev, A.N., Aksenov, S.G. & Longobardi, A. (2019). Spatio-temporal variability of precipitation and extreme wet events in the North Caucasus region, Russia. *Atmosphere*, 10(8), 483. <https://doi.org/10.3390/atmos10080483>
- Hamid, H. & Samantaray, S. (2025). Analysis of temporal trends and spatial variability of temperature and precipitation extremes over India. *Theoretical and Applied Climatology*, 161, 2277–2294. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04642-z>
- Hosseinpour, Z., Shamsipour, A.A., Karimi Ahmadabad, M. & KhoshAkhlagh, F. (2023). A spatial analysis of trends in rainfall and temperature indices of climate extremes in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 1072. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11763-9>
- Hosenpour, Z., Shamsipour, A.A., Karimi, M. & Khoshakhlagh, F. (2023). Statistical analysis of thermal heats in southern range of Alborz, *Applied researchs of Geography science's*, 23(68), 81-98. <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.23.68.81>. [in Perian]
- Jain, S.K., Kumar, V. & Saharia, M. (2013). Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. *International Journal of Climatology*, 33(4), 968–978. <https://doi.org/10.1002/joc.3483>
- Kabbilawsh, P., Kumar, D.S. & Chithra, N. R. (2024). Trend analysis of extreme rainfall indices over peninsular India. *Journal of Earth System Science*, 133, 61. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02131-7>
- Khorshiddoust, A.M., Rasouli, A.A., Slajegheh, A. & Nassaji Zavareh, M. (2016). Homogeneity Assessment of Annual and Seasonal Maximum and Minimum Temperatures Time Series (Case study of Khazar Region). *Journal of Geography and Planning*, 20(57), 133-149. [in Perian]
- Khosravi, A. & Azari, M. (2022). Determining of Spatiotemporal treand and point of temperature and precipitation in Kashaf roud Basin. *Applied researchs of Geography science's*, 22(66), 289-306. <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.22.66.289>. [in Perian]
- Kocsis, T., Kovács-Székely, I. & Anda, A. (2020). Trends and variability of precipitation indices in Hungary between 1901 and 2017. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 1303–1319. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03025-w>

- Mahapara, P., Hamid, H., & Samantaray, S. (2025). Spatiotemporal trend analysis of temperature and precipitation extremes over India. *Theoretical and Applied Climatology*, 161, 2107–2127. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04625-0>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Modarresi, F., Araghi Nejad, Sh., Ebrahimi, K., & Khaleghi, M. (2010). Investigation of precipitation and temperature trends in Isfahan province using Mann-Kendall test. *Iranian Journal of Water and Soil*, 24(2), 253–264. [In Persian]
- Mohammadi, H., Azizi, G., KhoshAkhlagh, F. & Ranjbar, F. (2017). Trends in temperature and precipitation extremes in the northwest of Iran. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(2), 515–529. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.61577>. [in Persian]
- Mohammadi, H., Azizi, G., Taghavi, F., & Yousefi, Y. (2011). Evaluation of climate change in northwest of Iran using Mann-Kendall test and Sen's estimator. *Geographical Research Quarterly*, 26(104), 75–90. [in Persian]
- Mortazipour, S., Asadi Askouei, E. & Abbasi, F. (2020). Analysis of drought using SPI and RDI indices in western Iran. *Desert*, 25(2), 241–252. <https://doi.org/10.22059/JDESERT.2020.295658.100666>.
- Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & van Ypersele, J. P. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Pakalidou, N. & Karacosta, P. (2018). Climate change in Greece: Analysis of precipitation and temperature extreme indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 131, 1179–1191. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2031-3>
- Persiano, S., Ferri, E., Antolini, G., Domeneghetti, A., & Castellarin, A. (2020). Recent changes in precipitation extremes over Italy: A study based on the E-OBS dataset. *Water*, 12(7), 1905. <https://doi.org/10.3390/w12071905>
- Pietrapertosa, F., Khokhlov, V., Salvia, M., & Cosmi, C. (2018). Climate change adaptation in urban areas: A review of recent developments and empirical evidence. *Energy and Sustainability*, 19, 155–166. <https://doi.org/10.2495/ESUS180151>
- Pińskwar, I., Choryński, A., Graczyk, D., & Kundzewicz, Z.W. (2019). Changes in extreme precipitation and temperature indices in Poland. *Climate Research*, 77(2), 113–129. <https://doi.org/10.3354/cr01543>
- Pishgahi Hadian, P., Ehsanzadeh, E., & Moeini, R. (2016). Changes in frequency of extreme rainfall in Iran. *Hydrology Research*, 47(5), 1102–1113. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.153>
- Pishgahi Hadian, P., Ehsanzadeh, E. & Moeini, R. (2016). Comparing the various methods of action on investigation climate variables trend (case study: Sefidroud Dam). *Iran water resources research*, 12(2), 49-66. <https://civilica.com/doc/1606055>. [in Persian]
- Seenu, P.Z., Chebrolu, M.S., Shradha, M., Sagar, G.V., & Venkatesh, B. (2024). Trend analysis of rainfall indices and their implications on hydrology in India. *Environmental Research Communications*, 6(5), 055001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad2a3b>
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., ... & Midgley, P.M. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Suhaila, J., & Yusop, Z. (2018). Trends in Malaysian rainfall data: A review. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 1005–1023. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2210-2>
- UU, A., Yusuf, A.S., Edet, C.O., Oche, C.O., & Agbo, E. (2018). Trend analysis of temperature and rainfall in Calabar, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6806-4>
- von Schuckmann, K., Le Traon, P.Y., Smith, N., Pascual, A., et al. (2020). Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 4. *Journal of Operational Oceanography*, 13(sup1), S1–S182. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2020.1785097>

- Zhang, X., Vincent, L. A., Hogg, W., & Niitsoo, A. (2000). Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean*, 38(3), 395–429. <https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649654>
- Zhao, N., Yue, T., Li, H., Zhang, L., Guo, Q., & Chen, C. (2018). Spatiotemporal variations and driving forces of precipitation extremes in the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration, China. *Atmospheric Research*, 212, 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.003>