Website: https://www.Sepehr.org Online ISSN: 2588-3879; Print ISSN: 2588-3860

Scientific - Research Quarterly

Geographical Data (SEPEHR) Vo.35, No.138, Summer 2026

P.P 07 - 26

Research paper

https://doi.org/10.22131/sepehr.2026.2088454.3178

Evolution of minimum temperature trequency distribution of Iran over the past five decades: A hidden driver of climatic change

Seyyed Abolfazl Masoodian [1]

1- Professor of climatology, Faculty of geographical sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: s.a.masoodian@geo.ui.ac.ir

Article Info

Date of receive:

2026/05/12

Date of last review:

2026/06/13

Date of accept:

2026/06/13

Date of online publication:

2026/06/13

Keywords:

Minimum temperature,
Evolution,
Frequency distribution,
Singular value decomposition,
Iran

Extended Abstract

Introduction

Changes in the frequency distribution of temperature are among the most important manifestations of climate variability. Such changes not only reveal the nature of global warming but also, due to temperature's undeniable interaction with other environmental variables, illuminate the root causes of many other environmental changes. Contrary to the common belief that changes in mean temperature are the primary indicator of warming, recent research shows that small changes in the mean stem from profound alterations in the temperature frequency distribution. Furthermore, statistical extreme value theory indicates that the frequency of temperature extremes depends more on the variance (scale parameter) of the distribution than on its mean (location parameter). Therefore, understanding changes in climate variance is as valuable as tracking changes in means, because the economic costs imposed by temperature variability far exceed those from mean temperature changes. For a vast country like Iran, with remarkable geographical and climatic diversity, examining changes in temperature frequency distribution can reveal regional and local patterns. This study aims to analyze the evolution of Iran's minimum temperature frequency distribution over the past five decades (1975–2024).

Materials and Methods

Two data types were used: reanalysis and station data. The reanalysis dataset comprises hourly 2-meter air temperature from ERA5-Land, with hourly temporal resolution and 0.1° spatial resolution (200×150 cells) over a 50-year period (21 March 1975 – 20 March 2025). Of 30351 total pixels within the framework, 28023 were data-bearing (over land and inland water bodies) and 15577 pixels fell within Iran's political borders. Daily minimum temperature was extracted as the minimum of a 24-hour vector (from 21:00 UTC of the previous day to 20:00 UTC of the current day). Station data consisted of daily minimum temperatures from 389 Iranian meteorological stations with varying record lengths (10 to over 73 years); 143 stations with >30 years of overlap with reanalysis data were used for validation. For frequency distribution analysis, the temperature range -37 to +40°C was divided into 77 bins of 1-degree interval. ... **Page 08**

How to Cite:

Masoodian, S.A. (2026). Evolution of minimum temperature frequency distribution of Iran over the past five decades: A hidden aspect of climatic change. Scientific-Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 35 (138), 07-26.

Annual minimum temperature frequencies per pixel per bin were counted and converted to relative frequency percentages. A centered array of relative frequencies (subtracting the spatial weighted mean of each column) with dimensions 15577×3850 was created. To identify spatial and temporal patterns, Singular Value Decomposition (SVD) was applied. Orthogonal left singular vectors represent spatial patterns, and right singular vectors represent temporal patterns of the temperature bins. Reanalysis validation was performed by calculating bias (reanalysis minus station) and comparing frequency distributions. The mean bias for daily minimum temperature was -0.2°C (slight underestimation).

Results and Discussion

The results show that over the past five decades, Iran's minimum temperatures have mostly ranged between -15 and +30°C, with 15°C being the most frequent. The peaks of maximum frequency have intensified since 1998. Comparing the frequency distributions of 1982 and 2023 shows that 1982 had a bimodal distribution (temperatures near zero in the cold season and near 16°C in the warm season), whereas 2023 exhibits a more unimodal distribution with a 4% frequency peak, causing the 2023 mean minimum temperature to be about 2.9°C warmer than that of 1982. The first component of SVD explained nearly 42% of the total data variance. Its scores partition Iran into two main parts: Cold Iran (positive scores, including the mountainous northwest, Zagros, and Alborz) and Warm Iran (negative scores, including plains, lowlands, and southern coasts). The first eigenvector revealed two important temperature ranges: a cold range (-7 to +3°C) and a warm range (20–29°C). The best representative of the dominant pattern is Mount Hezar southwest of Rayen (Kerman) with a bimodal distribution on -9 and -3°C, while the opposite pattern is best represented by the Gulf of Oman coast northeast of Chabahar with a bimodal distribution on 26 and 17°C. Trend analysis of the first eigenvector shows that in Cold Iran, the frequency of temperatures below -5°C has decreased over the past five decades, replaced by increased frequency of temperatures from -1 to +8°C. In Warm Iran, the frequency of temperatures above 27°C has increased and that of temperatures 15–25°C has decreased. Comparing the second half of the period (2000–2024) with the first half (1975–1999) shows that the reduction in <-5°C temperatures is stronger in the Sefidrud, Urmia, Aras, Karun, and Gavkhuni basins, while the increase in >27°C temperatures has occurred along the southern coasts and central Iran.

Conclusion

The frequency distribution of minimum temperature in Iran has evolved over the past five decades. This evolution, in both the cold and warm parts of the country, means a rightward shift of the frequency distribution curve: decreased frequency of low temperatures and increased frequency of high temperatures. An 1.8% decrease in the frequency of temperatures below -5°C and a 1.1% increase in temperatures above 27°C have respectively raised Iran's mean minimum temperature by 0.19°C and 0.33°C. Changes in other temperature bins (-1 to 8°C and 15–25°C) have contributed -0.04°C and +0.42°C, respectively. Overall, these changes have increased Iran's mean minimum temperature in the second half of the period by 0.94°C relative to the first half. The largest increase in minimum temperature (more than 0.7°C) occurred in the Sefidrud, Urmia, Aras, Karun, and Gavkhuni basins. This research demonstrates that analyzing temperature frequency distribution changes is a more fundamental approach than merely studying means or extremes, and can provide environmental planners and water resource managers with a more precise picture of Iran's climate evolution.

شاپای الکترونیکی: 2588-3879 / شاپای چاپی: 2588-3860
تارنمای نشریه https://www.Sepehr.org

فصلنامه علمی - پژوهشی
اطلاعات جغرافیایی (سپهر) دوره ۳۵، شماره ۱۳۸، تابستان ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی
صفحات ۲۶ - ۰۷

https://doi.org/10.22131/sepehr.2026.2088454.3178

فرگشت توزیع فراوانی دمای کمینهٔ ایران در پنج دههٔ گذشته: پیشران پنهان تغییر اقلیم

سیدابوالفضل مسعودیان[1]

۱- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. s.a.masoodian@geo.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:
۱۴۰۵/۰۲/۲۲
تاریخ آخرین بازنگری:
۱۴۰۵/۰۳/۲۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۳/۲۳
تاریخ انتشار:
۱۴۰۵/۰۳/۲۳

واژه‌های کلیدی:

دمای کمینه؛
فرگشت؛
توزیع فراوانی؛
تجزیه مقدار تکین؛
ایران

چکیده

وردش‌پذیری برازنده‌ترین صفت برای اقلیم است و ریشه در واداشت‌های طبیعی، انسانی یا فرایندهای غیرخطی درون دستگاه اقلیم دارد. تغییر توزیع فراوانی دما، یکی از مهم‌ترین نمودهای وردش‌پذیری اقلیم است که نه تنها چگونگی گرمایش جهانی را آشکار می‌نماید، بلکه ریشه بسیاری از تغییرات محیطی را نیز روشن می‌کند. هدف این پژوهش، بررسی فرگشت توزیع فراوانی دمای کمینه در ایران طی پنج دهه اخیر (سال‌های ۱۳۵٤ تا ۱٤۰۳) است. به این منظور از داده‌های دمای هوای دو متری **ERA5-Land** و داده‌های ایستگاهی ۳۸۹ ایستگاه هواشناسی برای راستی‌آزمایی استفاده شد. دمای کمینه روزانه از داده‌های ساعتی استخراج و فراوانی سالانه دمای کمینه در ۷۷ دسته دمایی (از ۳۷- تا ٤۰ درجه سلسیوس) شمارش شد. با به‌کارگیری روش تجزیه مقادیر تکین (SVD)، الگوهای مکانی و زمانی توزیع فراوانی، مورد شناسایی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که مؤلفه نخست SVD نزدیک به ٤۲ درصد پراش کل داده‌ها را تبیین و ایران را به سه پهنه دمایی متمایز افراز می‌کند: ایران سرد (کوهستانی)، ایران گرم (کرانه‌های جنوبی) و پهنه معتدل (میانی). بررسی روندها نشان داد که در پنج دهه گذشته، فراوانی دماهای زیر ۵- درجه سلسیوس در ایران سرد به میزان ۱/۸ درصد کاهش و فراوانی دماهای بالای ۲۷ درجه سلسیوس در ایران گرم افزایش یافته است. در مقابل، فراوانی دماهای ۱- تا ۸ درجه سلسیوس در ایران سرد و دماهای ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس در ایران گرم به ترتیب افزایش و کاهش داشته‌اند. این تغییرات سبب افزایش ۰/۹٤ درجه سلسیوسی میانگین دمای کمینه ایران در دهه‌های اخیر شده است. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که توزیع فراوانی دمای کمینه در ایران به راست منتقل شده و همچنین نتایج، اثر این فرگشت بر افزایش میانگین دمای کمینه بخش‌های مختلف کشور را مشخص نمود.

استناد به این مقاله:

مسعودیان، س. الف(۱٤۰۵) فرگشت توزیع فراوانی دمای کمینهٔ ایران در پنج دههٔ گذشته: لایه پنهان تغییر؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی(سپهر)، ۳۵(۱۳۸)، ۲٦ - ۰۷.

۱- مقدمه

وردش در نـهادِ ابَـردستگاه آب‌وهوا است. وردش‌پذیری اقلیم ریشه در واداشت‌های تابشی طبیعی، واداشت‌های تابشی ناشی از فعالیت‌های بشری یا فرایندهای غیرخطی درون خود دستـگاه اقـلیم دارد و در مقیـاس‌های زمـانی و مـکانی گـوناگـون رخ می‌دهند *(Shi et al, 2022:5933)*. افزایش جهانی دمای هوا و دمای آب رویه دریاها و بالا آمدن تراز آب دریاها (حدود ۰/۱۵ تا ۰/۱۸ متر در سده بیستم)، افزایش فراوانی بارش‌های سنگین (رگبار، سیل و کولاک)؛ خشک‌سالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر بر روی پهنه‌های گسترده‌تر، به‌ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری؛ افزایش فراوانی توفندها و توفان‌های حاره‌ای و نازک شدن کلاهک‌های یخی در شمالگان و جنوبگان از نشانه‌های تغییر آب‌وهوا است. از میان این نشانه‌ها، افزایش دمای جهان یا گرمایش جهانی از دهـه ۱۹۵۰ بـه این‌سو، روشن و آشکار است *(Abdalla et al, 2023:283)*. تغییر توزیع فراوانی دما یکی از این وردش‌ها است و نه تنها می‌تواند چگونگی گرمایش جهانی را آشکار نماید بلکه به دلیل اثرگذاری دما بر دیگر متغیرهای محیطی می‌تواند ریشه بسیاری از تغییرات محیطی دیگر را نیز روش کند. افزایش میانگین دمای جهان که از آن به گرمایش جهانی یاد می‌شود هم شدت، مدت و فراوانی فرین‌ها را تغییر می‌دهد *(Sanches et al, 2023:6293)* و هم اساساً تغییر میانگین دما و همچنین تغییر شدت، مدت و فراوانی فرین‌ها *(Vogel et al, 2019:1)*نتیجه تغییر توزیع فراوانی دما هستند. پس به جا است که ریشه وردش‌هایی که در میانگین دما رخ می‌دهند (خواه در چهره روند نمایان شده باشند یا در چهره جهش رخ داده باشند) را در وردش‌هایی جستجو کنیم که پیش از آن در توزیع فراوانی دما رخ داده‌اند *(Supian and Hasan, 2021:1)*. آشکارسازی وردش‌های توزیع فراوانی دما می‌تواند به آشکارسازی زودهنگام وردش‌های میانگین دما و وردش‌های فرین‌ها کمک کند. فراوانی رویدادهای فرین با مفهوم دوره بازگشت یعنی زمان انتظار برای رخداد دوباره رویدادی به همان شدت یا بزرگ‌تر بیان می‌شود و بیش از آن که به میانگین وابسته باشد به پراش وابسته است *(Alam et al, 2018:2)*. پس رویدادهای فرین که با وجود فراوانی اندک، اثرگذاری بیش‌تری بر جوامع بشری دارند بیش‌تر وابسته به فراسنج مقیاس توزیع فراوانی است *(Shi et al, 2022:5933)*.

فرین‌های آب‌وهوایی رویدادهایی بسیار کم‌بسامد هستند که کرانه‌های بالا و پایین میانگین‌های آب‌وهوایی را پشت سر می‌گذارند *(Li et al, 2024:1)*. افزایش شدت، مدت و فراوانی فرین‌های دمایی پیامد سرراست تغییر توزیع فراوانی دما است و تغییر فرین‌ها آشکارترین نـمود تغییر اقلیم است که مردم کوچه و بازار اثر آن را به چشم می‌بینند؛ چراکه بیش‌ترین اثر را بر زیست‌بوم و همچنین بر فعالیت‌های انسانی دارد *(Milovanović et al, 2023:280)*. به ویژه افزایش دمای کمینه در گذر دهه‌های اخیر چشمگیر بوده است *(Ouyang et al, 2024:1)*.

وردش‌پذیری پراش دما هزینه‌های سنگینی بر اقتصاد جوامع بشری تحمیل می‌کند که به سبب اثر چشمگیری که بر فرین‌ها دارد بسی فراتر از هزینه‌هایی است که تغییر میانگین دما پدید می‌آورد *(Linsenmeier et al, 2023:280)*. این است که آگاهی از وردش‌های پراش به اندازه آگاهی از وردش میانگین‌ها ارزشمند است *(Rehfeld et al, 2018:1)*. این یک واقعیت ثابت شده است که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت انسانی از زمان پیشاصنعتی تاکنون منجر به افزایش فراوانی و/یا شدت برخی پدیده‌های فرین آب‌وهوایی شده است؛ این افزایش به ویژه در مورد دماهای فرین آشکار است *(Seneviratne et al, 2021:6)*. هشدار واقعی اینجا است که همراه با روند افزایشی دمای زمین، فراوانی و شدت پدیده‌های فرین گرم همچنان افزایش خواهد یافت، در حالی که فراوانی و شدت پدیده‌های فـرین سـرد کاهش خـواهد یافت *(Fu and Ding, 2021:2489)*. این تغییرات در مقیاس جهانی و قاره‌ای و تقریباً در تمامی مناطق مسکونی، همراه با افزایش مقدار گرمایش جهانی رخ خواهد داد *(Seneviratne et al, 2021:7)*.

دمای بیشینه و کمینه به گردش هوا نیز وابسته است (Grace and Curran, 1993:151). چون گرمایش جهانی یکدست نیست و شدت آن با عرض جغرافیایی در پیوند است شیو نصف‌النهاری دما دستخوش دگرگونی شده و در پی تضعیف شیو نصف‌النهاری دما الگوی گردش هوا به جای جریانی مداری‌تر به جریانی مداری-نصف‌النهاری گرایش پیدا می‌کند. در نتیجه فرین‌های دمایی و بارشی دستخوش تغییر می‌شوند. اثر نوسان اطلس شمالی بر فرین‌های دمایی و بارشی اروپای غربی نمونه‌ای از همین تغییر الگوی جریان و پیامدهای آن برای فرین‌ها است (Sukhonos and Vyshkvarkova, 2023:1). در نیمکره شمالی پیدایش پرفشار بندالی که پیامد همین تغییر الگوی جریان است بر سر راه بادهای غربی قرار می‌گیرد و مسیر سامانه‌های همدید را تغییر می‌دهد و در نتیجه فراوانی فرین‌های گرم و سرد را دگرگون کرده است (La Sorte et al., 2021:9). کاهش شیو نصف‌النهاری دما که ناشی از افزایش تفریقی دما در عرض‌های مختلف جغرافیایی است پدیده‌ای کلان مقیاس است که در ابعاد سیاره‌ای رخ می‌دهد و چالش بزرگ این جا است که پیامدهای محلی تغییراتی که در مقیاس جهانی رخ می‌دهند روشن نیست (Guirguis et al, 2018:1). این چالش زمانی دردسرساز می‌شود که بدانیم برای بررسی‌های محلی و منطقه‌ای به داده‌های خوش‌تفکیک (چگالی مکانی زیاد) نیازمندیم اما در مقیاس‌های مکانی خُرد کیفیت داده‌ها پایین و چگالی داده‌ها ناچیز است (González et al, 2022:1724). به همین دلیل است که داده‌های بازکاویِ واقع‌نما ارزش خود را در بررسی تغییرات محلی و منطقه‌ای نشان می‌دهند (Hersbach et al, 2020:2000).

ایران سرزمینی گسترده و ناهموار است و تنوع جغرافیایی کم نظیر آن سبب پیدایش نواحی اقلیمی بزرگ و در دل این نواحی، خرده‌اقلیم‌های فراوان شده است؛ از این رو تغییرات دمایی نواحی مختلف ممکن است یکدست و همخوان نباشند (Mohammadi et al., 2017:362؛ Nasaji Zavare and Rahimzadeh, 2014:181). تغییرات توزیع فراوانی دما در ایران نیز همین گونه است و امکان دارد در هر مکان الگوی متفاوتی داشته باشد و در هر جا نیز به دلیل تفاوت دامنه‌های دمایی پیامدهای تغییر توزیع فراوانی دما متفاوت باشد. بررسی تغییر توزیع فراوانی دمای کمینه جزئیات زیادی را در دسترس می‌گذارد که در پرتو آن نه تنها می‌توان وردش‌های میانگین و نیز فرین‌ها را تبیین کرد بلکه می‌توان پاسخ محیط به تغییرات دمایی را روش‌تر نمود. این که تغییر میانگین دما در پی تغییر فراوانی کدام دسته‌های دمایی رخ داده برای جانداران مختلف معانی متفاوتی دارد و برای فعالیت‌های مختلف جوامع انسانی نیز پیامدهای مختلفی دارد. این است که واکاوی تغییر توزیع فراوانی دما از دیدگاه نظری و کاربردی هر دو پژوهشی بنیادی‌تر است.

در این پژوهش کوشش خواهیم کرد به کمک داده‌های بازکاوی و با به کارگیری روش تجزیه مقدار تکین نشان دهیم که در پنج دهه گذشته چه تغییری در توزیع فراوانی دمای کمینه ایران رخ داده است. در کنار آن نشان خواهیم داد که این تغییر توزیع فراوانی چه اثری بر تغییر دمای کمینه ایران داشته است.

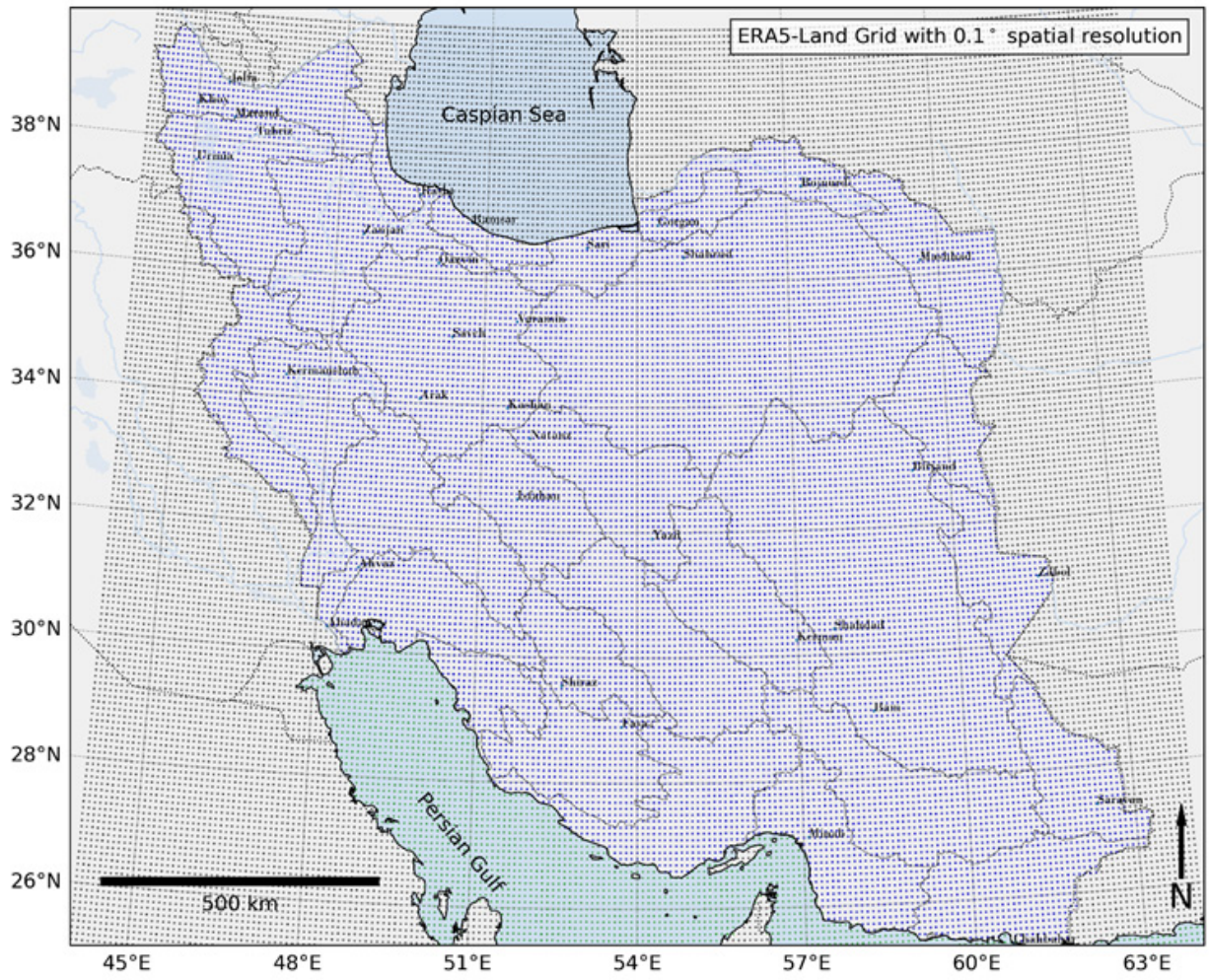
۲- داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش برای بررسی فرگشت توزیع فراوانی دمای کمینه دو دسته داده به کار گرفته‌ایم: داده‌های بازکاوی شبکه‌ای و داده‌های ایستگاهی.

۲-۱- داده‌ها

۲-۱-۱- داده‌های شبکه‌ای

داده‌های بازکاوی شبکه‌ای این پژوهش داده‌های ساعتی دمای هوای دومتری ECMWF بسته داده reanalysis - era5 - Land است (Muñoz-Sabater et al, 2021:4329). بازه زمانی داده‌ها ۱۳٥٤/۰۱/۰۱ تا ۱٤۰۳/۱۲/۳۰ برابر با ۱۹۷٥/۰۳/۲۱ تا ۲۰۲٥/۰۳/۲۰ به مدت ٥۰ سال برابر با ۱۸۲٦۳ روز با تفکیک زمانی ساعتی است. بُرد داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه از ۲٥ تا ٤۰ درجه شمالی (۱٥۱ مدار جغرافیایی) و ٤٤ تا ٦٤ درجه شرقی (۲۰۱ نصف‌النهار جغرافیایی) است (نگاره ۱).



نگاره ۱: یاخته‌های ERA5-LAND با تفکیک مکانی ۰/۱ × ۰/۱ درجه قوسی.
یاخته‌های روی خشکی و آب‌های محصور در خشکی به رنگ سیاه (بیرون ایران) و آبی (درون ایران) و یاخته‌های روی دریاها به رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. تنها یاخته‌های سیاه و آبی داده‌مند هستند.

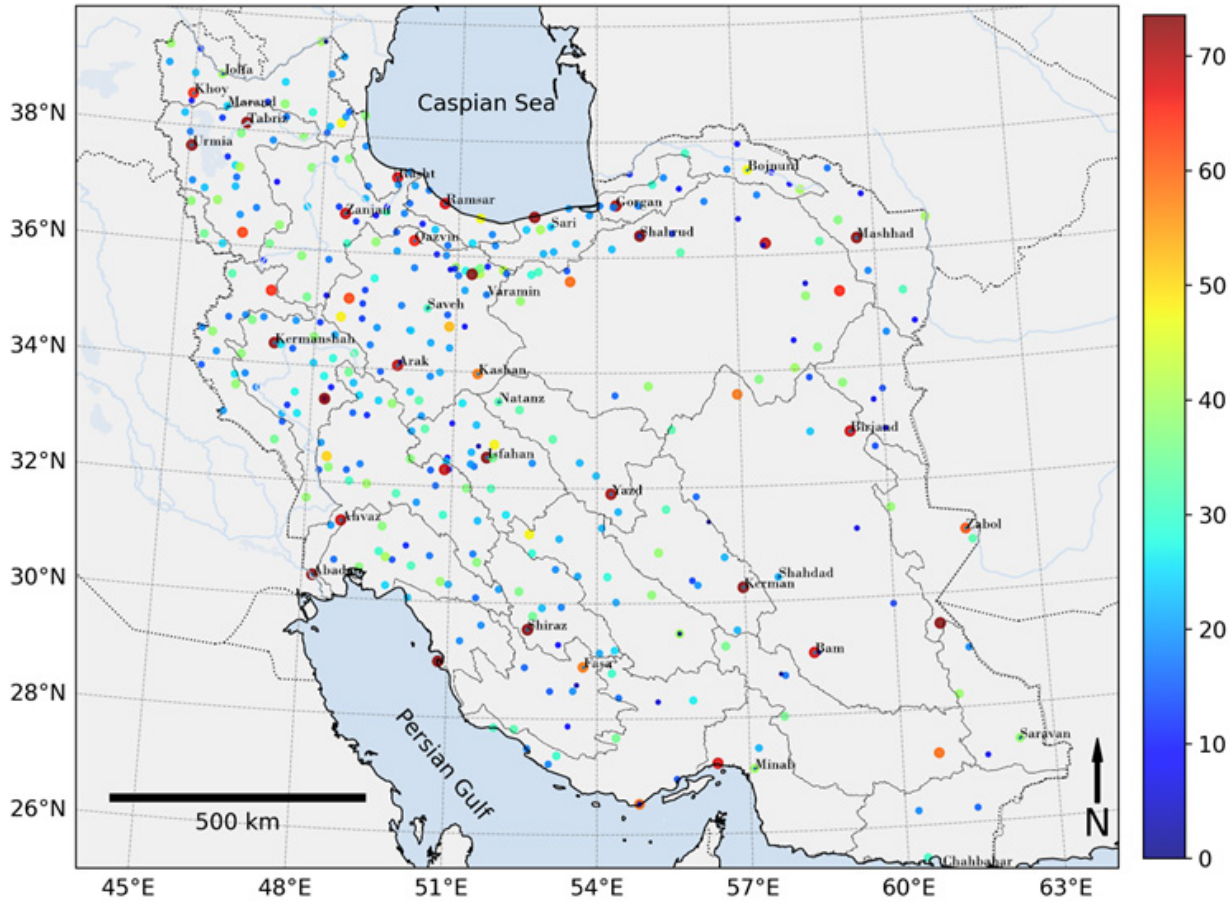
یکای دما در این داده‌ها کلوین و یکای زمان ساعت بر حسب زمان میانگین گرینویچ (GMT) است. برای یافتن دمای کمینه هر روز یک بردار ۲٤ ساعته از داده‌های ساعت ۲۱:۰۰ زولوی روز پیشین برابر با ساعت ۰۰:۳۰ بامداد محلی تا ساعت ۲۰:۰۰ زولوی روز کنونی برابر با ساعت ۲۳:۳۰ محلی برداشت و کمینه این بردار، دمای کمینه روز کنونی به شمار آمد. به این ترتیب آرایه سری زمانی دمای کمینه به ابعاد ۲۰۱×۱۵۱×۱۸۲٦۳ به دست آمد ($\check{T}$). این آرایه، دمای کمینه یاخته‌های داده‌مند را برای هر روز در خود نگه می‌دارد. این داده‌ها دمای هوا در دو متری از سطح زمین، تنها بر روی خشکی‌ها و پهنه‌های آبی درون خشکی‌ها را پوشش می‌دهند و از ۳۰۳۵۱ یاخته موجود در چارچوب (۳۰۳۵۱=۲۰۱×۱۵۱)، شمار یاخته‌هایی که بر روی خشکی یا پهنه‌های آبی درون خشکی هستند و بنابراین یاخته‌های داده‌مند هستند ۲۸۰۲۳ تا است؛ پس تنها بر روی همین یاخته‌ها داده‌های دما موجود است. یاخته‌هایی که روی دریاها جا دارند و شمار آن‌ها ۲۳۲۸ تا است داده دما ندارند (یاخته‌های ناداده‌مند). از مجموع ۳۰۳۵۱ یاخته موجود ۱۵۵۷۷ یاخته در

مرز سیاسی خشکی اصلی ایران جای می‌گیرند. پایین‌ترین دمای کمینه در ایران در این بازه زمانی در تاریخ ۱۳۹۲/۰۹/۱۹ بر روی نقطه‌ای به عرض ۳۷/۹ درجه شمالی و طول ٤٤/۳ درجه شرقی در ۵۰ کیلومتری جنوب‌غرب سلماس به مقدار ۳٤/۸- درجه سلسیوس و بالاترین دمای کمینه ایران در تاریخ ۱٤۰۳/۰٤/۱۵ بر روی نقطه‌ای به عرض ۳۰/۹ درجه شمالی و طول ۵۸/۳ درجه شرقی در ۸۰ کیلومتری شمال‌شرق شهداد به مقدار ۳۹/۵ درجه سلسیوس دیده شده است.

۲-۱-۲- داده‌های ایستگاهی

از داده‌های ایستگاهی برای راستی‌آزمایی داده‌های بازکاوی بهره برده‌ایم. داده‌های دمای کمینه روزانه ۳۸۹ ایستگاه هواسنجی ایران از ۱۳۲۹/۱۰/۱۱ تا ۱٤۰۳/۱۰/۱۱ برابر با ۲۷۰۲۹ روز در دست بود. برخی از این ایستگاه‌ها مانند آبادان، اصفهان، کرمان، خرم‌آباد، شاهرود، شیراز، تبریز، مهرآباد تهران و زاهدان بیش از ۷۳ سال آمار دارند (نگاره ۲). در کنار آن ایستگاه‌هایی هم هستند که کم‌تر از ۱۰ سال آمار دارند مانند فرودگاه پیام، فرودگاه خوی، فرودگاه جهرم، بندر لنگه ساحلی و نظایر آن.

هنگام راستی‌آزمایی داده‌های بازکاوی، ایستگاه‌هایی که در دوره ۵۰ ساله ۱۳۵٤ تا ۱٤۰۳ برابر یا بیش از ۳۰ سال پوشش مشترک آماری با داده‌های بازکاوی داشته‌اند به کار گرفته شدند. از ۳۸۹ ایستگاهی که داده‌های آنها در دسترس بود ۱٤۳ ایستگاه این شرط را داشتند.



نگاره ۲: طول دوره آماری داده‌های ایستگاه‌ها بر حسب سال.
رنگ و اندازه نشانگرها متناسب با طول دوره آماری است.

۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۱- شمارش فراوانی

از آنجا که هدف این پژوهش بررسی وردش‌های توزیع فراوانی دمای کمینه ایران است باید سری زمانی دمای کمینه را بر فراوانی دمای کمینه نگاشت. به بیان دیگر باید داده‌ها را از فضای زمان به فضای بسامد منتقل کرد. نخستین گام برای انجام این نگاشت شناسایی دامنه‌ای است که دماهای کمینه در آن دامنه نوسان می‌کنند. چنان که دیدیم در بُرد (٤٤ تا ٦٤ شرقی و ۲۵ تا ٤٠ شمالی) و بـازه (۱۳٥٤/۰۱/۰۱ تا ۱٤۰۳/۱۲/۳۰) این پژوهش، دامنه دمایی ۳۷/۰- تا ٤۰/۰ درجه سلسیوس بوده است. با گشودگی یک درجه سلسیوس این دامنه دمایی ۷۷ دسته دمایی را می‌سازد. پس، فراوانی سالانه دمای کمینه هر یک از یاخته‌های درون ایران برای هر یک از ۷۷ دسته دمایی یاد شده شمارش شد. به این ترتیب سری زمانی دمای کمینه ($\check{T}_{18263\times15577}$) به فراوانی سالانه دمای کمینه ($\dot{F}_{15577\times77\times50}$) تبدیل شد. با بخش کردن فراوانی مطلق ($\dot{F}$) به مجموع فراوانی هر یک از بازه‌های دمایی، درصد فراوانی نسبی (PF) به دست آمد (رابطه ۱).

$$PF = \frac{\dot{F}}{\sum_0^{76}\dot{F}} \times 100 \qquad (۱)$$

آرایه درصد فراوانی نسبی آرایه‌ای است سه بعدی که یک بعد آن مکان (۱٥٥۷۷)، یک بعد آن دسته‌های دمایی (۷۷ دسته از ۳۷- تا ٤۰ درجه سلسیوس) و یک بعد آن زمان (٥۰ سال از ۱۳٥٤ تا ۱٤۰۳) است. پس از تبدیل فراوانی مطلق به درصد فراوانی نسبی (رابطه ۲) سری زمانی هر یک از دسته‌های دمایی کنار هم چیده شد و دو بُعد دسته‌های دمایی و سال در هم ادغام شدند (رابطه ۳). پس در این گام آرایه درصد فراوانی نسبی از سه بعد به دو بعد فروکاسته شد. در گام فرجامین درصد فراوانی نسبی هر یک از ستون‌ها از میانگین وزنی مکانی همان ستون کسر شد تا آرایه مرکزی شده درصد فراوانی نسبی (F) به دست آید (رابطه ٤). مرکزی سازی داده‌ها کمک می‌کند تا وردش‌های فراوانی نسبی هر یاخته در گذر زمان نسبت به وضعیت متوسط مکان (یعنی میانگین سراسر ایران) ارزیابی شود.

$$\dot{F}_{15577\times77\times50} \rightarrow PF_{15577\times77\times50} \qquad (۲)$$

$$PF_{15577\times77\times50} \rightarrow PF_{15577\times3850} \qquad (۳)$$

$$PF_{15577\times3850} \rightarrow F_{28023\times3850} \qquad (٤)$$

برای شناسایی الگوهای مکانی و الگوهای زمانی توزیع فراوانی دمای کمینه از روش تجزیه مقادیر تکین (SVD) بهره برده‌ایم. این روش را بر روی آرایه مرکزی‌شده درصد فراوانی نسبی دمای کمینه ایران ($F_{15577\times3850}$) اعمال و الگوهای مکانی و زمانی توزیع دما را استخراج کردیم. تجزیه مقادیر تکین (تـمـت) بسط روش تجزیه بردارهای ویژه (EVD) به شمار می‌آید *(Strang, 2022:286)* و بر خلاف تجزیه بردارهای ویژه (تـبـو) که تنها بر روی آرایه‌های مربعی متقارن انجام‌پذیر است بر روی هر آرایه‌ای انجام‌پذیر است؛ از این گذشته به جای یک دسته بردار یکه متعامد در تـبـو این بار در تـمـت به دو دسته بردار یکه متعامد نیاز داریم:

$$F = PF - \overline{PF} = U\Sigma V^T \qquad (٥)$$

Σ آرایه قطری مقادیر تکین است؛ V^T آرایه بردارهای یکه متعامد و دسته بردار تکین راست نامیده می‌شود؛ U آرایه بردارهای یکه متعامد و دسته بردار تکین چپ نامیده می‌شود. از آنجا که سطرهای آرایه F نماینده مکان و ستون‌های آن نماینده سری زمانی دسته‌های دمایی است بردارهای یکه متعامد چپ(U) نماینده الگوهای مکانی و بردارهای یکه متعامد راست(V^T) نماینده الگوهای سری زمانی دسته‌های دمایی یا به بیان دیگر نماینده رفتار زمانی هر یک از دسته‌های دمایی است. بردارهای موجود در هر دو آرایه مستقل خطی هستند. در این صورت اطلاعاتی که هر یک از این بردارها حمل می‌کنند مستقل و متمایز از اطلاعات موجود در دیگر بردارها است. این ویژگی بسیار ارزشمند است چون هر یک از بردارهای چپ و راست رفتار مکانی و زمانی متمایز و

متفاوتی از دمای کمینه را نمودار می‌کند که در دیگر بردارها تکرار نمی‌شود. در مقایسه با تحلیل مؤلفه اصلی نخستین بردار تکین راست V_1^T معادل بردار ویژه نخستین مؤلفه اصلی ($loadings$) و حاصل‌ضرب نخستین مقدار تکین در نخستین بردار تکین چپ $U_1 \cdot \Sigma_1$ معادل نمرات نخستین مؤلفه اصلی ($Scores$) است. پراش مؤلفه‌های اصلی نیز طبق رابطه (٦) با مقادیر تکین مرتبط است:

$$\lambda = \frac{\Sigma^2}{n-1} \qquad (٦)$$

در اینجا λ پراش مؤلفه‌ها و n تعداد داده‌ها ($n =$ ۱۵۵۷۷) است. پراش‌ها پایگانی و یکنوا نزولی (از بزرگ به کوچک) هستند. به بیان دیگر بیشترین پراش در نخستین الگوی دمایی انباشته شده و الگوهای دمایی بعدی همواره مقدار کمتری از پراش داده‌ها را تبیین می‌کنند. ویژگی که می‌توان آن را انباشتگی پراش نامید، به این دلیل ارزشمند است که تضمین می‌کند نخستین الگوی دمایی مهم‌ترین الگوی حاکم است چون بیشترین مقدار پراش کل را تبیین می‌کند.

همین دو ویژگی یعنی استقلال خطی الگوهای دمایی و انباشتگی پایگانی پراش در الگوهای دمایی، برتری برجسته‌ای به بردارهای تکین چپ و راست نسبت به آرایه داده‌ها (آرایه درصد فراوانی نسبی مرکزی شده) برای واکاوی ویژگی‌های مکانی و زمانی دما می‌بخشد. به سخن دیگر در هنگام بررسی نخستین الگوی دمایی اطمینان داریم که در حال بررسی مهم‌ترین الگو هستیم و اطمینان داریم که این الگو هیچ وجه مشترک خطی با الگوهای بعدی ندارد.

۲-۲-۲- راستی‌آزمایی

همخوانی داده‌های بازکاوی و داده‌های ایستگاهی را از چند دیدگاه می‌توان ارزیابی کرد. این دیدگاه‌های گوناگون حاصل ترکیب سه وجه است: وجه آماری، وجه زمانی و وجه مکانی. به بیان دیگر ارزیابی همخوانی داده‌های بازکاوی و داده‌های ایستگاهی که آن را راستی‌آزمایی می‌نامیم پاسخگویی به این پرسش است که داده‌های بازکاوی از لحاظ کدام آماره‌ها (میانگین، مقادیر فرین، پراش و مانند آن)، در کدام مقیاس زمانی (ساعتی، روزانه، ماهانه و مانند آن) در کدام پهنه جغرافیایی (کوهستان‌ها، کرانه دریاها، جنگل‌ها، بیابان‌ها و مانند آن) با داده‌های ایستگاهی همخوانی دارند یا ندارند.

داده‌های بازکاوی و داده‌های ایستگاهی برای دوره مشترک ۱۳۵٤/۰۱/۰۱ تا ۱٤۰۳/۱۰/۱۱ به مدت ۱۸۱۸٤ روز (٤۹/۸ سال) در دست است. چنان که گفتیم ۱٤۳ ایستگاه بیش از سی سال داده مشترک با داده‌های بازکاوی دارند. پس دو آرایه به ابعاد ۱۸۱۸٤×۱٤۳ فراهم شد یکی حاوی داده‌های ایستگاهی (T_s) و دیگری حاوی داده‌های بازکاوی (T_r) یاخته‌هایی که این ایستگاه‌ها بر روی آن جا داشته‌اند. این دو آرایه برای راستی‌آزمایی داده‌های بازکاوی به کار گرفته شدند. در راستی‌آزمایی نخستین پرسشی که به آن می‌پردازیم این است که داده‌های بازکاوی در برآورد مقدار دمای کمینه روزانه تا چه اندازه کامیاب بوده‌اند؟

۲-۲-۳- تورش

برای پاسخ به پرسش بالا مقدار تورش دمای کمینه روزانه را محاسبه می‌کنیم. تورش تفاوت داده‌های بازکاوی و داده‌های ایستگاهی است:

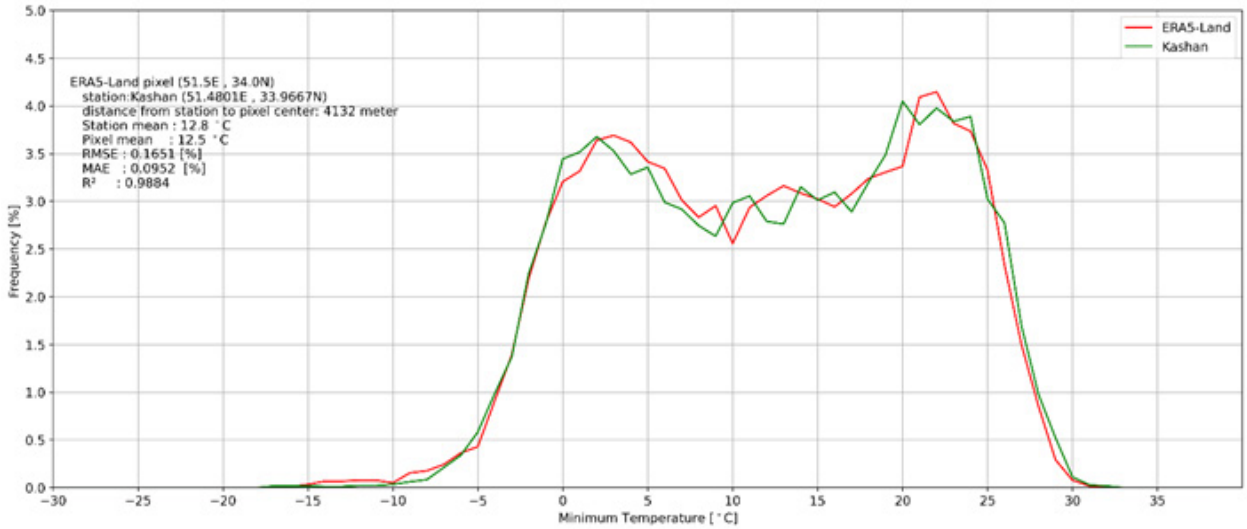
$$bias = T_r - T_s \qquad (۷)$$

در اینجا $bias$ آرایه تورش دمای کمینه روزانه به ابعاد ۱۸۱۸٤×۱٤۳ است. میانگین تورش دمای کمینه روزانه همه داده‌ها ۰/۲- درجه سلسیوس است. این به آن معنا است که داده‌های بازکاوی در برآورد دمای کمینه روزانه اندکی کم‌برآوردی دارند. در برخی ایستگاه‌ها داده‌های بازکاوی ریخت و اندازه توزیع فراوانی دمای کمینه را بخوبی برآورد می‌کنند. برای نمونه در ایستگاه کاشان داده‌های ایستگاهی و بازکاوی هر دو توزیعی دو نمایی را نشان می‌دهند که بر روی ۳ درجه سلسیوس فراوانی حدود ۳/٦ درصد و بر روی ۲۱ درجه سلسیوس فراوانی حدود ٤ درصد را نشان می‌دهد. منحنی توزیع فراوانی از هر دو منبع داده همخوانی

بسیار خوبی دارند و ریشه دوم میانگین مربعات خطا نزدیک ۰/۲ درصد است (نگاره ۳). این در حالی است که موقعیت ایستگاه تا مرکز یاخته داده‌های بازکاوی بیش از چهار کیلومتر فاصله دارد. با این وجود یکنواختی مکانی دما در این بخش از کشور سبب شده تا تفاوت چشمگیری بین وضعیت دمایی ایستگاه و یاخته دیده نشود. این یکنواختی مکانی دما را می‌توان این گونه هم دید که هر چند با توجه به تفکیک ۰/۱ درجه‌ای داده‌ها، دمای یاخته نماینده پهنه‌ای به مساحت ۱۰۲/٤ کیلومترمربع و دمای ایستگاه تنها نماینده نقطه جاگیری دماسنج است اما همان یکنواختی مکانی سبب شده تا میانگین دمای ایستگاه (۱۲/۸ درجه سلسیوس) و یاخته (۱۲/۵ درجه سلسیوس) چندان تفاوتی نداشته باشند.

ارزیابی داده‌های بازکاوی $reanalysis - era5 - land$

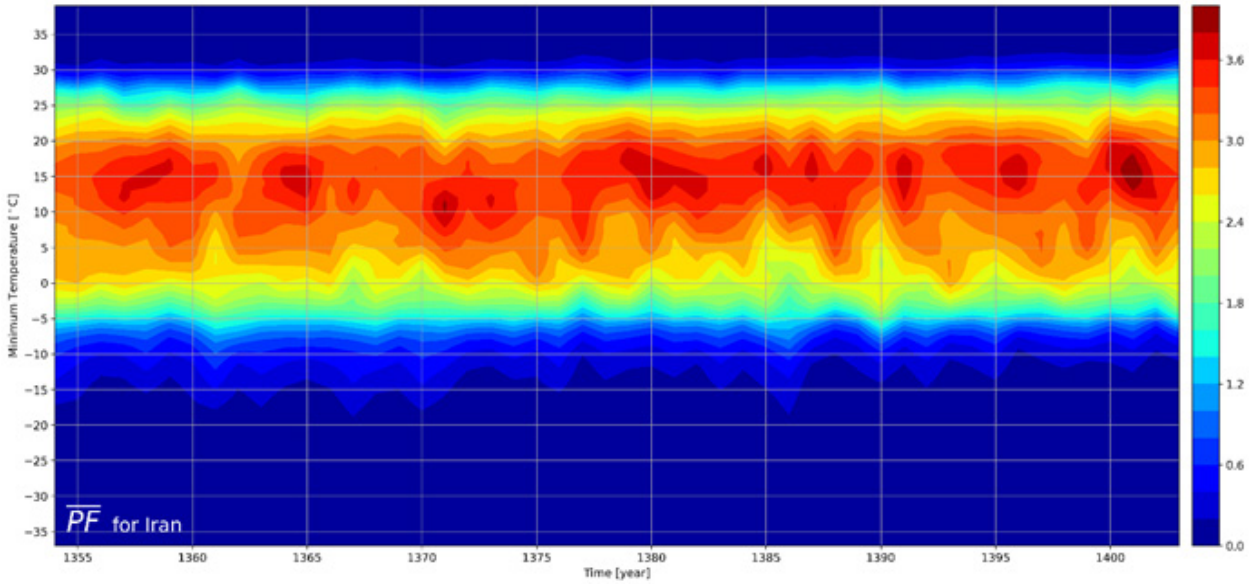
در برابر داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد که هرچند داده‌های بازکاوی اندکی (۰/۲- درجه سلسیوس) کم‌برآوردی دارند و به ویژه در بخش راست توزیع (دماهای بالا) همخوانی کمتری با داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهند اما ۱) پراکندگی مکانی نایکنواخت ایستگاه‌ها در برابر شبکه منظم ۰/۱ درجه‌ای داده‌های بازکاوی، ۲) گسست‌های زمانی داده‌های ایستگاهی در برابر پیوستگی زمانی داده‌های بازکاوی، ۳) شمار اندک ایستگاه‌ها در برابر شمار فراوان یاخته‌ها یعنی ۱٤۳ ایستگاه در برابر ۱۵۵۷۷ یاخته، ٤) ناهمگنی داده‌های ایستگاهی در برابر همگنی داده‌های بازکاوی برخی از دلایلی هستند که بهره‌گیری از داده‌های بازکاوی را برای بررسی فرگشت توزیع فراوانی دمای کمینه ایران موجه می‌نمایند. در عین حال همیشه جا برای کوشش بیش‌تر برای دستیابی به داده‌هایی که راستی‌نمایی بیش‌تری داشته باشند هست.



نگاره ۳: مقایسه توزیع فراوانی دمای کمینه ایستگاه کاشان با داده‌های بازکاوی

۳- نتایج و بحث

در گذر پنج دهه گذشته دماهای کمینه ایران غالباً بین ۱۵- تا ۳۰ درجه سلسیوس بوده است. در بیش‌تر سال‌ها دمای ۱۵ درجه سلسیوس بیش‌ترین فراوانی را داشته است. هسته‌های بیشینه فراوانی از سال ۱۳۷۷ به این سو نیرومندتر شده‌اند (نگاره ٤). پراکنش زمانی هسته‌های فراوانی بالاتر از سه درصد در نگاره ٤ به خوبی آشکار می‌نماید که در پنج دهه گذشته توزیع فراوانی دمای کمینه ایران دگرگون شده است. چنان که گفتیم این دگرگونی پیامدهای فراوانی دارد. در زمینه اثر تغییر توزیع فراوانی بر تغییر میانگین دما در نظر بگیرید که هسته‌های فراوانی در سال ۱۳٦۱ و سال ۱٤۰۲ در تقابل آشکار با یکدیگرند. در سال ۱٤۰۲ هسته فراوانی ٤ درصدی بارز و آشکار است؛ در حالی که در سال ۱۳٦۱ هسته فراوانی سه درصدی دیده می‌شود (نگاره ٤). اما تقابل توزیع فراوانی دمای کمینه این دو سال چه پیامدی برای میانگین دمای کمینه آنها دارد؟



نگاره ٤: سری زمانی (۱۴۰۳-۱۳۵٤) میانگین وزنی مکانی (بر روی ایران) توزیع فراوانی دمای کمینه

مقایسه توزیع فراوانی دمای کمینه این دو سال نشان می‌دهد که سال ۱۳٦۱ سالی دو فصلی بوده که در فصل سرد دماهای نزدیک صفر و در فصل گرم دماهای نزدیک ۱٦ درجه سلسیوس غالب بوده‌اند. در مقابل سال ۱٤۰۲ از نظر دمای کمینه یکدست‌تر بود و تضاد دمایی درون سالانه کم‌تری داشته است که توزیع تک‌نمایی دما همین ویژگی را نشان می‌دهد (نگاره ٥). میانگین دما از طریق رابطه (۸) با توزیع فراوانی دما پیوند دارد:

$$\bar{\bar{T}} = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{77} f_i \, \breve{T}_i \qquad (۸)$$

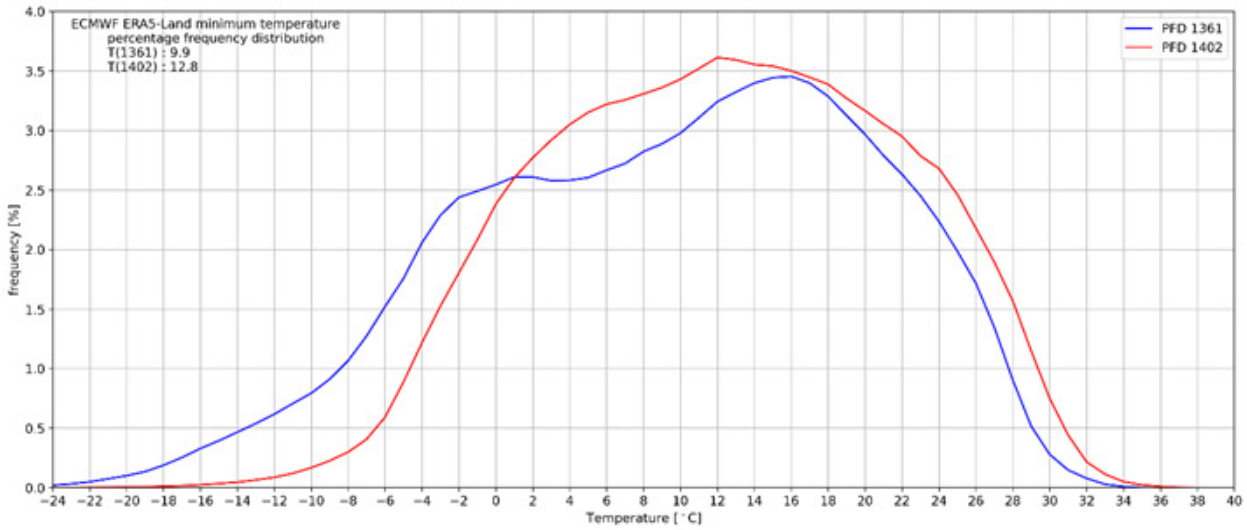
در اینجا $\bar{\bar{T}}$ میانگین دمای کمینه، f_i درصد فراوانی دسته دمایی iام، $\breve{T}_i$ میانه دسته دمایی iام است. در این صورت تغییر دمای ناشی از تغییر توزیع فراوانی باید از رابطه (۹) به دست آید:

$$\Delta\bar{\bar{T}} = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{77} (f_{i1} - f_{i0}) \, \breve{T}_i \qquad (۹)$$

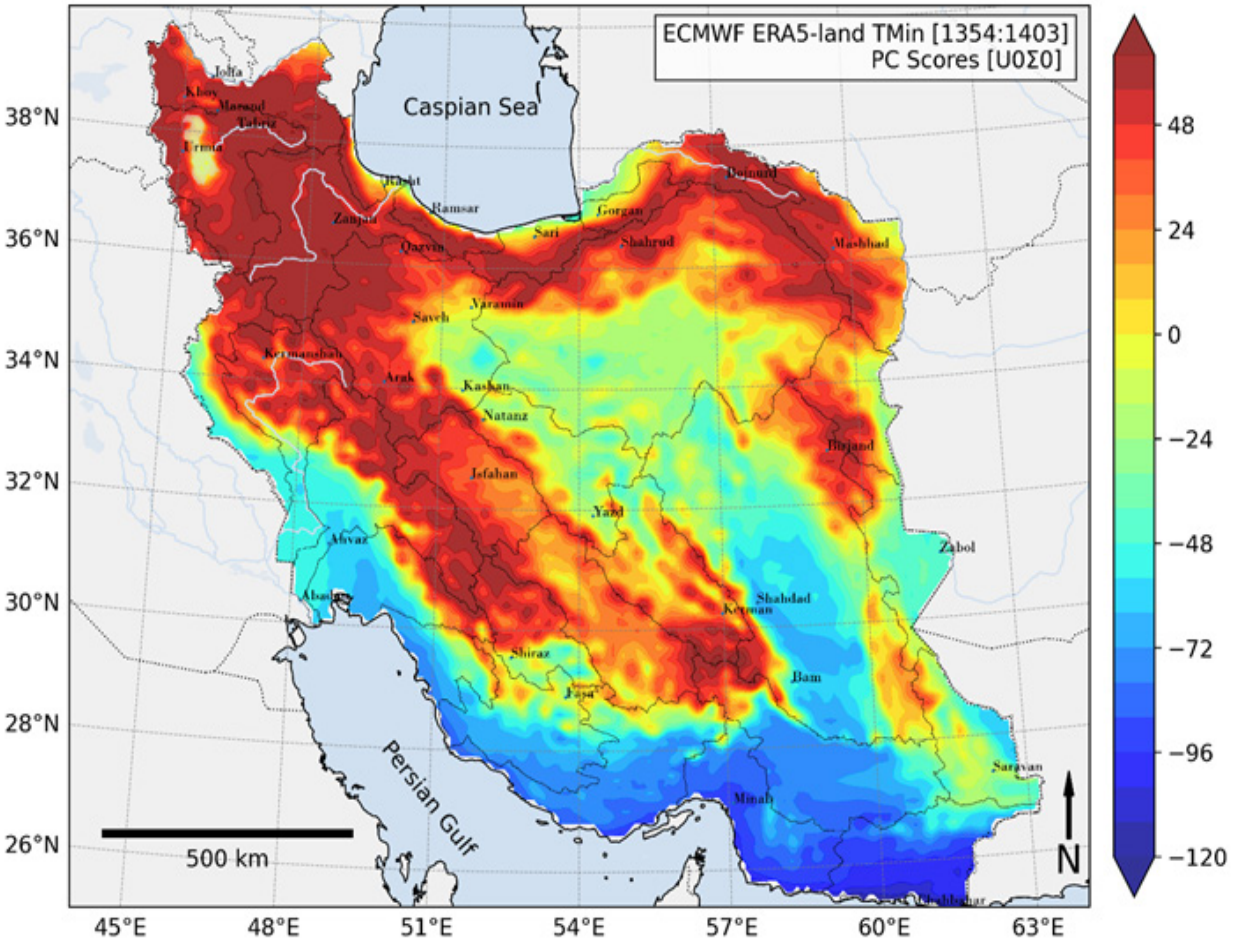
در اینجا $\Delta\bar{\bar{T}}$ تفاوت میانگین دمای کمینه، f_{i0} درصد فراوانی دسته دمایی iام در زمان مبدأ، f_{i1} درصد فراوانی دسته دمایی iام در زمان مقصد، $\breve{T}_i$ میانه دسته دمایی iام است.

تفاوت توزیع فراوانی دمای کمینه در سال ۱۳٦۱ و ۱٤۰۲ سبب شده تا میانگین دمای کمینه سال ۱٤۰۲ نزدیک به ۲/۹ درجه سلسیوس بالاتر از سال ۱۳٦۱ باشد. این در حالی است که نمای دما در سال ۱٤۰۲ حدود ۱۲ درجه سلسیوس اما در سال ۱۳٦۱ حدود ۱٦ درجه سلسیوس بوده است (نگاره ٥).

تجزیه مقادیر تکین می‌تواند مهم‌ترین تغییرات توزیع فراوانی که در اینجا برای نمونه بین سال ۱۳٦۱ و ۱٤۰۲ انجام شد را یکجا نمایش دهد. مؤلفه نخست تجزیه مقدار تکین به تنهایی نزدیک به ٤۲ درصد پراش کل داده‌ها را تبیین می‌کند. از این رو این مؤلفه ویژگی بنیادی و ساختاری زمانی و مکانی توزیع فراوانی دمای کمینه در ایران را نمایندگی می‌کند. به بیان دیگر این مؤلفه نشان می‌دهد که در کجای ایران (نگاره ٦)، در کدام سال چه دمایی فراوان‌تر بوده (نگاره ۷) یا در کجای ایران (نگاره ٦) فراوانی چه دمایی (نگاره ۸) چیره بوده است. به تعبیر دیگر نمرات مؤلفه نخست الگوی مکانی غالب و بردار ویژه نخست الگوی دمایی غالب را نمایندگی می‌کند. نمرات این مؤلفه (نگاره ٦) نشان می‌دهد که مهمترین ویژگی مکانی توزیع فراوانی دمای کمینه در ایران تبـاین میان سرزمین‌های کوهستانی و شمال غرب کشور با دشت‌ها و جلگه‌ها است. به سخن دیگر نمرات مؤلفه نخست ایران را از دیدگاه توزیع فراوانی دمای کمینه به دو بخش ایران سرد و ایران گرم افراز می‌کند.



نگاره ۵: میانگین وزنی مکانی (بر روی ایران) توزیع فراوانی دمای کمینه در سال‌های ۱۳۶۱ و ۱۴۰۲

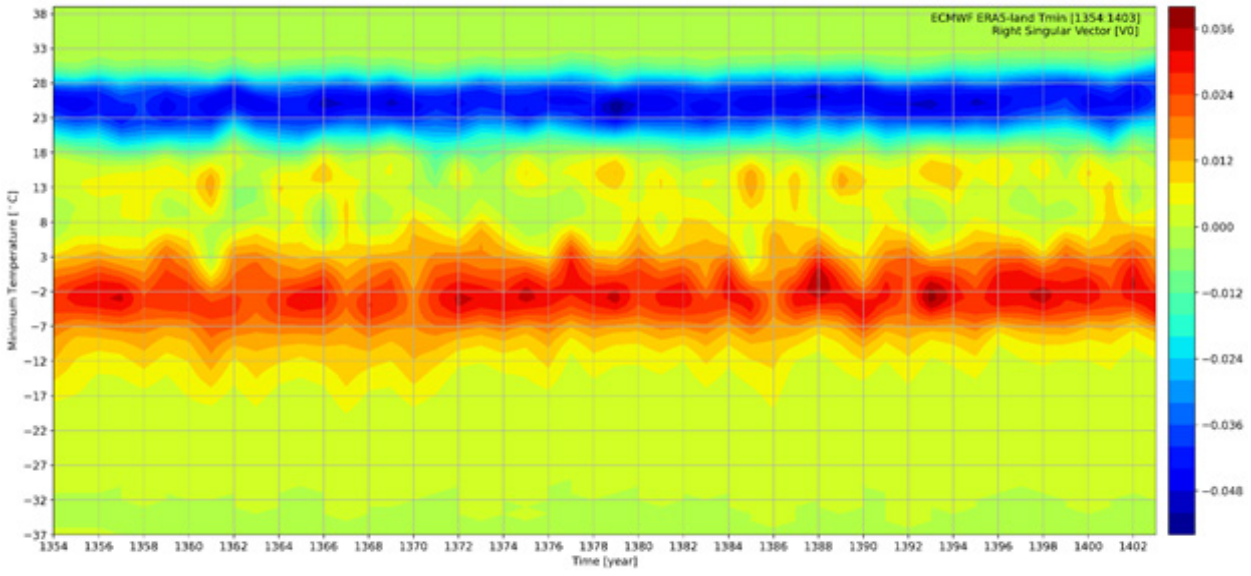


نگاره ٦: نمرات مؤلفه اول

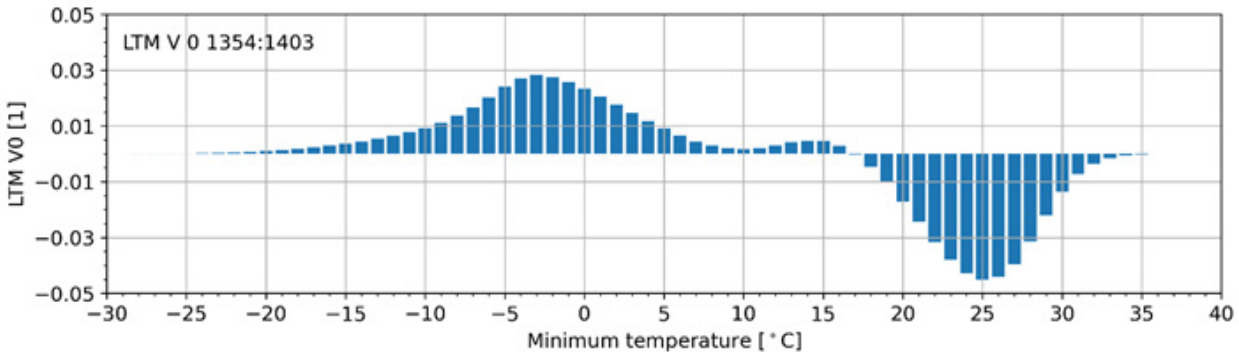
بردار ویژه نخست اهمیت دو دامنه دمایی را در ایران نشان می‌دهد: نخست دامنه دمایی ۷- تا ۳ درجه سلسیوس که آن را دامنه سرد می‌نامیم و دوم دامنه دمایی ۲۰ تا ۲۹ درجه سلسیوس که آن را دامنه گرم می‌نامیم (نگاره ۷). از آنجا که مقادیر بردار ویژه نخست در دامنه گرم منفی است تجزیه مقدار تکین ایجاب می‌کند که فراوانی این دسته دماها بر روی بخش‌هایی از نگاره ٦ که نمرات مؤلفه نخست آنها منفی است بالاتر از میانگین ایران باشد. به بیان دیگر چون داریم $F = PF - \overline{PF} = U\Sigma V^T$ پس هرگاه $U\Sigma$ و V^T هر دو منفی باشند F مثبت خواهد بود یعنی PF بزرگتر از $\overline{PF}$ بوده است. به زبان آب و هواشناختی بر روی ایران سرد دماهای ۷- تا ۳ درجه سلسیوس فراوان‌تر و بر روی ایران گرم فراوانی دماهای ۲۰ تا ۲۹ درجه سلسیوس بیشتر است. همین عبارت را می‌توان چنین هم بیان کرد: چون بردار ویژه نخست(V^T) روی دامنه دمایی گرم منفی است(نگاره ۷) پس هر جا نمرات مؤلفه نخست($U\Sigma$) مثبت باشند (نگاره ٦) F منفی است و در نتیجه بر روی ایران سرد دماهای ۲۰ تا ۲۹ درجه سلسیوس فراوانی کمتری دارند. فراوانی کمتر و فراوانی بیشتر در مقایسه با میانگین زمانی مکانی توزیع فراوانی دمای کمینه ایران ($\overline{PF}$) سنجیده می‌شود که معیار و سنگ محک ارزیابی تغییرات و تفاوت‌های فراوانی است. دیدیم که میانگین دمای کمینه ایران در پنج دهه گذشته ۱۱/٤ درجه سلسیوس بوده است؛ با این حال چنان که بردار ویژه نخست نشان می‌دهد مرز میان ایران گرم و ایران سرد جایی بین دمای ۸ تا ۱۸ درجه سلسیوس است (نگاره ۷).

چون نگاره ۷ بردار ویژه نخست (سری زمانی سالانه هر دسته دمایی) را نشان می‌دهد میانگین‌گیری از این نگاره در بعد زمان میانگین بلندمدت روی هر دسته دمایی ($\bar{V}_1$) را به دست می‌دهد (نگاره ۸). نمودار $\bar{V}_1$ نماینده الگوی غالب توزیع فراوانی دمای کمینه است و نشان می‌دهد که دمای ۱۷ درجه سلسیوس مرز دو پهنه دمایی سرد و گرم ایران است (نگاره ۸). بر روی ایران گرم (پهنه‌های آبی رنگ نگاره ٦) دماهای حدود ۲۵ درجه سلسیوس غالب هستند (نگاره ۸)؛ دماهای بین ۷ تا ۱۷ درجه سلسیوس (نگاره‌های ۷ و ۸) نماینده پهنه‌های معتدل هستند؛ و بر روی ایران سرد (پهنه‌های سرخ رنگ نگاره ٦) دماهای حدود ۳- درجه سلسیوس غالب هستد (نگاره ۸).

از آنچه گذشت روشن می‌شود که مؤلفه نخست نماینده نواحی دمایی ایران است و کشور را به سه پهنه متمایز افراز می‌کند. توزیع فراوانی دمای کمینه در هر یک از این سه پهنه



نگاره ۷: نمرات مؤلفه اول



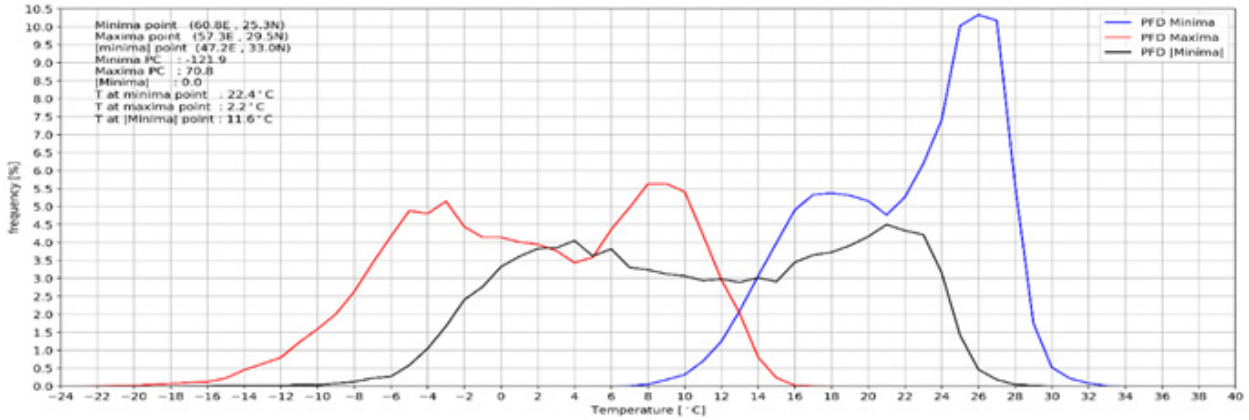
نگاره ۸: میانگین بلندمدت بردار ویژه نخست

متفاوت و متمایز از پهنه‌های دیگر است. برای روشن‌تر شدن ویژگی‌های این سه پهنه سه نقطه در ایران برگزیده و توزیع فراوانی دمای کمینه آنها را با هم مقایسه می‌کنیم: مکانی که مقدار نمره مؤلفه نخست آن بیشینه است؛ مکانی که مقدار نمره مؤلفه نخست آن کمینه است؛ و مکانی که مقدار قدرمطلق نمره مؤلفه نخست آن کمینه است. توزیع فراوانی دمای کمینه هر مکان ویژه همان مکان است و کم یا بیش با توزیع فراوانی دیگر مکان‌ها تفاوت دارد. پس در ایران ممکن است گونه‌های متنوعی از توزیع فراوانی دمای کمینه وجود داشته باشد. بردار ویژه نخست نماینده مهم‌ترین این گونه‌های توزیع فراوانی دمای کمینه است (نگاره ۸). افزون بر این گونه‌ای از توزیع فراوانی دمای کمینه که بردار ویژه نخست نماینده آن است و آن را الگوی توزیع غالب می‌نامیم همه جا به یک اندازه نمود پیدا نمی‌کند و یا ممکن است در یک مکان معین باژگونه آن نمود داشته باشد. مکانی که بزرگترین نمره مؤلفه نخست را دارد نیرومندترین نماینده الگوی توزیع غالب است؛ مکانی که کوچکترین نمره مؤلفه نخست را دارد نماینده باژگونه الگوی توزیع غالب است؛ و مکانی که نمره مؤلفه نخست آن صفر است یا به صفر نزدیک است الگوی غالب را نمایندگی نمی‌کند.

بهترین نماینده الگوی غالب مکانی است بر کوه هزار در پانزده کیلومتری جنوب‌غرب راین در استان کرمان به مختصات ۵۷/۳ شرقی و ۲۹/۵ شمالی. در اینجا توزیع فراوانی دمای کمینه دو نمایی است یکی بر روی دمای ۹ و دیگری بر روی دمای ۳- درجه سلسیوس (نگاره ۹)؛ پس نماینده اقلیمی دو فصلی (یک فصل سرد و یک فصل خنک) است که طول هر دو فصل تقریباً یکسان است. میانگین دمای کمینه این مکان ۲/۲ درجه سلسیوس است. مقدار نمره مؤلفه نخست بر روی این مکان ۷۰/۸ است و از این رو بهترین نماینده توزیع فراوانی دمای کمینه بر روی کوهستان‌های ایران است.

بهترین نماینده باژگونه الگوی غالب، مکانی است بر کرانه دریای عمان در پانزده کیلومتری شمال‌شرق چابهار در استان سیستان و بلوچستان به مختصات ۶۰/۸ شرقی و ۲۵/۳ شمالی. در اینجا نیز توزیع فراوانی دمای کمینه دو نمایی است یک نما بر روی دمای ۲۶ و دیگری بر روی دمای ۱۷ درجه سلسیوس (نگاره ۹)؛ پس نماینده اقلیمی دو فصلی (یک فصل داغ و یک فصل گرم) است که طول فصل داغ بسیار بیش از فصل گرم است. میانگین دمای کمینه این مکان ۲۲/٤ درجه سلسیوس است. مقدار نمره مؤلفه نخست بر روی این مکان ۱۲۱/۹- است و از این رو بهترین نماینده توزیع فراوانی دمای کمینه بر روی ایران گرم است.

پهنه‌هایی از ایران هست که توزیع فراوانی دمای کمینه آن نه مانند کوهستان‌ها است و نه مانند کرانه‌های عمان؛ نه آن اندازه سرد است و نه آن اندازه گرم. بهترین نماینده این پهنه‌ها مکانی است در دل جنگل‌های زاگرس در ۲۳ کیلومتری جنوب‌غرب دره‌شهر در استان ایلام به مختصات ٤۷/۲ شرقی و ۳۳/۰ شمالی. در اینجا نیز توزیع فراوانی

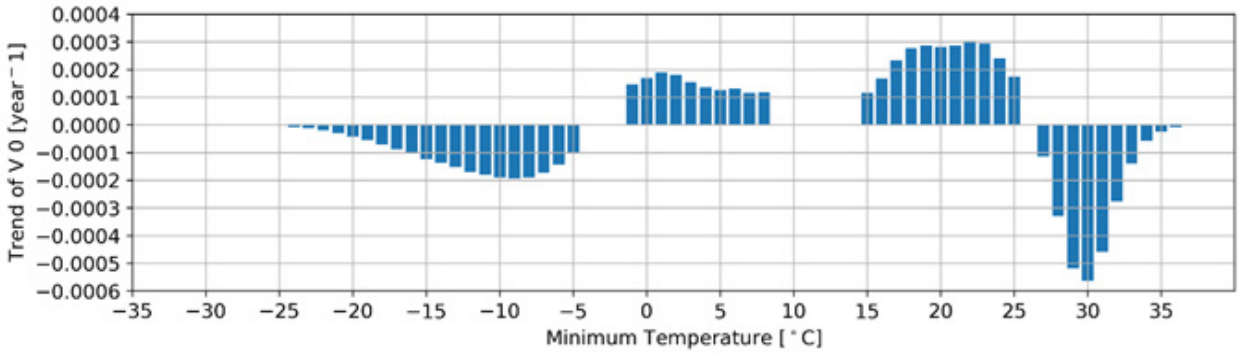


نگاره ۹: توزیع فراوانی دمای کمینه بر روی نقاطی با کم‌ترین (آبی)، بیش‌ترین (سرخ) و نمره مؤلفه صفر (سیاه)

دمای کمینه دو نمایی است یکی بر روی دمای ۲۱ و دیگری بر روی دمای ٤ درجه سلسیوس (نگاره ۹)؛ پس نماینده اقلیمی دو فصلی (یک فصل گرم و یک فصل خنک) است که طول هر دو فصل تقریباً یکسان است. میانگین دمای کمینه این مکان ۱۱/٦ درجه سلسیوس است. مقدار نمره مؤلفه نخست بر روی این مکان صفراست و از این رو نماینده الگوی غالب توزیع فراوانی دمای کمینه ایران نیست. زیرا نه دماهای خیلی پایین در آن فراوانی زیاد (کم) دارند و نه دماهای خیلی بالا در آن فراوانی زیاد (کم) نشان می‌دهند.

چون بردارهای ویژه نماینده الگوهای توزیع فراوانی دمای کمینه هستند واکاوی روند آنها می‌تواند نشان دهد در کدام بخش‌های ایران کدام دسته‌های دمایی دستخوش تغییر شده‌اند. انجام واکاوی روند بر روی بردار ویژه نخست (نگاره ۷) نشان داد که دماهای زیر ۵- درجه سلسیوس در طی پنج دهه گذشته روند کاهشی داشته‌اند (نگاره ۱۰). نگاره ۸ نشان داد که این دماها بر روی ایران سرد (نمرات مؤلفه اول مثبت) فراوان‌تر (مقدار بردار ویژه مثبت) بوده‌اند. از این رو روند منفی این دسته دماها به معنای کاهش فراوانی آنها در ایران سرد است. به بیان دیگر در پنج دهه گذشته از فراوانی دماهای زیر ۵- درجه سلسیوس بر روی بخش‌های کوهستانی ایران کاسته شده است. این کاهش فراوانی با افزایش فراوانی دماهای ۱- تا ۸ درجه سلسیوس در همین بخش کشور جبران شده است (نگاره ۱۰). از سوی دیگر بردار ویژه نخست روی دماهای بیش از ۲۷ درجه سلسیوس نیز روند کاهشی نشان می‌دهد. نگاره ۸ نشان داد که این دماها بر روی ایران گرم (نمرات مؤلفه اول منفی) فراوان‌تر (مقدار بردار ویژه منفی) بوده‌اند. از این رو روند منفی این دسته دماها به معنای افزایش فراوانی آنها در ایران گرم است. به بیان دیگر در پنج دهه گذشته به فراوانی دماهای بالاتر از ۲۷ درجه سلسیوس بر روی بخش‌های گرم ایران افزوده شده است. این افزایش فراوانی با کاهش فراوانی دماهای ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس در همین بخش کشور جبران شده است (نگاره ۱۰). به بیان دیگر بر روی ایران سرد فراوانی دماهای ۱- تا ۸ درجه سلسیوس به بهای کاهش فراوانی دماهای زیر ۵- درجه سلسیوس افزایش یافته و بر روی ایران گرم از فراوانی دماهای ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس کاسته و به فراوانی دماهای بالاتر از ۲۷ درجه سلسیوس افزوده شده است (نگاره ۱۰).

چنان که دیدیم توزیع فراوانی دمای کمینه در ایران دستخوش تغییر شده است اما چگونگی و اندازه تغییر فراوانی همه جای ایران یکسان نبوده است. اگر نیمه دوم (۱٤۰۳-۱۳۷۹) و نیمه نخست (۱۳۷۸-۱۳٥٤) بازه زمانی را با هم مقایسه کنیم می‌بینیم که فراوانی دماهای زیر ۵- درجه سلسیوس در همه جا کاهش یافته اما این کاهش بر روی محور زاگرس و آذربایجان و بر روی البرز نیرومندتر بوده است (نگاره ۱۱ چپ بالا). حوضه آبی سپیدرود، حوضه اورمیه، حوضه ارس، حوضه



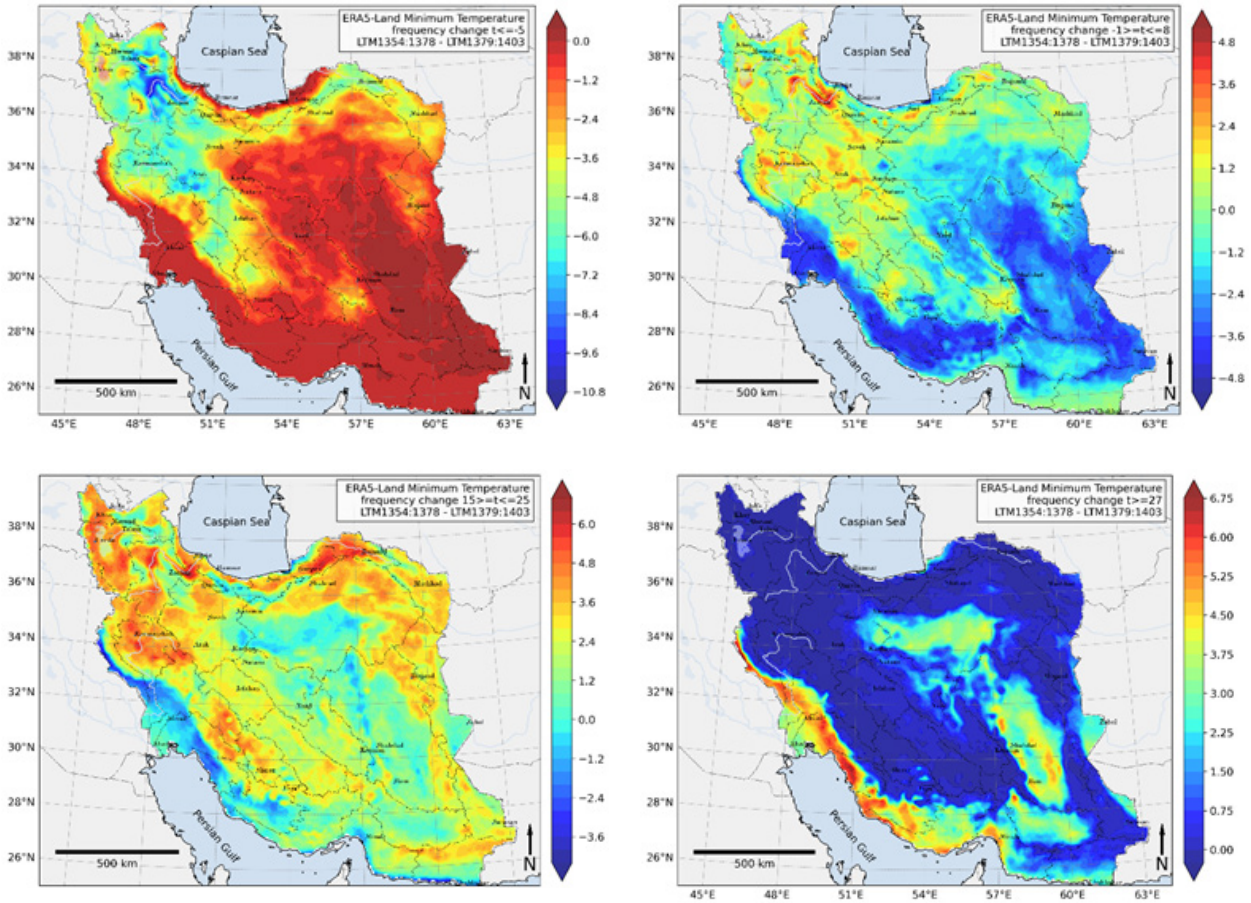
نگاره ۱۰: روند بردار ویژه نخست

کارون و حوضه گاوخونی بیش‌ترین کاهش فراوانی دماهای زیر ۵- درجه سلسیوس را تجربه کرده‌اند (نگاره ۱۱ چپ بالا). در کنار آن فراوانی دماهای ۱- تا ۸ درجه سلسیوس بر روی همان مناطق افزایش یافته است. حوضه‌های آبی سپیدرود، انزلی، اورمیه، ارس، دریاچه نمک، کرخه، کارون و گاوخونی بیش‌ترین افزایش فراوانی این دسته دماها را نشان می‌دهند (نگاره ۱۱ راست بالا). همراه با کاهش فراوانی دماهای ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس به مقدار ۵ تا ٦ درصد در کرانه‌های جنوبی و ایران میانی (نگاره ۱۱ چپ پایین) فراوانی دماهای بالای ۲۷ درجه سلسیوس به همان مقدار بر روی همین بخش‌ها افزایش یافته است (نگاره ۱۱ راست پایین). وضعیتی که چهار نقشه موجود در نگاره ۱۱ نمایش می‌دهند همان چیزی است که آن را فرگشت توزیع فراوانی دما نامیدیم. به بیان دیگر توزیع فراوانی دما که در روزگاران گذشته چیره بوده از میان رفته و توزیع فراوانی نوینی جایگزین آن شده است. این جایگزینی در هر دو بخش سرد و گرم ایران به معنای کاهش فراوانی دماهای پایین و افزایش فراوانی دماهای بالا بوده است. این گونه فرگشت به معنای انتقال به راست منحنی توزیع فراوانی دمای کمینه در سراسر ایران است.

چنان که پیش از این گفتیم فرگشت توزیع فراوانی دما پیامدهای زیادی دارد که تغییر میانگین و تغییر فرین‌ها از آن جمله هستند. اینک جای این پرسش است که تغییر فراوانی در چهار گروه دمایی یاد شده چه اندازه در تغییر میانگین دمای کمینه اثرگذار بوده است؟ محاسبات نشان داد که فراوانی دماهای کم‌تر از ۵- درجه سلسیوس پس از سال ۱۳۷۸ نسبت به ۲۵ سال پیش از آن به طور میانگین در ایران ۱/۸ درصد کاهش یافته است. این اندازه کاهش فراوانی سبب شده میانگین دمای کمینه ایران ۰/۹۱ درجه سلسیوس افزایش یابد. بیش‌ترین تغییر دمای کمینه ناشی از این تغییر فراوانی در حوضه‌های آبی سپیدرود، حوضه اورمیه، حوضه ارس، حوضه کارون و حوضه گاوخونی دیده شده که از ۰/۷ درجه سلسیوس بالاتر بوده است (نگاره ۱۲ چپ بالا).

نتیجه‌گیری

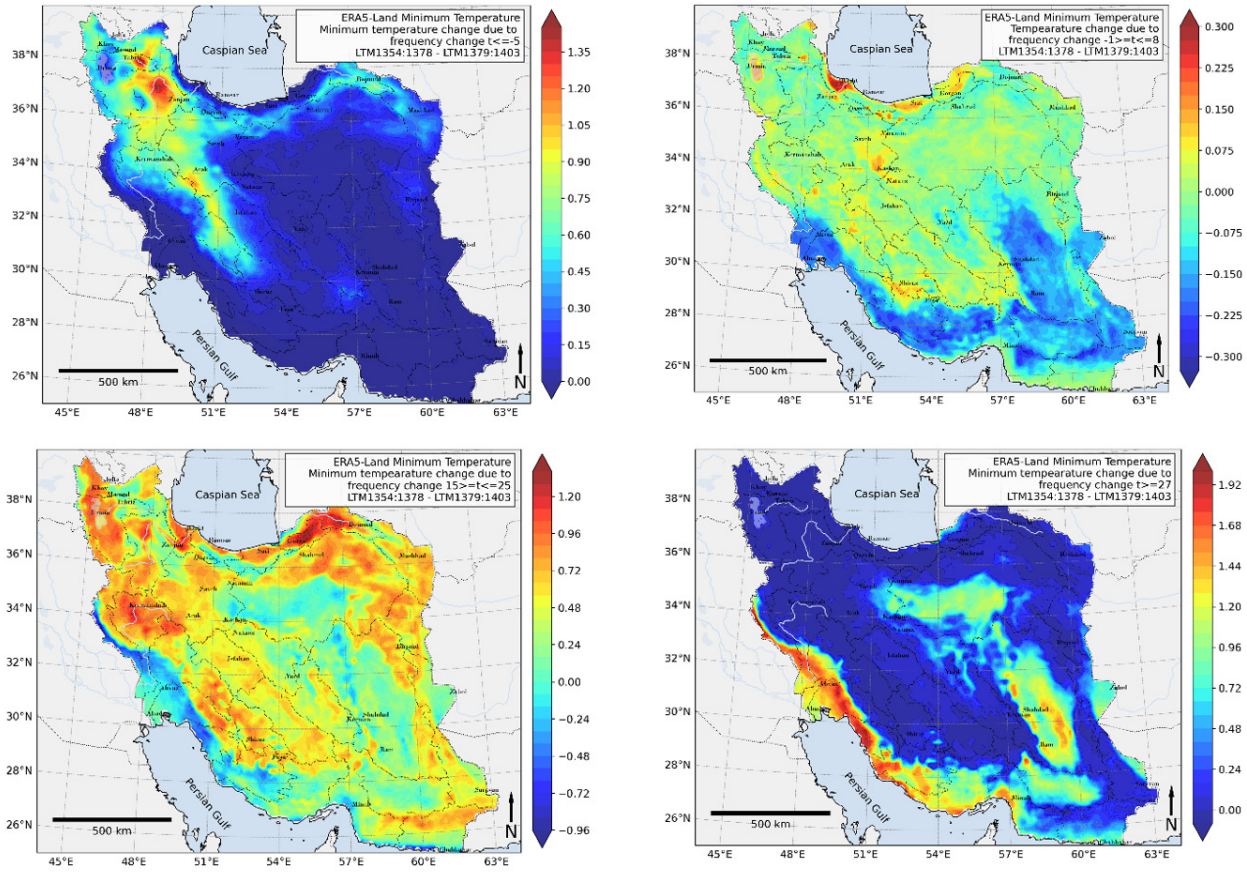
این پژوهش نشان داد که در کجای ایران کدام دماهای کمینه چه اندازه دستخوش تغییر شده‌اند. چهار دسته دمایی شناسایی شد که تغییر فراوانی آنها چشمگیر بوده است (جدول ۱). فرگشت توزیع فراوانی در این چهار دسته دمایی پیامدهای بزرگی دارد که در اینجا تنها به تغییر میانگین دمای کمینه کشور پرداختیم. در پی تغییر توزیع **فراوانی دمای کمینه در نیمه دوم بازه بررسی شده نسبت** به نیمه نخست، میانگین دمای کمینه ایران ۰/۹٤ درجه سلسیوس افزایش یافته است. این دستاورد با نتایج پژوهش Mohammadi et al., 2017:362 و Zavare and Rahimzadeh, 2014:181 همخوانی دارد و در عین حال ریشه این افزایش دما که همان تغییر توزیع فراوانی دمای کمینه بوده است را آشکار می‌سازد. همچنین نشان داده‌ایم که تغییر فراوانی هر بازه دمایی چه اندازه بوده و چه اندازه در تغییر دمای کمینه نقش بازی کرده است.



نگاره ۱۱: تغییر فراوانی دسته‌های دمایی در پنج دهه گذشته. تغییر فراوانی ۱) دماهای کم‌تر از ۳- درجه سلسیوس (چپ بالا) و ۲) تغییر فراوانی دماهای بین ۱- تا ۸ درجه سلسیوس (راست بالا)؛ ۳) تغییر فراوانی دماهای بیش از ۲۷ درجه سلسیوس (راست پایین) و ٤) تغییر فراوانی دماهای بین ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس (چپ پایین)

جدول ۱: تغییر فراوانی و تغییر دمای ناشی از آن

	$t \leq -۵$	$-۱ \leq t \leq ۸$	$۱۵ \leq t \leq ۲۵$	$t \geq ۲۵$
تغییر فراوانی (درصد)	−۱/۸	−۱/۱	+۲/۰	+۱/۱
تغییر دمای کمینه (درجه سلسیوس)	+۰/۱۹	−۰/۰٤	+۰/٤۲	+۰/۳۳



نگاره ۱۲) تغییر دمای کمینه (درجه سلسیوس) ناشی از تغییر فراوانی دسته‌های دمایی در پنج دهه گذشته.
تغییر دمای ناشی از تغییر فراوانی ۱) دماهای کم‌تر از ۵- درجه سلسیوس(چپ بالا) و ۲) تغییر فراوانی دماهای بین ۱- تا ۸ درجه سلسیوس(راست بالا)؛ ۳) تغییر فراوانی دماهای بیش از ۲۷ درجه سلسیوس(راست پایین) و ٤) تغییر فراوانی دماهای بین ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس(چپ پایین).

تشکر و سپاسگزاری

بدینوسیله از انباره داده‌های اقلیمی؛ پیشخوان تغییر اقلیم کپرنیک[1] (۲۰۲٤) برای فراهم آوردن داده‌های دمای هوای دومتری، سپاسگزاری می‌شود.

تعارض منافع

تحقیق حاضر تحت حمایت مادی بنیاد ملّی علم ایران (INSF) برگرفته از طرح شماره «٤٠٤٠٧١٩٢» انجام شده است و تعارض منافع در این اثر وجود ندارد.

بیانیه استفاده از هوش مصنوعی

نویسنده از هوش مصنوعی (DeepSeek,۲۰۲۶) برای آماده‌سازی چکیده مبسوط اثر استفاده کرده است.

References

1. Abdalla, A. H., Kai, K. H., Khamis, S. A., Kondowe, A. L., Osima, S. E., King'uza, P. H., & Hamad, A. O. (2023). The influence of climate change and variability on spatio-temporal rainfall and temperature distribution in zanzibar. Atmospheric and Climate Sciences, 13(2), 282-313. DOI: 10.4236/acs.2023.132016

1. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store

2. 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
3. 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
4. Fu, D., & Ding, Y. (2021). The study of changing characteristics of the winter temperature and extreme cold events in China over the past six decades. International Journal of Climatology,41(4),24802494. https://doi.org/10.1002/joc.6970
5. González‐Hidalgo, J. C., Beguería, S., Peña‐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. 10.1002/joc.7331
6. Grace, W., & Curran, E. (1993). A binormal model of frequency distributions of daily maximum. Australian Meteorological Magazine,42(4), 151.
7. 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
8. 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
9. La Sorte, F. A., Johnston, A., & Ault, T. R. (2021). Global trends in the frequency and duration of temperature extremes. Climatic Change,166(1), 1. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03094-0
10. 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
11. 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
12. 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.
13. Mohammadi, H., Ranjbar, F., & Moghbel, M. (2017). Warming effects on minimum temperature of Iran. Geography,14(51), 351-366. https://sid.ir/paper/150484/fa
14. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth system science data, 13(9), 4349-4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021.
15. Nasaji Zavare, M., & Rahimzadeh, F. (2014). Trends and variability of temperature during 1961-2010 over Iran, after adjustment of non climatic inhomogeneities. Geographical Research, 29(115), 181-196. https://sid.ir/paper/30027/fa
16. Ouyang, X., Liao, W., & Luo, M. (2024). Change of probability density distributions of summer temperatures in different climate zones. Frontiers of Earth Science,18(1), 116. https://doi.org/10.1007/s11707-022-1006-1
17. 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
18. Sanches, F. H., Martins, F. R., Conti, W. R., & Christofoletti, 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
19. Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D., ... & Allan, R. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. Climate change 2021: The physical science basis: Working group I contribution to the

sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,15131766. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013

20. 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
21. Strang, G. (2022). Introduction to linear algebra. Wellesley-Cambridge Press.
22. 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
23. 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
24. Vogel, E., Donat, M. G., Alexander, L. V., Meinshausen, M., Ray, D. K., Karoly, D., ... & Frieler, K. (2019). The effects of climate extremes on global agricultural yields. Environmental Research Letters, 14(5), 054010. 10.1088/1748-9326/ab154b

COPYRIGHTS

©2026 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NoDerivs 4.0 International (CC BY-ND 4.0)