



article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Extended Abstract

Introduction

Climate change is one of the most important environmental challenges of the twenty-first century and is mainly driven by anthropogenic greenhouse gas emissions. Its impacts are reflected in rising air temperatures, changes in precipitation regimes, and increasing hydro-climatic extremes (IPCC, 2023). Arid and semi-arid regions are especially vulnerable because they depend on scarce and highly variable water resources and climate-sensitive agriculture. Northeast Iran, including Khorasan Razavi, North Khorasan, and South Khorasan provinces, is a representative dryland region exposed to these pressures. It is characterized by hot dry summers, cold winters, low and irregular precipitation, and growing stress on groundwater resources. Previous studies have reported warming tendencies, declining humidity, and hydro-climatic instability in parts of this region. However, many of those studies were conducted either at broader national scales, over shorter periods, or without a systematic assessment of data homogeneity before trend analysis. This study addresses these gaps by examining long-term annual and seasonal changes in temperature and precipitation in Northeast Iran during 1995–2024 and by evaluating their statistical relationship with globally averaged atmospheric CO₂ concentration.

Methodology

Monthly, seasonal, and annual mean temperature and total precipitation data from 16 synoptic stations of the Iran Meteorological Organization were analyzed for the period 1995–2024. Stations were selected based on balanced spatial distribution, continuity of records, and low rates of missing data. Missing values, which did not exceed 0.5 percent, were completed using multiple imputation in SPSS. Global atmospheric CO₂ data were obtained from the NOAA Global Monitoring Laboratory. Before trend detection, annual temperature and precipitation series were tested for homogeneity using three complementary methods: Pettitt, SNHT, and Buishand. Temporal trends were identified using the non-parametric Mann–Kendall test, and their magnitude was estimated by Sen’s slope estimator. A paired t-test was applied to compare climatic conditions between the two sub-periods 1995–2009 and 2010–2024. P-values between 0.05 and 0.10 were interpreted as marginally significant because weak precipitation declines may still be hydrologically important in dry environments. The relationship between global CO₂ concentration and regional climatic variables was examined through simple linear regression. Spatial patterns of trend magnitude were mapped using the Inverse Distance Weighting method in ArcGIS Pro. Finally, hierarchical clustering based on Ward’s method and squared Euclidean distance was performed using four standardized variables: annual temperature trend slope, annual precipitation trend slope, mean annual temperature, and mean annual precipitation.

Results and Discussion

The homogeneity assessment showed that annual temperature series at all 16 stations were non-homogeneous. This was interpreted as a statistical signal of strong and persistent warming rather than a data-quality problem. In contrast, annual precipitation series were homogeneous at all stations and therefore suitable for direct trend analysis. The Mann–Kendall test revealed a clear regional warming pattern. Fifteen of the sixteen stations, equivalent to 93.75 percent, exhibited statistically significant positive annual temperature trends. The strongest warming rates were observed at Qaen (0.069°C year⁻¹), Tabas (0.068°C year⁻¹), Torbat-e Jam (0.066°C year⁻¹), and Sarakhs (0.064°C year⁻¹). Quchan was the only station with a negative slope, but this trend was not statistically significant. Seasonal analysis showed that spring had the strongest and most spatially consistent warming signal across the region, while summer also displayed mainly positive trends. Precipitation trends were more heterogeneous and generally weaker than temperature trends. Significant annual precipitation declines were detected only at Tabas and Torbat-e Heydarieh, while Torbat-e Jam and Birjand showed marginally significant decreases. Several northern stations, including Quchan, Mashhad, and Sarakhs, displayed weak positive or near-zero precipitation slopes. Seasonal analysis indicated that the most persistent declines occurred in winter and spring, the two seasons most critical for groundwater recharge and rainfed agriculture. This pattern points to increasing pressure on regional water resources and agricultural stability, especially in the southern and central sectors of the study area. The paired t-test confirmed that the second sub-period was significantly warmer than the first at all stations except Quchan. In Qaen, Tabas, and Torbat-e Jam, the increase

exceeded 1°C, indicating a structural shift in the regional thermal regime. Regression analysis further showed a positive and statistically significant relationship between global CO₂ concentration and annual temperature at 15 of the 16 stations. In contrast, no significant association was found between global CO₂ and annual precipitation, suggesting that precipitation in Northeast Iran is influenced more strongly by regional circulation patterns, topography, and moisture transport processes than by direct global radiative forcing. Hierarchical clustering identified three distinct climatic groups: a hot-arid cluster with high temperatures, low precipitation, and strong warming trends; a transitional semi-arid cluster with moderate thermal and moisture conditions; and a distinct cool-wet cluster represented only by Quchan.

Conclusion

The findings show that Northeast Iran experienced substantial climatic change during 1995–2024, mainly in the form of widespread and statistically robust warming. In contrast, precipitation changes were spatially less uniform, although drying tendencies were evident in the southern and central sectors, particularly during winter and spring. The combined effect of increasing temperature and declining seasonal precipitation implies rising risks of hydrological and agricultural drought. The identification of three climatic clusters provides a practical basis for region-specific adaptation strategies. Priority actions should include improved water allocation, strengthened drought monitoring systems, and the promotion of drought-resistant agricultural practices, especially in the most vulnerable hot-arid areas

Funding

There is no funding support for this research..

Authors' Contribution

The authors have contributed equally to this research.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Iran Meteorological Organization for providing synoptic station data and to the National Oceanic and Atmospheric Administration's Global Monitoring Laboratory (NOAA-GML) for providing global CO₂ data. We are also grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

- Adeyeri, O. E., Zhou, W., & Laux, P. (2025). Global heatwaves dynamics under climate change. *Earth's Future*, 13(6), e2025EF006486. <https://doi.org/10.1029/2025EF006486>
- Ahmadi, M., & Dadashi Roudbari, A. (2019). Monitoring of monthly temperature trend of Iran based on the output of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA Interim database. *Geography (Iranian Geographical Society)*, 17(60), 58–74. [Persian] https://mag.iga.ir/article_247710_en.html
- Akbari, M., Maleki-Nejad, H., & Hajibiglou, M. (2024). Investigation of climate change and future precipitation and temperature trends in the Kardeh Dam watershed. *Desert Management*, 12(4), 87–106. [Persian] . <https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2045459.1490>
- Akbari, M., & Sayyad, V. (2021). Analysis of climate change studies in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 53(1), 37–74. [Persian], <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528>
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Alizadeh, A., Kamali, G. A., & Mousavi, F. (2022). Investigation of climate change in Khorasan Razavi under CMIP6 scenarios. *Journal of Water and Soil*, 36(3), 515–535. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v36i3.98754>
- Arab, N., Salman-Mahiny, A., Mikaeili-Tabrizi, A., & Witte, T. (2022). Investigation and analysis of land-use dynamics and its impact on urban heat islands (Case study: Mashhad City). *Journal of Natural Environment*, 75(3), 384–398. [Persian]. <https://doi.org/10.22059/jne.2022.336599.2365>
- Attarod, P., Dezhban, A., Pypker, T. G., Sigaroodi, S. K., Bayramzadeh, V., Tang, Q., & Mariv, H. S. (2023). Iran's changing climate over the past 30 years. *Russian Meteorology and Hydrology*, 48(1), 53. <https://doi.org/10.3103/S1068373923010077>

- Banayan Aval, M., Mohammadian, A., & Alizadeh, A. (2010). Investigation of climatic variability in Northeast Iran. *Journal of Water and Soil Sciences*, 15(57), 123–135. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.2927>
- Batibeniz, F., Hauser, M., Diffenbaugh, N. S., & Seneviratne, S. I. (2023). Risks of simultaneous climate extremes in Europe under different warming levels. *Earth System Dynamics*, 14(2), 485–505. <https://doi.org/10.5194/esd-14-485-2023>
- Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58(1–2), 11–27. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90066-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90066-X)
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 12(2), e2023EF003849. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Donat, M. G., Angélil, O., & Ukkola, A. M. (2019). Intensification of precipitation extremes in the world's humid and water-limited regions. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1c8e>
- Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarniand, H., & Barati, A. A. (2020). Simulation and prediction of climatic components of temperature and precipitation in arid regions: Case study of Minab Plain. *International Quarterly Journal of Iranian Geographical Society*, 18(66), 110–128. [Persian] 20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6
- Graus, S., Friesinger, S., & Schindelegger, M. (2024). Climate hazards in Mediterranean Europe: A review of compound events. *Urban Science*, 8(2), 42. <https://doi.org/10.3390/urbansci8020042>
- Hamzeh, N. H., Naderikia, M., Malakooti, H., Dehghan, A., Kaskaoutis, D. G., & Alam, K. (2021). The relationship between dust storms and drought in the Sistan region during 2000–2019. *Atmosphere*, 12(10), 1350. <https://doi.org/10.3390/atmos12101350>
- Heydari, S. (2017). Climatic zoning of Khorasan region (North, Razavi, and South Khorasan). 4th International Conference on Environmental Planning and Management, Tehran. [Persian] <https://civilica.com/doc/589407>
- Heydarizad, M., Raeisi, E., Sori, R., Gimeno, L., & Nieto, R. (2018). The role of moisture sources and climatic teleconnections in Northeastern and South-Central Iran's hydro-climatology. *Water*, 10(11), 1550. <https://doi.org/10.3390/w10111550>
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kazemzadeh, M., Nouri, Z., Jamali, S., & Mohammadabadi, A. (2022). Air temperature change trend in Iran. *Journal of Meteorological Research*, 36(3), 462–477. <https://doi.org/10.1007/s13351-022-1184-5>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). London: Charles Griffin.
- Kouzegaran, S., & Mousavi Baygi, M. (2015). Investigating the trend of extreme climatic events in Northeast Iran. *Journal of Climate Change Research*, 2(6), 45–60. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.40845>
- Lange, S., Volkholz, J., Geiger, T., Zhao, F., Vega, I., Veldkamp, T., & Frieler, K. (2020). Projecting exposure to extreme climate impact events across six event categories and three spatial scales. *Earth's Future*, 8(12), e2020EF001616. <https://doi.org/10.1029/2020EF001616>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleimani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: Facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3>
- Minaei, M., & Irannezhad, M. (2018). Spatio-temporal trend analysis of precipitation, temperature, and related agroclimatic variables in Northeast Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1–2), 167–179. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1963-y>
- Motamedi, A., Gohari, A., & Haghighi, A. T. (2023). Three-decade assessment of dry and wet spells change across Iran, a fingerprint of climate change. *Scientific Reports*, 13(1), 2888. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30040-0>
- Murtagh, F., & Legendre, P. (2014). Ward's hierarchical agglomerative clustering method: Which algorithms implement Ward's criterion? *Journal of Classification*, 31(3), 274–295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
- Naderi, M. (2025). Projections of major climate change indicators over Iran from 2021 to 2080. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(5), 7002–7024. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36186-w>
- Nazari, M., Dehghani Sanij, H., & Ebrahimian, H. (2021). Climate change impact on rainfed wheat in Iran: A spatial analysis. *Frontiers in Agronomy*, 3, 806146. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.806146>

- NOAA Global Monitoring Laboratory. (2024). Globally averaged marine surface monthly mean CO₂ data. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Rahimi, J., & Khalili, A. (2019). Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1–2), 545–564. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2395-7>
- Ramezani Etedali, H., & Kouhi, S. (2025). Investigating the effect of climate change on aridity in Iran with a population exposure approach. *Journal of Disasters and Environmental Crises*, 3(1), 17–38. [Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>
- Sadeqi, A., Irannezhad, M., Bahmani, S., Jelodarlou, K. A., Varandili, S. A., & Pham, Q. B. (2024). Long-term variability and trends in snow depth and cover days throughout Iranian mountain ranges. *Water Resources Research*, 60(1), e2023WR035411. <https://doi.org/10.1029/2023WR035411>
- Scott, M., Carter, J., & Dellagi, A. (2020). Climate disruption and planning: Rationality and climate emergency. *Planning Theory and Practice*, 21(1), 125–154. <https://doi.org/10.1080/14649357.2020.1704130>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shayan Mehr, S., Shahnoushi, N., Sabuohi, M., & Rastegari, S. (2021). Climate change and food security in Khorasan. *Agricultural Economics*, 15(4), 95–128. [Persian], <https://doi.org/10.22034/IAES.2021.534502.1852>
- Shirmohammadi, A., Akbarkhani, Z., Saberali, F., Mirzaei, M., & Mawdudi, M. N. (2023). Trend of changes in relative humidity in Khorasan Razavi province, Northeast Iran. *Water and Sustainable Development*, 10(2), 35–44. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i2.2302-1220>
- Vicente-Serrano, S. M., Miralles, D. G., McDowell, N., Brodribb, T., Domec, J. C., Leung, R., & Breshears, D. D. (2023). Global characterization of the varying responses of the standardized precipitation evapotranspiration index to atmospheric evaporative demand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(14), e2022JD038273. <https://doi.org/10.1029/2020JD033017>
- Whiteman, C. D. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. New York: Oxford University Press.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3rd ed.). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00001-4>
- Zanouzi-Alamdari, N., Sobhani, B., Eslahi, M., & Mohammadi, M. (2024). Zoning precipitation and temperature in Khorasan Razavi Province using the Sixth Assessment Report climate change data (CMIP6). *Environmental Sciences Studies*, 9(4), 9753–9761. [Persian]. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.424861.2169>
- Zhou, S., Huang, P., Wang, L., Hu, K., Huang, G., & Hu, P. (2024). Robust changes in global subtropical circulation under greenhouse warming. *Nature Communications*, 15(1), 96. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44244-5>



بررسی روند تغییرات دما و بارش در شمال شرق ایران و ارتباط آن با غلظت جهانی CO₂

قربان جعفری^۱، عبدالرضا کاشکی^۲

۱. دانشجوی دکتری گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

E:ghorban8591@gmail.com

۲. دانشیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران (نویسنده مسئول).

E:a.kashki@hsu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:

تغییر اقلیم
روند دما و بارش
دی اکسید کربن خوشه بندی
سلسله مراتبی
شمال شرق ایران

پژوهش حاضر با هدف تحلیل روند تغییرات دما و بارش و واکاوی ارتباط آن با غلظت جهانی CO₂ در دوره سی ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۴) در شمال شرق ایران انجام شد. این مطالعه با استفاده از داده های ماهانه، فصلی و سالانه شانزده ایستگاه همدید سازمان هواشناسی کشور و با به کارگیری روش های آماری پیشرفته شامل آزمون ناپارامتریک من کندال، برآوردگر شیب سن، رگرسیون خطی، آزمون T زوجی و تحلیل خوشه های سلسله مراتبی انجام گرفت. پیش از تحلیل روند، همگنی سری های زمانی با سه آزمون Pettitt، SNHT و Buishand ارزیابی شد. تحلیل فضایی روندها نیز با روش درون یابی وزنی معکوس فاصله (IDW) در محیط ArcGIS تکمیل گردید. نتایج نشان داد که پانزده ایستگاه از شانزده ایستگاه (93/75 درصد) روند افزایشی معنادر دما را در سطح ۰.۰۵ تجربه کرده اند. بیشترین نرخ گرمایش در ایستگاه های قائن (0/069 درجه سلسیوس در سال، P < 0/001)، طبس (0/068)، تربت جام (0/066) و سرخس (0/064) ثبت شد. تنها ایستگاه قوچان با شیب -0/015 درجه در سال، رفتاری متمایز و غیرمعنادر (P = 0/318) نشان داد. بارش سالانه در بیشتر ایستگاه ها روند کاهشی داشت؛ کاهش معنادر در ایستگاه های طبس (P = 0/025)، تربت حیدریه (P = 0/050) و روندهای کاهشی مرزی (marginally significant) در ایستگاه های تربت جام (P = 0/059) و بیرجند (P = 0/087) مشاهده شد. آزمون همگنی نشان داد سری های زمانی دما به دلیل روند گرمایشی شدید، غیرهمگن ولی داده های بارش عمدتاً همگن هستند. ارتباط دمای منطقه با غلظت جهانی CO₂ مثبت و معنادر بود (R² > 0/4 در اکثر ایستگاه ها). خوشه بندی سلسله مراتبی چهار متغیره (شیب روند دما، شیب روند بارش، میانگین دما و میانگین بارش سالانه)، ایستگاه ها را به سه خوشه اقلیمی متمایز تفکیک نمود: خوشه اول (اقلیم گرم و خشک) شامل هشت ایستگاه با میانگین دمای بالا و بارش کم؛ خوشه دوم (اقلیم گذار) شامل هفت ایستگاه با شرایط میانه و خوشه سوم شامل ایستگاه قوچان به عنوان یک ناحیه منحصربه فرد با بالاترین بارش و پایین ترین دما. رویکرد تحلیلی یکپارچه این پژوهش با ترکیب سه تکنیک تحلیل روند، پهنه بندی فضایی و خوشه بندی، امکان شناسایی الگوهای منطقه ای تغییرات اقلیمی و تعیین خوشه های آسیب پذیر را برای نخستین بار در این منطقه فراهم کرده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۱۲/۲۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۵/۰۱

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۶/۰۱

استناد: جعفری، قربان و کاشکی، عبدالرضا. (۱۴۰۵). بررسی روند تغییرات دما و بارش در شمال شرق ایران و ارتباط آن با غلظت جهانی CO₂، جغرافیا، ۲۴ (۸۹)، ۹۱-۱۱۴.

doi <http://doi.org/10.22034/jiga.2026.2076947.1459>



مقدمه و پیشینه

تغییر اقلیم به عنوان یکی از پیچیده ترین چالش های زیست محیطی قرن بیست و یکم، با افزایش بی سابقه دمای میانگین کره زمین از دوران پیشاصنعتی شناخته می شود. اجماع علمی قاطعانه نشان می دهد که این پدیده عمدتاً ناشی از فعالیت های انسانی، به ویژه انتشار گازهای گلخانه ای است (Adeyeri et al., 2025: 5؛ Azhari, 2025: 12). تأثیرات این پدیده فراتر از افزایش دمای هوا بوده و به تغییرات اقلیمی گسترده ای منجر شده است که در تشدید رویدادهای حادی آب و هوایی مانند امواج گرمایی، خشکسالی های ممتد، سیلاب های ویرانگر و آتش سوزی های جنگلی تجلی یافته اند (Lange et al., 2020: ۸؛ Graus et al., 2024: ۴۵).

پژوهش ها هشدار می دهند که با افزایش دو درجه سانتی گراد دما نسبت به سطح پیشاصنعتی، فراوانی و شدت رویدادهای ترکیبی نظیر «خشکسالی-امواج گرمایی» به طور معناداری افزایش خواهد یافت (Batibeniz et al., 2023). این تغییرات نه تنها اکوسیستم ها را تهدید می کنند، بلکه پایه های اقتصادی-اجتماعی جوامع را متزلزل ساخته و زیرساخت های حیاتی مانند بهداشت و امنیت غذایی را در معرض خطر قرار می دهند (Scott et al., 2020: 130). الگوهای پیش نگرشی شده توسط مدل های اقلیمی و گزارش های IPCC حاکی از دگرگونی های بنیادین در چرخه های هیدرولوژیکی طی قرن حاضر است. بر اساس این سناریوها، افزایش غلظت گازهای گلخانه ای موجب تغییرات فضایی-زمانی بارش و افزایش دمای هوا در تمامی عرض های جغرافیایی خواهد شد (IPCC, 2023: 12). مناطق نیمه خشک مانند ایران با مخاطرات مضاعفی مواجهند؛ چرا که افزایش دما در این نواحی عمدتاً با کاهش بارندگی و تشدید خشکسالی ها همراه است (Rahimi & Khalili, 2019: 550). در مقابل، مناطق مرطوب جهان با افزایش بارش های فصلی و بروز سیلاب های مخرب روبه رو خواهند بود (Donat et al., 2019: 5). این ناهمگونی فضایی، مدیریت منابع آب و طراحی راهبردهای سازگاری را به چالشی پیچیده تبدیل کرده است (Nazari et al., 2021). بر اساس تازه ترین سناریوهای CMIP6، شدت و فراوانی خشکسالی ها در قرن بیست و یکم به ویژه در مناطق نیمه خشک به طور معناداری افزایش خواهد یافت (Cook et al., 2020: 4). خاورمیانه و به ویژه ایران در کمربند خشک و نیمه خشک جهانی قرار داشته و از حساس ترین مناطق جهان در برابر تغییرات اقلیمی محسوب می شوند. بیش از ۸۲ درصد خاک ایران تحت شرایط اقلیمی خشک تا نیمه خشک قرار دارد و میانگین بارش سالانه آن (حدود ۲۳۰ میلی متر) تنها معادل یک سوم میانگین جهانی است. بر پایه مطالعات مرجع، ایران در دهه های آینده با افزایش ۲.۶ درجه سانتی گراد دما و کاهش ۳۵ درصدی بارندگی مواجه خواهد شد که این امر پیامدهای فاجعه باری برای امنیت آبی و غذایی کشور به دنبال دارد (Mansouri Daneshvar et al., 2019: 5). پژوهش های میدانی نشان می دهند تحت سناریوی مشترک اجتماعی و اقتصادی (SSP2-4.5)، کاهش ۱۲ تا ۲۴ درصدی بارش سالانه و تغییر الگوی فصول بارشی (جابجایی بارش ها به فصل های بهار و پاییز) در ایران اجتناب ناپذیر است (Naderi, 2025). در پژوهشی با محور پایش روند دمای ماهانه کشور در بازه ۱۹۷۹-۲۰۱۵، نتایج حاکی از آن بود که دمای ایران به طور عمده دارای روند افزایشی و از نظر آماری معنادار بوده است (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۷: ۶۵). همچنین در مطالعه ای با هدف پیش بینی مؤلفه های اقلیمی دما و بارش در دشت میناب، نشان داده شد که میانگین دما در دوره آینده تحت تمامی سناریوهای انتشار روند افزایشی خواهد داشت (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۱۵). این یافته ها در مجموع، تصویری همسو و نگران کننده از تشدید پدیده گرمایش در مقیاس ملی و منطقه ای ارائه می دهند.

شمال شرق ایران (شامل استان های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی) به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه خشک کشور، نمونه ای بارز از نواحی آسیب پذیر اقلیمی به شمار می رود. یافته های حاصل از مطالعات اقلیمی نیز این واقعیت را تأیید می کنند، به طوری که حدود ۹۰ درصد از ایستگاه های هواشناسی منطقه در دوره پایه، در طبقه بندی اقلیمی

نیمه خشک تا بسیار خشک قرار داشته‌اند (رمضانی اعتدالی، ۱۴۰۴: ۲۵). این منطقه با ویژگی‌هایی همچون تابستان‌های گرم و خشک، زمستان‌های سرد، بارش‌های ناچیز و نامنظم و وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی شناخته می‌شود (Heydarizad et al., 2018). منابع آب سطحی در این ناحیه محدود و متکی بر رواناب‌های دوره‌ای است و منابع آب زیرزمینی نیز به دلیل تبخیر بالا با افت مداوم مواجهند (کوزه‌گران و موسوی‌بایگی، ۱۳۹۴: ۵۰). چنین شرایطی موجب شده تا کوچک‌ترین نوسانات دمایی و بارشی، تأثیرات نامناسبی بر نظام‌های اکولوژیک و اقتصادی-اجتماعی منطقه بگذارد.

مبانی نظری

مطالعات ایستگاه‌های معتبری مانند مشهد حاکی از روند افزایشی معنادار دما و کاهش رطوبت نسبی در دهه‌های اخیر است، هرچند تغییرات بارش در این ایستگاه از نظر آماری معنادار نبوده است. (Banayan Aval et al., 2010: 130) یافته‌ها در استان خراسان رضوی نیز کاهش پایدار رطوبت نسبی را در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه تأیید می‌کنند که این موضوع نشانگر تشدید خشکی اقلیمی در منطقه است (شیرمحمدی و همکاران، ۱۴۰۲: ۴۰).

بررسی روند تغییرات اقلیمی در شمال شرق ایران طی سه دهه اخیر از جنبه‌های مختلفی اهمیت دارد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و سیاست‌گذاری زیست‌محیطی فراهم کند. یکی از مهم‌ترین آثار این تغییرات، پیامدهای هیدرواقلمی است؛ کاهش میزان بارش همراه با افزایش دمای هوا، موجب افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی شده است. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در این منطقه، تعداد روزهای آفتابی افزایش یافته (Sadeqi et al., 2024: 8) و طوفان‌های گردوغبار، به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی، با شدت بیشتری رخ داده‌اند (Hamzeh et al., 2021: 1355؛ اکبری و صیاد، ۱۴۰۰: ۵۵).

تغییرات اقلیمی همچنین چالش‌های بزرگی را برای بخش کشاورزی شمال شرق ایران به همراه داشته است. کاهش ۸۰ درصدی دبی رودخانه‌ها در ۸۰ درصد از ایستگاه‌های اندازه‌گیری و افت سطح آب‌های زیرزمینی، کشاورزی را که بخش مهمی از اقتصاد منطقه را تشکیل می‌دهد با خطر جدی مواجه کرده است. (Minaei & Irannezhad, 2018: 170) بر اساس پیش‌بینی‌ها، تولید محصولاتی مانند گندم و جو ممکن است تا ۲۰ درصد کاهش یابد که این کاهش می‌تواند امنیت غذایی منطقه را تهدید کند (شایان‌مهر و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۰۵). از سوی دیگر، مدل‌سازی‌های اقلیمی نشان می‌دهند که در بازه زمانی ۲۰۸۱-۲۱۰۰، میزان آسیب‌پذیری استان‌های شمال شرق کشور در برابر خشکسالی به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت؛ به‌گونه‌ای که این مناطق که در حال حاضر در رده، کم‌خطر، قرار دارند، ممکن است به سطح، بسیار پرخطر، برسند (باباییان و نجفی‌نیک، ۱۳۸۵: ۲۵). در همین راستا، بر اساس نتایج مطالعات مبتنی بر مدل‌های CMIP6، خراسان رضوی در دهه‌های آینده با افزایش دمای سالانه ۰٫۲۹ تا ۲٫۷۵ درجه سلسیوس و افزایش بارش ۰٫۴ تا ۶٫۸ درصد مواجه خواهد شد (زنوزی علمداری و همکاران، ۱۴۰۳: ۹۷۵۳)، یافته‌ای که ضرورت اقدامات پیشگیرانه و راهبردهای سازگاری را در این منطقه دوجندان می‌سازد. با وجود چنین هشدارهایی، هنوز در این حوزه خلأهای تحقیقاتی قابل‌توجهی وجود دارد. بیشتر مطالعات گذشته در مقیاس ملی انجام شده و به تحلیل دقیق شرایط اقلیمی در مقیاس‌های منطقه‌ای کمتر پرداخته‌اند. (Attarod et al., 2023: 55) همچنین دوره‌های زمانی کوتاه یا پراکنده در برخی پژوهش‌ها، مانع شناسایی روندهای بلندمدت و پایدار اقلیمی شده‌اند. (Motamedi et al., 2023: 2890) علاوه بر این، بررسی هم‌زمان شاخص‌های دما و بارش در ارتباط با تغییر اقلیم نیز کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Kazemzadeh et al., 2022: 465). خلأ مهم دیگر، عدم ارزیابی دقیق همگنی داده‌ها پیش از تحلیل روند و همچنین

محدود بودن متغیرهای ورودی در تحلیل‌های خوشه‌بندی اقلیمی گذشته است که در پژوهش حاضر مورد توجه ویژه قرار گرفته است.

شمال شرق ایران به دلیل موقعیت استراتژیک و وابستگی شدید به منابع آب و کشاورزی، منطقه‌ای آسیب‌پذیر در برابر تغییرات اقلیمی است. با توجه به روند گرمایش جهانی، درک دقیق تغییرات دما و بارش در این ناحیه طی سه دهه اخیر برای مدیریت پایدار منابع و امنیت غذایی امری حیاتی است. پژوهش حاضر با هدف اصلی تحلیل روند تغییرات دما و بارش در شمال شرق ایران طی دوره سی‌ساله (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴) و ارزیابی ارتباط آن با پدیده گرمایش جهانی، به دنبال پاسخگویی به این نیاز است. این مطالعه به‌طور مشخص وجود روندهای آماری معنی‌دار در داده‌های سالانه و فصلی، بازتاب شواهد تغییر اقلیم در داده‌های دمایی، میزان هماهنگی الگوهای بارش با روندهای جهانی، همگنی سری‌های زمانی و تفکیک ایستگاه‌ها به خوشه‌های اقلیمی همگن را بررسی می‌کند.

وجه تمایز این پژوهش، رویکرد تحلیلی جامع و چندمرحله‌ای آن است؛ برای نخستین بار در این منطقه، ترکیبی از پنج روش شامل: (۱) آزمون‌های همگنی سه‌گانه (SNHT، Pettitt و Buishand) پیش از تحلیل روند، (۲) آزمون‌های ناپارامتری من‌کندال و شیب سن، (۳) تحلیل تطبیقی دو دوره با آزمون T زوجی، (۴) درون‌یابی فضایی و (۵) خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با چهار متغیر ورودی (شیب روند دما، شیب روند بارش، میانگین دما و میانگین بارش سالانه) به کار گرفته شده است. این رویکرد جامع، علاوه بر ارائه تصویری دقیق از تغییرات اقلیمی، با شناسایی خوشه‌های اقلیمی آسیب‌پذیر به تدوین راهکارهای مدیریتی متناسب با هر ناحیه کمک می‌کند. نتایج این تحقیق، ابزاری علمی و کاربردی برای تصمیم‌گیران حوزه منابع آب، کشاورزی و محیط‌زیست خواهد بود تا با چالش‌های اقلیمی آینده به شکلی مؤثرتر مقابله نمایند.

روش تحقیق

در این پژوهش، از داده‌های ماهانه، فصلی و سالانه متوسط دما و مجموع بارش برای دوره آماری سی‌ساله ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. این داده‌ها از شانزده ایستگاه همدید مستقر در منطقه از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس معیارهایی چون توزیع جغرافیایی متوازن در پهنه شمال شرق ایران، طول دوره آماری مناسب (حداقل ۳۰ سال کامل)، کمترین مقدار داده‌های مفقوده و کیفیت پذیرفتنی داده‌ها صورت گرفت. اطلاعات مکانی و ارتفاعی ایستگاه‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های همدید مورد مطالعه

ایستگاه	عرض جغرافیایی (DD)	طول جغرافیایی (DD)	ارتفاع (متر)	ایستگاه	عرض جغرافیایی (DD)	طول جغرافیایی (DD)	ارتفاع (متر)
بجنورد	37/49	57/30	1065	قائن	33/74	59/18	1432
بیرجند	32/90	59/25	1491	قوچان	37/11	58/45	1287
تربت جام	35/30	60/57	950	کاشمر	35/27	58/47	1109
تربت حیدریه	35/33	59/20	1451	گلمکان	36/48	59/28	1176
سبزوار	36/21	57/65	962	گناباد	34/35	58/68	1056
سرخس	36/54	61/15	278	مشهد	36/24	59/63	999
طبرس	33/60	56/95	711	نهبندان	31/53	60/03	1188

ایستگاه	عرض جغرافیایی (DD)	طول جغرافیایی (DD)	ارتفاع (متر)	ایستگاه	عرض جغرافیایی (DD)	طول جغرافیایی (DD)	ارتفاع (متر)
فردوس	34/03	58/18	1293	نیشابور	36/27	58/80	1213

منبع: سازمان هواشناسی ایران، ۱۳۹۹

داده‌های جهانی CO₂

به‌منظور واکاوی اثرات تغییر اقلیم بر اقلیم منطقه، از داده‌های میانگین ماهانه غلظت جهانی دی‌اکسیدکربن (CO₂) وابسته به مرکز ملی مطالعات جو و اقیانوس‌شناسی ایالات متحده آمریکا (NOAA-GML) برای بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. (NOAA, 2024) این داده‌ها در سطح جهانی میانگین‌گیری شده‌اند و شاخصی مطمئن برای بررسی نقش پدیده‌های جهانی در نوسانات اقلیمی مناطق خشک ایران محسوب می‌شوند.

کنترل کیفیت و پیش‌پردازش داده‌ها

در مرحله نخست، داده‌های خام دما و بارش شانزده ایستگاه همدید از نظر کیفیت، انسجام زمانی و وجود مقادیر پرت مورد کنترل دقیق قرار گرفتند. با توجه به اینکه حجم داده‌های گمشده در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها از ۰.۵ درصد کل سری زمانی تجاوز نمی‌کرد، تکمیل داده‌های مفقود با استفاده از روش جایگذاری چندگانه^۱ در نرم‌افزار SPSS انجام شد. سپس داده‌ها در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه سازماندهی گردیدند.

ارزیابی همگنی سری‌های زمانی

به‌منظور اطمینان از قابلیت اتکای سری‌های زمانی پیش از هرگونه تحلیل روند، همگنی داده‌های سالانه دما و بارش هر ایستگاه با استفاده از سه آزمون متداول و مکمل ارزیابی شد:

آزمون Pettitt (Pettitt, 1979) یک آزمون ناپارامتریک قدرتمند برای شناسایی نقطه شکست (change Point) در میانه سری زمانی که بر اساس آماره U بیشینه محاسبه می‌شود و نسبت به توزیع داده‌ها حساسیت کمی دارد. فرضیه صفر این آزمون بیانگر همگنی سری زمانی است.

آزمون SNHT (Alexandersson, 1986) آزمون همگنی نرمال استاندارد^۲ که برای تشخیص تغییر ناگهانی در میانگین سری زمانی طراحی شده است. این آزمون به‌ویژه برای شناسایی شکست‌هایی که در ابتدا یا انتهای سری رخ می‌دهند، حساسیت بالایی دارد. مقدار بحرانی این آزمون برای n=30 و سطح معناداری ۰.۰۵ برابر با ۸.۴۵ است.

آزمون Buishand (Buishand, 1982) آزمون مجموع تجمعی انحرافات از میانگین که برای شناسایی تغییرات تدریجی یا ناگهانی در سری زمانی مناسب است. مقدار بحرانی این آزمون برای سطح معناداری ۰.۰۵ برابر با ۱.۵ است.

نتایج آزمون‌های همگنی در جدول ۲ ارائه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌ها، سری زمانی دمای سالانه غیرهمگن تشخیص داده شد که این نتیجه، بازتاب مستقیم روند گرمایشی قوی و پیوسته در سه دهه اخیر است. به عبارت دیگر، غیرهمگنی داده‌های دمایی نه به معنای خطای اندازه‌گیری یا ناپایداری ایستگاه، بلکه شواهدی است بر وقوع یک تغییر ساختاری واقعی در الگوی دمایی منطقه که ناشی از تغییرات اقلیمی جهانی است. این تفسیر مطابق با نتایج مشابه در مطالعات جهانی است که نشان داده‌اند در مناطق تحت تأثیر گرمایش شدید، آزمون‌های همگنی معمولاً

¹ MultiPle ImPutation

² Standard Normal Homogeneity Test

ناهمگنی را تشخیص می‌دهند. (Sadeqi et al., 2024) در مقابل، سری‌های زمانی بارش سالانه در تمامی ۱۶ ایستگاه همگن تشخیص داده شد که بیانگر پایداری ساختاری داده‌های بارش و مناسب بودن آن‌ها برای تحلیل روند است.

جدول ۲. نتایج آزمون‌های همگنی سری‌های زمانی سالانه دما و بارش (1995-2024)

ایستگاه	متغیر	Pettitt (P)	SNHT	Buishand	نتیجه کلی	ایستگاه	متغیر	Pettitt (P)	SNHT	Buishand	نتیجه کلی
بیرجند	دما	0/122	غیرهمگن	همگن	غیرهمگن	بیرجند	بارش	0/488	همگن	همگن	همگن
بجنورد	دما	0/014	غیرهمگن	غیرهمگن	غیرهمگن	بجنورد	بارش	0/337	همگن	همگن	همگن
فردوس	دما	0/007	غیرهمگن	غیرهمگن	غیرهمگن	فردوس	بارش	0/364	همگن	همگن	همگن
گلمکان	دما	0/016	غیرهمگن	غیرهمگن	غیرهمگن	گلمکان	بارش	0/922	همگن	همگن	همگن
گناباد	دما	0/009	غیرهمگن	غیرهمگن	غیرهمگن	گناباد	بارش	0/287	همگن	همگن	همگن
کاشمر	دما	0/037	غیرهمگن	همگن	غیرهمگن	کاشمر	بارش	0/597	همگن	همگن	همگن
مشهد	دما	0/008	غیرهمگن	غیرهمگن	غیرهمگن	مشهد	بارش	1/000	همگن	همگن	همگن
نهبندان	دما	0/073	غیرهمگن	همگن	غیرهمگن	نهبندان	بارش	0/213	همگن	همگن	همگن

تمامی آزمون‌ها در سطح معناداری 0/05 انجام شده‌اند. غیرهمگنی داده‌های دما با زتاب طبیعی روند گرمایشی گسترده منطقه است. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

روش‌شناسی تحلیل روند

آزمون من‌کندال: برای تحلیل روند تغییرات زمانی متغیرهای اقلیمی، از آزمون ناپارامتری من‌کندال استفاده شد (Mann, 1945: 250; Kendall, 1975: 12). این آزمون بدون فرض توزیع نرمال داده‌ها، روند افزایشی یا کاهشی را با استفاده از اختلاف علامت‌دار بین زوج‌های زمانی بررسی می‌کند و به دلیل مقاومت بالا در برابر داده‌های پرت و توزیع‌های غیرنرمال، به‌عنوان یکی از استانداردترین آزمون‌های تحلیل روند در مطالعات هیدرواقلیمی شناخته می‌شود. کاربرد آزمون من‌کندال در مطالعات اخیر ایران، از جمله در بررسی روند فراسنج‌های اقلیمی نیمه‌غرب کشور، بارش حوضه کرخه، و سناریوهای دما و بارش حوزه سد کارده، نشان‌دهنده رواج این روش ناپارامتری در تحلیل سری‌های زمانی اقلیمی است (اکبری و همکاران، ۱۴۰۳: ۹۸). آماره S در این آزمون به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، تابع علامت (sgn) برابر با ۱، ۰ یا -۱ است بسته به اینکه $x_j - x_k$ مثبت، صفر یا منفی باشد. سپس برای محاسبه معناداری، از آماره نرمال شده Z استفاده می‌شود.

برآوردگر شیب سن: برای تعیین نرخ کمی تغییرات زمانی، از برآوردگر ناپارامتری شیب سن (Sen, 1968: 1385) استفاده شد که یک روش مقاوم، دقیق و مناسب برای داده‌های اقلیمی محسوب می‌شود. این برآوردگر نسبت به رگرسیون خطی

معمولی، در برابر داده‌های پرت مقاومت بیشتری دارد و شیب واقعی روند را بهتر نمایش می‌دهد. فرمول محاسبه شیب سن به صورت رابطه (۲) است:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_k}{j - k} \right) \text{ for all } k < j \quad \text{رابطه (2)}$$

رگرسیون خطی

برای بررسی ارتباط میان غلظت جهانی CO₂ و میانگین سالانه دما و بارش ایستگاه‌ها، از رگرسیون خطی ساده و ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید. قدرت تبیین مدل با ضریب تعیین (R²) سنجیده شد که مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده وابستگی قوی‌تر متغیر وابسته به متغیر مستقل است. این تحلیل امکان ارزیابی نقش گرمایش جهانی در تغییرات اقلیمی منطقه‌ای شمال شرق ایران را فراهم می‌کند و به تفکیک اثرات جهانی از عوامل محلی کمک می‌نماید.

آزمون T زوجی

برای مقایسه میانگین دما و بارش بین دو دوره زمانی ۱۹۹۵-۲۰۰۹ و ۲۰۱۰-۲۰۲۴ در هر ایستگاه، از آزمون T زوجی^۱ استفاده شد. این آزمون برای ارزیابی معنادار بودن تفاوت میان دو مجموعه داده جفت‌شده متعلق به یک ایستگاه در دو بازه زمانی متفاوت به کار می‌رود و ابزاری قدرتمند برای شناسایی تغییرات ساختاری بلندمدت اقلیمی محسوب می‌شود. سطوح معناداری در این پژوهش با نمادهای استاندارد مشخص گردیده است: علامت * نشان‌دهنده $p < 0/05$ و علامت ** نشان‌دهنده $p < 0/01$ است. علاوه بر این، مقادیر p در بازه 0/05 تا 0/10 به عنوان روندهای مرزی یا نیمه‌معنادار^۲ گزارش شده‌اند تا از رد نادرست شواهد ضعیف تا متوسط روند جلوگیری شود. این رویکرد تفسیری محتاطانه، به‌ویژه در مطالعات اقلیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت راهبردی برخوردار است، زیرا در چنین بافت‌هایی حتی روندهای کاهشی ضعیف می‌توانند در بلندمدت پیامدهای هیدرولوژیکی جدی به همراه داشته باشند. (Wilks, 2006: 145)

تحلیل خوشه‌ای اقلیمی

به منظور طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه و شناسایی الگوهای مشابه تغییرات دما و بارش در پهنه شمال شرق ایران، از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی^۳ با روش وارد^۴ و فاصله اقلیدسی مجذور استفاده شد (Murtagh & Legendre, 2014: 280). این روش به دلیل توانایی بالا در کمینه‌سازی واریانس درون خوشه‌ای و ایجاد خوشه‌های همگن و متمایز، به عنوان یکی از قدرتمندترین و پرکاربردترین روش‌های خوشه‌بندی در مطالعات اقلیمی و منطقه‌بندی هیدرواقلیمی شناخته می‌شود. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌های خوشه‌بندی، ارائه ساختاری سلسله‌مراتبی و قابل تفسیر از روابط بین ایستگاه‌ها در قالب دارنمای خوشه‌بندی (Dendrogram) است که امکان انتخاب تعداد بهینه خوشه‌ها را با اتکا به معیارهای علمی فراهم می‌آورد. متغیرهای ورودی این تحلیل شامل چهار شاخص کلیدی برای هر ایستگاه بود که مشخصات کامل آن‌ها در جدول (3) ارائه شده است. این متغیرها با دقت و بر پایه مبانی نظری اقلیم‌شناسی انتخاب شدند تا هم‌زمان دو بُعد مکمل شامل «پویایی تغییرات اقلیمی» و «وضعیت پایه اقلیمی» را در تحلیل لحاظ نمایند. رویکرد چهارمتغیره اتخاذشده در پژوهش حاضر، از یک سو جهت و شدت تغییرات اقلیمی طی دوره مطالعه را از طریق شیب روند دما و بارش بازتاب می‌دهد و از سوی دیگر، شرایط اقلیمی بنیادین هر ایستگاه را از طریق میانگین‌های مطلق دما و بارش سالانه در تحلیل ادغام می‌کند. این ترکیب متغیری، امکان تفکیک اقلیمی معنادار میان ایستگاه‌های با اقلیم‌های

¹ Paired Samples T-Test

² marginally significant

³ Hierarchical Cluster Analysis

⁴ Ward Linkage

ذاتاً متفاوت، نظیر ایستگاه‌های گرم و خشک در برابر نیمه‌خشک را فراهم می‌آورد و از محدودیت‌های خوشه‌بندی صرفاً مبتنی بر شیب روند فراتر می‌رود.

جدول (۳): متغیرهای ورودی تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و نقش آن‌ها

شماره	متغیر ورودی	واحد	نقش در تحلیل
1	شیب روند سالانه دما (Sen)	°C/سال	جهت و شدت تغییرات دمایی
2	شیب روند سالانه بارش (Sen)	mm/سال	جهت و شدت تغییرات بارشی
3	میانگین دمای سالانه دوره ۳۰ ساله	°C	وضعیت پایه حرارتی
4	میانگین بارش سالانه دوره ۳۰ ساله	mm	وضعیت پایه رطوبتی

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

همان‌گونه که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود، انتخاب این ترکیب چهارگانه از متغیرها با هدف لحاظ کردن هم‌زمان دو بُعد مکمل صورت گرفته است: بُعد نخست شامل شیب روند دما و بارش است که جهت و شدت تغییرات اقلیمی در طول دوره مطالعه را نشان می‌دهد؛ و بُعد دوم شامل میانگین‌های مطلق دما و بارش است که شرایط اقلیمی بنیادین هر ایستگاه را مشخص می‌کند.

توجیه علمی این انتخاب از آن‌جاست که خوشه‌بندی صرفاً بر اساس شیب روند نمی‌تواند تفاوت‌های بنیادی میان اقلیم‌های مختلف را به‌درستی بازتاب دهد. به‌عنوان نمونه، ایستگاه گرم و خشک طبس با میانگین دمای 23/2 درجه سلسیوس و بارش 76/7 میلی‌متر، در مقایسه با ایستگاه نیمه‌خشک بجنورد با میانگین دمای 13/8 درجه سلسیوس و بارش ۲۴۱ میلی‌متر، ممکن است شیب‌های روند مشابهی داشته باشند، اما از نظر ساختار اقلیمی کاملاً متفاوت‌اند. ترکیب مقادیر مطلق با شیب روند، این محدودیت را برطرف می‌سازد و امکان تفکیک اقلیمی معنادار میان ایستگاه‌ها را فراهم می‌آورد. در خصوص عدم استفاده از شاخص‌های ترکیبی نظیر SPI^1 و $SPEI^2$ به‌عنوان متغیرهای ورودی در تحلیل خوشه‌بندی، لازم به توضیح است که این شاخص‌ها ماهیتاً مشتقاتی از همان داده‌های پایه بارش و دما هستند. هرچند شاخص $SPEI$ به‌عنوان یکی از حساس‌ترین شاخص‌ها به گرمایش جهانی معرفی شده است (Vicente-Serrano et al., 2023: 6800)، ماهیت مشتق‌شدنی آن از داده‌های دما و بارش می‌تواند در فرآیند خوشه‌بندی موجب بروز مشکل هم‌خطی چندگانه^۳ گردد. ورود هم‌زمان متغیرهای اصلی و مشتقات آن‌ها به ماتریس خوشه‌بندی، علاوه بر ایجاد افزونگی اطلاعات^۴، می‌تواند به وزن‌دهی نامتوازن ابعاد مختلف تحلیل منجر شده و تفسیرپذیری نتایج نهایی را تحت‌الشعاع قرار دهد. با این وجود، بررسی این شاخص‌های ترکیبی در قالب مطالعات تکمیلی و مستقل، برای پژوهش‌های آتی توصیه می‌شود تا ابعاد چندگانه خشکسالی هیدرواقلیمی در منطقه شمال شرق ایران به‌طور جامع‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد. پیش از انجام خوشه‌بندی، تمامی متغیرها با روش استانداردسازی z-score نرمال‌سازی شدند تا اثر تفاوت مقیاس و واحد اندازه‌گیری متغیرهای مختلف حذف گردیده و همه متغیرها با وزن یکسان در فرآیند تحلیل مشارکت داشته باشند. این مرحله برای اطمینان از عدم تسلط متغیرهای با مقیاس بزرگ‌تر (مانند بارش با واحد میلی‌متر) بر متغیرهای با مقیاس کوچک‌تر (مانند شیب روند دما) ضروری است. در نهایت، تعداد بهینه خوشه‌ها بر اساس دارنمای خوشه‌بندی^۵ و معیار

¹ Standardized Precipitation Index

² Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

³ Multicollinearity

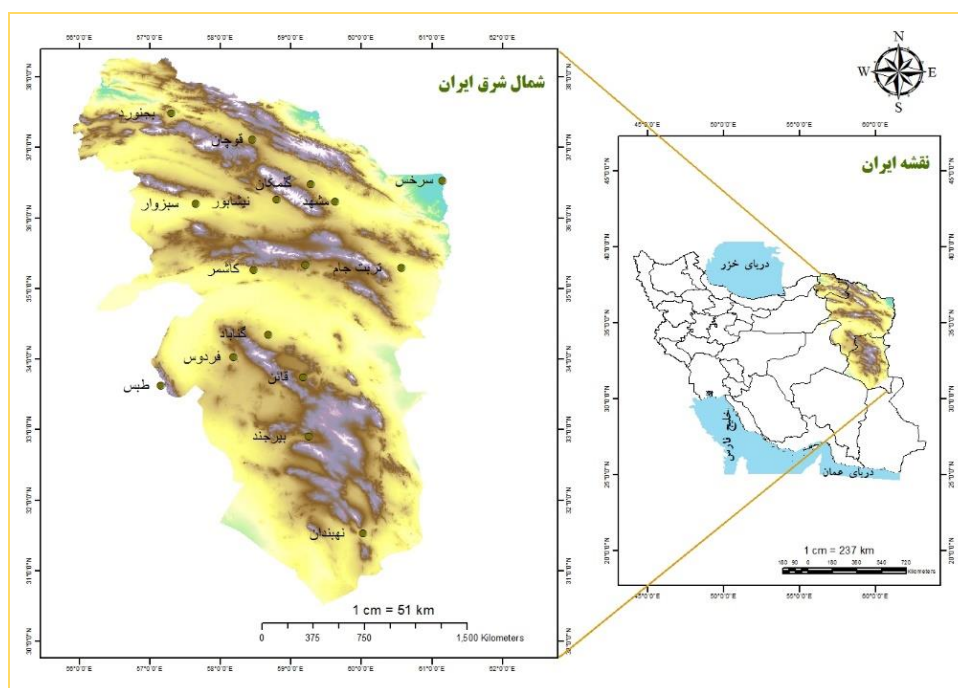
⁴ Redundancy

⁵ Dendrogram

فاصله ادغام بین خوشه‌ها تعیین شد. تحلیل نشان داد که سه خوشه متمایز، ساختار بهینه‌ای برای طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های شمال شرق ایران فراهم می‌آورد که نتایج تفصیلی آن در بخش یافته‌ها ارائه خواهد شد. برای تحلیل فضایی تغییرات اقلیمی، از روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله (IDW^1) در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. این روش با وزن‌دهی به مشاهدات نزدیک‌تر نسبت به نقاط دورتر، توزیع فضایی دقیق‌تری از متغیرهای اقلیمی فراهم می‌آورد و امکان شناسایی الگوهای مکانی روندهای دما و بارش را در پهنه مطالعه فراهم می‌سازد. در در مجموع، تحلیل‌های آماری در محیط نرم‌افزارهای Python (نسخه ۳.۱۱ با کتابخانه‌های SciPy، Scikit-learn و Minitab (نسخه ۲۱)، SPSS (نسخه ۲۶) و Excel انجام شد. ترسیم نقشه‌های فضایی نیز در نرم‌افزار ArcGIS Pro انجام گرفت. نتایج حاصل از این روش‌های مکمل، تصویری دقیق و چندبعدی از وضعیت اقلیمی شمال شرق ایران در مواجهه با تغییر اقلیم جهانی ترسیم می‌کنند.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل نواحی وسیعی از شمال شرق ایران است که سه استان خراسان رضوی، خراسان شمالی و خراسان جنوبی را دربر می‌گیرد (شکل ۱). این منطقه از نظر اقلیمی عمدتاً در محدوده اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار داشته و به دلیل تنوع توپوگرافی چشمگیر، از دشت‌های کم‌ارتفاع در سرخس با ارتفاع ۲۷۸ متر تا نواحی کوهستانی در بیرجند با ارتفاع ۱۴۹۱ متر، تنوع قابل‌توجهی در الگوهای دما و بارش فصلی و سالانه دارد (حیدری، ۱۳۹۶: ۵). موقعیت جغرافیایی منطقه بین عرض‌های ۳۱ تا ۳۸ درجه شمالی و طول‌های ۵۶ تا ۶۱ درجه شرقی قرار دارد (سازمان هواشناسی ایران، ۱۳۹۹). قرارگیری این منطقه در حاشیه شرقی فلات ایران و همجواری با کویرهای مرکزی از یک سو و ارتفاعات هزارمسجد و بینالود از سوی دیگر، شرایط اقلیمی متنوع و پیچیده‌ای را در آن ایجاد کرده که آن را به یکی از مناسب‌ترین مناطق برای مطالعات هیدرواقلیمی و بررسی الگوهای فضایی تغییر اقلیم در ایران تبدیل می‌نماید.



¹ Inverse Distance Weighting -

شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

بحث و یافته‌ها

تحلیل داده‌های اقلیمی شمال شرق ایران طی دوره آماری ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴، الگوهای آشکار و نگران‌کننده‌ای از گرمایش منطقه‌ای و تغییر در رژیم بارش را آشکار می‌سازد که به صورت فضایی و فصلی ناهمگون توزیع شده‌اند. یافته‌های این بخش در پنج محور اصلی ارائه می‌شود: (۱) واکاوی روند دمای سالانه، (۲) واکاوی روند دمای فصلی، (۳) واکاوی روند بارش سالانه، (۴) واکاوی روند بارش فصلی، (۵) نتایج آزمون T زوجی و تحلیل خوشه‌ای.

واکاوی روند دمای سالانه

نتایج حاصل از آزمون ناپارامتری من‌کندال و برآوردگر شیب سن برای تحلیل روند دمای سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه (جدول ۴) نشان می‌دهد که پانزده ایستگاه از شانزده ایستگاه (معادل 93/75 درصد) دارای روند افزایشی مثبت و از نظر آماری معنادار هستند. این یافته‌ها بیانگر وقوع یک گرمایش گسترده و پیوسته در سراسر منطقه طی دوره سی ساله مطالعه است. بر اساس تحلیل‌های آماری انجام‌شده بر روی ایستگاه‌های مورد بررسی، یک روند افزایشی و گرمایش سیستماتیک در کل منطقه مشهود است. در این میان، ایستگاه‌های قائن، طبس، فردوس، تربت‌جام، تربت‌حیدریه، سرخس، مشهد، گناباد و گل‌مکان با سطح اطمینان 99/9 درصد ($p < 0/001$) دارای روند افزایشی بسیار معناداری هستند که نشان از استحکام بالای پدیده گرمایش در این نواحی دارد؛ به‌طوری‌که ایستگاه طبس بالاترین میزان آماره ($Z = 4/603$) را در میان آن‌ها به خود اختصاص داده است. در مرتبه بعدی، ایستگاه‌های بجنورد، بیرجند، کاشمر، نهبندان و نیشابور قرار دارند که روند افزایشی آن‌ها نیز کاملاً معنادار بوده و در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($p < 0/01$) تایید شده است. در نهایت، ایستگاه سبزوار با ثبت روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0/05$)، تغییرات معنادار اما با شدت کمتری را نسبت به سایرین نشان می‌دهد. در مجموع، هم‌سویی تمامی این ایستگاه‌ها در نمایش آماره‌های مثبت و معنادار، حاکی از یک سیگنال قوی، غیرتصادفی و فراگیر از تغییر اقلیم در این گستره جغرافیایی است. بررسی نرخ تغییرات نشان می‌دهد که بیشترین میزان افزایش سالانه دما به ترتیب در ایستگاه‌های قائن (با شیب 0/069 درجه سلسیوس در سال)، طبس (0/068)، تربت‌جام (0/066)، سرخس (0/064)، فردوس (0/061)، گناباد (0/060) و تربت‌حیدریه (0/060) ثبت شده است. در نقطه مقابل این الگوی غالب گرمایش، تنها ایستگاه قوچان رفتاری متفاوت از خود نشان داد؛ به‌طوری‌که با شیب منفی و بسیار ملایم -0/015 درجه سلسیوس در سال، روندی کاهشی اما از نظر آماری غیرمعنادار ($Z = -0/999$) را تجربه کرده است. تحلیل تفصیلی و ریشه‌یابی دلایل این رفتار متمایز در ایستگاه قوچان، در بخش بحث ارائه شده است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر نقاط منطقه، روند گرمایش هوا از نظر آماری بسیار معنادار بوده و این امر می‌تواند بازتابی از تأثیرات گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی بلندمدت در پهنه شمال شرق ایران باشد.

جدول ۴. نتایج آزمون من‌کندال و شیب سن برای دمای سالانه ایستگاه‌های منتخب ۱۹۹۵-۲۰۲۴

ردیف	ایستگاه	Z	P-value	شیب سن (C°/سال)	سطح معناداری
1	بجنورد	2/962	0/0031	0/0388	**
2	بیرجند	2/819	0/0048	0/0392	**
3	تربت‌جام	4/103	0/0000	0/0656	***

***	0/0599	0/0001	3/854	تربت حیدریه	4
*	0/0373	0/0185	2/355	سبزوار	5
***	0/0644	0/0001	3/854	سرخس	6
***	0/0680	0/0000	4/603	طبس	7
***	0/0610	0/0000	4/210	فردوس	8
***	0/0690	0/0000	4/210	قائن	9
ns	-0/0150	0/3177	-0/999	قوچان	10
**	0/0453	0/0031	2/962	کاشمر	11
***	0/0440	0/0006	3/425	گلمکان	12
***	0/0602	0/0001	3/818	گناباد	13
***	0/0587	0/0002	3/675	مشهد	14
**	0/0432	0/0019	3/104	نهبندان	15
**	0/0357	0/0067	2/712	نیشابور	16

نمادهای *، ** و *** به ترتیب نشان دهنده سطوح معناداری ۰.۰۵، ۰.۰۱ و ۰.۰۰۱ هستند. ns: غیرمعنادار.

منبع: ن (گازندگان، ۱۴۰۴)

واکاوی روند دمای فصلی

بررسی روند تغییرات دمای فصلی در ایستگاه‌های منتخب (جدول ۵) الگویی پیچیده از گرمایش منطقه‌ای را آشکار می‌سازد که با تفاوت‌های مکانی و زمانی چشمگیری همراه است. برجسته‌ترین و فراگیرترین روند افزایشی دما در فصل بهار مشاهده می‌شود؛ تمامی ایستگاه‌ها بدون استثنا روندی مثبت و در اغلب موارد بسیار شدید را ثبت کرده‌اند. بالاترین نرخ گرمایش بهار در ایستگاه‌های تربت‌جام (0/109 C°/سال)، طبس (0/101) و تربت حیدریه (0/099) گزارش شد. فصل زمستان و تابستان نیز عموماً با روندهای افزایشی دما همراه بوده‌اند، با بیشینه گرمایش در زمستان در طبس (0/075) و در تابستان در سرخس (0/083) در مقابل، فصل پاییز متغیرترین و نامنظم‌ترین الگو را نشان می‌دهد؛ در حالی که برخی ایستگاه‌ها مانند قائن (۰.۰۵۳) روند افزایشی دارند، تعدادی از ایستگاه‌ها به‌ویژه در نواحی شمالی مانند قوچان (0/054-) و نیشابور (0/004-) روندی کاهشی یا خنثی را تجربه کرده‌اند. ایستگاه قوچان در سه فصل زمستان، تابستان و پاییز روند کاهشی معنادار و تنها در بهار روند افزایشی ضعیفی (0/027) را نشان می‌دهد که این وضعیت منحصر به فرد، احتمالاً ناشی از عوامل محلی نظیر توپوگرافی خاص و رطوبت منطقه است (این موضوع در بخش بحث به تفصیل تحلیل شده است). به‌طور کلی، این داده‌ها نشان می‌دهند که شتاب گرمایش اقلیمی در شمال شرق ایران به‌ویژه در دوره گرم سال چشمگیرتر است، در حالی که پاییز با الگویی ناپایدارتر مواجه است.

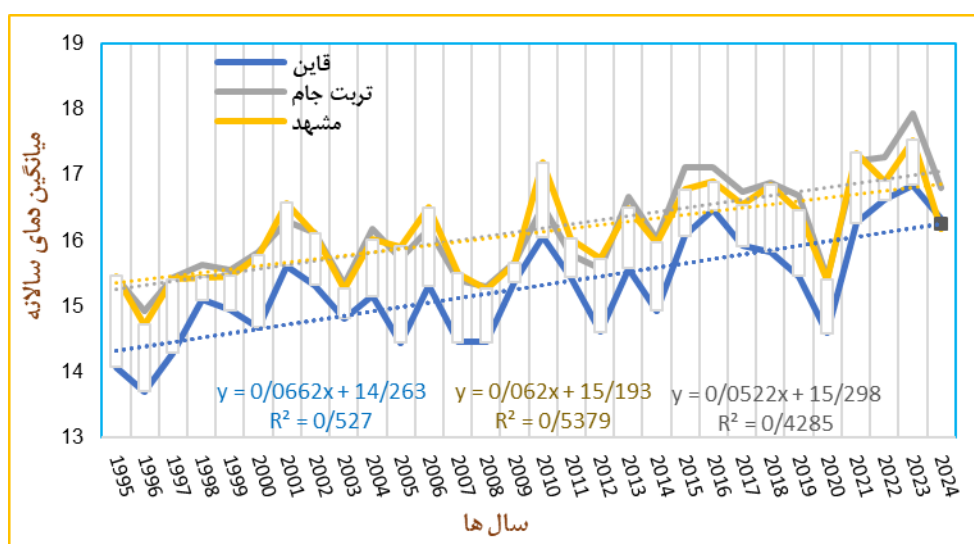
جدول ۵. شیب روند تغییرات دمای فصلی در ایستگاه‌های منتخب (C°/سال)

ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
بجنورد	0/031 *	0/086	0/043 *	0/002 **	قائن	0/047 *	0/098	0/071	0/053 *
بیرجند	0/034 *	0/045 *	0/029 *	0/025 *	قوچان	-0/011 **	0/027 *	-0/029 *	-0/054
تربت جام	0/046 *	0/109	0/075	0/025 *	کاشمر	0/032 *	0/091 *	0/047 *	0/009
تربت حیدریه	0/042 *	0/099	0/057	0/026 *	گلمکان	0/036 *	0/075	0/053	0/000 **
سبزوار	0/029 *	0/061	0/049 *	0/012 **	گناباد	0/044 *	0/099	0/056	0/023 *
سرخس	0/035 *	0/091	0/083	0/019 *	مشهد	0/053	0/085	0/052	0/015 *

ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
طبس	0/075 *	0/101	0/050 *	0/036 *	نهبندان	0/032 *	0/051	0/039 *	0/026 *
فردوس	0/056	0/083	0/060	0/030 *	نیشابور	0/011 **	0/077	0/042 *	-0/004 **

***: منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴. P<0.01، *: P<0.05

شکل (۲) روند تغییرات میانگین دمای سالانه را در سه ایستگاه همدید قائن، تربت جام و مشهد را به عنوان نمونه طی دوره آماری ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. بررسی خطوط روند برازش شده بر داده‌های سری زمانی بیانگر آن است که هر سه ایستگاه به‌طور معناداری روند افزایشی را در میانگین دمای سالانه خود تجربه کرده‌اند؛ روندی که تأییدی بر وقوع پدیده گرمایش جهانی در این مناطق طی بازه مورد مطالعه است. در میان این ایستگاه‌ها، قائن (خط آبی) بیشترین نرخ افزایش دما را داراست، به‌طوری که معادله خط روند آن به صورت $y = 0/0662x + 14.263$ با ضریب تبیین $R^2 = 0/527$ محاسبه شده است. بر اساس این معادله، میانگین دمای سالانه قائن حدود ۰۰۰۶۶ درجه سلسیوس افزایش یافته و بیش از ۵۲ درصد تغییرات دمایی این ایستگاه توسط مدل خطی مذکور تبیین می‌شود. پس از آن، ایستگاه تربت جام (خط خاکستری) با معادله $y = 0.0522x + 15.298$ و ضریب تبیین $R^2 = 0/428$ قرار دارد که نشان‌دهنده نرخ گرمایش سالانه‌ای معادل 0/052 درجه سلسیوس است. در رتبه سوم، ایستگاه مشهد (خط زرد) با معادله $y = 0/062x + 15.193$ و ضریب تبیین $R^2 = 0/5379$ قرار دارد که روند افزایشی ملایم‌تری معادل 0/062 درجه سلسیوس در سال را تجربه کرده است. به طور کلی، اگرچه قائن نسبت به دو ایستگاه دیگر میانگین دمای سالانه پایین‌تری دارد، اما سرعت گرمایش در آن بیشتر بوده و این موضوع اهمیت ویژه‌ای در تحلیل تغییرات اقلیمی منطقه دارد. علاوه بر این، نوسانات بین‌سالی در تمامی ایستگاه‌ها قابل مشاهده است، اما روند کلی صعودی دما در هر سه منطقه بیانگر وجود تغییرات اقلیمی محسوس و پایدار در گستره مورد مطالعه است.



شکل ۲. روند دمای سالانه در ایستگاه‌های منتخب

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

واکاوی روند بارش سالانه (شامل تفسیر روندهای مرزی)

واکاوی روند بارش سالانه، شامل تفسیر روندهای مرزی: نتایج آزمون من کندال برای بارش سالانه (جدول 6) نشان می‌دهد که شیب روند تغییرات بارش در بیشتر ایستگاه‌های شمال شرق ایران منفی است و الگوی غالب منطقه به سمت کاهش بارش متمایل می‌باشد. با این حال، این کاهش‌ها از نظر آماری در سطوح متفاوتی معنادار هستند و تفسیر دقیق آن‌ها نیازمند توجه ویژه به P-value های مرزی است. الف) روندهای معنادار: ($p \leq 0/05$) از میان شانزده ایستگاه بررسی شده، ایستگاه طبس با $p=0/0246$ و شیب $-1/353$ میلی‌متر در سال، کاهش معنادار بارش را در سطح اطمینان ۹۵ درصد تجربه کرده است. ایستگاه تربت حیدریه با $p=0/0497$ و شیب $-2/913$ میلی‌متر در سال، در آستانه معناداری قرار دارد و شواهد قوی از روند کاهشی واقعی در این ناحیه ارائه می‌کند. ب) روندهای مرزی یا نیمه معنادار ($0/05 < p \leq 0/10$): نکته مهم آماری: دو ایستگاه دارای مقادیر P-value در مجاورت آستانه معناداری هستند که در ادبیات آماری به عنوان روندهای مرزی یا نیمه معنادار^۱ شناخته می‌شوند: (Wilks, 2011) ایستگاه تربت جام با $p=0/0586$ و شیب $-2/402$ میلی‌متر در سال و ایستگاه بیرجند با $p=0/0868$ و شیب $-2/05$ میلی‌متر در سال. بر اساس رویکرد تفسیری محتاطانه‌تر که در ادبیات نوین آماری اقلیم‌شناسی توصیه می‌شود، این ایستگاه‌ها دارای شواهد ضعیف تا متوسطی از کاهش بارش هستند و نمی‌توان آن‌ها را به طور قطعی نادیده گرفت. در شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک شمال شرق ایران، حتی روندهای کاهشی غیرمعنادار در سطح $0/05$ نیز می‌توانند در بلندمدت پیامدهای جدی برای منابع آب و فعالیت‌های کشاورزی به همراه داشته باشند. ج) روندهای غیرمعنادار: در مقابل، ایستگاه‌هایی نظیر قوچان ($p=0/9148$)، سرخس ($p=0/9431$)، مشهد ($p=0/9715$)، گل‌مکان ($p=0/5925$) و نیشابور ($p=0/6685$) دارای شیب مثبت بارش هستند که نشان‌دهنده عدم کاهش بارش در نواحی شمالی استان خراسان رضوی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش بارش در شمال شرق ایران از نظر مکانی ناهمگون بوده و مناطق مرکزی و جنوبی (به ویژه طبس، تربت حیدریه، تربت جام، بیرجند و نهبندان) از این نظر آسیب پذیرتر هستند.

جدول ۶. روند بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه ۱۹۹۵-۲۰۲۴

ایستگاه	Z	P-value	شیب سن (سال/mm)	معناداری	ایستگاه	Z	P-value	شیب سن (سال/mm)	معناداری
بجنورد	-1/178	0/2390	-1/873	ns	قائن	-0/856	0/3918	-0/926	ns
بیرجند	-1/713	0/0868	-2/053	mrg	قوچان	0/107	0/9148	0/325	ns
تربت جام	-1/891	0/0586	-2/402	mrg	کاشمر	-1/427	0/1535	-2/051	ns
تربت حیدریه	-1/963	0/0497	-2/913	*	گل‌مکان	0/535	0/5925	0/467	ns
سبزوار	-0/928	0/3535	-1/097	ns	گناباد	-0/963	0/3353	-0/996	ns
سرخس	0/071	0/9431	0/123	ns	مشهد	0/036	0/9715	0/262	ns
طبس	-2/248	0/0246	-1/353	*	نهبندان	-1/499	0/1340	-1/990	ns
فردوس	-1/285	0/1989	-1/465	ns	نیشابور	0/428	0/6685	0/820	ns

*: $P < 0/05$ (معنادار)، mrg: مرزی/نیمه معنادار ($0/05 < P \leq 0/10$)، ns: غیر معنادار

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

¹ marginally significant

واکاوی روند بارش فصلی

(جدول ۷) شیب روند تغییرات بارش فصلی در ایستگاه‌های منتخب شمال شرق ایران را نشان می‌دهد. این جدول بیانگر آن است که فصل زمستان با روند غالب کاهش بارش در تقریباً تمامی ایستگاه‌ها مواجه است، که بیشترین افت در قوچان با شیب $-3/005$ میلی‌متر در سال و تربت‌حیدریه با $-2/920$ مشاهده می‌شود. در فصل بهار نیز، کاهش بارش در ایستگاه‌هایی نظیر قوچان ($-2/987$) و بجنورد ($-1/977$) بارز است، هرچند برخی ایستگاه‌ها مانند طبس ($+0/906$)، فردوس ($+0/817$) و گناباد ($+0/788$) روند افزایشی اندکی را نشان می‌دهند. تابستان عموماً فصل ثبات بارش است، به‌طوری‌که بسیاری از ایستگاه‌ها شیب صفر یا نزدیک به صفر دارند. در فصل پاییز نیز روند کاهشی در ایستگاه‌هایی مانند بجنورد ($-1/900$) و قوچان ($-1/583$) دیده می‌شود، اما برخی ایستگاه‌ها مانند طبس ($+0/400$) و نهبندان ($+0/302$) روند افزایشی اندکی را تجربه کرده‌اند. به‌طور کلی، داده‌ها حاکی از روند غالب کاهش بارش در فصول حیاتی زمستان و بهار در بیشتر ایستگاه‌های شمال شرق ایران هستند که نگرانی‌های جدی‌ای را برای منابع آب و کشاورزی منطقه ایجاد می‌کند.

جدول ۷. شیب روند تغییرات بارش فصلی در ایستگاه‌های منتخب (mm/سال)

ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
بجنورد	-0/556	-1/997	-0/680	-1/900	قائن	-1/737	-0/082	** 0/000	0/200
بیرجند	-1/316	0/072	** 0/000	0/149	قوچان	-3/005	-2/987	-0/368	-1/583
تربت‌جام	-0/850	-1/256	** 0/000	* 0/031	کاشمر	-1/926	-0/802	** 0/000	* 0/017
تربت‌حیدریه	-2/920	-1/782	* -0/033	-0/235	گلمکان	-0/850	-1/074	-0/174	-0/602
سبزوار	-1/118	0/155	** -0/005	-0/276	گناباد	-0/612	0/788	** 0/000	0/120
سرخس	-1/322	-0/564	** 0/000	-0/248	مشهد	-1/570	-1/495	-0/235	-0/545
طبس	* -0/039	0/906	** 0/000	0/400	نهبندان	-0/858	0/766	** 0/000	0/302
فردوس	-1/466	0/817	** 0/000	0/223	نیشابور	-1/665	-0/953	-0/087	-0/321

P<0/01، *: P<0/05، **: منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

آزمون T زوجی: مقایسه دو دوره زمانی

بر اساس نتایج آزمون T زوجی جدول (8) که به مقایسه میانگین سالانه بارش و دما بین دو دوره زمانی ۱۹۹۵-۲۰۰۹ و ۲۰۱۰-۲۰۲۴ می‌پردازد، دو الگوی متمایز و قابل توجه مشاهده می‌شود. الف) الگوی دما: تحلیل تغییرات دمای میانگین، تصویری کاملاً هشداردهنده را به نمایش می‌گذارد. به‌جز ایستگاه قوچان ($p=0/1076$ ، تغییر: $-0/42$ °C)، تمامی ایستگاه‌ها روند گرمایشی معنادار را تجربه کرده‌اند. این افزایش دما در ۱۲ ایستگاه در سطح اطمینان بالای ۹۹ درصد ($p<0/01$) به ثبت رسیده که نشان‌دهنده مدرک آماری بسیار قوی مبنی بر وقوع یک تغییر اقلیمی واقعی و گسترده است. بیشترین افزایش‌های دمایی در قائن ($+1/02$ °C)، تربت‌جام ($+0/98$)، طبس ($+0/99$)، سرخس ($+0/93$) و مشهد ($+0/88$) ثبت شده که همگی در سطح $p<0/001$ معنادار هستند. ایستگاه نیشابور با تغییر $+0/38$ درجه و $p=0/0787$ در محدوده مرزی قرار دارد. ب) الگوی بارش: در خصوص متغیر بارش، تغییرات مشاهده‌شده در اکثر ایستگاه‌ها فاقد معناداری آماری در سطح ۰.۰۵ هستند. با این حال، شایان توجه است که: ایستگاه‌های دارای کاهش معنادار بارش: طبس با $p=0/0156$ (تغییر: $-21/23$ میلی‌متر)، ایستگاه‌های دارای کاهش مرزی (روندهای نیمه‌معنادار): بیرجند با $p=0/0792$ (تغییر: $-27/43$

میلی متر، بجنورد با ($p=0/0639$ تغییر: $-45/20$ میلی متر) و نهبندان با ($p=0/0719$ تغییر: $-25/77$ میلی متر). این چهار ایستگاه در مجاورت آستانه معناداری قرار دارند و نمی توان آن ها را به سادگی رد کرد. تفسیر این موارد به عنوان روندهای مرزی، تصویر دقیق تری از واقعیت تغییرات بارش در منطقه ارائه می دهد.

جدول ۸. نتایج آزمون T زوجی برای مقایسه میانگین دما و بارش سالانه در دو دوره (۱۹۹۵-۲۰۰۹ و ۲۰۲۴-۲۰۱۰)

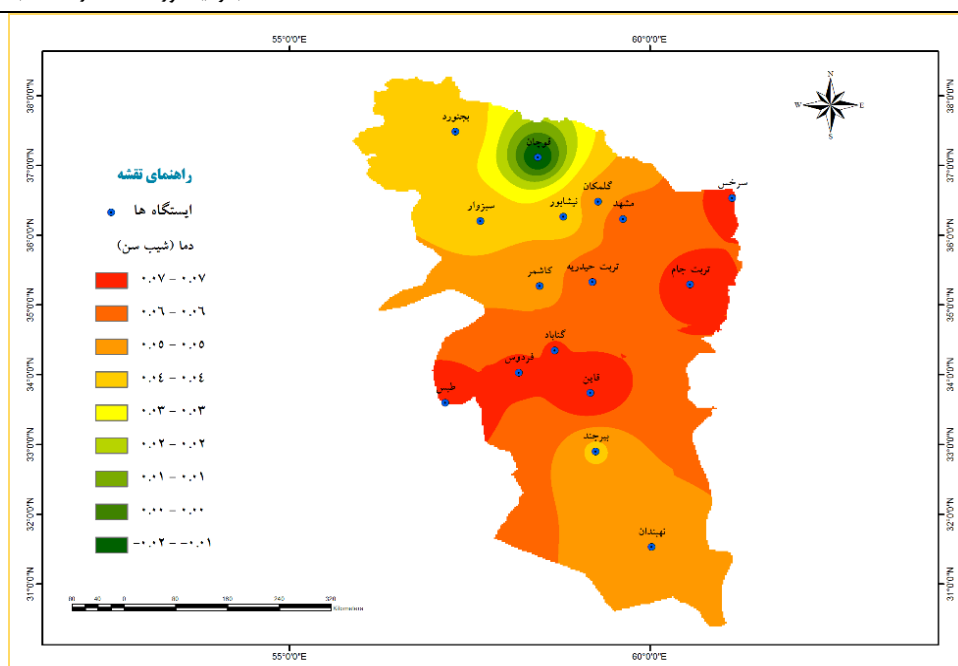
ایستگاه	متغیر	م.دوره ۱	م.دوره ۲	تغییر	P-value	معناداری	ایستگاه	متغیر	م.دوره ۱	م.دوره ۲	تغییر	P-value	معناداری
بجنورد	دما	13/45	14/11	+0/66	0/0026	**	قائن	دما	14/78	15/80	+1/02	0/0001	**
بجنورد	بارش	263/86	218/65	-45/20	0/0639	mrg	قائن	بارش	155/69	151/41	-4/28	0/8104	ns
بیرجند	دما	16/78	17/17	+0/39	0/0473	*	قوچان	دما	13/06	12/64	-0/42	0/1076	ns
بیرجند	بارش	153/73	126/31	-27/43	0/0792	mrg	قوچان	بارش	312/74	314/84	+2/11	0/9356	ns
تربت جام	دما	15/66	16/65	+0/98	0/0001	**	کاشمر	دما	18/08	18/65	+0/58	0/0056	**
تربت جام	بارش	171/45	145/78	-25/66	0/2151	ns	کاشمر	بارش	187/19	170/14	-17/05	0/4288	ns
تربت حیدریه	دما	14/35	15/19	+0/84	0/0001	**	گلمکان	دما	13/71	14/42	+0/71	0/0012	**
تربت حیدریه	بارش	244/01	211/84	-32/17	0/2247	ns	گلمکان	بارش	203/12	209/49	+6/37	0/7019	ns
سبزوار	دما	18/38	19/12	+0/74	0/0107	*	گناباد	دما	17/66	18/44	+0/78	0/0007	**
سبزوار	بارش	173/37	166/00	-7/38	0/7045	ns	گناباد	بارش	123/29	112/56	-10/73	0/5756	ns
سرخس	دما	18/32	19/25	+0/93	0/0003	**	مشهد	دما	15/67	16/54	+0/88	0/0003	**
سرخس	بارش	184/46	196/76	+12/30	0/6390	ns	مشهد	بارش	229/18	219/59	-9/59	0/5986	ns
طیس	دما	22/74	23/73	+0/99	0/0001	**	نهبندان	دما	20/21	20/72	+0/51	0/0131	*
طیس	بارش	87/36	66/13	-21/23	0/0156	*	نهبندان	بارش	119/42	93/65	-25/77	0/0719	mrg
فردوس	دما	17/69	18/49	+0/80	0/0002	**	نیشابور	دما	14/61	14/99	+0/38	0/0787	mrg
فردوس	بارش	135/56	120/99	-14/57	0/4776	ns	نیشابور	بارش	223/34	225/23	+1/88	0/9145	ns

ns: تغییر معنادار، mrg: مرزی، **: $P < 0/01$ ، *: $P < 0/05$

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

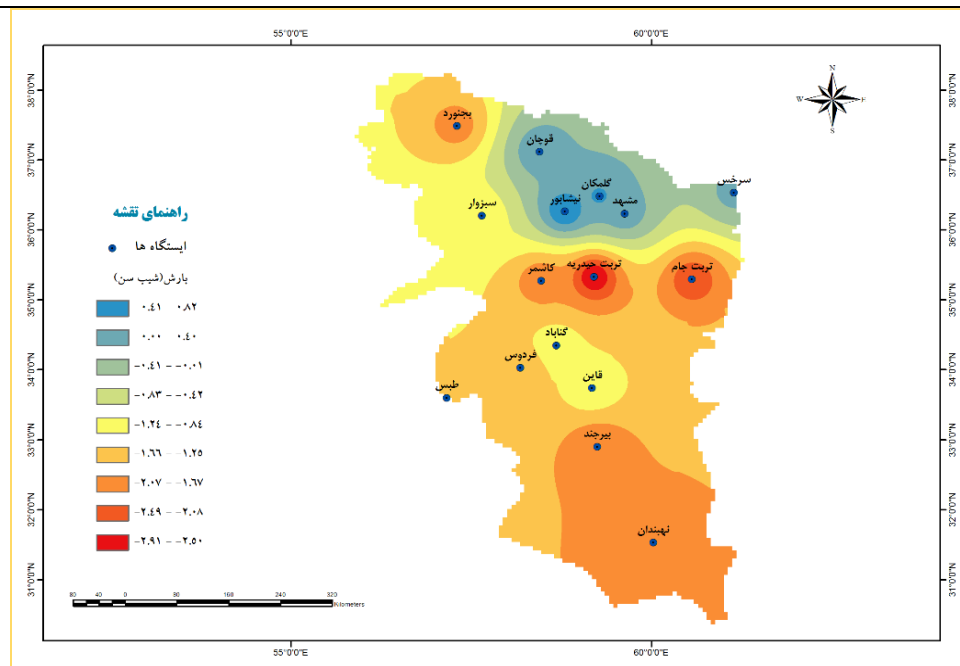
تحلیل فضایی تغییرات دما و بارش

شکل (۳)، تصویری جامع از پراکنش دمای سالانه در شمال شرق ایران طی سه دهه اخیر را ارائه می دهد. این نقشه، که با استفاده از تکنیک وزندهی بر اساس معکوس فاصله (IDW) تهیه شده، نشان می دهد که بیشترین افزایش دما (با شیبی بیش از 0/07 درجه سلسیوس در سال) در مناطق جنوبی و جنوب غربی استان خراسان رضوی، به ویژه در نواحی اطراف فردوس، طیس، قائن و تربت جام، متمرکز شده است. این مناطق با ترکیب رنگهای نارنجی تا قرمز نمایش داده شده اند که بیانگر گرمایش شدید و قابل توجه است. در مقابل، ناحیه اطراف شهرستان قوچان در شمال خراسان رضوی، تنها منطقه ای است که شیب منفی دما را نشان می دهد و با رنگ سبز تیره تا روشن مشخص شده است، که حاکی از کاهش نسبی دما در این بخش است. به طور کلی، اکثر نواحی منطقه مورد مطالعه روند افزایشی در دمای سالانه را تجربه کرده اند، که این امر به وضوح تأثیرات گرمایش جهانی را در این بخش از ایران تأیید می کند و نشان می دهد که تغییرات دمایی به صورت یکنواخت در کل منطقه توزیع نشده اند.



شکل ۳. توزیع فضایی شیب روند دمای سالانه
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

شکل (۴)، تغییرات فضایی بارش سالانه در شمال شرق ایران طی یک دوره ۳۰ ساله را نشان می‌دهد. این نقشه، با استفاده از طیف رنگی از آبی (افزایش بارش) تا قرمز (کاهش شدید بارش)، الگوی ناهمگون بارش را آشکار می‌کند. بر اساس نقشه، نواحی شمالی استان خراسان رضوی، از جمله اطراف مشهد، گلستان و قوچان، روند افزایشی یا نسبتاً ثابت در بارش سالانه دارند، که با رنگ‌های آبی تا سبز مشخص شده‌اند. در مقابل، بخش‌های مرکزی و جنوبی استان، به ویژه نواحی اطراف تربت حیدریه، قاین، طبس و نهبندان، کاهش قابل توجهی در بارش سالانه را تجربه کرده‌اند. این کاهش، با رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز نشان داده شده و شیب منفی تا حدود ۲/۵- میلی‌متر در سال را ثبت کرده است. بیشترین کاهش در مرکز استان خراسان رضوی و بخش‌های شرقی و جنوبی خراسان جنوبی مشاهده می‌شود. این روند منفی در بارش، حاکی از افزایش احتمالی خطر خشکسالی در آینده بوده و بر ضرورت توجه به مدیریت منابع آبی در این مناطق تأکید می‌کند.



شکل ۴. توزیع فضایی شیب روند بارش سالانه

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

ارتباط غلظت جهانی CO₂ با دما و بارش منطقه‌ای

جدول (9) نتایج تحلیل رگرسیون خطی ساده بین میانگین سالانه دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه و غلظت جهانی دی‌اکسیدکربن (CO₂) نشان داد که در اغلب ایستگاه‌ها، رابطه‌ای مثبت و معنادار وجود دارد. ضرایب به‌دست‌آمده (B) برای اکثر ایستگاه‌ها در محدوده 0/014 تا 0/031 قرار گرفت و ضریب تعیین (R²) نیز در برخی نقاط مانند طبس (0/602) و تربت جام (0/543) بیانگر سهم بالای CO₂ جهانی در تبیین تغییرات دمای منطقه‌ای است. با این حال، ایستگاه قوچان رفتاری متفاوت از خود نشان داد؛ در این ایستگاه، ضریب B منفی (-0/008) و سطح معناداری بالا (p=0/212) بیانگر نبود ارتباط معنادار بین غلظت جهانی CO₂ و دمای ثبت‌شده است. این ناهنجاری می‌تواند ناشی از شرایط محلی ویژه از جمله موقعیت توپوگرافی کوهستانی، اثرات بادهای محلی (کوه - دشت)، وارونگی دمایی و تغییرات رطوبتی باشد که می‌تواند پدیده جهانی تغییر اقلیم را در مقیاس خرد اقلیم تعدیل کند. در خصوص بارش، نتایج تحلیل همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی ساده در تمام ایستگاه‌ها نشان داد که هیچ رابطه آماری معناداری میان تغییرات بارش سالانه و غلظت جهانی CO₂ وجود ندارد. به عنوان نمونه، در ایستگاه بجنورد مقدار P-value برابر با 0/190 به دست آمد که فاقد معنی‌داری آماری است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط اقلیمی شمال شرق ایران، بارش بیش از آنکه تحت تأثیر مستقیم افزایش غلظت CO₂ جهانی باشد، تحت تأثیر عوامل منطقه‌ای و درون اقلیمی نظیر جابه‌جایی الگوهای گردش جو، منابع رطوبتی و پویایی‌های محلی قرار دارد. به طور کلی، یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که افزایش جهانی CO₂ همبستگی مستقیمی با روند افزایشی دما در بیشتر ایستگاه‌های شمال شرق ایران دارد، در حالی که تأثیر آن بر تغییرات بارش منطقه‌ای چندان مشهود و معنادار نیست.

جدول ۹. رابطه دی اکسیدکربن جهانی با میانگین دما در ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	B (ضریب CO ₂)	R ² (ضریب تعیین)	P-value	ایستگاه	B (ضریب CO ₂)	R ² (ضریب تعیین)	P-value
بجنورد	0/017	0/314	**0/001	قاین	0/030	0/527	**0/001
بیرجند	0/017	0/251	**0/005	قوچان	-0/008	0/055	0/212
تربت جام	0/029	0/543	**0/001	کاشمر	0/019	0/309	**0/001
تربت حیدریه	0/025	0/484	**0/001	گلمکان	0/020	0/381	**0/001
سبزوار	0/017	0/188	*0/017	گناباد	0/025	0/463	**0/001
سرخس	0/028	0/521	**0/001	مشهد	0/024	0/419	**0/001
طیس	0/031	0/602	**0/001	نهبندان	0/018	0/285	**0/002
فردوس	0/025	0/504	**0/001	نیشابور	0/014	0/202	*0/013

منبع: نگارندگان، (۱۴۰۴)

تحلیل خوشه‌ای اقلیمی

خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با روش وارد و بر اساس چهار متغیر (شیب روند دما، شیب روند بارش، میانگین دمای سالانه و میانگین بارش سالانه)، ایستگاه‌های مورد مطالعه را به سه خوشه اقلیمی متمایز تفکیک نمود (جدول ۱۰؛ شکل ۵):

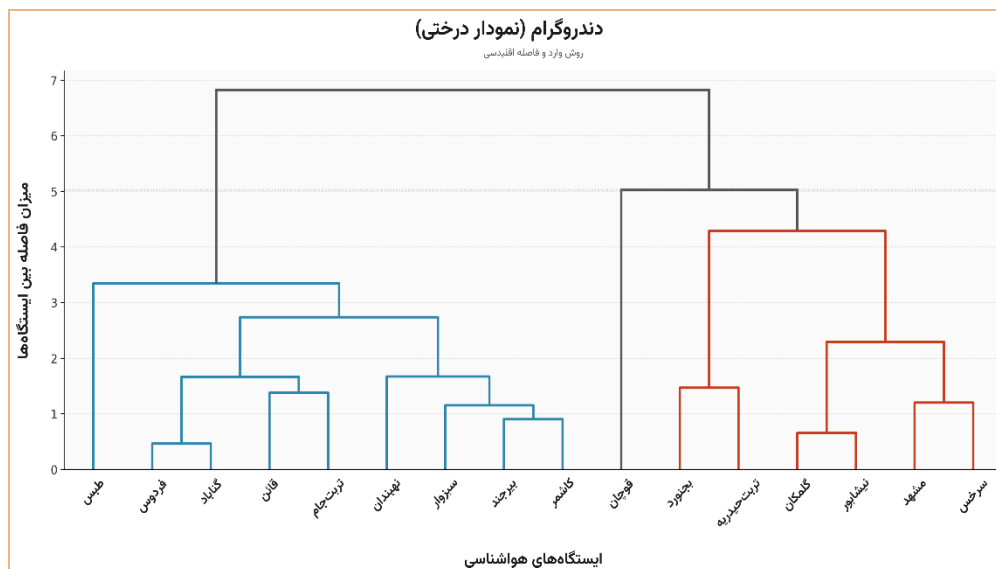
خوشه اول که در دندروگرام با رنگ آبی نمایش داده شده، اقلیم گرم و خشک با گرمایش شدید را نمایندگی می‌کند و شامل نه ایستگاه طیس، نهبندان، سبزوار، کاشمر، فردوس، گناباد، بیرجند، تربت جام و قائن است. این ایستگاه‌ها با میانگین دمای بالا (15/29 تا 23/23 درجه سلسیوس)، میانگین بارش سالانه پایین (76/7 تا 178/7 میلی‌متر) و شیب گرمایش قوی (0/037 تا 0/069 درجه سلسیوس در سال) مشخص می‌شوند و بیشتر در بخش‌های جنوبی و مرکزی منطقه پراکنده‌اند. در این میان، ایستگاه طیس با میانگین دمای 23/23 درجه سلسیوس و بارش 76/74 میلی‌متر، گرم‌ترین و خشک‌ترین ایستگاه این خوشه محسوب می‌شود و شدیدترین فشار اقلیمی ناشی از گرمایش و کاهش بارش را تجربه می‌کند. خوشه دوم که در دندروگرام با رنگ قرمز نمایش داده شده، اقلیم گذار و معتدل با گرمایش متوسط تا زیاد را در بر می‌گیرد و شامل شش ایستگاه سرخس، مشهد، نیشابور، تربت حیدریه، گلمکان و بجنورد است. ایستگاه‌های این گروه دارای شرایط میانه از نظر دما (13/78 تا 18/78 درجه سلسیوس) و بارش (190/6 تا 241/3 میلی‌متر) هستند و شیب گرمایش آن‌ها متوسط تا زیاد (0/036 تا 0/064 درجه سلسیوس در سال) برآورد شده است. این خوشه عمدتاً ایستگاه‌های نیمه شمالی و شمال شرقی منطقه را در بر می‌گیرد که اقلیمی نسبتاً معتدل تر و مرطوب تر از خوشه اول دارند. خوشه سوم تنها شامل ایستگاه قوچان است که با پایین‌ترین میانگین دمای منطقه (۱۲.۸۵ درجه سلسیوس)، بالاترین میانگین بارش سالانه (313/79 میلی‌متر) و شیب دمایی منفی (0/015- درجه سلسیوس در سال) از سایر ایستگاه‌ها متمایز می‌شود. همان‌گونه که در دندروگرام (شکل ۵) نیز مشاهده می‌شود، ایستگاه قوچان در بالاترین سطح فاصله اقلیدی از دیگر ایستگاه‌ها جدا می‌شود که این امر بیانگر رفتار اقلیمی کاملاً متمایز این ایستگاه است؛ سردی، پُربارش بودن و روند اندکی کاهشی دما، آن را به یک نمونه اقلیمی منحصربه‌فرد و پایدار در شمال شرق ایران تبدیل کرده است. بررسی ساختار دندروگرام نشان می‌دهد که در بالاترین سطح ناهمگنی (فاصله اقلیدی حدود 6/8)، ایستگاه‌ها به دو گروه اصلی گرم و خشک و معتدل و مرطوب تقسیم می‌شوند و با کاهش سطح ناهمگنی، ایستگاه قوچان به عنوان یک زیرخوشه مستقل ظاهر می‌گردد. این نتایج تأیید می‌کند که شمال شرق ایران از نظر رفتار اقلیمی همگن نیست و تفاوت‌های معناداری میان بخش‌های جنوبی (گرم و خشک)، شمالی (معتدل) و ارتفاعات شمالی (سرد و مرطوب) وجود

دارد. این تفاوت‌ها، ضرورت مدیریت منطقه‌ای متفاوت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگاری با تغییر اقلیم را در هر خوشه دوچندان می‌سازد.

جدول 10. نتایج خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی ایستگاه‌های شمال شرق ایران

ایستگاه	شیب دما	شیب بارش	میانگین دما	میانگین بارش	خوشه	ایستگاه	شیب دما	شیب بارش	میانگین دما	میانگین بارش	خوشه
طیس	0/068	-1/353	23/23	76/74	1	قائن	0/069	-0/926	15/29	153/55	1
نهبندان	0/043	-1/990	20/47	106/54	1	سرخس	0/064	0/123	18/78	190/61	2
سبزوار	0/037	-1/097	18/75	169/69	1	مشهد	0/059	0/262	16/11	224/39	2
کاشمر	0/045	-2/051	18/37	178/67	1	نیشابور	0/036	0/820	14/80	224/29	2
فردوس	0/061	-1/465	18/09	128/28	1	تربت حیدریه	0/060	-2/913	14/77	227/93	2
گناباد	0/060	-0/996	18/05	117/93	1	گلمکان	0/044	0/467	14/07	206/31	2
بیرجند	0/039	-2/053	16/97	140/02	1	بجنورد	0/039	-1/873	13/78	241/26	2
تربت جام	0/066	-2/402	16/15	158/61	1	قوچان	-0/015	0/325	12/85	313/79	3

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)



شکل ۵. دارنمای خوشه‌بندی ایستگاه‌های اقلیمی شمال شرق ایران

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که شمال شرق ایران طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ تحت تأثیر یک روند گرمایشی آشکار و در برخی نواحی تحت تأثیر کاهش بارش قرار داشته است. روند افزایشی دما در ۹۳.۷۵ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه معنادار بود و این نتیجه با گزارش‌های جهانی درباره تشدید گرمایش در دهه‌های اخیر هم‌راستا است (IPCC, 2023: 12). میانگین نرخ گرمایش در ایستگاه‌های بررسی شده، حدود 0/05 درجه سلسیوس در سال، از میانگین جهانی بالاتر بوده و این موضوع بیانگر حساسیت بیشتر نواحی خشک و نیمه‌خشک به تغییر اقلیم است. در همین راستا، پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که گرمایش ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، از رهگذر تغییر در پویایی‌های جوی، به تضعیف معنادار گردش جنب‌حاره‌ای در مناطق کم‌عرض جغرافیایی می‌انجامد و می‌تواند الگوهای بارش موسمی و خشکی نواحی حاشیه‌ای را دگرگون کند (Zhou et al., 2024: 5). یافته‌ای که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد و تأکید می‌کند که شمال شرق ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی خاص خود، در معرض شدت بیشتری از تغییرات دمایی قرار دارد. از نظر مکانی نیز، بیشترین شدت گرمایش در ایستگاه‌های جنوبی و مرکزی مانند قائن،

طیس، تربت جام، فردوس و گناباد ثبت شد که با نتایج مطالعات انجام شده درباره گرم شدن سریع تر نواحی خشک ایران انطباق دارد. (Attarod et al., 2023: 55) افزون بر این، نتایج آزمون T زوجی نشان داد که در دوره ۲۰۲۴-۲۰۱۰ نسبت به ۱۹۹۵-۲۰۰۹، در برخی ایستگاه‌ها افزایش دما به حدود یک درجه سلسیوس رسیده است؛ بنابراین، تغییرات دمایی منطقه را نمی‌توان صرفاً به نوسانات طبیعی نسبت داد، بلکه باید آن را نشانه‌ای از یک تغییر ساختاری در رژیم حرارتی منطقه دانست.

در مقابل، الگوی بارش نسبت به دما ناهمگون تر و پیچیده‌تر بود. هرچند شیب روند بارش در بسیاری از ایستگاه‌ها منفی بود، اما کاهش معنادار بارش تنها در ایستگاه‌های طیس و تربت حیدریه مشاهده شد و ایستگاه‌های تربت جام و بیرجند در محدوده روندهای مرزی (marginally significant) قرار گرفتند. این امر نشان می‌دهد که کاهش بارش در منطقه اگرچه به اندازه دما یکنواخت نیست، اما در بخش‌های مرکزی و جنوبی نشانه‌های قابل توجهی دارد. از نظر فصلی نیز، کاهش بارش بیشتر در زمستان و بهار رخ داده است؛ موضوعی که از منظر منابع آب و کشاورزی اهمیت زیادی دارد، زیرا بارش زمستانه در تغذیه آبخوان‌ها و بارش بهاره در پایداری کشاورزی دیم نقش اساسی ایفا می‌کند. از این رو، هم‌زمانی افزایش دما با کاهش یا بی‌ثباتی بارش می‌تواند به تشدید خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی در منطقه منجر شود. این الگو با دیدگاه‌های کلان مطرح شده درباره افزایش آسیب‌پذیری نواحی خشک در برابر تغییر اقلیم نیز سازگار است، IPCC, (Attarod et al., 2023: 58; 2023: 15).

یکی از یافته‌های برجسته پژوهش، رفتار متمایز ایستگاه قوچان است که برخلاف پانزده ایستگاه دیگر با شیب -0.015 درجه سلسیوس در سال ($p=0/318$) روند کاهشی غیرمعناداری نشان داد. این ایستگاه در تحلیل خوشه‌بندی چهار متغیره نیز به صورت مستقل در خوشه سوم قرار گرفت که همگرایی نتایج چهار روش تحلیلی مستقل (من‌کندال سالانه و فصلی، آزمون T زوجی و خوشه‌بندی چندمتغیره) اعتبار درونی این یافته را تقویت می‌کند. برای تبیین علمی این الگوی منحصر به فرد، شش عامل محلی و منطقه‌ای قابل بررسی است.

نخست، موقعیت توپوگرافی قوچان با ارتفاع ۱۲۸۷ متر و قرارگیری در دامنه‌های شمالی هزارمسجد، آن را در معرض جریان‌های هوای مرطوب دریای خزر قرار می‌دهد (Heydarizad et al., 2018: 1555)؛ شاهد آن میانگین بارش سالانه 313/79 میلی‌متر است که بیش از دو برابر ایستگاه‌های جنوبی مانند طیس (76/74) و نهبندان (106/54) است. دوم، الگوی بادهای محلی کوه-دشت (Whiteman, 2000: 145) موجب کاهش دمای تابستانی قوچان (شیب $-0/029$) شده، در حالی که ایستگاه‌های سرخس ($+0/083$) و طیس ($+0/050$) گرمایش تابستانی معنادار دارند. سوم، پدیده وارونگی دمایی در موقعیت دره‌ای این ایستگاه، منجر به کاهش معنادار دمای زمستانی (شیب $-0/011$ ، $p<0/01$) و پایین‌ترین میانگین دمای ژانویه (0/65 درجه سلسیوس) در میان همه ایستگاه‌ها شده است. چهارم، پوشش گیاهی غنی‌تر حوضه اترک و اثر واحه از طریق تبخیر-تعرق، دمای محلی را کاهش می‌دهد. پنجم، پنجم، مقیاس شهرنشینی قوچان نسبت به کلان‌شهر مشهد بسیار کوچک‌تر است. بر پایه سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، جمعیت قوچان ۱۰۱۶۰۴ نفر و جمعیت شهر مشهد بیش از ۳ میلیون نفر بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). پژوهش‌های انجام شده در مشهد نشان داده‌اند که توسعه اراضی ساخته شده و تغییر کاربری زمین با افزایش دمای سطح زمین و گسترش جزایر حرارتی شهری مرتبط است (عرب و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۹۷). بنابراین، شدت کمتر ساخت‌وساز و شهرنشینی در قوچان می‌تواند به عنوان فرضیه‌ای برای اثر کمتر جزیره حرارتی شهری مطرح شود؛ اما اثبات این ادعا نیازمند مقایسه مستقیم دمای سطح زمین، الگوی کاربری اراضی و اختلاف دمای شهر و پیرامون در قوچان و مشهد است. ششم و از منظر روش‌شناختی مهم‌ترین عامل، اعتبارسنجی متقابل رفتار متمایز قوچان از طریق چهار روش مستقل تحلیلی، نشان می‌دهد

این الگو صرفاً ناهنجاری تصادفی نیست، بلکه واقعیتی اقلیمی مستند و ریشه‌دار در عوامل محلی است. تأیید قطعی این فرضیه‌ها نیازمند مطالعات تکمیلی نظیر بررسی داده‌های رادیوسوند برای تأیید وارونگی دما، تحلیل NDVI برای پوشش گیاهی و داده‌های ری‌آنالیز جوی است. از منظر کاربردی، ایستگاه قوچان می‌تواند به‌عنوان یک «ذخیره‌گاه اقلیمی» با ظرفیت تاب‌آوری بالاتر مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گیرد و مطالعه سازوکارهای طبیعی مقاوم‌سازی اقلیمی در آن، الگویی مفید برای سایر مناطق فراهم آورد. در همین راستا، تحلیل رگرسیونی نیز نشان داد که دما در بیشتر ایستگاه‌ها با غلظت جهانی CO₂ رابطه مثبت و معنادار دارد، در حالی که برای بارش چنین رابطه‌ای مشاهده نشد؛ موضوعی که بیانگر پاسخ نسبتاً مستقیم‌تر دما به روندهای اقلیمی جهانی و وابستگی بیشتر بارش به شرایط منطقه‌ای و محلی است. در مجموع، نتایج این پژوهش با شواهد جهانی و ملی درباره گرمایش سریع‌تر نواحی خشک و نیمه‌خشک هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که شمال‌شرق ایران با ترکیبی از افزایش دما، کاهش موضعی بارش و ناهمگونی فضایی اقلیم روبه‌رو است (IPCC, 2023: 18). (Attarod et al., 2023: 60). این وضعیت لزوم بازنگری در مدیریت منابع آب، تقویت سامانه‌های پایش خشکسالی، سازگار کردن الگوهای کشت با شرایط جدید اقلیمی و تدوین راهبردهای منطقه‌ای متناسب با تفاوت‌های فضایی را برجسته می‌سازد. همچنین، وضعیت متمایز قوچان نشان می‌دهد که برخی نواحی می‌توانند به‌عنوان پهنه‌های نسبتاً پایدارتر اقلیمی مورد توجه قرار گیرند و مطالعه دقیق‌تر آن‌ها می‌تواند به شناخت سازوکارهای تاب‌آوری اقلیمی در شمال‌شرق ایران کمک کند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع روند تغییرات دما و بارش در شمال‌شرق ایران طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ و بررسی ارتباط آن با غلظت جهانی دی‌اکسیدکربن (CO₂) انجام شد و با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از روش‌های مکمل، شامل آزمون‌های همگنی، من‌کنرال، شیب سن، آزمون T زوجی، رگرسیون خطی، درون‌یابی فضایی و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، تصویری چندبعدی از وضعیت اقلیمی منطقه ارائه داد. نتایج نشان داد که در پانزده ایستگاه از شانزده ایستگاه، یعنی ۹۳.۷۵ درصد ایستگاه‌های مورد بررسی، روند افزایشی دما معنادار بوده است و این امر از غلبه یک الگوی گرمایشی گسترده در منطقه حکایت دارد. این افزایش دما به‌ویژه در فصل‌های بهار و تابستان آشکارتر بود و بیشترین شدت آن در ایستگاه‌های قائن، طبس، تربت‌جام، سرخس، فردوس و گناباد مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که قائن، طبس و تربت‌جام در زمره کانون‌های اصلی گرمایش منطقه قرار گرفتند. مقایسه دو دوره ۱۹۹۵-۲۰۰۹ و ۲۰۱۰-۲۰۲۴ نیز نشان داد که در بسیاری از ایستگاه‌ها، به‌ویژه در قائن، طبس و تربت‌جام، افزایش دما به حدود یک درجه سلسیوس رسیده است؛ بنابراین، تغییرات دمایی مشاهده‌شده را نمی‌توان صرفاً به نوسانات طبیعی نسبت داد، بلکه باید آن را نشانه‌ای از یک تغییر ساختاری در الگوی حرارتی شمال‌شرق ایران دانست. در مقابل، الگوی بارش نسبت به دما ناهمگون‌تر و پیچیده‌تر بود. اگرچه بارش سالانه در اکثر ایستگاه‌ها روندی کاهشی نشان داد، اما کاهش معنادار تنها در ایستگاه‌های طبس و تربت‌حیدریه مشاهده شد و ایستگاه‌های تربت‌جام و بیرجند نیز در محدوده روندهای مرزی قرار گرفتند. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش بارش در منطقه، هرچند به اندازه دما یکنواخت نیست، اما در بخش‌های مرکزی و جنوبی شمال‌شرق ایران از اهمیت اقلیمی و مدیریتی بالایی برخوردار است. همچنین، الگوی فصلی نشان داد که کاهش بارش عمده‌تاً در زمستان و بهار رخ داده است؛ دو فصلی که به‌ترتیب در تغذیه منابع آب زیرزمینی و پایداری کشاورزی دیم نقش اساسی دارند. از این‌رو، ترکیب افزایش دما با کاهش یا ناپایداری بارش می‌تواند زمینه تشدید خشکسالی‌های

هیدرولوژیکی و کشاورزی را فراهم سازد. در همین چارچوب، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات بارش در منطقه بیش از آنکه مستقیماً از افزایش CO_2 جهانی اثر بپذیرد، تابع شرایط منطقه‌ای و محلی، از جمله الگوهای گردش جو، منابع رطوبتی و ویژگی‌های توپوگرافی است. یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، رفتار متمایز ایستگاه قوچان بود. این ایستگاه تنها موردی بود که روند افزایشی معنادار دما را نشان نداد و حتی در برخی تحلیل‌ها دارای تغییرات دمایی منفی یا خنثی بود. افزون بر این، قوچان با کمترین میانگین دمای سالانه و بیشترین میانگین بارش سالانه، در تحلیل خوشه‌ای نیز به صورت یک خوشه مستقل ظاهر شد. این الگوی منحصربه‌فرد را می‌توان حاصل اثر هم‌زمان عوامل محلی و منطقه‌ای، از جمله موقعیت توپوگرافی، ارتفاع، تأثیرپذیری از رطوبت شمالی، پوشش گیاهی مناسب‌تر، پویایی‌های محلی دما و ضعف اثر جزیره حرارتی شهری دانست. در همین حال، نتایج همبستگی و رگرسیون نشان داد که افزایش غلظت جهانی CO_2 با افزایش دما در بیشتر ایستگاه‌ها رابطه مثبت و معناداری دارد و این یافته با گزارش‌های اخیر تغییر اقلیم جهانی هم‌سو است (IPCC, 2023)؛ در حالی که برای بارش چنین رابطه‌ای مشاهده نشد. این نتیجه نشان می‌دهد که دما، در مقایسه با بارش، پاسخ مستقیم‌تر و یکنواخت‌تری به روندهای اقلیمی جهانی دارد، در حالی که تغییرات بارش بیشتر تحت تأثیر شرایط منطقه‌ای و محلی قرار می‌گیرد. تحلیل خوشه‌ای نیز سه گروه اقلیمی متمایز را در شمال شرق ایران آشکار ساخت: خوشه نخست شامل نواحی گرم و خشک با گرمایش شدید، خوشه دوم شامل نواحی گذار یا با شرایط میانه، و خوشه سوم شامل ایستگاه منحصربه‌فرد قوچان به عنوان ناحیه‌ای نسبتاً پایدارتر. این تفکیک نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری اقلیمی در سطح منطقه یکسان نیست و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی باید متناسب با ویژگی‌های هر خوشه انجام گیرد. در مجموع، نتایج این پژوهش با یافته‌های پیشین درباره افزایش دما و نوسان‌پذیری یا کاهش بارش در شمال شرق ایران هم‌خوانی دارد (بنایان اول و همکاران، ۲۰۱۰؛ باباییان و همکاران، ۲۰۱۰) و در عین حال، هم‌راستایی آن با گزارش‌های جهانی نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده‌شده در شمال شرق ایران بخشی از روند گسترده‌تر تغییر اقلیم جهانی است (IPCC, 2023). بر این اساس، بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آب، توسعه الگوهای کشت مقاوم به خشکی، گسترش فناوری‌های نوین سازگاری، تقویت سامانه‌های پایش و هشدار زودهنگام خشکسالی، و حفاظت راهبردی از نواحی نسبتاً پایدارتر مانند قوچان، از مهم‌ترین الزامات برنامه‌ریزی اقلیمی در این منطقه به شمار می‌آید. در نهایت، چارچوب تحلیلی به کاررفته در این پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای مدل‌سازی‌های آینده‌نگر تحت سناریوهای اقلیمی و نیز برای مطالعات تکمیلی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های عددی جوی و شاخص‌های ترکیبی خشکسالی مانند SPI و SPEI باشد.

حامی مالی

بنابر اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی ندارد.

سهم نویسندگان

نویسندگان در انجام این پژوهش سهم برابر دارند.

تضاد منافع

نویسندگان بدین وسیله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافع در این مقاله وجود ندارد.

تقدیر و تشکر

بنابر اظهار نویسنده مسئول، این مقاله مستخرج از رساله دکتری است و از مسئولین انتشار تشکر می‌کنند.

منابع

- (۱) احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۷). پایش روند دمای ماهیانه ایران مبتنی بر برونداد پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخه ERA Interim. جغرافیا (انجمن جغرافیایی ایران)، ۱۷(۶۰)، ۵۸-۷۴. <http://www.magiran.com/P2005627>
- (۲) اسکندری دامنه، حامد؛ زهتابیان، غلامرضا؛ خسروی، حسن؛ آذرینوند، حسین؛ براتی، علی‌اکبر. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی و پیش‌بینی مؤلفه‌های اقلیمی دما و بارش در مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت میناب). فصلنامه علمی-پژوهشی انجمن جغرافیایی ایران، ۱۸(۶۶)، ۱۱۰-۱۲۸. <http://sid.ir/PaPer/962335/fa>
- (۳) اکبری، مریم؛ ملکی نژاد، حسن؛ حاجی بیگلر، محبوبه. (۱۴۰۳). بررسی تغییر اقلیم و روند بارش و دمای آینده در حوزه آبخیز سد کارده. مدیریت بیابان، ۱۲(۴)، ۸۷-۱۰۶. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2045459.1490>
- (۴) اکبری، مهری؛ صیاد، وحیده. (۱۴۰۰). تحلیل مطالعات تغییر اقلیم در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۳۷-۷۴. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528>
- (۵) باباییان، ایمان؛ نجفی‌نیک، زهرا. (۱۳۸۵). پیش‌بینی تغییر اقلیم شمال شرق ایران. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۲(۸۴)، ۱۵-۳۰. <http://civilica.com/doc/10416>
- (۶) بنایان‌اول، محمد؛ محمدیان، آزاده؛ علی‌زاده، امین. (۱۳۸۹). بررسی نوسان‌پذیری اقلیمی در شمال شرق ایران. مجله علوم آب و خاک، ۱۵(۵۷)، ۱۲۳-۱۳۵. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.2927>
- (۷) حیدری، سوسن. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی اقلیمی خطه خراسان (خراسان شمالی، خراسان رضوی و خراسان جنوبی). چهارمین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، تهران. <https://civilica.com/doc/589407>
- (۸) رضوانی‌اعتدالی، هادی؛ کوهی، سکینه. (۱۴۰۴). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان خشکی در ایران با رویکرد مواجهه جمعیتی. مجله مخاطرات و بحران‌های محیطی، ۱۳(۱)، ۱۷-۳۸. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>
- (۹) زنوزی علمداری، نازلی؛ سبحانی، بهروز؛ اصلاحی، مهدی؛ محمدی، مسیح‌اله. (۱۴۰۳). پهنه بندی بارش و دمای استان خراسان رضوی با استفاده از داده های گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6). مطالعات علوم محیط زیست، ۹(۴)، ۹۷۶۱-۹۷۵۳. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.424861.2169>
- (۱۰) شایان‌مهر، سمیرا؛ شاهنوشی، ناصر؛ صبوچی، محمود؛ رستگاری، شیدا. (۱۴۰۰). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر امنیت غذایی خراسان. نشریه اقتصاد کشاورزی، ۱۵(۴)، ۹۵-۱۲۸. <https://doi.org/10.22034/IAES.2021.534502.1852>
- (۱۱) شیرمحمدی علی اکبرخانی؛ زهرا، صابرعلی؛ سیدفرهاد، میرزایی؛ سیدمحمدجواد، مودودی؛ محمدناصر. (۲۰۲۳). روند تغییرات رطوبت نسبی در استان خراسان رضوی، شمال شرق ایران. ۳۵-۴۴. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i2.2302-1220>
- (۱۲) عرب، نرگس؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ میکاییلی تبریزی، علیرضا؛ ویت، توما. (۱۴۰۱). بررسی و تحلیل پویایی کاربری اراضی و تأثیر آن بر جزایر حرارتی شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد). نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۵(۳)، ۳۸۴-۳۹۸. <https://doi.org/10.22059/jne.2022.336599.2365>
- (۱۳) کوزه‌گران، سعید؛ موسوی‌بایگی، محمد. (۱۳۹۴). بررسی روند رویدادهای حدی اقلیمی در شمال شرق ایران. مجله پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۲(۶)، ۴۵-۴۶. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.408456>
- (۱۴) منصوری‌دانشوار، محمدرضا؛ ابراهیمی، مجید؛ نجات‌سلیمانی، حمید. (۱۳۹۸). مروری بر تغییر اقلیم در ایران. Environmental Systems Research، ۸(۱)، ۱-۱۰. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3>
- 15) Adeyeri, O. E., Zhou, W., & Laux, P. (2025). Global heatwaves dynamics under climate change. Earth's Future, 13(6), e2025EF006486. <https://doi.org/10.1029/2025EF006486>
- 16) Ahmadi, M., & Dadashi Roudbari, A. (2019). Monitoring of monthly temperature trend of Iran based on the output of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA Interim database. Geography (Iranian Geographical Society), 17(60), 58-74. [Persian] https://mag.iga.ir/article_247710_en.html
- 17) Akbari, M., Maleki-Nejad, H., & Hajibiglou, M. (2024). Investigation of climate change and future precipitation and temperature trends in the Kardeh Dam watershed. Desert Management, 12(4), 87-106. [Persian]. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2045459.1490>
- 18) Akbari, M., & Sayyad, V. (2021). Analysis of climate change studies in Iran. Physical Geography Research Quarterly, 53(1), 37-74. [Persian], <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528>

- 19) Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- 20) Alizadeh, A., Kamali, G. A., & Mousavi, F. (2022). Investigation of climate change in Khorasan Razavi under CMIP6 scenarios. *Journal of Water and Soil*, 36(3), 515–535. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v36i3.98754>
- 21) Arab, N., Salman-Mahiny, A., Mikaeili-Tabrizi, A., & Witte, T. (2022). Investigation and analysis of land-use dynamics and its impact on urban heat islands (Case study: Mashhad City). *Journal of Natural Environment*, 75(3), 384–398. [Persian]. <https://doi.org/10.22059/jne.2022.336599.2365>
- 22) Attarod, P., Dezhban, A., Pypker, T. G., Sigaroodi, S. K., Bayramzadeh, V., Tang, Q., & Mariv, H. S. (2023). Iran's changing climate over the past 30 years. *Russian Meteorology and Hydrology*, 48(1), 53–https://doi.org/10.3103/S1068373923010077
- 23) Babaeiyan, I., & Najafi Nik, Z. (2007). Prediction of climate change in Northeast Iran. *Geographical Research Quarterly*, 22(84), 15–30. [Persian], <https://doi.org/10.22059/geores.2007.10416>
- 24) Banayan Aval, M., Mohammadian, A., & Alizadeh, A. (2010). Investigation of climatic variability in Northeast Iran. *Journal of Water and Soil Sciences*, 15(57), 123–135. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.2927>
- 25) Batibeniz, F., Hauser, M., Diffenbaugh, N. S., & Seneviratne, S. I. (2023). Risks of simultaneous climate extremes in Europe under different warming levels. *Earth System Dynamics*, 14(2), 485–505. <https://doi.org/10.5194/esd-14-485-2023>
- 26) Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58(1–2), 11–27. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90066-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90066-X)
- 27) Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 12(2), e2023EF003849. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- 28) Donat, M. G., Angélil, O., & Ukkola, A. M. (2019). Intensification of precipitation extremes in the world's humid and water-limited regions. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1c8e>
- 29) Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarniuan, H., & Barati, A. A. (2020). Simulation and prediction of climatic components of temperature and precipitation in arid regions: Case study of Minab Plain. *International Quarterly Journal of Iranian Geographical Society*, 18(66), 110–128. [Persian] 20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6
- 30) Graus, S., Friesinger, S., & Schindelegger, M. (2024). Climate hazards in Mediterranean Europe: A review of compound events. *Urban Science*, 8(2), 42. <https://doi.org/10.3390/urbansci8020042>
- 31) Hamzeh, N. H., Naderikia, M., Malakooti, H., Dehghan, A., Kaskaoutis, D. G., & Alam, K. (2021). The relationship between dust storms and drought in the Sistan region during 2000–2019. *Atmosphere*, 12(10), 1350. <https://doi.org/10.3390/atmos12101350>
- 32) Heydari, S. (2017). Climatic zoning of Khorasan region (North, Razavi, and South Khorasan). 4th International Conference on Environmental Planning and Management, Tehran. [Persian] <https://civilica.com/doc/589407>
- 33) Heydarizad, M., Raeisi, E., Sori, R., Gimeno, L., & Nieto, R. (2018). The role of moisture sources and climatic teleconnections in Northeastern and South-Central Iran's hydro-climatology. *Water*, 10(11), 1550. <https://doi.org/10.3390/w10111550>
- 34) IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- 35) Kazemzadeh, M., Nouri, Z., Jamali, S., & Mohammadabadi, A. (2022). Air temperature change trend in Iran. *Journal of Meteorological Research*, 36(3), 462–477. <https://doi.org/10.1007/s13351-022-1184-5>
- 36) Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). London: Charles Griffin.
- 37) Kouzegaran, S., & Mousavi Baygi, M. (2015). Investigating the trend of extreme climatic events in Northeast Iran. *Journal of Climate Change Research*, 2(6), 45–60. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.40845>
- 38) Lange, S., Volkholz, J., Geiger, T., Zhao, F., Vega, I., Veldkamp, T., & Frieler, K. (2020). Projecting exposure to extreme climate impact events across six event categories and three spatial scales. *Earth's Future*, 8(12), e2020EF001616. <https://doi.org/10.1029/2020EF001616>
- 39) Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- 40) Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleimani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: Facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3>

- 41) Minaei, M., & Irannezhad, M. (2018). Spatio-temporal trend analysis of precipitation, temperature, and related agroclimatic variables in Northeast Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1–2), 167–179. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1963-y>
- 42) Motamedi, A., Gohari, A., & Haghighi, A. T. (2023). Three-decade assessment of dry and wet spells change across Iran, a fingerprint of climate change. *Scientific Reports*, 13(1), 2888. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30040-0>
- 43) Murtagh, F., & Legendre, P. (2014). Ward's hierarchical agglomerative clustering method: Which algorithms implement Ward's criterion? *Journal of Classification*, 31(3), 274–295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
- 44) Naderi, M. (2025). Projections of major climate change indicators over Iran from 2021 to 2080. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(5), 7002–7024. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36186-w>
- 45) Nazari, M., Dehghani Sanij, H., & Ebrahimian, H. (2021). Climate change impact on rainfed wheat in Iran: A spatial analysis. *Frontiers in Agronomy*, 3, 806146. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.806146>
- 46) NOAA Global Monitoring Laboratory. (2024). Globally averaged marine surface monthly mean CO₂ data. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>
- 47) Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- 48) Rahimi, J., & Khalili, A. (2019). Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1–2), 545–564. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2395-7>
- 49) Ramezani Etedali, H., & Kouhi, S. (2025). Investigating the effect of climate change on aridity in Iran with a population exposure approach. *Journal of Disasters and Environmental Crises*, 3(1), 17–38. [Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>
- 50) Sadeqi, A., Irannezhad, M., Bahmani, S., Jelodarlou, K. A., Varandili, S. A., & Pham, Q. B. (2024). Long-term variability and trends in snow depth and cover days throughout Iranian mountain ranges. *Water Resources Research*, 60(1), e2023WR035411. <https://doi.org/10.1029/2023WR035411>
- 51) Scott, M., Carter, J., & Dellagi, A. (2020). Climate disruption and planning: Rationality and climate emergency. *Planning Theory and Practice*, 21(1), 125–154. <https://doi.org/10.1080/14649357.2020.1704130>
- 52) Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- 53) Shayan Mehr, S., Shahnoushi, N., Sabuohi, M., & Rastegari, S. (2021). Climate change and food security in Khorasan. *Agricultural Economics*, 15(4), 95–128. [Persian], <https://doi.org/10.22034/IAES.2021.534502.1852>
- 54) Shirmohammadi, A., Akbarkhani, Z., Saberali, F., Mirzaei, M., & Mawdudi, M. N. (2023). Trend of changes in relative humidity in Khorasan Razavi province, Northeast Iran. *Water and Sustainable Development*, 10(2), 35–44. [Persian] <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i2.2302-1220>
- 55) Vicente-Serrano, S. M., Miralles, D. G., McDowell, N., Brodribb, T., Domec, J. C., Leung, R., & Breshears, D. D. (2023). Global characterization of the varying responses of the standardized precipitation evapotranspiration index to atmospheric evaporative demand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(14), e2022JD038273. <https://doi.org/10.1029/2020JD033017>
- 56) Whiteman, C. D. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. New York: Oxford University Press.
- 57) Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3rd ed.). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00001-4>
- 58) Zanoouzi-Alamdari, N., Sobhani, B., Eslahi, M., & Mohammadi, M. (2024). Zoning precipitation and temperature in Khorasan Razavi Province using the Sixth Assessment Report climate change data (CMIP6). *Environmental Sciences Studies*, 9(4), 9753–9761. [Persian]. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.424861.2169>
- 59) Zhou, S., Huang, P., Wang, L., Hu, K., Huang, G., & Hu, P. (2024). Robust changes in global subtropical circulation under greenhouse warming. *Nature Communications*, 15(1), 96. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44244-5>