

On the evolution of the frequency distribution of maximum temperature in Iran over the past four decades

Seyed Abolfazl Masoodian  1

1. Prof. of University of Isfahan

Article Info:

Article type:

Research Article

Date:

Received: 2025.05.26

Received: 2025.06.21

Accepted: 2025.06.26

Published:

Keywords:

Evolution, Frequency
Distribution, Maximum
Temperature, Iran

Abstract: Variation is an inherent characteristic of the climate. Over time, the change in the frequency distribution of the temperature at a location can reach a point where that location leaves behind its previous climate and accepts a new type of climate. In this case, the evolution of the temperature frequency distribution can be a suitable indicator of climate change. In hot and arid climatic regions such as Iran, where water resources are already very scarce, the evolution of the temperature frequency distribution can have significant consequences for water and energy demands. A detailed understanding of the changes that have occurred in the frequency of different temperature intervals across various points of Iran over time has been the goal of this research. To achieve this goal, daily maximum temperature reanalysis data (ERA5) for 44 years were evaluated using Singular Value Decomposition (SVD). This investigation showed that over the warmer parts of Iran, the frequency of temperatures below 20°C, and over the colder parts, the frequency of temperatures below 10°C, have decreased. In contrast to this decrease, over the warmer parts of Iran, the frequency of temperatures above 40°C, and over the colder parts, the frequency of temperatures above 30 degrees Celsius, have increased.

Cite this article: Masoodian, S, A. (2025). On the evolution of the frequency distribution of maximum temperature in Iran over the past four decades. *Climat Chenge and Climat Disasters*, 4(7), 54-74.

© The Author(s).

Homepage: cccd.znu.ac.ir

Publisher: University of Zanjan.



Extended Abstract

Introduction

Climate change manifests not merely as an increase in mean temperature but more fundamentally as a shift in the frequency distribution of temperature. It is this alteration in distribution that drives both changes in the mean and the intensification of extreme events. The scale parameter (variance) of the distribution plays a crucial role in determining the frequency of extremes, and its socio-economic and ecological impacts are at least as significant as those of the mean. In Iran, research has predominantly focused on trend analysis, often overlooking the more fundamental changes occurring within the temperature frequency distribution. This study aims to address the question: Over the past four decades (1979-2022), which maximum temperature categories have experienced changes in frequency, in which parts of Iran, and to what extent?

Data and Methods

Daily maximum temperature data were obtained from the ERA5 reanalysis dataset with a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ for the domain covering Iran ($25-40^\circ\text{N}$, $44-64^\circ\text{E}$) over a 44-year period (16,071 days). The temperature range, from -23°C to 54°C , was divided into 77 bins of 1°C width. For each grid cell, the annual frequency of occurrences within each temperature bin was calculated and converted to a relative percentage frequency. This process resulted in a four-dimensional array (location $\times$ location $\times$ temperature $\times$ time). To facilitate analysis, this array was reduced to a two-dimensional matrix of dimensions 4941 (grid cells) $\times$ 3388 (temperature bin-

years) by merging spatial dimensions and then the temperature-time dimensions. This matrix was centered by subtracting the spatially weighted mean of each column. Singular Value Decomposition (SVD) was then applied to this centered matrix to extract the dominant spatial patterns and their corresponding temporal evolution patterns of the frequency distribution.

Findings and Results

The spatially weighted mean of the frequency distribution revealed that temperatures between 20°C and 35°C have been the most frequent throughout all years. Notably, since 1998, high-frequency cores ($>3.5\%$) have emerged for the $30-35^\circ\text{C}$ temperature range, indicating an increasing prevalence of these temperatures across the country. The long-term (spatio-temporal) mean distribution exhibited a bimodal pattern, with peaks around 22°C and 33°C .

Examining the temporal evolution of Iran's temperature frequency distribution clearly shows a warm shift. The national mean maximum temperature increased from 23.0°C in the first half of the period (1979-2000) to 24.5°C in the second half (2001-2022). A comparison of these two halves demonstrates a decrease in the frequency of all temperatures below 25°C and an increase for all temperatures above 25°C . The most substantial increase was observed for the $37-40^\circ\text{C}$ range, while the most significant decrease occurred for temperatures near 0°C .

The SVD results, based on the first left singular vector, partitioned Iran into two main climatic regions: the high-elevation areas with negative values ("Cold Iran") and the low-elevation areas with positive values ("Warm Iran"). The corresponding

first right singular vector delineated the temperature evolution patterns, showing that temperatures near 10°C are most frequent in "Cold Iran", while those near 40°C dominate in "Warm Iran". This first mode explained nearly 29% of the total variance.

Further analysis of these regions revealed distinct changes. In "Cold Iran", the frequency of temperatures below 10°C has decreased, while that of temperatures above 30°C has increased. In "Warm Iran", the frequency of temperatures below 20°C has decreased, concurrent with an increase in the frequency of temperatures exceeding 40°C. These findings underscore that the warming pattern is not spatially uniform, with cold and warm regions experiencing different shifts in their temperature frequency distributions.

Conclusion

Over the past four decades, the maximum temperature frequency distribution of Iran has undergone a significant evolution. This evolution is characterized by a

decline in the frequency of mild and cold temperatures and a marked increase in the frequency of warm and extremely hot temperatures. The 1.5°C rise in the national mean temperature is a direct consequence of a 4.6% increase in the frequency of summer days ($T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) and an equivalent decrease in cooler days. In coastal areas of the Oman Sea, the frequency of such summer days now exceeds 80%. Concurrently, the frequency of icy days ($T_{max} \leq 0^{\circ}\text{C}$), critical for sustaining the country's snow-dependent water resources, has decreased by approximately 1.3%, signaling reduced snow cover and heightened water stress. These profound changes pose serious challenges for the current demographic plans, water and energy resource management, and underscore the urgent need for adaptive strategies to cope with Iran's emerging climate regime.

Keywords:

Evolution, Frequency Distribution, Maximum Temperature, Iran



دانشگاه زنجان

دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی

شاپا چاپی: ۵۵۱-۲۷۸۳

فرگشت توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران در چهار دهه گذشته

سیدابوالفضل مسعودیان

۱. استاد دانشگاه اصفهان

اطلاعات مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ‌ها:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵

انتشار:

واژگان کلیدی:

فرگشت، توزیع فراوانی، دمای

بیشینه، ایران

چکیده: دگرگونی ویژگی نهادین اقلیم است. در گذر زمان تغییر توزیع فراوانی دما در یک محل می‌تواند به جایی برسد که آن محل اقلیم پیشین خود را ترک گفته و گونه تازه‌ای از اقلیم را بپذیرد. در این صورت فرگشت توزیع فراوانی دما می‌تواند نماینده بسیار شایسته‌ای برای تغییر اقلیم باشد. در قلمروهای اقلیمی گرم و خشکی مانند ایران که از پیش منابع آب بسیار کمیاب است فرگشت توزیع فراوانی دما می‌تواند پیامدهای بزرگی برای نیازهای آبی و انرژی داشته باشد. شناخت تفصیلی تغییراتی که در فراوانی دماهای مختلف نقاط مختلف ایران در گذر زمان رخ داده، هدف این پژوهش بوده است. برای دستیابی به این هدف داده‌های باز کاوی دمای بیشینه روزانه ERA5 برای ۴۴ سال به روش تجزیه مقادیر تکین ارزیابی شد. این بررسی نشان داد بر روی بخش‌های گرم‌تر ایران فراوانی دماهای زیر ۲۰ درجه سلسیوس و بر روی بخش‌های سردتر فراوانی دماهای زیر ۱۰ درجه سلسیوس کاهش یافته است. در برابر این کاهش، بر روی بخش‌های گرم‌تر ایران فراوانی دماهای بالای ۴۰ درجه سلسیوس و بر روی بخش‌های سردتر فراوانی دماهای بالای ۳۰ درجه سلسیوس افزایش یافته است.

استناد: مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۴۰۴). فرگشت توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران در چهار دهه گذشته. دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی، ۴(۷)، ۵۴-۷۴.

© نویسندگان.

Homepage: cccd.znu.ac.ir

ناشر: دانشگاه زنجان



۱. مقدمه

وردش‌پذیر، شایسته‌ترین و برآورده‌ترین صفتی است که می‌توان به اقلیم داد. وردش‌پذیری اقلیم می‌تواند ریشه در واداشت‌های طبیعی، واداشت‌های انسانی یا فرایندهای غیرخطی درون خود دستگاه اقلیم داشته باشد و در مقیاس‌های زمانی و مکانی گوناگون رخ دهد (Shi et al, 2022). تغییر توزیع فراوانی دما یکی از این وردش‌ها است و نه تنها می‌تواند چگونگی گرمایش جهانی را آشکار سازد بلکه به دلیل کنشگری بی‌چون و چرایی که دما با دیگر متغیرهای محیطی دارد می‌تواند ریشه بسیاری از تغییرات محیطی دیگر را نیز روشن سازد. پس در تکمیل سخن Sanches et al, 2023 که مدعی هستند افزایش میانگین دمای جهان می‌تواند به تغییر شدت، مدت و فراوانی فرین‌ها بیانجامد می‌توان گفت که تغییر میانگین دما و همچنین تغییر شدت، مدت و فراوانی

فرین‌ها هر دو ریشه در تغییر توزیع فراوانی دما دارند. پس چنان که Supian and Hasan, 2021 گفته‌اند دقیق‌تر آن است که بگوییم تغییری کوچک در میانگین دما ناشی از تغییراتی شگرف در فراوانی‌ها است. آشکارسازی تغییراتی که در توزیع فراوانی دما رخ می‌دهد می‌تواند به کشف زود هنگام افزایش میانگین دما و افزایش فرین‌ها کمک کند. انگاره آماری فرین‌ها نیز نشان می‌دهد که فراوانی فرین‌ها بیش از آن که به میانگین (فراسنج مکان) توزیع وابسته باشد به پراش (فراسنج مقیاس) توزیع وابسته است (Alam et al, 2018). پس پراش اگر از میانگین مهم‌تر نباشد کم اهمیت‌تر هم نیست و البته که هر دو فراسنج بر جوامع بشری اثرگذاری بزرگی دارند (Shi et al, 2022) و هر دو فراسنج نماینده چگونگی توزیع فراوانی داده‌ها هستند.

رویدادهای فرین اقلیمی نوعاً به رویدادهای ویژه‌ای گفته می‌شود که از کرانه‌های بالا و پایین میانگین‌های اقلیمی بسیار فراتر می‌روند (Li et al, 2024). افزایش شدت، مدت و فراوانی فرین‌های دمایی پیامد تغییر توزیع فراوانی دما است و تغییر فرین‌ها آشکارترین نمود تغییر اقلیم در نزد افکار عمومی است؛ زیرا شگرف‌ترین اثر را بر زیست‌بوم و همچنین بر فعالیت‌های انسانی دارد (Milovanović et al, 2023). به راستی هزینه‌هایی که تغییرپذیری دما بر اقتصاد جوامع تحمیل می‌کند از هزینه‌هایی که تغییر میانگین دما به بار می‌آورد زیادتر است (Linsenmeier, 2023). این است که شناخت تغییر پراش اقلیم به اندازه شناخت تغییر میانگین‌ها برای جوامع بشری ارزشمند است (Rehfeld et al, 2018).

دمای بیشینه و کمینه هر محل وابسته به چگونگی جریان هوا در همان محل است (Grace and Curran, 1993). از سوی دیگر تغییر نایکدست دما در مقیاس جهانی سبب تغییر شیو نصف‌النهاری دما و در پی آن تغییر الگوی گردش هوا و در نتیجه تغییر فرین‌های دمایی و بارشی می‌شود. هم‌چنان که مثلاً Sukhonos and Vyshkvarkova, 2023 اثر نوسان اطلس شمالی بر فرین‌های دمایی و بارشی اروپای غربی را نشان داده‌اند. چالش بزرگ این جا است که نمی‌دانیم تغییراتی که در مقیاس جهانی رخ می‌دهند چه پیامدهایی در مقیاس محلی خواهند داشت (Guirguis et al, 2018). این چالش زمانی سنگین‌تر می‌شود که در نظر آوریم بررسی‌های محلی و منطقه‌ای نیازمند داده‌های خوش‌تفکیک (چگالی مکانی زیاد) هستند در حالی که کیفیت و چگالی داده‌ها در مقیاس‌های خرد ناچیز است (González et al, 2022). اینجا است که داده‌های بازکای قابل اعتماد

وضعیت کنونی منابع آب و انرژی ناگزیر
است.

ارزش خود را در بررسی‌های محلی و
منطقه‌ای نشان می‌دهند (Hersbach et
al, 2020).

۲. داده‌ها و روش‌ها

۲.۱. داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

داده‌های شبکه‌ای دمای بیشینه روزانه
(ERA5 Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, 2024) از
۱۳۵۸/۰۱/۰۱ تا ۱۴۰۱/۱۲/۲۹ به مدت
۴۴ سال (۱۶۰۷۱ روز) و بر روی چهارچوب
۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی (۶۱ مدار) و ۴۴ تا
۶۴ درجه شرقی (۸۱ نصف‌النهار) یعنی
شبکه‌ای به ابعاد ۶۱×۸۱ با تفکیک مکانی
 $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ درجه بازیابی شد (شکل ۱). به
این ترتیب آرایه سری زمانی دمای بیشینه
به ابعاد $۱۶۰۷۱ \times ۶۱ \times ۸۱$ به دست
آمد (T_{max}). در این پژوهش هر جا واژه
سرزمین به کار رفته سراسر همین پهنه را
در نظر داشته‌ایم و هر جا سرزمین ایران
گفته شده تنها گستره درون مرز خاک

در ایران چنان به روند دما پرداخته شده که
جای چندانی برای بررسی جهش و نیز
بررسی تغییرات توزیع فراوانی دما نمانده
است. این در حالی است که بررسی تغییر
توزیع فراوانی دما نسبت به بررسی روند دما
بررسی بنیادی‌تری است چرا که با
شناسایی تغییرات توزیع فراوانی دما می-
توان به روند دما پی برد اما عکس آن
چندان ساده نیست. این است که در این
پژوهش کوشیده‌ایم تا به این پرسش پاسخ
دهیم که در گذر چهار دهه گذشته فراوانی
کدام دماهای بیشینه در کدام بخش‌های
ایران و به چه اندازه تغییر کرده است؟ پاسخ
به این پرسش به ویژه به دلیل وضعیت هرم
سنی کشور از یک سو و سیاست‌های کلان
اسکان جمعیت از سوی دیگر و همچنین

شمارش شد. به این ترتیب سری زمانی دمای بیشینه ($T_{max16071 \times 61 \times 81}$) به فراوانی سالانه دمای بیشینه ($\dot{F}_{61 \times 81 \times 77 \times 44}$) تبدیل شد. با بخش کردن فراوانی مطلق ($\dot{F}$) به مجموع فراوانی هر یک از بازه‌های دمایی، درصد فراوانی (PF) به دست آمد (رابطه یک).

(۱)

$$PF = \frac{\dot{F}}{\sum_{0}^{77} \dot{F}} \times 100$$

ارائه درصد فراوانی آرایه‌ای است چهار بعدی که دو بعد آن مکان (۶۱ عرض جغرافیایی و ۸۱ طول جغرافیایی)، یک بعد آن دسته‌های دمایی (۷۷ دسته از ۲۳- تا ۵۴ درجه سلسیوس) و یک بعد آن زمان (۴۴ سال از ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۱) است. اگر بخواهیم به این پرسش پاسخ دهیم که فراوانی کدام دسته‌های دمایی در کجای ایران در طی ۴۴ سال گذشته تغییر کرده است باید بتوان این آرایه چهار بعدی را به

اصلی ایران منظور بوده است. پایین‌ترین دمای بیشینه سرزمین در این بازه زمانی در تاریخ ۱۴۰۱/۱۰/۲۳ بر روی نقطه‌ای به عرض ۳۵/۵ درجه شمالی و طول ۶۳/۰ درجه شرقی در شمال شرق هرات به مقدار ۲۲/۴- درجه سلسیوس و بالاترین دمای بیشینه سرزمین در تاریخ ۱۳۹۶/۰۳/۰۸ بر روی نقطه‌ای به عرض ۲۵/۷۵ درجه شمالی و طول ۶۲/۵ درجه شرقی در شمال شرق گوادر به مقدار ۵۳/۹ درجه سلسیوس دیده شده است. این بازه دمایی با گشودگی یک درجه سلسیوس ۷۷ دسته دمایی از ۲۳/۰- تا ۵۴/۰ درجه سلسیوس را می‌سازد.

۲.۲. روش‌ها

از آنجا که هدف از این پژوهش بررسی وردش‌های توزیع فراوانی دمای بیشینه است باید سری زمانی دمای بیشینه را بر فراوانی دمای بیشینه نگاشت. پس، فراوانی سالانه دمای بیشینه هر یک از یاخته‌ها برای هر یک از ۷۷ دسته دمایی یاد شده

آرایه‌ای دو بعدی فروکاست و پردازش کرد.

روابط دو و سه مراحل این فروکاست را

نشان می‌دهند. چنان که می‌بینید پس از

تبدیل فراوانی مطلق به فراوانی نسبی، دو

بعد طول و عرض در یک بعد ادغام و آرایه

فراوانی نسبی از چهاربعدی به سه بعدی

تبدیل شد. در گام دوم همه دسته‌های

دمایی یک سال معین کنار هم چیده شد و

دو بعد دسته‌های دمایی و سال نیز در هم

ادغام شد. پس در این گام آرایه فراوانی

نسبی از سه بعد به دو بعد فروکاسته شد.

در گام فرجامین فراوانی نسبی هر یک از

ستون‌ها از میانگین وزنی مکانی همان

ستون کسر شد تا آرایه مرکزی شده فراوانی

نسبی به دست آید (F). مرکزی سازی

داده‌ها کمک می‌کند تا وردش‌های فراوانی

نسبی هر یاخته در گذر زمان نسبت به

وضعیت متوسط مکان (یعنی میانگین

سراسر سرزمین) ارزیابی شود.

(۲)

$$\dot{F}_{61 \times 81 \times 77 \times 44} \rightarrow PF_{61 \times 81 \times 77 \times 44}$$

$$PF_{61 \times 81 \times 77 \times 44} \rightarrow PF_{4941 \times 77 \times 44}$$

(۳)

$$PF_{4941 \times 77 \times 44} \rightarrow PF_{4941 \times 3388}$$

$$PF_{4941 \times 3388} \rightarrow F_{4941 \times 3388}$$

از آنجا که از مجموع ۴۹۴۱ یاخته موجود

۲۴۸۸ یاخته در مرز سیاسی خشکی اصلی

ایران جا می‌گیرد هر جا از ایران سخن

گفته‌ایم تنها همین یاخته‌ها در پردازش

دمایی ایران منظور شده‌اند.

برای شناسایی الگوهای مکانی و الگوهای

زمانی توزیع فراوانی دمای بیشینه از روش

تجزیه مقادیر تکین (SVD^1) بهره برده‌ایم.

این روش را بر روی آرایه مرکزی شده

توزیع فراوانی دمای بیشینه ($F_{4941 \times 3388}$)

اعمال و الگوهای مکانی و زمانی توزیع دما

را استخراج کردیم (شکل ۲). در اینجا

¹. Singular Value Decomposition

ویژگی‌های این روش را شرح می‌دهیم (Strang, 2023). تجزیه بردار یک متعامد در تبو این بار در تمت به دو دسته بردار یک متعامد نیاز داریم:

مقادیر تکین (تمت) بسط روش (۴)

$$F = U \Sigma V^T$$

ارائه قطری مقادیر تکین است؛ V^T آرایه

بردارهای یک متعامد و پایه‌های فضای

سطری است و دسته بردار تکین راست

نامیده می‌شود؛ U آرایه بردارهای یک

متعامد و پایه‌های فضای ستونی است و

دسته بردار تکین چپ نامیده می‌شود.

ویژگی‌های این روش را شرح می‌دهیم (Strang, 2023). تجزیه

مقادیر تکین (تمت) بسط روش

تجزیه بردارهای ویژه به شمار می‌آید

و بر خلاف تجزیه بردارهای ویژه (تبو) که

تنها بر روی آرایه‌های مربعی متقارن انجام-

پذیر است بر روی هر آرایه‌ای انجام‌پذیر

است؛ از این گذشته به جای یک دسته



شکل ۱: یاخته‌های پایگاه داده ERA5 با تفکیک مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ درجه‌ی قوسی.

تنها یاخته‌های درون ایران نمایش داده شده‌اند.

مقادیر تکین، مثبت و یکنوا نزولی هستند و مربع آنها متناسب با پراش تبیین شده توسط هر بردار تکین است. بردارهای تکین راست و چپ وظیفه چرخش یا احیاناً بازتابش و مقادیر تکین وظیفه کشش را بر دوش دارند. به بیان دیگر بردارهای تکین چپ و راست دستگاه مختصات را در جهت بیشترین پراش داده‌ها می‌چرخانند و مقادیر تکین دستگاه مختصات تازه را که از چرخش دستگاه پیشین به دست آمده در راستای بیشترین پراش کشش می‌دهند درست همان گونه که از ضرب یک بردار در یک مقدار نرده‌ای بردار کشیده یا فشرده می‌شود. به این شیوه اطمینان می‌یابیم که داده‌های توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران در دستگاه مختصات تازه چنان چیده می‌شوند که پراش تبیین شده توسط هر بعد از این دستگاه مختصات بزرگتر یا برابر بعد بعدی است. در این صورت تمام پراش داده‌های اولیه تبیین می‌شود؛ ابعاد دستگاه تازه مستقل از یکدیگر هستند و بر خلاف داده‌های اولیه حاوی اطلاعات مشترک نیستند؛ و پراش در دستگاه تازه پلکانی است و در نتیجه بیشترین مقدار اطلاعات در تعداد کمتری از ابعاد گردآمده و به سبب کاهش ابعاد تفسیر داده‌ها ساده‌تر می‌شود. سرانجام آن که در دستگاه تازه الگوهای مکانی در یک آرایه و الگوهای فرگشت دمایی متناظر با آنها در آرایه دیگر گرد می‌آیند و در نتیجه الگوهای مکانی و الگوهای فرگشت دمایی از هم تفکیک می‌شوند. پس با تجزیه F به بردارهای تکین راست و چپ الگوهای مکانی و الگوهای فرگشت زمانی توزیع فراوانی دما به ترتیب اهمیت آشکار می‌شوند (شکل ۲).

$$T_{max} 16071 \times 61 \times 81$$

$$\text{freq_ann(Data , Date)}:$$

$$\dot{F}_{61 \times 81 \times 77 \times 44}$$

$$PF_{61 \times 81 \times 77 \times 44}$$

$$PF_{4941 \times 77 \times 44}$$

$$PF_{4941 \times 3388}$$

$$F_{4941 \times 3388}$$

$$F = U \Sigma V^T$$

شکل ۲: مراحل پردازش داده‌ها

۳. یافته‌ها و نتایج

از دل آنها پدیدار می‌شوند آب و هوا نیز در گذر زمان یکسان نمی‌ماند و دگرگونی می‌پذیرد. در گذر این فرگشت هر سرزمین آب و هوای گذشته خود را پس پشت می‌گذارد و آرام آرام یا به تندی آب و هوای دیگری را می‌پذیرد. یکی از بارزترین نمودهای این فرگشت، دگرگونی توزیع فراوانی دما در گذر زمان است. آن چه به نام تغییر اقلیم از آن یاد می‌شود به بارزترین شیوه در چهره همین تغییر توزیع فراوانی نمایان

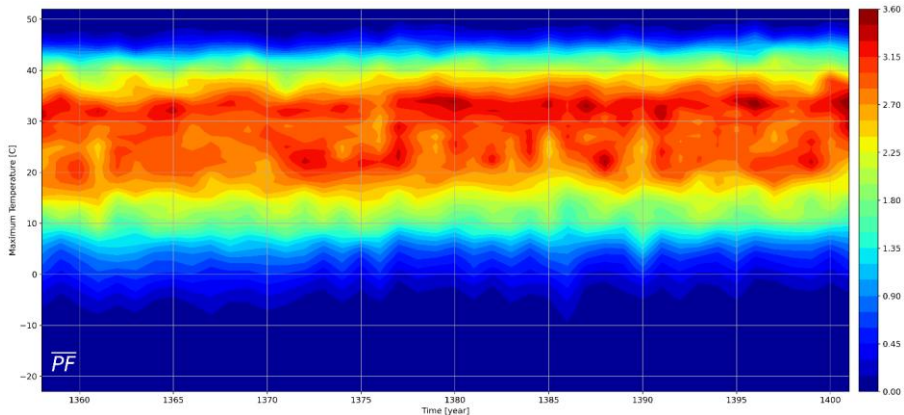
هدف این پژوهش آن است که نشان دهیم در گذر ۴۴ سال گذشته (۱۳۵۸-۱۴۰۱) در کجای ایران فراوانی کدام دماهای بیشینه افزایش و فراوانی کدام دماهای بیشینه کاهش یافته است. به بیان دیگر به دنبال شناسایی فرگشت توزیع فراوانی دمای بیشینه بر روی سرزمین هستیم. همچنان که هر گونه‌ای از جانداران در گذر روزگار دگرگون می‌شوند و گونه‌هایی تازه

می‌شود. اما هرگاه از تغییر سخن می‌گوییم
جای این پرسش هست که تغییر نسبت به
چه؟ چه چیز را معیار و هنجار به شمار
آوریم و آنگاه تغییر را نسبت به آن
بسنجیم؟ اگر بخواهیم فرگشت توزیع
فراوانی بر گستره یک پهنه را ارزیابی کنیم
چه هنجاری بهتر از میانگین توزیع فراوانی
بر روی همان سرزمین را می‌توان برگزید.
اگر آرایه $PF_{4941 \times 3388}$ را در نظر بیاورید
که سطرهای آن نماینده نقاط مختلف
سرزمین هستند با محاسبه میانگین روی
محور سطرها هنجار توزیع فراوانی دمای
بیشینه به دست می‌آید. چون ۳۳۸۸ درایه
بردار به دست آمده حاصل ضرب ۷۷ دسته
دمایی در ۴۴ سال آماری است با تغییر
چیدمان این بردار می‌توان آرایه‌ای دو بعدی
ساخت که زمان یکی از ابعاد و دما بعد دیگر
آن باشد ($\overline{PF}_{77 \times 44}$). چون یاخته‌ها بر
حسب درجه قوسی (۲۵/۰ درجه) تعریف
شده‌اند اندازه آنها تابعی از کسینوس عرض

جغرافیایی است و بنابر این در محاسبه
میانگین مکانی باید میانگین وزنی را به کار
برد و روشن است که وزن مقادیر همان
کسینوس عرض جغرافیایی است. آرایه‌ای
که به این شیوه به دست می‌آید نشان می‌دهد
که در گذر ۴۴ سال گذشته میانگین
مکانی فراوانی هر دسته دمایی چگونه
دگرگونی پذیرفته است (شکل ۳). بررسی
این آرایه چند نکته را روشن می‌سازد. یکی
این که در همه سال‌ها دماهای بین ۲۰ تا
۳۵ درجه سلسیوس بیش‌ترین فراوانی را
داشته‌اند. پس این دماها هنجار سرزمین به
شمار می‌آیند (شکل ۳). دوم و مهم‌تر از آن
این که از سال ۱۳۷۷ بدین سو هسته‌های
فراوانی بیش از ۳/۵ درصد برای دماهای
بین ۳۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس پدیدار
شده‌اند در حالی که پیش از سال ۱۳۷۷
فراوانی این دسته از دماها هرگز به ۳/۵
درصد نمی‌رسید (شکل ۳). به سخن دیگر
افزایش فراوانی دماهای ۳۰ تا ۳۵ در گذر

۴۴ سال گذشته از ویژگی‌های عمومی

سرزمین است.

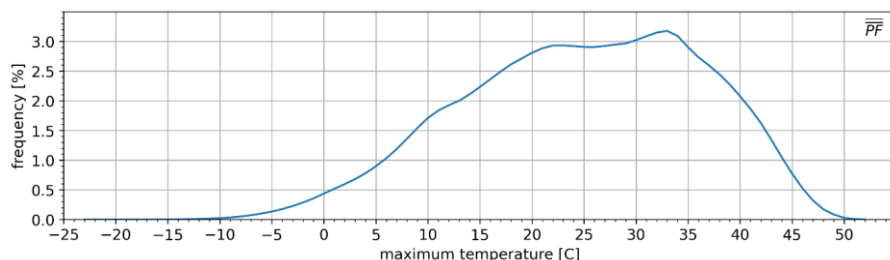


شکل ۳: میانگین وزنی مکانی درصد فراوانی رخداد دمای بیشینه. مکان ۲۵ تا ۴۰ درجه

شمالی؛ ۴۴ تا ۶۴ شرقی

اگر از آرایه میانگین مکانی ($\overline{PF}_{77 \times 44}$) بر
 روی بعد زمان هم میانگین بگیریم بعد
 زمان هم کنار می‌رود ($\overline{PF}_{77}$) و می‌توان از
 میانگین بلندمدت توزیع فراوانی دمای
 بیشینه سرزمین سخن گفت (شکل ۴).
 بردار $\overline{PF}$ نشان می‌دهد که توزیع فراوانی
 دمای سرزمین دونمایی است. در جایگاه-
 های گرم دماهای نزدیک به ۳۳ درجه
 سلسیوس و در جایگاه‌های سرد دماهای
 نزدیک به ۲۲ درجه سلسیوس فراوان-
 ترند (یادداشت: چون $\overline{PF}$ هم میانگین
 مکانی و هم میانگین زمانی داده‌ها است و
 دو خط روی حروف نیز برای اشاره به همین
 واقعیت است؛ به کار بردن واژه جایگاه در
 واقع برای اشاره به همین مفهوم
 مکانی (جای) و زمانی (گاه) $\overline{PF}$ است). از
 این گذشته دماهای زیر صفر با فراوانی کم-
 تر از ۱/۵ درصد نمایانگر چیرگی آب و

هوایی گرم بر این سرزمین است. میانگین
سرزمین ایران $23/8$ درجه سلسیوس است
بلندمدت دمای بیشینه سرزمین $25/0$
که نشان از اثر تعدیلی ناهمواری های ایران
درجه سلسیوس است که همین مقدار برای
بر دمای بیشینه دارد.

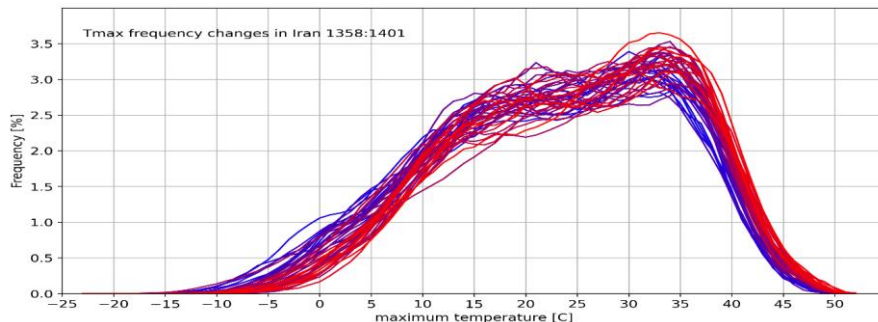


شکل ۴: میانگین مکانی و زمانی درصد فراوانی رخداد دمای بیشینه. مکان 25 تا 40 درجه شمالی؛ 44 تا 64 شرقی. زمان $1358-1401$

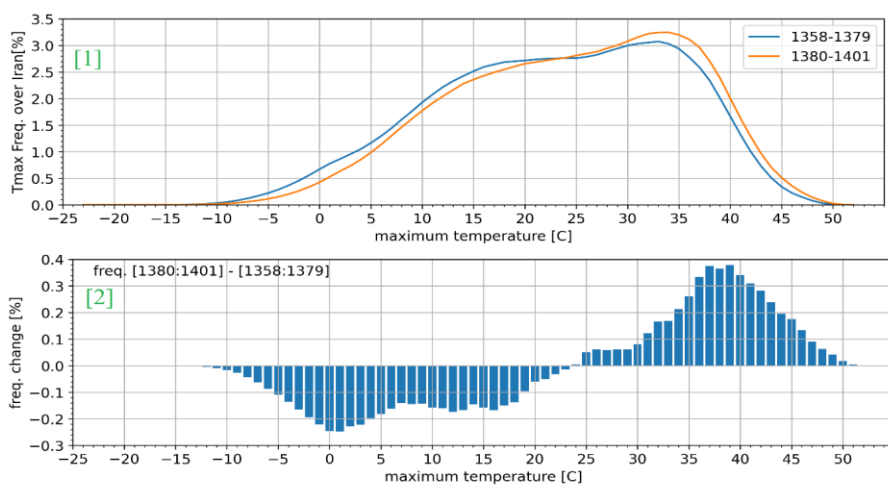
اگر فرگشت توزیع فراوانی دمای بیشینه را
نیمه نخست دوره ($1358-1379$) بررسی
بر روی سرزمین ایران سال به سال بررسی
شده $23/0$ درجه سلسیوس بوده در نیمه
کنیم جابجایی به راست فراسنج مکان
دوم ($1380-1401$) به $24/5$ درجه
توزیع آشکار می شود (شکل ۵). نتیجه این
سلسیوس رسیده است.
جابجایی آن است که از فراوانی دماهای
این دو نیمه را با هم بسنجیم خواهیم دید
سرد کاسته شده و به فراوانی دماهای گرم
که از فراوانی همه دماهای سردتر از 25
افزایش می شود نتیجه
درجه سلسیوس کاسته و به فراوانی همه
همین جابجایی است. روشن تر بگوییم که
دماهای گرم تر از 25 درجه سلسیوس
بر اثر این جابجایی نمودار توزیع فراوانی،
تا 37 دماهای (شکل ۶).
میانگین دمای بیشینه سرزمین ایران که در
 40 درجه بیشترین افزایش فراوانی و

دماهای نزدیک به صفر بیشترین کاهش

فراوانی را از سر گذرانده‌اند.



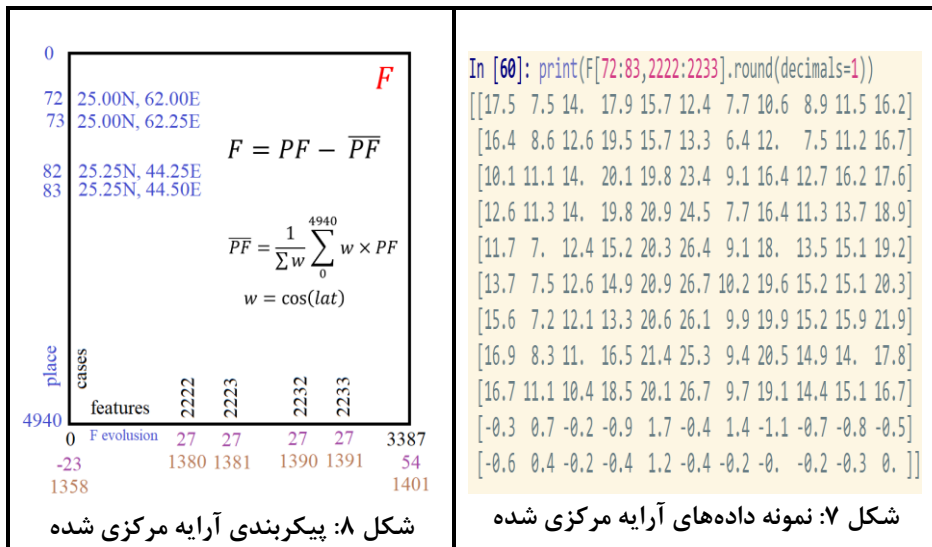
شکل ۵: فرگشت توزیع فراوانی دمای بیشینه بر روی ایران در گذر زمان از ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۱. سال‌های دورتر به رنگ آبی‌تر و سال‌های نزدیک‌تر به رنگ سرخ‌تر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۶: تغییر توزیع فراوانی دمای بیشینه بر روی ایران. نیمه نخست و نیمه دوم دوره آماری (۱). تفاضل دو نیمه (۲).

شایسته است که هر بخش از سرزمین بسته به عوامل اثرگذار بر دمای همان بخش الگوهای فرگشت زمانی توزیع فراوانی دمای بیشینه متفاوتی داشته باشند. شناسایی سرزمین‌هایی که الگوهای یکسانی نشان می‌دهند نیازمند تجزیه آرایه مکان-الگوی فرگشت ($F_{4941 \times 3388}$) به دو آرایه مکان و الگوی فرگشت دما است. تجزیه مقدار تکین امکان تفکیک الگوهای مکانی و الگوهای فرگشت دما را فراهم می‌سازد. هر سطر از F فرگشت هر یک از دسته‌های دمایی در بین سال‌های ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۱ را نشان می‌دهد (شکل ۷ و ۸). برای نمونه سطر ۷۲ نماینده فرگشت دما بر روی مکانی به مختصات ۲۵ درجه شمالی و ۶۲ درجه شرقی است. ستون ۲۲۲۲ همین سطر نماینده فراوانی مرکزی شده دمای ۲۷ درجه سلسیوس در سال ۱۳۸۰ است. عدد ۱۷/۵ درصد که بر روی سطر ۷۲ و

ستون ۲۲۲۲ از آرایه F ثبت شده به این معناست که در سال ۱۳۸۰ فراوانی دمای ۲۷ درجه سلسیوس بر روی یاخته ۲۵ درجه شمالی و ۶۲ درجه شرقی ۱۷/۵ درصد بیش از میانگین سرزمینی همین دما در همین سال بوده است. عدد ستون بعد نماینده وضعیت همین مکان برای همین دما اما برای سال بعد (۱۳۸۱) است. پس هر پاره ۴۴ تایی از ستون‌های آرایه F فرگشت یکی از دسته‌های دمایی را نشان می‌دهد. از این رو آرایه بردارهای تکین چپ نماینده الگوهای مکانی و آرایه بردارهای تکین راست نماینده الگوهای فرگشت توزیع فراوانی دمای بیشینه خواهند بود. باید افزود که برای به تصویر کشیدن الگوهای فرگشت، هر یک از بردارهای تکین راست را با تفکیک زمان از دسته‌های دمایی باز به آرایه دوبعدی بازمی‌گردانیم.

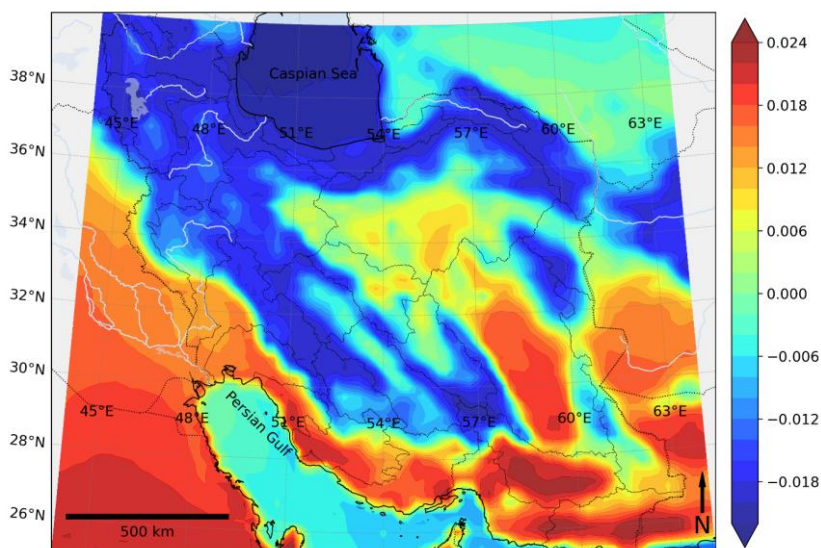


شکل ۷: نمونه داده‌های آرایه مرکزی شده

```
In [60]: print(F[72:83,2222:2233].round(decimals=1))
[[17.5 7.5 14. 17.9 15.7 12.4 7.7 10.6 8.9 11.5 16.2]
 [16.4 8.6 12.6 19.5 15.7 13.3 6.4 12. 7.5 11.2 16.7]
 [10.1 11.1 14. 20.1 19.8 23.4 9.1 16.4 12.7 16.2 17.6]
 [12.6 11.3 14. 19.8 20.9 24.5 7.7 16.4 11.3 13.7 18.9]
 [11.7 7. 12.4 15.2 20.3 26.4 9.1 18. 13.5 15.1 19.2]
 [13.7 7.5 12.6 14.9 20.9 26.7 10.2 19.6 15.2 15.1 20.3]
 [15.6 7.2 12.1 13.3 20.6 26.1 9.9 19.9 15.2 15.9 21.9]
 [16.9 8.3 11. 16.5 21.4 25.3 9.4 20.5 14.9 14. 17.8]
 [16.7 11.1 10.4 18.5 20.1 26.7 9.7 19.1 14.4 15.1 16.7]
 [-0.3 0.7 -0.2 -0.9 1.7 -0.4 1.4 -1.1 -0.7 -0.8 -0.5]
 [-0.6 0.4 -0.2 -0.4 1.2 -0.4 -0.2 -0. -0.2 -0.3 0. ]]
```

و دیگری بخش‌هایی که مقادیر بردار آن‌ها مثبت است و عمدتاً منطبق بر دماهای نزدیک به چهل درجه سلسیوس است (شکل ۱۰). از این دو شکل دو نتیجه اساسی به دست می‌آید. یکی این که فراوان‌ترین دما در بخش سرد سرزمین (بخش‌های آبی رنگ شکل ۸) دماهای نزدیک به ده درجه سلسیوس و فراوان‌ترین دما در بخش‌های گرم سرزمین (بخش‌های سرخ رنگ شکل ۹) دماهای نزدیک به چهل درجه سلسیوس هستند.

نخستین بردار تکین چپ تمت نشان می‌دهد که سرزمین به دو بخش افرازپذیر است. بخش‌هایی که بردار تکین چپ آن‌ها منفی است و عمدتاً منطبق بر سرزمین‌های پرارتفاع است و دیگری بخش‌هایی که بردار تکین چپ آن‌ها مثبت و عمدتاً منطبق بر سرزمین‌های کم‌ارتفاع است (شکل ۹). نخستین بردار تکین راست نیز به دو بخش افراز می‌شود. یکی بخش‌هایی که مقادیر بردار آن‌ها منفی است و عمدتاً منطبق بر دماهای نزدیک به ده درجه سلسیوس است

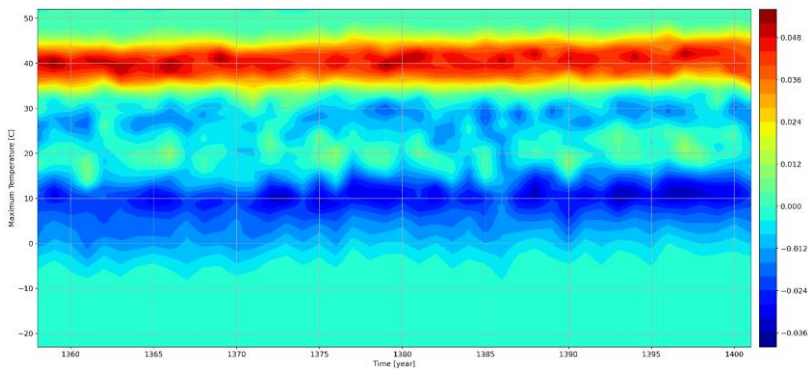


شکل ۹: نخستین الگوی مکانی. نخستین بردار تکین چپ

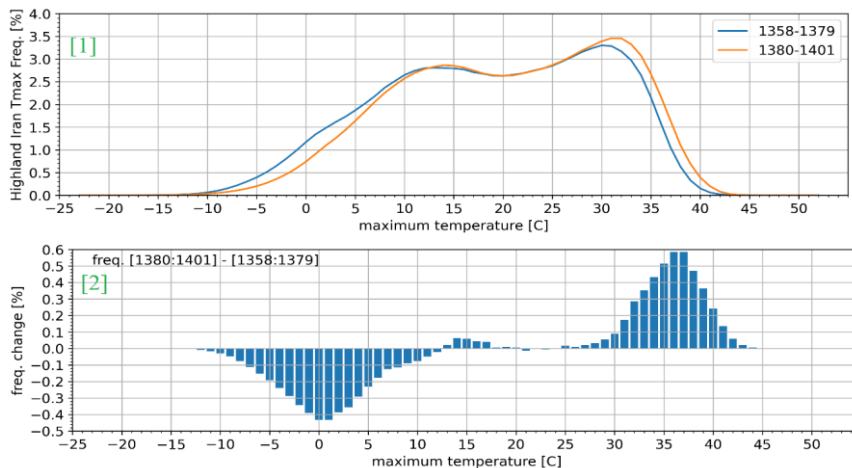
بردار تکین راست از دمای چهل درجه به دماهای بالاتر از چهل به معنای افزایش فراوانی دماهای بالاتر از چهل درجه سلسیوس در بخش های گرم سرزمین است. افزون بر این کمینه مقادیر بردار تکین راست که در گذشته بر روی دمای ده درجه رخ داده در سال های اخیر بر روی دماهای بالاتر از ده درجه دیده می شود که نماینده افزایش فراوانی دماهای بالاتر از ده درجه سلسیوس بر روی بخش سردتر سرزمین است. چون نخستین بردار تکین راست

نخستین بردارهای تکین نزدیک ۲۹ درصد از پراش داده ها را تبیین می کنند. دوم این که بردار تکین راست (شکل ۱۰) که نماینده فرگشت زمانی توزیع فراوانی دما است در گذشته بیشینه مقایر خود را روی دمای چهل درجه نشان می داده اما در سال های اخیر بزرگ ترین مقایر آن بر روی دماهای گرم تر از چهل درجه رخ داده است. مهاجرت لکه های قهوه ای در راستای دمای چهل درجه بر روی شکل ۱۰ همین پدیده را نشان می دهد. مهاجرت بیشینه مقادیر

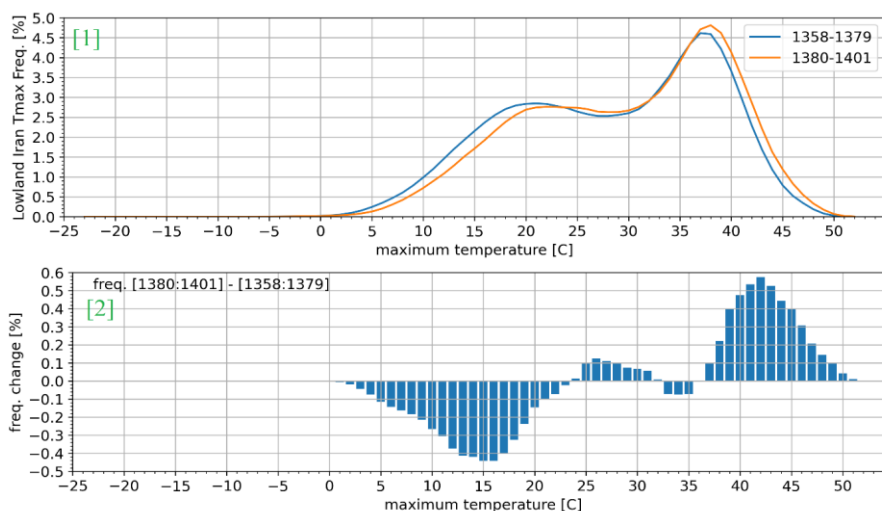
ایران را به دو بخش گرم و سرد افراز می‌کند
می‌توان تغییرات فراوانی بر روی هر یک از
این بخش‌ها را جداگانه بررسی کرد. اگر
نیمه نخست و دوم دوره آماری را بر روی
هر یک از این بخش‌ها بسنجیم روشن می‌-
شود که بر روی ایران سرد فراوانی دماهای
زیر ده درجه سلسیوس کاهش و به فراوانی
دماهای بالای سی درجه سلسیوس افزوده
شده است (شکل ۱۱)؛ بر روی ایران گرم اما
فراوانی دماهای زیر بیست درجه کاهش و
به فراوانی دماهای بالاتر از چهل درجه
سلسیوس افزوده شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۰: نخستین الگوی فرگشت زمانی دما. نخستین بردار تکین راست



شکل ۱۱: تغییر توزیع فراوانی دمای بیشینه بر روی ایران سرد. نیمه نخست و نیمه دوم دوره آماری (۱). تفاضل دو نیمه (۲)



شکل ۱۲: تغییر توزیع فراوانی دمای بیشینه بر روی ایران گرم. نیمه نخست و نیمه دوم دوره آماری (۱). تفاضل دو نیمه (۲)

۴. نتیجه گیری

آخر ۱/۵ درجه سلسیوس از دمای بیشینه

آن در دو دهه پیش از آن بیش تر باشد. کاهش فراوانی دماهای زیر صفر بر روی بخش های سردتر ایران و افزایش فراوانی دماهای بالاتر از ۴۰ درجه سلسیوس بر روی بخش های گرم تر ایران چشمگیر بوده است که پیامدهای زیست محیطی آن شایسته بررسی است.

در چهار دهه گذشته فراوانی دماهای زیر ۲۵ درجه سلسیوس در ایران ۴/۶ درصد کاهش یافته و همین مقدار به فراوانی

در گذر چهار دهه گذشته بر روی بخش های گرم تر ایران از فراوانی دماهای کمتر از ۲۰ درجه سلسیوس کاسته و به فراوانی دماهای بالاتر از ۴۰ درجه سلسیوس افزوده شده است. بر روی بخش های خنک تر ایران از فراوانی دماهای زیر ۱۰ درجه سلسیوس کاسته و به فراوانی دماهای بیش از ۳۰ درجه سلسیوس افزوده شده است. این تغییر در توزیع فراوانی دما سبب شده است تا میانگین دمای بیشینه ایران در دو دهه

دماهای بیش از ۲۵ درجه سلسیوس افزوده شده است. این فرگشت دمایی به معنای فراوان تر شدن روزهای تابستانی در ایران است. اگر به یاد بیاوریم که میانگین فراوانی روزهای تابستانی در ایران ۵۰ درصد است می بینیم که افزوده شدن بیش از چهار درصد به فراوانی چنین روزهایی چه فشاری بر منابع آب و انرژی کشور خواهد آورد. نکته دیگر این که در کرانه‌های دریای عمان هم اکنون فراوانی روزهای تابستانی از ۸۰ درصد بالاتر است. در این صورت جای این پرسش هست که آیا در طرح‌های توسعه جمعیتی این مناطق سختی اقلیمی و پیامدهای آن دیده شده است یا خیر؟

از زاویه دیگر که به موضوع بنگریم میانگین فراوانی روزهای یخی یعنی روزهایی که دمای بیشینه زیر صفر قرار می‌گیرد به ۲/۵ درصد نمی‌رسد. در عین حال در چهار دهه گذشته فراوانی روزهای یخی حدود ۱/۳ درصد کاهش یافته است. در کشوری که تمدن خود را وامدار پوشش برفی کوهستان‌ها است کاهش فراوانی روزهای یخی به معنای از دست رفتن پوشش برفی و تنگنای منابع آبی است.

چنان که با فرگشت یک گونه به گونه دیگر جهان جانداران با گونه پیشین بدرود و به گونه تازه درود می‌گوید با فرگشت توزیع فراوانی دما جهان اقلیم با جانداران پیشین و شیوه پیشین زندگی بدرود می‌گوید؛ پس باید شیوه زیستنی سازگار با اقلیم نو پدید را در پیش گرفت. فرگشت تنها از دست رفتن نیست به دست آمدن هم هست. در پرتو فرگشتی که از آن سخن گفتیم مثلاً اصفهان شهر نخلستان‌ها می‌تواند بود یا شهر ارواح

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی: این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان های تأمین مالی دریافت نکرده است.
تعارض منافع: طبق اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.
برگرفته از پایان نامه / رساله: این مقاله برگرفته از پایان نامه/رساله نبوده است.

References

- Alam, M. A., Emura, K., Farnham, C., & Yuan, J. (2018). Best-fit probability distributions and return periods for maximum monthly rainfall in Bangladesh. *Climate*, 6(1), 9. <https://doi.org/10.3390/cli6010009>
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2024): ERA5 post-processed daily-statistics on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI:[10.24381/cds.4991cf48](https://doi.org/10.24381/cds.4991cf48)
- Gonzalez-Hidalgo, J., Begueria Portugues, S., Pena-Angulo, D., & Sandonis, L. (2022). Variability of maximum and minimum monthly mean air temperatures over mainland Spain and their relationship with low-variability atmospheric patterns for period 1916-2015. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1723-1741. DOI:[10.1002/joc.7331](https://doi.org/10.1002/joc.7331)
- Grace, W., & Curran, E. (1993). A binormal model of frequency distributions of daily maximum. *Australian Meteorological Magazine*, 42(4), 151.
- Guirguis, K., Gershunov, A., Cayan, D. R., & Pierce, D. W. (2018). Heat wave probability in the changing climate of the Southwest US. *Climate Dynamics*, 50(9), 3853-3864.

- <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3850-3>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly journal of the royal meteorological society,146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Li, Z., Xue, H., Dong, G., Liu, X., & Lian, Y. (2024). Spatiotemporal variation in extreme climate in the Yellow River Basin and its impacts on vegetation coverage. Forests,15(2), 307. <https://doi.org/10.3390/f15020307>
- Linsenmeier, M. (2023). Temperature variability and long-run economic development. Journal of Environmental Economics and Management,121, 102840. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102840>
- Milovanović, B., Takara, K., Radovanović, M., Milivojević, M., & Jovanović, J. M. (2023). Frequency analysis of absolute maximum air temperatures in Serbia. Zbornik radova Geografskog instituta" Jovan Cvijić",SANU,73(3),279-293.
- Rehfeld, K., Münch, T., Ho, S. L., & Laepple, T. (2018). Global patterns of declining temperature variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene. Nature,554(7692), 356-359. <https://www.nature.com/articles/nature25454>
- Sanches, F. H., Martins, F. R., Conti, W. R., & Christofolletti, R. A. (2023). The increase in intensity and frequency of surface air temperature extremes throughout the western South Atlantic coast. Scientific Reports,13(1),

6293.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-32722-1>
- Shi, J., Jiang, D., Tian, Z., & Lang, X. (2022). Enhanced interannual variability in temperature during the Last Glacial Maximum. *Journal of Climate*, 35(18), 5933-5950. DOI: [10.1175/JCLI-D-21-0739.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0739.1)
- Strang, G. (2023). *Introduction to linear algebra*. Wellesley-Cambridge Press.
- Sukhonos, O., & Vyshkvarkova, E. (2023). Connection of compound extremes of Air Temperature and Precipitation with Atmospheric circulation patterns in Eastern Europe. *Climate*, 11(5), 98. <https://doi.org/10.3390/cli11050098>
- Supian, N. M., & Hasan, H. (2021). Selecting the probability distribution of annual maximum temperature in Malaysia. In *ITM Web of Conferences* (Vol. 36, p. 01010). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20213601010>