

Time Series Analysis of Temperature and Relative Humidity Variations at Selected Stations in Iran

Dorna Ghaffari   ¹ | Ali Mohammad Khorshiddoust  ² | Hashem
Rostamzadeh  ² | Mohammad Darand  ³

1. Corresponding author, Department of Climatology and Urban Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Department of Climatology and Urban Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3. Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Article Info:

Article type:
Research Article

Date:
Received: 2025.05.15
Received: 2025.06.20
Accepted: 2025.06.25
Published:

Keywords:

Climate Change,
Relative Humidity,
Temperature, Time
Series, Iran

Abstract: Iran, as a prominent climate change hotspot, exhibits complex and heterogeneous hydroclimatic responses to global warming. This study analyzes the temporal dynamics of temperature and relative humidity using monthly data from five representative synoptic stations (Ahvaz, Bandar-e Anzali, Tabriz, Zahedan, and Yazd) over a 38-year period (1986–2023). To model the time series behavior, a comparative framework incorporating Moving Average (MA), Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), and Holt-Winters exponential smoothing was employed. Prior to modeling, the distributional structure of the data was assessed using the Anderson-Darling test and graphical probability analysis. The results revealed a consistent and significant warming trend across all stations, confirming a convergent thermal response at the national scale, whereas relative humidity exhibited a pronounced divergence. The most significant finding was strong evidence of a climate regime shift at the Tabriz station, where a bimodal distribution in relative humidity indicates an abrupt transition to a more stable, arid climatic state. Model evaluation confirmed the superiority of the Holt-Winters approach, owing to its capability to adapt to both trend and seasonal components, and highlighted the insufficiency of standard linear models for assessing climate change in transitioning regions.

Cite this article: Ghaffari, D, Khorshiddoust, A ,M, Rostamzadeh, H , Darand, M. (2025). Time Series Analysis of Temperature and Relative Humidity Variations at Selected Stations in Iran. *Climat Chenge and Climat Disasters*, 4(7), 75-102.

© The Author(s).

Homepage: cccd.znu.ac.ir

Publisher: University of Zanjan



Extended Abstract

Introduction

Hydroclimatic responses to global warming across the Middle East are characterized by significant spatial heterogeneity and non-linear behavior, largely driven by the region's diverse climatic zones and complex topography. Iran, with its extensive arid and semi-arid climates, serves as a critical natural laboratory for examining localized atmospheric adjustments to thermal forcing. The nation's water security and environmental stability are contingent upon a delicate balance between temperature and atmospheric moisture. While a consistent rise in temperature is well-documented, the corresponding evolution of relative humidity (RH) is less understood and often exhibits dynamics that diverge from regional warming trends. Conventional linear analyses are insufficient for capturing such complexity, as they tend to overlook abrupt transitions or regime shifts. This study addresses this knowledge gap by investigating the magnitude, structure, and non-linearity of temperature-humidity dynamics across five representative climates in Iran.

Methodology

This study utilized a 38-year monthly dataset of mean temperature and relative humidity from five key meteorological stations: Tabriz, Ahvaz, Yazd, Zahedan, and Bandar-e Anzali. The temporal dynamics were analyzed using three distinct statistical models. Moving Average (MA) provided a smoothed baseline, while the Autoregressive Integrated

Moving Average (ARIMA) model was employed to handle non-stationarity through differencing. For capturing more complex dynamics, the Holt–Winters (HW) exponential smoothing method was selected, as its additive and multiplicative parameters for level (α), trend (β), and seasonality (γ) allow for real-time adaptation to structural changes. Model accuracy was rigorously evaluated using Mean Squared Deviation (MSD) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The statistical suitability of the data was confirmed via the Anderson–Darling test, which affirmed normality for both variables at a 95% confidence level. To visualize the coupled, state-dependent behavior of the temperature-humidity system, three-dimensional phase-space plots were constructed, revealing underlying attractors and regime-specific climatic signatures.

Discussion

A ubiquitous warming signal was detected across all five stations, confirming that Iran is experiencing significant climate warming. The most pronounced temperature increases were observed in Ahvaz and Yazd, which is consistent with desert amplification effects under the dominance of the subtropical high-pressure system. In contrast, relative humidity exhibited sharp spatial divergence. Ahvaz and Yazd showed pronounced linear drying trends, associated with an elevated Vapor Pressure Deficit (VPD), indicating significant atmospheric desiccation and heightened evaporative stress. Conversely, Bandar-e Anzali

demonstrated notable hydroclimatic resilience, maintaining consistently high RH due to its year-round marine influence, despite persistent warming. The most compelling evidence of non-linear dynamics emerged in Tabriz. A bimodal RH distribution signaled a distinct structural break around the early 2000s, marking a definitive shift from a more humid regime to a drier one—a climatic transition that linear models like ARIMA failed to capture. Zahedan displayed a unique U-shaped RH pattern, with an initial decline followed by a partial recovery, likely reflecting the interplay between continental heating and intermittent moisture influx from monsoonal systems. Yazd represented a single, stable dry phase with minimal interannual variability, indicative of a thermodynamically locked arid environment.

Comparative model assessment demonstrated the clear superiority of the Holt–Winters model, which achieved the lowest MAPE and MSD values across all stations. Its state-space architecture effectively captured both seasonal oscillations and long-term trend persistence, proving its methodological robustness for complex hydroclimatic modeling, especially in systems with discontinuities.

Conclusion

Iran's hydroclimate exhibits a dual character of spatial coherence in

warming and marked divergence in its moisture response. While temperature follows a uniform upward trajectory, atmospheric humidity evolves through contrasting, non-linear pathways. The climatic regime shift identified in Tabriz exemplifies how sustained warming can trigger abrupt reconfigurations in regional moisture systems, likely representing a threshold in local climate resilience. The prevalent linear drying in desert climates and the complex biphasic behavior in others collectively point to an intensification of atmospheric evaporative demand. Our findings confirm that adaptive forecasting methods like Holt–Winters are more effective than static or purely linear models for diagnosing these intricate climate signals. The documented rise in VPD across all stations signifies a deepening disequilibrium between thermal conditions and moisture availability, implying escalating stress on ecosystems, agricultural productivity, and water security. Therefore, effective climate adaptation strategies must be localized and dynamic, tailored to the non-linear realities of regional hydroclimatic change.

Key words

Iran; Time series; Temperature; Relative humidity; Holt–Winters model; ARIMA



تحلیل سری های زمانی تغییرات دما و رطوبت نسبی در ایستگاه‌های منتخب ایران

درنا غفاری^۱ | علی محمد خورشید دوست^۲ | هاشم رستم زاده^۲ | محمد دارند^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲. استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳. استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

چکیده: ایران به عنوان یکی از کانون‌های اصلی تغییر اقلیم، پاسخ‌های هیدروکلیماتیک پیچیده و ناهمگنی را به گرمایش جهانی نشان می‌دهد. این پژوهش با هدف تحلیل دینامیک زمانی دما و رطوبت نسبی، داده‌های ماهانه پنج ایستگاه سینوپتیک معرف (اهواز، بندرانزلی، تبریز، زاهدان و یزد) را در دوره ۳۸ ساله ۱۹۸۶-۲۰۲۳ بررسی کرد. برای مدل‌سازی رفتار سری‌های زمانی، از چارچوب مقایسه‌ای شامل مدل‌های میانگین متحرک (MA)، خودهمبسته یکپارچه میانگین متحرک (ARIMA) و هموارسازی نمایی هالت-وینترز (Holt-Winters) استفاده شد. پیش از مدل‌سازی، ساختار توزیع داده‌ها از طریق آزمون اندرسون-دارلینگ و تحلیل گرافیکی احتمال ارزیابی گردید. نتایج حاکی از روند گرمایشی پایدار و معنادار در تمامی ایستگاه‌ها بود که همگرایی پاسخ حرارتی در مقیاس کشوری را تأیید می‌کند، در حالی که رطوبت نسبی واگرایی عمیقی را نشان داد. مهم‌ترین یافته، شناسایی شواهد قدرتمند تغییر رژیم اقلیمی در تبریز بود؛ در این ایستگاه، توزیع فراوانی دوقله‌ای (Bimodal) رطوبت، یک گذار ناگهانی به حالت اقلیمی پایدار و خشک‌تر را نشان می‌دهد. ارزیابی مدل‌ها نیز برتری مطلق رویکرد هالت-وینترز را به دلیل قابلیت انطباق با روند و مؤلفه‌های فصلی اثبات کرد و نشان داد راهبردهای سازگاری منطقه‌ای باید بر درک پاسخ‌های غیرخطی و ناهمگن استوار باشند.

اطلاعات مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ‌ها:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

انتشار:

واژگان کلیدی:

تغییرات اقلیمی، رطوبت نسبی، دما، سری‌های زمانی، ایران

استناد: غفاری، درنا، خورشید دوست، علی محمد، رستم زاده، دارند، محمد. (۱۴۰۴). تحلیل سری های زمانی تغییرات دما و رطوبت نسبی در ایستگاه‌های منتخب ایران. دگرگونی ها و مخاطرات آب و هوایی، ۷۵(۷)، ۱۰۲-۷۵.

© نویسندگان .

Homepage: cccd.znu.ac.ir

ناشر: دانشگاه زنجان



۱. مقدمه

هیئت بین الدول تغییرات اقلیمی، تغییرات

جهانی آب و هوای ناشی از فعالیت‌های

انسانی و بروز رویدادهای شدید اقلیمی

بیشتر شده و رو به افزایش است

(Masson-Delmotte et al; 2021). دما

از عوامل مهم تمایز اقلیمی در جهان است.

بررسی دمای ایران نشان داده است که

گذشته از وجود چرخه در دمای کشور؛

روند افزایشی دما در برخی مناطق دیده

می‌شود & (Shirgholami

Ghahraman, 2005). گذشته از تغییر

ویژگی‌های زمانی، ویژگی‌های مکانی دما

نیز دستخوش تغییر شده است. برای نمونه

(Barati & Mousavi, 2005) جابه‌جایی

مکانی امواج گرم فصل زمستان ایران به

سوی البرز و آذربایجان را گزارش کرده‌اند.

با توجه به اینکه با هر درجه افزایش دما

ارتفاع برف‌مرز حدود ۱۶۰ متر افزایش می‌

یابد (Masoudian, 2003). جابه‌جایی

امواج گرم به سوی مناطق کوهستانی

دما و رطوبت به‌عنوان دو مؤلفه بنیادین

اقلیم، نقش برجسته‌ای در تغییرپذیری و

توزیع سایر عناصر اقلیمی ایفا می‌کنند.

تغییرات دما می‌تواند فرآیندهایی نظیر

تبخیر، تراکم و شکل‌گیری الگوهای بارشی

را تحت تأثیر قرار دهد و به‌طور مستقیم بر

چرخه رطوبتی جو اثرگذار باشد. از سوی

دیگر، رطوبت هوا نیز در تعدیل یا تشدید

شرایط حرارتی و در نتیجه بر پویایی

سامانه‌های جوی و پایداری اقلیمی نقش

دارد. تعامل متقابل میان این دو عامل سبب

می‌شود که دما و رطوبت نه تنها بر

ویژگی‌های مکانی و زمانی بارش‌ها اثرگذار

باشند، بلکه تغییرپذیری سایر پارامترهای

اقلیمی را نیز جهت‌دهی کنند. بر این

اساس، تحلیل روند تغییرات دما و رطوبت

به‌عنوان شاخص‌های کلیدی، از روش‌های

اساسی در مطالعات علمی تغییر اقلیم به

شمار می‌آید. بر اساس ششمین گزارش

- پيامدهای آب شناختی زیانباری برای کشور خواهد داشت. از آنجایی که کشور ایران در کمربند بیابانی نیمکره شمالی واقع شده است و قسمت اعظم آن تحت تسلط سلول های پرفشار مجاور حاره ای قرار دارد، بنابراین بیشتر وسعت آن را مناطق خشک و نیمه خشک تشکیل می دهد؛ که بارندگی بین ۵۰ تا ۲۵۰ میلی متر دارد (Tavousi 2000). مطالعات انجام شده در اروپا، آسیا، استرالیا و آفریقا (Pongracz et al., 2013; Cowan et al., 2014; Ceccherini et al., 2017; Yan et al., 2017; Guerreiro et al., 2018) نشان می دهند که بیشینه های دما در دهه های اخیر افزایش یافته و امواج گرمایی از نظر شدت، طول مدت و فراوانی روندی افزایشی دارند. بر اساس بررسی (Beniston & Diaz, 2004) امواج گرمایی مشابه رویداد استثنایی تابستان ۲۰۰۳ در اروپا تا اواخر قرن بیست و یکم به رخدادی معمول بدل خواهند شد. نتایج
- مشابهی از رشته کوه های آلپ (Zampieri et al., 2016) و قاره آفریقا (Dosio, 2017) گزارش شده است که نشان دهنده افزایش ۳/۵ تا ۶ درجه ای میانگین دما در آینده و سه برابر شدن مساحت جهانی تحت پوشش امواج گرما نسبت به اوایل قرن بیستم است. مطالعات دیگر نیز ارتباط میان امواج گرما و دوره های خشک را مورد توجه قرار داده اند. پژوهش های انجام شده در جمهوری چک (Huth, 2000)، بلغارستان (Gocheva et al., 2006)، مکزیکوسیتی (Jáuregui, 2009) و هند (Panda et al., 2017) همگی افزایش طول دوره های گرم و شدت امواج گرمایی را تأیید کرده اند. افزون بر این، تحلیل بلندمدت DTR در هند (Sankalp et al; 2023) نشان دهنده نوسان نامنظم ولی افزایشی این شاخص بوده است. بررسی اخیر در چین نیز آشکار ساخته که فرین های گرم و خشک از اواخر دهه ۱۹۷۰

به‌طور چشمگیری افزایش یافته‌اند و حدود ۸۵ درصد آنها پیش از وقوع خشکسالی رخ داده‌اند، که این امر بیانگر نقش برجسته خشکی در شکل‌گیری این پدیده‌هاست (Hu et al., 2024). مطالعات متعدد در ایران به شناسایی و تحلیل رفتار امواج گرمایی و تغییرات دمایی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف پرداخته‌اند. شواهد نشان می‌دهد که نواحی داخلی کشور، به‌ویژه محورهای کوهستانی زاگرس و البرز، از کانون‌های اصلی شکل‌گیری هسته‌های گرما به شمار می‌آیند (Barati & Mousavi, 2005). روندهای آماری طی چند دهه گذشته نیز افزایش بسامد و شدت این پدیده را نشان داده‌اند. در استان کرمان، تحلیل زنجیره مارکف دماهای بیشینه روزانه طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ حاکی از افزایش چشمگیر امواج گرما، به‌ویژه در ماه‌های آوریل و مه بوده است (Yazdanpanah & Alizadeh, 2011).

از منظر دینامیکی، وقوع موج آبرگرم تابستان ۱۳۸۹ ناشی از استقرار کم‌فشار حرارتی عربستان در سطح زمین و غلبه پرفشار جنب‌حاره‌ای در ترازهای بالاتر جو بوده که سبب تشدید گرما در جنوب‌غرب و غرب کشور شد (Ghavidel Rahimi, 2011). یافته‌های حاصل از بررسی‌های آماری بلندمدت نیز بر افزایش چشمگیر فراوانی و شدت امواج گرما دلالت دارند. برای نمونه، نتایج (Esmaeilnezhad, et al; 2013) نشان داد که امواج گرمایی کوتاه‌مدت نسبت به امواج طولانی‌تر فراوان‌تر ولی کم‌دامنه‌تر هستند، در حالی که امواج طولانی‌مدت مساحت بیشتری از کشور را دربر می‌گیرند. پژوهش (Darand, 2014) نیز بر اساس داده‌های روزانه (۱۹۶۲-۲۰۱۴) روند افزایشی فراوانی، تداوم و شدت امواج گرما را در ایران تأیید کرد؛ به‌ویژه در نواحی دشت و مناطق هموار که نرخ افزایش

بیش‌تری داشته‌اند. بررسی‌های همدیدی نیز نشان داده‌اند که الگوهای پرفشار جنب‌حاره در انتقال و تشدید این امواج نقش تعیین‌کننده‌ای دارند (Mohammadkhorshiddoost, et al; 2017) بررسی‌های جدیدتر با رویکردهای آماری و مدل‌سازی زمانی، ابعاد دقیق‌تری از رفتار دما در ایران آشکار کرده‌اند. تحلیل بلندمدت تغییرات دمایی در بازه ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ نشان داد که امواج گرمایی شدید به‌ویژه در زمستان‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ رخ داده و روند کلی افزایش تعداد و بزرگی این امواج در کشور معنادار بوده است (Baharvandi, et al; 2020). در ارزیابی مدل‌های سری زمانی برای پیش‌بینی دمای متوسط در نیمه جنوبی کشور، نتایج نشان داد مدل $ARIMA(0,1,2)_0$ بهترین برازش را برای ایستگاه‌های یزد و شیراز دارد، در حالی که مدل‌های SARIMA عملکرد ضعیف‌تری نشان دادند

(Pourkarim Barabadi, & Heidari Monfared, 2020). پژوهش (Rahmdel, et al; 2022) اهمیت همگنی داده‌های اقلیمی را مورد تأکید قرار داده است. این مطالعه با بررسی داده‌های ۳۰ ساله ۱۳۴ ایستگاه هواشناسی کشور (۱۹۸۹-۲۰۱۸) نشان داد که حدود ۳٪ داده‌های دمای بیشینه، ۴٪ دمای کمینه و ۲٪ داده‌های بارش گم شده‌اند، در حالی که ایستگاه ژئوفیزیک تهران بیشترین داده‌های پرت را داشته است. بر اساس آزمون‌های همگنی، تنها ۸۹ ایستگاه برای دما و ۱۵ ایستگاه برای بارش همگن بودند، که نشان‌دهنده ضرورت اصلاح و پایش مستمر داده‌های اقلیمی در مطالعات گرمایش است. علاوه بر آن، مطالعات مربوط به پیش‌نگری تنش گرمایی مبتنی بر مدل‌های CMIP6 پیش‌بینی کرده‌اند که تا پایان قرن بیست‌ویکم، پهنه‌های بدون تنش گرمایی کاهش یافته و تنش‌های

شدید تا بسیار شدید گرمایی در ایران گسترش خواهند یافت (Kadkhoda, et al; 2023) در زمینه کیفیت داده ها و اعتبار تحلیل های دمایی این یافته ها بیانگر آن است که انتخاب مدل های آماری متناسب با رفتار دمایی منطقه، در پیش بینی روند گرمایش آینده کشور اهمیت ویژه ای دارد. مطالعات مبتنی بر داده های ماهواره ای نیز به درک بهتر سازوکارهای فیزیکی گرمایش کمک کرده اند. تحلیل تصاویر AIRS نشان داده است که افزایش دی اکسید کربن، به ویژه در فصل زمستان، موجب افزایش دمای شبانه و تهدیدی جدی برای تعادل زیست کره می شود (Moradi, & Rezaei, 2024) روند مشابهی در شمال غرب کشور نیز مشاهده شده، به طوری که میانگین دمای بیشینه طی ۲۴ سال گذشته روندی افزایشی معنادار داشته است (Ahmadifar, et al; 2024)

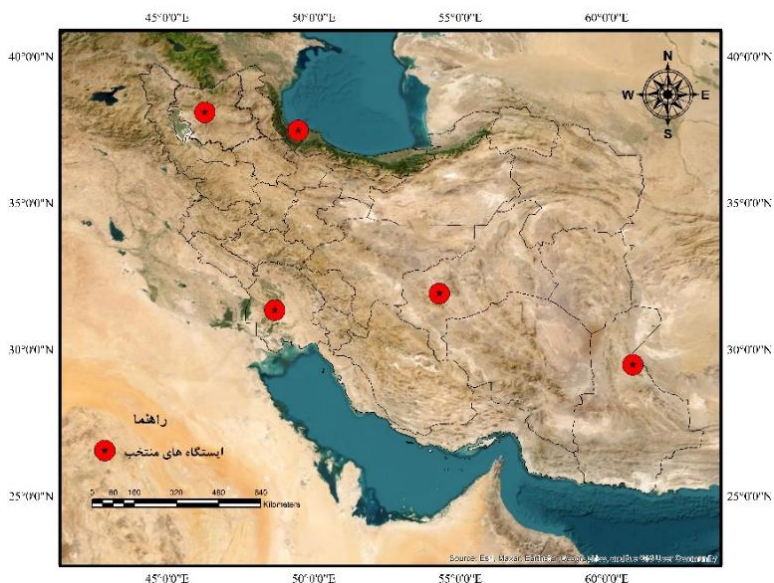
تحلیل دامنه نوسان شبانه روزی دما (DTR) در آذربایجان غربی طی سه دهه اخیر نشان داده است که این شاخص در اغلب مناطق روندی افزایشی دارد، به ویژه در فصل تابستان (Tohidisardasht, et al; 2025) با وجود گستردگی مطالعات داخلی و خارجی درباره روندهای دمایی و افزایش فراوانی و شدت امواج گرمایی، تحلیل یکپارچه و بلندمدت همزمان دما و رطوبت نسبی همچنان با خلا علمی مواجه است. بخش عمده پژوهش های پیشین بر دما متمرکز بوده اند و نقش رطوبت را به عنوان متغیر تعدیل کننده یا تشدیدکننده در شکل گیری رویدادهای حدی لحاظ نکرده اند. بر این اساس، هدف اصلی این مطالعه تحلیل همزمان روندهای بلندمدت دما و رطوبت نسبی با تکیه بر داده های همگن شده و روش های سری زمانی است تا ضمن شناسایی الگوهای تغییرپذیری و همبستگی میان این دو مؤلفه کلیدی، نقش

رطوبت در تشدید یا تعدیل امواج گرمایی و دوره‌های خشک در ایران به‌طور نظام‌مند تبیین شود و مبنای علمی دقیق‌تری برای ارزیابی پیامدهای هیدرواقليمی و برنامه‌ریزی سازگاری با تغییر اقلیم فراهم آید.

این مطالعه در پنج ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور؛ شامل تبریز، اهواز، زاهدان، بندرانزلی و یزد انجام گرفت که موقعیت مکانی ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. ملاک انتخاب این ایستگاه‌ها وجود تنوع اقلیمی و پوششی از رژیم‌های حرارتی و رطوبتی ایران بود.

۲. داده‌ها و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه



شکل ۱: نقشه ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران

۲.۲. داده‌ها

هواشناسی کشور ایران^۱ اتخاذ و استفاده

شد. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده

در جدول ۱ ارائه شده است.

داده‌های ماهانه دما ($^{\circ}\text{C}$) و رطوبت نسبی

(%) ایستگاه‌های مورد مطالعه با دوره آماری

۳۸ ساله (۱۹۸۶-۲۰۲۳) از سازمان

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی ($^{\circ}\text{E}$)	عرض جغرافیایی ($^{\circ}\text{N}$)	ارتفاع از سطح دریا (m)	متوسط دمای سالانه ($^{\circ}\text{C}$)	متوسط رطوبت نسبی سالانه (%)
اهواز	۴۶/۶۸	۳۱/۳۱	۲۲/۵	۲۷/۵	۴۵
بندر انزلی	۴۹/۴۶	۳۷/۴۸	-۲۶	۱۶/۲	۸۰
تبریز	۴۶/۲۹	۳۸/۰۸	۱۳۶۱	۱۲/۵	۵۵
زاهدان	۶۰/۸۶	۲۹/۴۸	۱۳۷۰	۲۰	۳۵
یزد	۵۴/۳۷	۳۱/۸۹	۱۲۳۷/۲	۲۱/۳	۳۰

۳.۲. روش‌ها

دما و رطوبت نسبی، از آزمون آندرسون-دارلینگ^۲ استفاده شد. این آزمون نسبت به

آزمون‌های دیگر حساسیت بیشتری به

انحرافات در دو انتهای توزیع دارد و برای

تشخیص دقیق ناهمگنی توزیع داده‌ها در

پژوهش‌های اقلیمی مناسب است. که آماره

این آزمون به صورت زیر تعریف می‌شود

در این پژوهش، بررسی و مدل‌سازی رفتار

زمانی متغیرهای اقلیمی شامل دما و

رطوبت نسبی متوسط در ایستگاه‌های

منتخب، فرایند تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری

از نرم‌افزار Minitab21 انجام گرفت. به

منظور بررسی ویژگی‌های آماری داده‌ها و

شناخت شکل توزیع میانگین‌های ماهانه

². Anderson-Darling

¹. www.irimo.ir

که در آن MA_t مقدار میانگین متحرک سری زمانی در زمان t و $t-i$ مقدار مشاهده شده متغیر مورد مطالعه در زمان $t-i$ و t زمان می باشد.

۲- مدل خود همبسته میانگین متحرک^۳ که سری مورد انتظار را به صورت میانگین متحرک و خود برگشتی در نظر گرفته و در نهایت به مدلسازی می پردازد. رابطه آن بدین شکل است.

(۴)

$$x_n = a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2} + \dots + a_p x_{n-p} + \varepsilon_n - b_1 \varepsilon_{n-1} - \dots - b_q \varepsilon_{n-q}$$

در این مدل، مقدار متغیر در زمان n یعنی x_n ، ترکیبی خطی از p مقدار پیشین خود (بخش خودرگرسیون یا AR) و q خطای تصادفی گذشته (بخش میانگین متحرک یا MA)، به همراه یک خطای آنی (ε_n) است. پارامترهای p و q به ترتیب مرتبه

(Mirhashemi, & Hasanvand, 2022).

(۱)

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F_n(x) - F(x))^2}{F(x)(1 - F(x))} dF(x)$$

در این آزمون این فرضیه بررسی می شود که آیا داده ها از توزیع مورد نظر پیروی می کنند یا خیر. در این آزمون، با توجه به صحت این فرضیه، تابع توزیع احتمال تجمعی F دارای توزیع احتمال یکنواخت^۱ در فاصله (۰ و ۱) است، یعنی

(۲)

$$F \sim Uniform(0,1)$$

برای تحلیل سری های زمانی میانگین ماهانه دما و رطوبت نسبی در ایستگاه های منتخب، از یک مجموعه روش های استاندارد سری زمانی استفاده شد.

۱- میانگین متحرک^۲ که به صورت رابطه زیر است (Wilks 2011).

(۳)

$$MA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{t-i}$$

3. ARIMA

1. Uniform Distribution

2. Moving Average

مدل را تعیین می‌کنند (Brockwell &

Davis, 2002)

مدل هموارسازی نمایی هالت-وینترز^۱

برای پیش بینی سری زمانی فصلی از مدل

هموارسازی نمایی سه‌گانه هالت - وینترز

استفاده می‌شود (Kohansal, et al;

2012) این روش مشابه روش هموارسازی

نمایی، به این صورت عمل می‌کند که همه

داده‌ها را در پیش‌بینی لحاظ کرده و به

داده‌های اخیر وزن بیشتری می‌دهد. در

واقع می‌توان گفت حالت بهبود یافته

هموارسازی نمایی است؛ چراکه در هر دوره

دو پارامتر سطح و پارامتر روند به روز می-

شود (Shahriari, et al; 2016) معادلات

مربوط به آن به صورت زیر می‌باشد.

(۵) معادله سطح

$$L_t = a \frac{A_t}{S_{t-1}} + (1 - a)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

(۶) معادله فصلی

$$S_t = y \frac{A_t}{L_t} + (1 - y)s_{t-1}$$

(۷) معادله رشد

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$$

(۸) معادله پیش بینی

$$F_{t+m} = (L_t + mT_t)S_{t-L-m}$$

که در آن A_t مقادیر واقعی که در زمان t

دارای عامل فصلی و روند، I_t مقدار هموار

شده داده‌هایی می‌باشد که در زمان t اثر

فصلی آنها گرفته شده است، T_t مقدار

هموار شده روند در زمان t ، S_t مقدار

هموار شده فصل در زمان t ، L طول فصل،

M تعداد دفعات بعد از زمان t و β, α, y به

ترتیب ضرایب هموارساز سطح، روند و فصل

می‌باشند.

۳. یافته‌ها و نتایج

در این مطالعه، به‌منظور توصیف

ویژگی‌های آماری داده‌های ماهانه دما و

رطوبت نسبی و بررسی نبود ناهنجاری‌های

آشکار در الگوی توزیع آنها، از آزمون

آندرسون-دارلینگ استفاده شد. نتایج

¹. Holt-Winters

آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد که داده‌ها از رفتار آماری پایدار و بدون انحراف قابل توجه برخوردارند. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های سری زمانی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دما و رطوبت نسبی، سه رویکرد آماری شامل میانگین متحرک ساده، خودرگرسیون میانگین متحرک یکپارچه و هموارسازی نمایی حالت-سوینترز بر داده‌های پنج ایستگاه منتخب اعمال شد. نتایج کمی حاصل از این مدل‌ها مبنای این تحلیل قرار گرفته است. مدل میانگین متحرک ساده (MA) که بر فرض ایستاد بودن سری زمانی استوار است، عملکرد بسیار ضعیفی از خود نشان داد. همانطور که در جدول ۱ قابل مشاهده است، مقادیر بالای درصد خطای مطلق میانگین (MAPE)، ناتوانی این مدل در توصیف دینامیک‌های اقلیمی را آشکار می‌سازد. این ضعف به ویژه در ایستگاه‌های با روند خطی قدرتمند مانند یزد (MAPE

دما: ۳۸/۶۹٪ و اهواز (MAPE) دما: ۹۵/۶۱٪ به اوج خود می‌رسد، زیرا مدل قادر به دنبال کردن افزایش یا کاهش سیستماتیک مقادیر نیست. حتی در ایستگاه پایداری مانند بندرانزلی، که تحت تأثیر تعدیل‌کننده دریا قرار دارد، خطای مدل همچنان قابل توجه است و نشان می‌دهد که نادیده گرفتن مؤلفه فصلی به تنهایی برای کاهش دقت کافی است. این نتایج، کاربرد آن را صرفاً به عنوان یک مدل پایه (baseline) جهت مقایسه محدود می‌کند. در مقابل، مدل ARIMA به دلیل قابلیت حذف روند از طریق تفاضل‌گیری (d)، بهبود قابل توجهی در دقت برازش ایجاد کرد. نتایج این مدل که در جدول ۲ ارائه شده، نشان‌دهنده کاهش چشمگیر خطا در تمامی ایستگاه‌ها نسبت به مدل MA است. با این حال، عملکرد ARIMA در ایستگاه‌ها یکسان نیست. برای مثال، در بندرانزلی با دینامیک پایدار،

مدل به خوبی بخشی از وابستگی‌های زمانی را مدل می‌کند، اما در ایستگاه تبریز، که رطوبت آن یک شکست ساختاری (تغییر پله‌ای) را تجربه کرده است، آسیب‌پذیری مدل آشکار می‌شود. ARIMA برای تطبیق با چنین تغییرات ناگهانی و غیرخطی در رژیم داده‌ها طراحی نشده و این امر منجر به افزایش خطای آن در این ایستگاه خاص می‌گردد. با این حال، بهترین عملکرد به طور قاطع متعلق به مدل هموارسازی نمایی حالت-وینترز بود که به طور ویژه برای تحلیل داده‌های دارای روند و مؤلفه فصلی طراحی شده است. مطابق با نتایج خلاصه شده در جدول ۳، این مدل با ثبت کمترین مقادیر خطا (MSD و MAPE) برای هر دو متغیر در تمام ایستگاه‌ها، به عنوان چارچوب بهینه شناسایی شد. برتری این مدل در توانایی آن برای انطباق با ویژگی‌های خاص هر ایستگاه نهفته است: این مدل هم روند

گرمایشی شدید و خطی یزد را به دقت مدل می‌کند و هم الگوی فصلی پایدار و منظم رطوبت در بندرانزلی را بازتولید می‌نماید. حتی در دینامیک پیچیده رطوبت زاهدان با روند U-شکل، حالت-وینترز با تنظیم پارامترهای خود، برازش بهتری نسبت به دو مدل دیگر ارائه می‌دهد و انطباق کامل ساختار خود با دینامیک سیستم‌های اقلیمی را به اثبات می‌رساند. مقایسه نتایج سه مدل آشکار می‌سازد که شکاف عملکرد بین مدل‌ها در ایستگاه‌هایی با دینامیک پیچیده‌تر (مانند یزد با روند قوی و تبریز با شکست ساختاری) بسیار برجسته‌تر است. در حالی که مدل MA به دلیل سادگی، بخش بزرگی از واریانس داده‌ها را نادیده می‌گیرد، ARIMA با مدیریت روند بهبود می‌یابد و حالت-وینترز با در نظر گرفتن همزمان روند و فصلی بودن، دقیق‌ترین بازنمایی از واقعیت اقلیمی را ارائه می‌دهد. همچنین، در تمام

رویکردها، دقت برازش برای متغیر رطوبت
نسبی به دلیل ماهیت پیچیده تر و
تأثیرپذیری آن از فرآیندهای سینوپتیک و
محلی، عموماً پایین تر از متغیر دما است.

این واگرایی در عملکرد مدل ها، ضرورت
انتخاب رویکردی متناسب با دینامیک های
ذاتی هر متغیر اقلیمی را برجسته می سازد.

جدول ۲: نتایج مدل میانگین متحرک در ایستگاه های مورد مطالعه

مدل سری زمانی	متغیر اقلیمی	ایستگاه ها	مقادیر میانگین درصد خطای مطلق
میانگین متحرک	دما (°C)	اهواز	MAPE ۳۹/۶۷
			۴۵/۱۸
		بندرانزلی	۵۰/۶۱
			۴/۷۶
		تبریز	۳۴۵/۸۵
	رطوبت نسبی (%)	زاهدان	۹۳/۲۷
			۵۱/۱۷
		یزد	۴۳/۷۳
			۶۹/۳۸
			۵۳/۲۳

جدول ۳: نتایج مدل خود همبسته میانگین متحرک در ایستگاه های مورد مطالعه

مدل سری زمانی	متغیر اقلیمی	ایستگاه ها	مقادیر میانگین مربعات خطا MAPE
خود همبسته میانگین متحرک	دما (°C)	اهواز	۲/۸۸
			۶۳/۱۸
		بندرانزلی	۲/۹۷
			۱۳/۲۵
		تبریز	۵/۵۳
	رطوبت نسبی (%)	زاهدان	۴۳/۸۹
			۳/۶۷
		یزد	۵۵/۵۸
			۴/۵۸
			۶۶/۵۷

جدول ۴: نتایج مدل هموارسازی نمایی هالت- وینترز در ایستگاه‌های مورد مطالعه

مدل سری زمانی	متغیر اقلیمی	ایستگاه‌ها	مقادیر میانگین مربعات خطا MAPE
هموارسازی نمایی هالت-وینترز	دما (°C)	اهواز	۱۷/۰۴
			۲۵/۳۳
		بندر انزلی	۲۳/۲۳
			۳/۷۲
		تبریز	۹۹/۰۹
	رطوبت نسبی (%)	زاهدان	۱۵/۵۱
			۲۳/۶۲
		یزد	۲۵/۶۱
			۳۲/۴۳
			۲۹/۷۷

اقلیمی منطقه به جای گذار تدریجی، بین آنها جهش می‌کند. خوشه اول معرف رژیم گرم و مرطوب تابستانه است که محصول هم‌افزایی استیلای پرفشار جنب‌حاره‌ای و نفوذ توده هوای مرطوب از سمت خلیج فارس است. خوشه دوم، که در دماهای پایین‌تر و رطوبت نسبی کمتر قرار دارد، نمایانگر فاز اقلیمی فصول خنک‌تر تحت تأثیر سامانه‌های دینامیکی مهاجر غربی است. این ساختار دوگانه اقلیمی، با مکانیسم‌های سینوپتیکی متفاوت، در ایستگاه تبریز نیز به شیوه‌ای متمایز

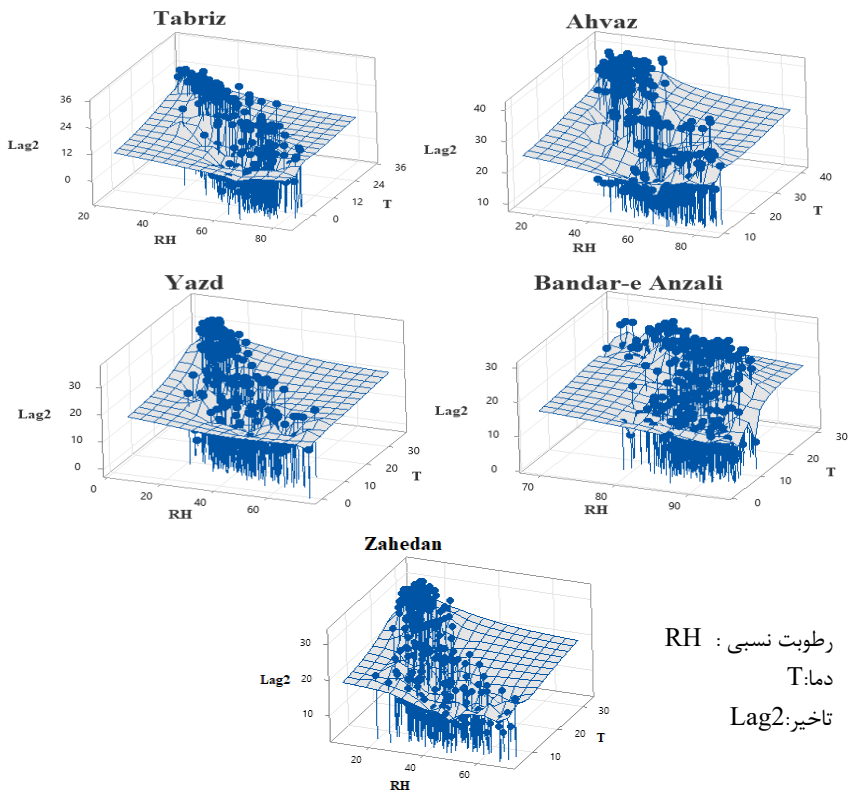
تحلیل نمودارهای سطح سه بعدی، ماهیت عملکردی و الگوهای رفتاری سامانه‌های حرارتی-رطوبتی را در پنج منطقه اقلیمی معرف ایران آشکار می‌سازد و از الگوهای دوگانه و کاملاً تفکیک شده تا رژیم‌های واحد و پایدار را به تصویر می‌کشد (شکل ۲). در ایستگاه اهواز، یک ساختار اقلیمی دوگانه به وضوح قابل تشخیص است. پراکندگی داده‌ها در دو خوشه متمرکز و مجزا، که با یک فضای خالی قابل توجه از یکدیگر جدا شده‌اند، نشان‌دهنده وجود دو رژیم عملیاتی متمایز است که سامانه

مشاهده می شود. توزیع گسسته و خوشه ای داده ها در دو ناحیه مجزا، حاکی از یک وابستگی غیرخطی و کاملاً فصلی است. خوشه متراکم اول در دماهای پایین و رطوبت نسبی بالا، بیانگر حاکمیت رژیم سرد و مرطوب زمستانه تحت نفوذ سامانه های کم فشار مدیترانه ای است. در مقابل، خوشه دوم در دماهای بالاتر و رطوبت نسبی پایین تر، شواهدی از رژیم گرم و خشک تابستانه تحت حاکمیت سامانه های پرفشار جنب حاره ای را به نمایش می گذارد. این رفتار دوگانه نشان می دهد که سامانه اقلیمی تبریز نیز به جای تحولات خطی، میان دو فاز عملیاتی متمایز نوسان می کند. در مقابل این ساختارهای دوگانه، ایستگاه یزد الگویی از یک رژیم غالب با یک فاز فرعی را نمایان می سازد. پراکنش ناهمگون و تجمع انبوه نقاط در گستره دمایی بالا (۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی گراد) و رطوبت نسبی بسیار اندک (۲۰ تا ۴۰ درصد)، معرف رژیم غالب گرم و خشک منطقه است که محصول چیرگی سیستم های پرفشار جنب حاره ای است. در سوی دیگر، تجمع پراکنده تر داده ها در دماهای پایین تر، شواهدی بر وجود یک دوره اقلیمی ثانویه و کوتاه مدت در فصل سرد است. این ساختار نامتعادل نشان می دهد که سیستم اقلیمی یزد بیشتر ماهیتی تک رژیمی با نوسانات فصلی محدود دارد. برخلاف الگوی خوشه ای و تک رژیمی یزد، سامانه اقلیمی زاهدان از یک وابستگی خطی غالب پیروی می کند. توزیع و روند منظم سطح شبکه حاکی از آن است که نوسانات حرارتی منطقه بیشتر به تغییرات خطی و متقابل میان دما و رطوبت نسبی حساسند و سامانه از رفتاری نسبتاً پیش بینی پذیر برخوردار است. با این حال، این رفتار کاملاً خطی نیست؛ در مقادیر بالاتر دما و رطوبت نسبی، هم افزایی میان دو متغیر مشهود است که شواهدی از یک

رژیم گرما-رطوبتی غیرخطی و متضاد جلوگیری می‌کند. مطالعه تطبیقی ترمودینامیکی، احتمالاً مرتبط با نفوذ الگوهای موسمی، را نشان می‌دهد. نقطه مقابل تمام الگوهای پیشین، در ایستگاه بندرانزلی مشاهده می‌شود. در این نمودار، به جای خوشه‌های مجزا یا غالب، با یک توده متمرکز، یکپارچه و گسترده از داده‌ها روبرو هستیم. این ساختار، نشان‌دهنده حاکمیت مطلق یک رژیم اقلیمی واحد و بسیار پایدار، یعنی رژیم مرطوب خزری است. این سامانه به دلیل وابستگی شدید به دریای خزر به عنوان یک منبع رطوبتی عظیم، رطوبت نسبی را به طور مداوم در سطوح بسیار بالا حفظ می‌کند. در این سیستم، رطوبت یک پارامتر تقریباً ثابت و نزدیک به اشباع است و نوسانات اصلی، ماهیت حرارتی دارند. این ویژگی نشانگر یک سیستم اقلیمی با حافظه بلندمدت است که تحت کنترل یک عامل جغرافیایی غالب، از شکل‌گیری رژیم‌های اقلیمی

متضاد جلوگیری می‌کند. مطالعه تطبیقی روندهای هیدروکلیماتیک در پنج منطقه معرف ایران، با بهره‌گیری از مدل‌سازی سری‌های زمانی هالت-وینترز، تصویری منسجم و در عین حال پیچیده از پاسخ‌های اقلیمی به فشارهای گرمایشی معاصر را آشکار می‌سازد. یافته کلیدی و فراگیر این پژوهش، شناسایی یک سیگنال گرمایشی آماری معنادار و پایدار در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه است که صرف‌نظر از تنوع جغرافیایی آنها از اقلیم مرطوب خزری (بندرانزلی) تا بیابانی فراخشک (یزد) حضور دارد. این همگرایی قوی، تأثیر غیرقابل انکار یک نیروی محرک در مقیاس بزرگ، یعنی تغییر اقلیم جهانی، را بر خط پایه حرارتی کشور تأیید می‌کند. با این حال، دینامیک این گرمایش در هر منطقه تفاوت‌های ظریفی را به نمایش می‌گذارد: در یزد، این روند به شکل یک افزایش خطی، شدید و با حداقل نوسان

ظاهر می شود که نمایانگر پاسخ کلاسیک
یک سیستم بیابانی تحت حاکمیت پرفشار
جنب حاره ای است؛ در مقابل، ایستگاه های
تبریز و زاهدان شواهدی از شتاب گیری
روند در دهه های اخیر نشان می دهند که
می تواند بیانگر ورود این سیستم ها به یک
فاز جدید و گرم تر باشد.



شکل ۲: نمودارهای سه بعدی سطح برای دما و رطوبت نسبی ایستگاه های مورد مطالعه

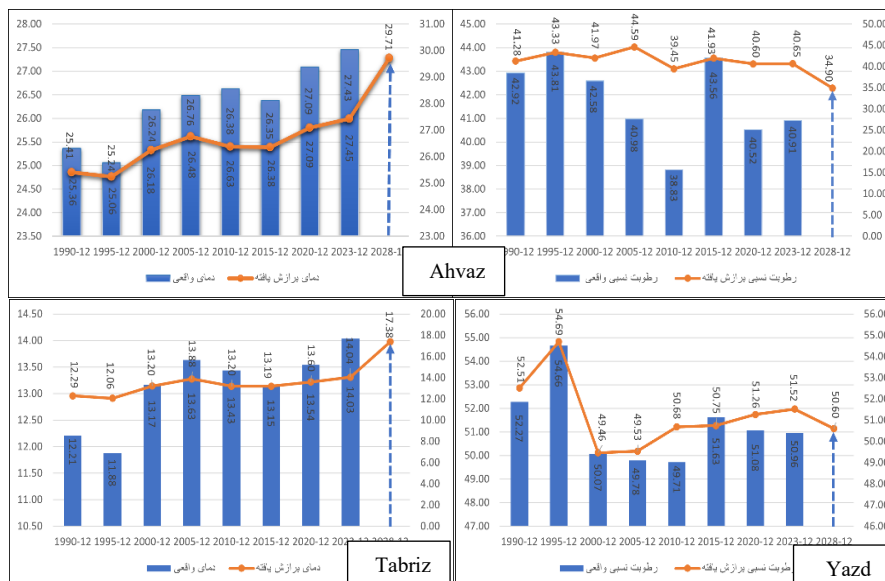
برخلاف همگرایی مشاهده شده در متغیر
دما، تحلیل رطوبت نسبی یک واگرایی
معنادار در پاسخ های منطقه ای را به تصویر
می کشد که عمیقاً به سازوکارهای

سینوپتیک و جغرافیایی محلی وابسته است. در یک سو، ایستگاه یزد سازوکار تشدید خشکی^۱ را به نمایش می‌گذارد، جایی که روند کاهشی رطوبت، قوی، خطی و پایدار بوده و یک پاسخ ترمودینامیکی مستقیم به گرمایش در محیطی با منابع رطوبتی محدود را مدل‌سازی می‌کند. در سوی دیگر، ایستگاه‌های ساحلی بندر بندرانزلی و اهواز نوسانات اقلیمی را نشان می‌دهند. با وجود گرمایش شدید و مجاورت با پیکره‌های آبی بزرگ، هر دو ایستگاه یک روند کاهشی ملایم در رطوبت نسبی را تجربه می‌کنند. این پدیده بیانگر آن است که پتانسیل خشک‌کنندگی اتمسفر ناشی از افزایش دما، حتی بر تأثیر تعدیل‌کننده منابع تبخیری محلی نیز غلبه کرده است. پیچیده‌ترین دینامیک‌ها در ایستگاه‌های تبریز و زاهدان مشاهده می‌شود. تبریز یک افت اساسی آشکار را در حدود سال ۲۰۰۰ تجربه کرده است، که طی آن رطوبت نسبی به صورت ناگهانی به یک سطح تعادلی جدید و پایین‌تر سقوط کرده و در آنجا تثبیت شده است. این گذار غیرخطی، نشان‌دهنده یک تغییر رژیم قطعی به یک حالت اقلیمی پایدار و خشک‌تر است. زاهدان، با روند U شکل خود، یک دوگانگی رژیم اقلیمی را به نمایش می‌گذارد. نتایج نشان‌دهنده یک دوره اولیه تشدید خشکی است که عمدتاً تحت تأثیر افزایش دما و تقویت تقاضای تبخیری جو (گرمایش ترمودینامیکی) شکل گرفته است؛ در حالی که در دهه اخیر، نوعی تثبیت و بازیابی نسبی مشاهده می‌شود که با نفوذ دوره‌ای رطوبت ناشی از سامانه‌های موسمی جنوب و انتقال رطوبت از دریای عرب و اقیانوس هند مرتبط است (Khosravi, et al; 2019). در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که اگرچه پاسخ رطوبت

^۱. Intensified Aridification

نسبی در نواحی مختلف کشور ناهمگن است، اما هم‌زمانی گرمایش قطعی و فراگیر با کاهش یا عدم افزایش متناسب رطوبت نسبی، به‌طور سیستماتیک منجر به افزایش کمبود فشار بخار (VPD)¹ در تمامی مناطق مورد مطالعه شده است. تحلیل روندهای زمانی و الگوهای مکانی VPD بیانگر آن است که این افزایش عمدتاً از مسیر تقویت ترمودینامیکی تقاضای تبخیری جو و نه صرفاً کاهش بارش رخ داده است؛ سازوکاری که در مطالعات پیشین نیز به‌عنوان یکی از محرک‌های اصلی تشدید خشکی جوی در اقلیم‌های گرم و نیمه‌خشک گزارش شده است. (Soltani, et al; 2012) از آنجا که VPD به‌عنوان شاخص اصلی خشکی جو، نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل نرخ تبخیر-تعرق، تنش فیزیولوژیک پوشش گیاهی و تراز رطوبتی سطح زمین دارد (یوآن ۲۰۱۹)، افزایش همگن آن در مقیاس ملی دلالت بر تشدید فراگیر تنش آبی بر اکوسیستم‌های طبیعی، منابع آب سطحی و زیرزمینی و بخش کشاورزی کشور دارد. شواهد به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که ایران، مستقل از تفاوت‌های اقلیمی ناحیه‌ای، در مسیر گذار به شرایطی گرم‌تر با چالش‌های هیدرولوژیکی عمیق‌تر قرار گرفته است. در این چارچوب، به‌منظور حفظ انسجام تحلیلی و تمرکز بر شاخص‌ترین الگوهای شناسایی‌شده، تنها سه نمودار منتخب ارائه شده‌اند که به‌طور نماینده، طیف کامل پاسخ‌های اقلیمی مشاهده شده از روندهای خطی ساده تا تغییرات ساختاری و ناپیوسته را پوشش می‌دهند.

¹. Vapor Pressure Deficit - VPD



شکل ۳: نمودار حاصل از خروجی مدل هالت- وینترز برای دمای واقعی و دمای برازش یافته

همگرایی قدرتمند، تأثیر غیرقابل انکار یک

۴. نتیجه گیری

نیروی محرک در مقیاس بزرگ یعنی تغییر

اقلیم جهانی را بر خط پایه حرارتی ایران

تأیید می کند و جایگاه کشور را به عنوان

یکی از کانون های اصلی گرمایش جهانی

مستحکم می سازد. با این حال، در مقابل

این روند همگرا دمایی، تحلیل رطوبت

نسبی یک واگرایی عمیق و معنادار در

پاسخ های منطقه ای را آشکار ساخت که

ریشه در برهم کنش پیچیده فرآیندهای

این پژوهش، با تحلیل سری های زمانی دما

و رطوبت نسبی در پنج ایستگاه معرف

اقلیم های گوناگون ایران، تصویری

چندوجهی و پیچیده از پاسخ های

هیدروکلیماتیک کشور به فشارهای

گرمایشی معاصر ارائه می دهد. یافته فراگیر

و بنیادین این مطالعه، شناسایی یک

سیگنال گرمایشی پایدار و آماری معنادار

در تمامی مناطق، از اقلیم مرطوب خزری

تا بیابان فراخشک مرکزی است. این

ترمودینامیکی جهانی و سازوکارهای سینوپتیک و جغرافیایی محلی دارد. واگرایی در روندهای رطوبت، طیفی از پاسخ‌های اقلیمی را به نمایش گذاشت. ایستگاه یزد، با نمایش یک روند کاهشی خطی و قدرتمند در رطوبت نسبی، نمونه کلاسیک تشدید خشکی ترمودینامیکی در یک محیط بیابانی با منابع رطوبتی محدود است. در مقابل، ایستگاه‌های ساحلی مانند بندرانزلی، با وجود مجاورت با یک پیکره آبی عظیم، روندهای کاهشی ملایمی را تجربه می‌کنند که نشان می‌دهد پتانسیل خشک‌کنندگی اتمسفر ناشی از گرمایش، حتی بر تأثیر تعدیل‌کننده منابع تبخیری محلی نیز غلبه کرده است. پیچیده‌ترین دینامیک‌ها در ایستگاه‌های تبریز و زاهدان مشاهده شد. شواهد گرافیکی حاصل از آزمون‌های نرمالیتی، وجود تغییر رژیم اقلیمی و توزیع دوقله‌ای (Bimodal) را در سری زمانی رطوبت تبریز تأیید کرد که

نشان‌دهنده یک گذار رژیم اقلیمی ناگهانی به یک حالت پایدار و خشک‌تر است. در همین حال، الگوی U شکل رطوبت در زاهدان، بازتابی از یک دینامیک دوگانه است: یک دوره خشکی اولیه تحت حاکمیت گرمایش و یک دوره تثبیت و بازیابی نسبی در دهه‌های اخیر که احتمالاً ناشی از نفوذ دوره‌ای سامانه‌های مرطوب موسمی از جنوب است. این یافته‌ها دارای پیامدهای علمی و روش‌شناختی مهمی هستند. از منظر علمی، تفاوت بنیادین در پاسخ‌های هیدروکلیماتیک منطقه‌ای مؤید آن است که راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم در ایران نمی‌تواند یکپارچه و ملی باشد، بلکه نیازمند رویکردهای منطقه‌ای و مکان‌محور است. از دیدگاه روش‌شناختی، این مطالعه نشان داد که مدل‌های سری زمانی استاندارد مانند ARIMA، به دلیل ناتوانی در شناسایی و مدل‌سازی نالیستایی‌ها و شکست‌های ساختاری، برای

تحلیل اقلیم مناطق در حال گذار ناکافی
 هستند. ضرورت انجام پیش‌آزمون‌های
 تشخیصی دقیق (مانند تحلیل توزیع) و
 حرکت به سمت مدل‌های پیشرفته‌تر تغییر
 رژیم اقلیمی و تحلیل مداخله‌ای
 (Intervention Analysis) برای
 مطالعات آتی برجسته می‌شود. پیشنهاد
 می‌گردد تحقیقات آینده با بهره‌گیری از
 داده‌های شبکه‌بندی شده با وضوح بالا و
 مدل‌های اقلیمی فیزیکی، به بررسی
 سازوکارهای دینامیکی منجر به این
 تغییرات رژیم و ارزیابی کمی تأثیر آنها بر
 شاخص‌های کلیدی مانند کمبود فشار بخار
 (VPD) و تنش آبی در سراسر کشور
 بپردازند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی: این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان‌های تأمین مالی دریافت نکرده است.
تعارض منافع: طبق اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.
برگرفته از پایان نامه / رساله: این مقاله برگرفته از رساله درنا غفاری بوده است.

References

- Ahmadifar Vahdat, M., Dalirhasannia, R., Samadianfard, S., & Mohammadzadeh Tima, M. (2024). Investigation of the trend and prediction of the average maximum temperature in northwestern Iran using time series models. Journal of Water and Soil Knowledge, 24(1), 55–73. [In Persian].
- Baharvandi, N., Mojarad, F., & Masoompour, J. (2020). Identification of heat waves and analysis of their spatiotemporal changes in Iran. Applied

- Research of Geographical Sciences Journal, 20(59), 39–58. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/jgs.20.59.39>
- Barati, G., & Mousavi, S. Sh. (2005). Spatial displacement of winter heat waves in Iran. *Geography and Development*, 3(5), 41–52. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/431615/fa>
 - Beniston, M., & Diaz, H. F. (2004). The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change*, 44(1–4), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.06.006>
 - Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (Eds.). (2002). *Introduction to time series and forecasting*. New York, NY: Springer New York.
 - Ceccherini, G., Russo, S., Ameztoy, I., Marchese, A. F., & Carmona-Moreno, C. (2017). Heat waves in Africa 1981–2015: Observations and reanalysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(1), 115–125. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-115-2017>
 - Cowan, T., Purich, A., Perkins, S., Pezza, A., Boschat, G., & Sadler, K. (2014). More frequent, longer, and hotter heat waves for Australia in the twenty-first century. *Journal of Climate*, 27(15), 5851–5871. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00092.1>
 - Darand, M. (2014). *Identification and*

- spatiotemporal analysis of heat waves in Iran. Geography and Development, 12(35), 167–180. [In Persian]. <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1561>
- Dosio, A. (2017). Projection of temperature and heat waves for Africa with an ensemble of CORDEX Regional Climate Models. Climate Dynamics, 49(1), 493–519. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3355-5>
 - Esmailnezhad, M., Khosravi, M., Alijani, B., & Masoudian, S. A. (2013). Identification of heat waves in Iran. Geography and Development, 11(33), 39–53. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/77333/fa>
 - Ghavidel Rahimi, Y. (2011). Identification, classification, and synoptic analysis of the 2010 summer super heat wave in Iran. Journal of Geographical Studies of Arid Zones, 2(3), 85–100. [In Persian].
 - Gocheva, A., Trifonova, L., Marinova, T., & Bocheva, L. (2006). Extreme hot spells and heat waves on the territory of Bulgaria. Water Observation and Information System for Decision Support, 23, 26. <https://meteo.hr/SEECOF08/day2/2-17.pdf>
 - Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E., & Ford, A. (2018). Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. Environmental Research Letters, 13(3), 034009.

- <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>
- Hu, Y., Wang, W., Wang, P., Teuling, A. J., & Zhu, Y. (2024). Spatial-temporal variations and drivers of the compound dry-hot event in China. *Atmospheric Research*, 299, 107160. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107160>
 - Huth, R., Kysely, J., & Pokorná, L. (2000). A GCM simulation of heat waves, dry spells, and their relationships to circulation. *Climatic Change*, 46(1), 29–60. <https://doi.org/10.1023/A:1005633925903>
 - Jáuregui, E. (2009). The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, 70, 71–76. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000300005
 - Kadkhoda, A., Kamal, Z., Azar, M., Mazidi, V., & Dadashi-Roodbari. (2023). Heat stress projection in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble output. *Iranian Journal of Geophysics*, 17(2), 157–173. [In Persian].
 - Khosravi, M., Shoja, F., & Pakbaz, H. (2019). Investigation of moisture sources of summer precipitation events in southeastern Iran. *Scientific Quarterly of Water Resources Engineering*, 12(41), 127–144. [In Persian].
 - Kohansal, P., Zorar, A., Esmaeilpour, Gh., & Abdolrasoul, [Name/Initial missing]. (2012). Forecasting egg prices using ARIMA,

- artificial neural network, and Holt–Winters smoothing. *Journal of Business Research*, 62(1), 49–74. [In Persian]. <http://noo.rs/X6b29>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., & Huang, M. (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 (Vol. 2). Cambridge University Press.
 - Masoudian, A. (2003). Climatic regions of Iran. *Geography and Development*, 1(2), 171–184. [In Persian]. <https://doi.org/10.22111/gdij.2003.3821>
 - Mirhashemi, H., & Hasanvand, Z. (2022). The impact of teleconnection patterns on monthly precipitation at Khorramabad and Kermanshah stations. *Journal of Water and Soil Modeling*, 3(4), 133–151. [In Persian]. doi:10.22098/mmws.2022.11702.1159
 - Mohammadkhorshiddoost, A., Zanganeh, S., Zarei, Y., & Mahmoudi, S. (2017). Synoptic analysis of heat wave hazard in Northwest Iran. *Natural Geography*, 10(37), 1–14. [In Persian]. <https://doi.org/10.1001.1.20085656.1396.10.37.1.2>
 - Moradi, S., & Rezaei, B. (2024). Investigation of nocturnal temperature change trends in Iran and

- the effect of carbon dioxide. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 16(3), 105–122. [In Persian].
- Panda, D. K., AghaKouchak, A., & Ambast, S. K. (2017). Increasing heat waves and warm spells in India, observed from a multi-aspect framework. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(7), 3837–3858. <https://doi.org/10.1002/2016JD026292>
 - Pongrácz, R., Bartholy, J., & Bartha, E. B. (2013). Analysis of projected changes in the occurrence of heat waves in Hungary. *Advances in Geosciences*, 35, 115–122. <https://doi.org/10.5194/adgeo-35-115-2013>
 - Pourkarim Barabadi, R., & Heydari Monfared, Z. (2020). Evaluation of time series models for forecasting mean temperature in southern Iran (Case study: Yazd and Shiraz stations). *Climate Changes and Hazards*, 1(2), 164–189.
 - Rahmdel, M., Javanshiri, Z., & Sanaeinejad, S. H. (2022). Exploratory analysis and homogeneity detection of temperature and precipitation series of Iranian meteorological stations (1959–2018). *Iranian Journal of Geophysics*, 16(1), 213–233. [In Persian]. <https://doi.org/10.30499/ijg.2022.308829.1367>
 - Sankalp, S., Sahoo, B. B., & Sahoo, S. N. (2023). Uncertainty and sensitivity analysis of deep learning models for diurnal temperature range (DTR) forecasting over

- five Indian cities. Environmental Monitoring and Assessment, 195(2), 291.
- Shahriyari, H., Aghaei, A., & Nejadafrasiyabi, M. (2016). Forecasting financial time series using the multi-step Holt–Winters method. Financial Research, 18(3), 505–518. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jfr.2016.62453>
 - Shirgholami, H., & Ghahraman, B. (2005). Investigation of trends in annual mean temperature changes in Iran. Water and Soil Sciences (Agricultural Sciences and Natural Resources), 9(1), 9–25. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/368157/fa>
 - Soltani, A., Mirlatifi, S. M., & Dehghani Sanij, H. (2012). Estimation of reference evapotranspiration using limited meteorological data under different climatic conditions. Journal of Water and Soil, 26(1). [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.13637>
 - •Tavousi, T. (2000). Hydroclimatological causes of desertification (Case study: Gavkhouni basin margin) [Doctoral dissertation, Tarbiat Modares University]. [In Persian].
 - •Tohidisardasht, A., Jahanbakhsh Asl, S., Khorshiddoost, A. M., & Darand, M. (2025). Detection of diurnal temperature range (DTR) trend in West Azerbaijan Province. Nivar, 49(128–129), 133–144. [In Persian].

- <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.492022.1315>
- •Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100). Academic Press.
 - •Yan, Y., Qu, J., Hao, X. and Yue, S.)2017(. Characterizing spatial-temporal changes of heat waves in China using center of gravity analysis. Physical Geography, 38(4), pp.379-391. <https://doi.org/10.1080/02723646.2017.1294415>
 - Yazdnpanah, H., & Alizadeh, T. (2011). Estimation of the probability of heat waves with different recurrence periods in Kerman province using Markov chain. Geographical Research (Discontinued), 26(102), 51–72. [In Persian].
 - •Zampieri, M., Russo, S., Di Sabatino, S., Michetti, M., Scoccimarro, E., & Gualdi, S. (2016). Global assessment of heat wave magnitudes from 1901 to 2010 and implications for the river discharge of the Alps. Science of the Total Environment, 571, 1330–1339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.008>