



Comparative Analysis of the Spatio-Temporal Distribution of Thermal Stress Derived from ERA5-Land Reanalysis and Observational Data in Iran

Faezeh Noori¹ , Amir Hussain Meshkatee² ✉, Abbas Ranjbar Saadat Abadi³ , Mojtaba Ezam⁴

1. Department of Earth Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: f.noori5752@iau.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Earth Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: ameshkatee@iau.ac.ir

3. Department of Meteorological Hazards Forecasting, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

Email: a-ranjabr@iriimo.ir

4. Department of Marine Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: ezam@srbiau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

2 June 2025

Revised:

1 September 2025

Accepted:

7 October 2025

Available online:

9 November 2025

Keywords:

Thermal Comfort,
Effective Temperature
Index,
Baker Index.

ABSTRACT

This study assesses the performance of ERA5-Land reanalysis data in identifying thermal stress conditions by comparison with synoptic station observations across Iran during the period 1991 to 2020. Daily temperature, humidity, and wind speed data from both datasets were employed to calculate the Effective Temperature and Baker thermal indices. Spatial and temporal variations were examined on a seasonal basis, with further comparisons conducted for cold-dry and warm-humid climatic zones. ERA5-Land showed strong agreement with observational data in reproducing the spatiotemporal distribution of thermal indices, particularly during spring and summer, with a correlation coefficient of 0.80 ($p < 0.005$). During winter, both datasets indicated extensive cold stress conditions; observational data showed that 79 percent of the country experienced mild to moderate cold stress, compared with approximately 95 percent in the ERA5-Land dataset. Within the cold-dry climatic zone, the number of observed very cold days declined from approximately 100 to fewer than 10, while days classified as no thermal stress increased from about 50 to more than 150. In contrast, ERA5-Land exhibited relatively stable values, indicating approximately 80 to 100 very cold days throughout the study period. During summer, observational data indicated that more than 62 percent of Iran experienced mild to moderate heat stress, whereas ERA5-Land estimated this proportion at approximately 43 percent. In the warm-humid climatic zone, the number of observed very hot days increased from fewer than 50 in 2000 to more than 350, while ERA5-Land captured only about 150 such days. Overall, ERA5-Land effectively captures broad-scale thermal stress patterns but tends to underestimate extreme local climatic variations.

Cite this article: Noori, F., Meshkatee, A. H., Ranjbar Saadat Abadi, A., & Ezam, M. (2025). Comparative Analysis of the Spatio-Temporal Distribution of Thermal Stress Derived from ERA5-Land Reanalysis and Observational Data in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (3), 1-21.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.400974.1007901>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Understanding thermal conditions is essential for promoting human health, productivity, and overall well-being, as well as for informing urban and environmental planning. These conditions, shaped by temperature, humidity, wind, and solar radiation, can produce both beneficial effects, such as facilitating economic and social activities, and adverse outcomes, including heat- and cold-related illnesses and mortality. To evaluate thermal comfort and thermal stress, numerous bioclimatic indices have been developed. Their accuracy, however, depends strongly on the quality and spatial resolution of the input data.

In recent years, reanalysis datasets such as ERA5-Land have been widely used in climate research because of their extensive spatial and temporal coverage. These datasets, generated through the integration of numerical modeling and meteorological observations, provide a consistent representation of atmospheric conditions. Nevertheless, their reliability at local scales and across diverse climatic zones requires careful validation. By contrast, observational data from synoptic stations, despite limitations such as incomplete spatial coverage and occasional missing values, generally provide more accurate measurements at the local scale. They therefore serve as an essential benchmark for evaluating the performance of reanalysis datasets.

Previous studies conducted in Iran have largely relied on observational data, demonstrating the strong influence of thermal stress on energy demand, building design, and human thermal comfort. These findings also indicate a significant increase in heat stress during recent decades, particularly in lowland regions. Nevertheless, no comprehensive study has directly compared thermal indices derived from reanalysis data with those calculated from synoptic station observations across Iran.

The present study addresses this gap by evaluating the performance of ERA5-Land data in calculating thermal indices and comparing the results with observational records across Iran's diverse climatic

conditions. This comparison is particularly relevant for applications in public health, energy management, and environmental planning.

Methodology

Two datasets were employed: ERA5-Land reanalysis data and synoptic meteorological observations from the Iran Meteorological Organization (IRIMO) covering the period 1991 to 2020. ERA5-Land, developed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), provides hourly data at a spatial resolution of 0.1 degrees. The observational dataset consisted of monthly mean air temperature, wind speed, and relative humidity records obtained from 130 synoptic stations with complete data coverage. Two thermal comfort indices, Net Effective Temperature (NET) and the Baker Index (CPI), were selected because both can be computed using variables available in reanalysis datasets. These indices were calculated on an hourly basis for both datasets using the Python programming language. ERA5-Land values were extracted from grid points nearest to the synoptic station coordinates and for specific observation times (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, and 21 UTC). Seasonal maps of the thermal indices were generated using Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation in order to illustrate their spatial patterns. In addition, mean values of the indices were compared across two representative climatic regions, namely a cold-arid zone in northwestern Iran and a hot-humid zone along the southern coastal areas. The reliability of ERA5-Land was further evaluated by calculating correlation coefficients, coefficients of determination (R^2), and corresponding statistical significance levels (p-values).

Results and Discussion

Both the observational dataset and the ERA5-Land reanalysis exhibited consistent spatial and seasonal patterns; however, ERA5-Land generally produced slightly cooler thermal values. During winter, most regions of Iran were affected by cold stress conditions, while near-comfort conditions were largely confined to the southern coastal areas. In summer, widespread heat stress was observed across central, southern, and

eastern regions of the country. ERA5-Land demonstrated better performance during the warmer seasons, particularly spring and summer, showing stronger correlations with station-based observations, whereas its accuracy declined during autumn and, most notably, winter.

Spatial analyses indicated that ERA5-Land tends to underestimate topographic influences in mountainous areas, frequently reporting temperatures lower than those observed at synoptic stations. Climatic comparisons revealed that observational data more effectively captured warming trends, particularly the increase in extremely hot days in the hot-humid southern regions after 2000. By contrast, ERA5-Land substantially underestimated this increasing trend.

Statistical evaluations confirmed these findings; correlation coefficients were highest in spring and summer (r approximately 0.8), while weaker relationships were observed during autumn and winter (r approximately 0.5 to 0.7). Overall, ERA5-Land provides a reliable source for assessing thermal comfort during warmer periods; however, it requires calibration and integration with station observations for colder seasons and regions characterized by complex topography.

Conclusion

This study demonstrates that ERA5-Land data can reliably reproduce large-scale patterns of thermal comfort across Iran during the period 1990 to 2020, with the strongest agreement observed in spring and summer. However, ERA5-Land tends to overestimate cold stress during winter and to underestimate heat stress during summer. These discrepancies were most pronounced in mountainous areas and in the hot-humid southern coastal region. Long-term analyses further revealed that observational data more accurately capture local warming signals, such as the marked increase in extremely hot days after 2013, trends that were not adequately reflected in the ERA5-Land dataset.

In summary, ERA5-Land represents a valuable resource for identifying general patterns of thermal comfort and large-scale climatic conditions; however, it has limitations in representing localized

variations and long-term warming trends. Integrating reanalysis datasets with ground-based observational data is therefore crucial for applications related to urban planning, energy management, and climate change adaptation.

Funding

No funding was received for this study.

Authors' Contribution

All authors contributed equally to the conceptualization and writing of this article. All authors approved the final manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the scientific advisors who contributed to this study.

بررسی تطبیقی توزیع زمانی - مکانی تنش حرارتی به‌دست آمده از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land با داده‌های مشاهداتی در ایران

فائزه نوری^۱، امیرحسین مشکوتی^۲، عباس رنجبر سعادت آبادی^۳، مجتبی عظام^۴

۱- گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: f.noori5752@iau.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ameshkatee@iau.ac.ir

۳- گروه پیش آگاهی مخاطرات جوی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: a-ranjbar@irimo.ir

۴- گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ezam@srbiau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۸/۱۸

واژگان کلیدی:

آسایش حرارتی،

شاخص دمای مؤثر،

شاخص بیکر.

آسایش حرارتی از مؤلفه‌های کلیدی در ارتقاء کیفیت زندگی، بهره‌وری انسانی و برنامه‌ریزی‌های محیطی و شهری است. در این پژوهش، کارایی داده‌های بازتحلیل ERA5-Land در شناسایی تنش‌های حرارتی با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هم‌دید طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ مقایسه شد. برای این منظور، داده‌های روزانه دما، رطوبت و باد از هر دو منبع استخراج و شاخص‌های دمای مؤثر و بیکر محاسبه گردید. نتایج کلی نشان داد ERA5-Land در بازنمایی الگوهای فضایی و زمانی شاخص‌های حرارتی ایران، به‌ویژه در بهار و تابستان، تطابق قابل‌قبولی با مشاهدات دارد (ضریب همبستگی ۰.۸۰، $p < 0.005$) در زمستان، هر دو منبع وجود تنش سرمایی گسترده را تأیید کردند؛ بر اساس مشاهدات، ۷۹٪ و طبق ERA5-Land حدود ۹۵٪ مساحت کشور در معرض سرمای خفیف تا متوسط قرار داشت. در منطقه سرد و خشک، مشاهدات کاهش روزهای «خیلی سرد» از حدود ۱۰۰ به کمتر از ۱۰ روز و افزایش روزهای «بدون تنش» از ۵۰ به بیش از ۱۵۰ روز را ثبت کردند، درحالی‌که ERA5-Land فراوانی روزهای «خیلی سرد» را تقریباً ثابت و در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ روز گزارش نمود. در تابستان، مشاهدات بیش از ۶۲٪ و ERA5-Land حدود ۴۳٪ مساحت کشور را با گرمایش خفیف تا متوسط گزارش کردند. در منطقه گرم و مرطوب، بر اساس مشاهدات، تعداد روزهای «خیلی گرم» از کمتر از ۵۰ روز در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۳۵۰ روز افزایش یافت، اما ERA5-Land این تغییر را کمتر (حدود ۱۵۰ روز) بازتاب داد. این یافته‌ها بیانگر توان نسبی ERA5-Land در شناسایی الگوهای کلی تنش حرارتی است، هرچند در ثبت تغییرات شدید اقلیمی محلی، دقت آن کاهش می‌یابد.

استناد: نوری، فائزه؛ مشکوتی، امیرحسین؛ رنجبر سعادت آبادی، عباس و عظام، مجتبی. (۱۴۰۴). بررسی تطبیقی توزیع زمانی - مکانی تنش حرارتی به‌دست آمده از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land با داده‌های مشاهداتی در ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۳)، ۲۱-۱.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.400974.1007901>

مقدمه

درک دقیق از شرایط حرارتی محیط، امکان ارائه راهکارهایی برای ارتقای کیفیت زندگی انسان در فضاهای گوناگون را فراهم می‌سازد. شرایط حرارتی، که تحت تأثیر پارامترهای هواشناسی نظیر دما، رطوبت، سرعت باد و تابش خورشیدی است، نقش مهمی در سلامت، بهره‌وری و آسایش انسان دارد. قرارگیری در معرض گرمای شدید می‌تواند منجر به اختلال در سیستم تنظیم دمای بدن شده و در نهایت موجب بیماری‌های ناشی از گرما یا حتی مرگ شود (Kjellstrom et al., 2016; Raymond et al., 2020; Luo & Lau, 2021; Saylor et al., 2015; Kovats & Hajat, 2008). در مقابل، شرایط متعادل حرارتی دارای نقش برجسته‌ای در تسهیل فعالیت‌هایی اجتماعی و اقتصادی مانند گردشگری، ورزش، ساخت‌وساز و حمل‌ونقل هستند (Lin et al., 2012). برای بررسی شرایط آسایش حرارتی، شاخص‌های زیست‌اقلیمی متنوعی با استفاده از ترکیب کمیت‌هایی مانند دما، رطوبت، باد و تابش توسعه یافته‌اند که امکان ارزیابی دقیق‌تری از شرایط آسایش حرارتی در گذشته، حال و آینده را فراهم کرده‌اند (Schwingshackl et al., 2021; Dde Freitas & Grigorieva, 2015). ارزیابی دقیق تنش حرارتی در مناطق دارای اقلیم‌های متنوع، مستلزم بهره‌گیری از داده‌هایی با کیفیت بالا و وضوح مکانی مناسب است، چراکه دقت داده‌ها بر نتایج تحلیل‌های اقلیمی و برنامه‌ریزی‌های سازگاری تأثیر مستقیمی دارد (Khan et al., 2021). و تأثیر مستقیمی بر ارزیابی صحیح شاخص‌های حرارتی مانند NET و CPI دارد. باتوجه به نقش فزاینده تنش‌های گرمایی و سرمایگی در حوزه‌هایی چون سلامت عمومی، بهره‌وری نیروی انسانی، مصرف انرژی و برنامه‌ریزی شهری، ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی برای تحلیل اقلیمی از اهمیت بالایی برخوردار است. در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های باز تحلیل نظیر ERA5-Land در مطالعات اقلیمی به طور گسترده رواج یافته است (Hersbach et al., 2020). این داده‌ها، که توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی (ECMWF) تولید می‌شوند، با ترکیب مدل‌سازی عددی و داده‌های مشاهداتی، تصویری منسجم از شرایط جوی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف ارائه می‌دهند (Dee et al., 2011). در مقابل، داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی، اگرچه دارای محدودیت‌هایی از نظر پوشش مکانی و برخی نواقص در ثبت داده هستند، اما اغلب دقت بالاتری در سطح محلی دارند و می‌توانند مبنای مناسبی برای ارزیابی صحت داده‌های باز تحلیل باشند. باتوجه به این تفاوت‌ها، ارزیابی تطبیقی بین داده‌های باز تحلیل و مشاهداتی در زمینه شاخص‌های حرارتی، گامی ضروری برای اعتبارسنجی کاربرد داده‌های باز تحلیل در مطالعات اقلیمی ایران محسوب می‌شود. تحلیل شرایط آسایش حرارتی و تنش‌های گرمایی در مناطق شهری طی دهه‌های اخیر به عنوان یکی از دغدغه‌های اصلی پژوهش‌های اقلیم‌شناسی و برنامه‌ریزی شهری مطرح شده است. بررسی شاخص‌های مختلف آسایش حرارتی و میزان دقت آن‌ها در ارزیابی شرایط انسانی در مواجهه با تغییرات اقلیمی، یکی از محورهای کلیدی مطالعات اخیر در این زمینه بوده است. قانقرمه و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از دیاگرام اولگی، دماهای پایه جدیدی برای محاسبه شاخص‌های درجه روز در اقلیم‌های مختلف ایران پیشنهاد دادند و نشان دادند که استفاده از دماهای ثابت رایج (۱۸ و ۲۴ درجه) برای کل کشور مناسب نیست. انتظاری و همکاران (۱۳۹۶) در اسلام‌آباد غرب، شرایط زیست‌اقلیمی را با شاخص‌های مختلف بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد نیاز به استفاده از سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی در بخش عمده‌ای از سال اجتناب‌ناپذیر است. بر همین اساس، پژوهشگران بر اهمیت طراحی اقلیمی ساختمان‌ها و به کارگیری مصالح مناسب برای کاهش مصرف انرژی تأکید کردند. کدخدا و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از شاخص UTCI، به تحلیل روند فصلی تنش حرارتی در ایران پرداختند. یافته‌ها بیانگر افزایش معنادار تنش گرمایی به‌ویژه در فصول بهار و پاییز و در مناطق پست کشور بود. موسوی و همکاران (۱۴۰۳) در شهر رشت، وضعیت آسایش حرارتی فضاهای باز را ارزیابی کردند و بر لزوم استفاده از سایه و تهویه طبیعی در دوره گرم سال تأکید نمودند. میر و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده

از شاخص DI، روند آینده تنش گرمایی در زاهدان را تحلیل کرده و افزایش قابل توجه این شاخص را در ماه‌های خاص پیش‌بینی کردند. در سطح بین‌المللی، موهان و همکاران (۲۰۱۴) در هند، مدل اصلاح‌شده‌ای برای رتبه‌بندی حرارتی شهری ارائه دادند که ساعات روز را بر اساس فاصله از شرایط آسایش طبقه‌بندی می‌کرد. نتایج نشان داد که ارزیابی بر اساس درصد ساعات آسایش می‌تواند منجر به تحلیل نادرست وضعیت حرارتی شهرها شود، چراکه درصد ساعات با تنش حرارتی بالا در این روش نادیده گرفته می‌شود. مدل اصلاح‌شده با لحاظ کردن تمام کلاس‌های آسایش حرارتی، تصویر جامع‌تری از شرایط اقلیمی شهری ارائه می‌دهد و امکان رتبه‌بندی دقیق‌تر شهرها را فراهم می‌سازد. این رویکرد می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های شهری، مدیریت مصرف انرژی و توسعه گردشگری کاربردی باشد. پولیدوروس و کارتالیس (۲۰۱۴) نیز با استفاده از شاخص DI و داده‌های AVHRR، ماندگاری عدم آسایش حرارتی را در کلان‌شهر آتن حتی در شب گزارش کردند. رحیمی و ایزدی (۲۰۱۸) با استفاده از شاخص CPI نشان دادند که سواحل گیلان در بیشتر ماه‌های سال شرایط زیست‌اقلیمی مطلوب برای گردشگری دارند. در مطالعه‌ای دیگر، شوینگشکل و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های CMIP6 و شاخص‌های متنوع، روند افزایشی قرارگیری در معرض گرمای شدید در خاورمیانه را پیش‌بینی کردند و بر لزوم استفاده ترکیبی از شاخص‌ها برای پوشش ابعاد مختلف تنش حرارتی تأکید کردند. همچنین، لپو و همکاران (۲۰۲۳) با مرور بیش از ۱۶۰ شاخص، تأکید کردند که انتخاب شاخص وابسته به هدف مطالعه، اقلیم منطقه و مقیاس تحلیل است. بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در ایران مبتنی بر داده‌های مشاهداتی بوده‌اند و تاکنون استفاده مستقیمی از داده‌های باز تحلیل شبکه‌ای مانند ERA5-Land برای تحلیل و مقایسه شاخص‌های حرارتی در کشور انجام نشده است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی داده‌های ERA5-Land در محاسبه شرایط آسایش حرارتی و مقایسه آن با داده‌های ایستگاهی، تلاش دارد کارایی این داده‌ها را در مواجهه با تنوع اقلیمی ایران بررسی کند. این مسئله به‌ویژه در زمینه سلامت عمومی، برنامه‌ریزی انرژی و طراحی محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

روش پژوهش

برای محاسبه شاخص‌های حرارتی، به مجموعه‌ای از داده‌های هواشناسی، از جمله دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش و دمای نقطه شبنم نیاز است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از دو پایگاه داده‌های باز تحلیل پیشرفته سطح زمین موسوم به ERA5-Land و پایگاه داده‌های سازمان هواشناسی کشور استفاده شده است.

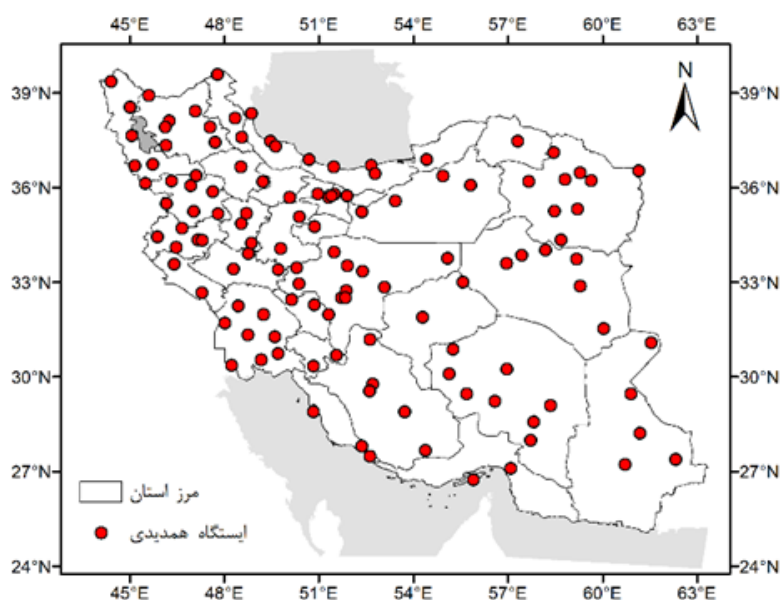
ERA5-Land در مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مقیاس هواشناسی (ECMWF) برای برخی از متغیرهای سطح زمین توسعه یافته است. طول دوره آماری داده‌های ERA5-Land از ۱۹۵۰ تا حال حاضر است که سطح زمین کل کره زمین را با تفکیک افقی ۰.۱ درجه و گام زمانی ۱ ساعته پوشش می‌دهد (یان و همکاران، ۲۰۲۱).

این داده‌ها در مقیاس ساعتی از ژانویه ۱۹۹۱ تا دسامبر ۲۰۲۰ در ۳۰ فایل با فرمت Netcdf دریافت شده است و کل کشور ایران را پوشش می‌دهد. همچنین داده‌های ساعتی دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی از سازمان هواشناسی کشور برای دوره مشابه دریافت شد. به منظور اطمینان از صحت داده‌های ساعتی، مجموعه‌ای از کنترل‌های کیفی بر داده‌های ایستگاهی و ERA5-Land اعمال شد. ابتدا کامل بودن سری‌های زمانی و وجود چهار متغیر اصلی در دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ بررسی شد و ایستگاه‌هایی که دارای نواقص گسترده یا فاقد هر یک از متغیرها بودند، حذف گردیدند. سپس مقادیر غیرواقعی هر متغیر اصلاح یا حذف شد و پیوستگی زمانی نیز از طریق شناسایی و تصحیح پرش‌های ناگهانی بین ساعات متوالی کنترل شد. در نهایت، داده‌های ساعتی ۱۳۰ ایستگاه (شکل ۱ و جدول ۲ همدید، شامل ۴۵۰۵۵۲۰۰۰ رکورد معتبر، برای

محاسبه شاخص‌های حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۱ کمیت‌های دریافت‌شده از ERA5-Land و سازمان هواشناسی کشور را نشان می‌دهد.

جدول ۱. کمیت‌های دریافت شده از پایگاه داده‌های باز تحلیل ERA5-Land و پایگاه داده‌های سازمان هواشناسی کشور

کمیت	توضیحات	واحد	منبع دریافت داده
T_a	دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین	کلوین	Era5-Land
U	مؤلفه مداری باد در ۱۰ متری از سطح زمین	متر بر ثانیه	
V	مؤلفه نصف‌النهاری باد در ۱۰ متری از سطح زمین	متر بر ثانیه	
T_d	دمای نقطه شبنم در ۲ متر بالاتر از سطح زمین	کلوین	سازمان هواشناسی
ff	سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری	متر بر ثانیه	
T	دمای هوا	درجه سلسیوس	
RH	رطوبت نسبی	درصد	



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی ایستگاه‌های همدیدی منتخب در دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های همدیدی منتخب در دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
نهبندان	۶۰.۰۳	۳۱.۵۳	فرودگاه مهرآباد	۵۱.۳۰۹	۳۵.۶۹۳	پارس‌آباد	۴۷.۸۷۷	۳۹.۶۰۸
زابل	۶۱.۵۴۳	۳۱.۰۸۹	آبعلی	۵۱.۹۸۷	۳۵.۷۷۱	ماکو	۴۴.۳۹۲	۳۹.۳۷۹
آبادان	۴۸.۲۲	۳۰.۳۷	سمنان	۵۳.۴۲۲	۳۵.۵۸۸	جلفا	۴۵.۶۰۷	۳۸.۹۳۲
بندر ماهشهر	۴۹.۱۵۹	۳۰.۵۴۶	گرمسار	۵۲.۳۶	۳۵.۲۴۳	خوی	۴۴.۹۹	۳۸.۵۶
امیدیه (آغاچاری)	۴۹.۶۸۸	۳۰.۷۴۳	ترت‌خیلریه	۵۹.۲۰۶	۳۵.۳۳۲	اهر	۴۷.۰۶۷	۳۸.۴۳۳
دوگندان	۵۰.۸۱۹	۳۰.۳۴۶	کاشمر	۵۸.۴۷۳	۳۵.۲۷۱	تبریز	۴۶.۲۳۴	۳۸.۱۲۲
یاسوج	۵۱.۵۵۵	۳۰.۶۹۹	روانسر	۴۶.۶۵	۳۴.۷۱	سهند	۴۶.۱۵۷	۳۷.۹۲۴
انار	۵۵.۲۵	۳۰.۸۸	سرپل‌ذهاب	۴۵.۸۶	۳۴.۴۵	اردبیل	۴۸.۳۲۹	۳۸.۲۱۹
کرمان	۵۶.۹۶۵	۳۰.۲۵۲	کرمانشاه	۴۷.۱۵۳	۳۴.۳۵۲	آستارا	۴۸.۸۵۵	۳۸.۳۶۵
جزیره خارک	۵۰.۳۱۵	۲۹.۲۶۵	همدان (پایگاه نوژه)	۴۸.۶۹۰۳	۳۵.۱۹۵۳	سراب	۴۷.۵۰۸	۳۷.۹۳۵
زرقان	۵۲.۷۰۴	۲۹.۷۷۸	همدان (فرودگاه)	۴۸.۵۳	۳۴.۸۵	ارومیه	۴۵.۰۵۶	۳۷.۶۵۸
شیراز	۵۲.۶۰۳	۲۹.۵۴۵	اراک	۴۹.۷۸	۳۴.۰۷	مراغه (سینوتیک)	۴۶.۱۴۶	۳۷.۳۴۸
شهر بابک	۵۵.۱۰۷	۳۰.۱۴۶	قم	۵۰.۸۵۵	۳۴.۷۷۴	میانه	۴۷.۷۳۲	۳۷.۴۲۱
سیرجان	۵۵.۶۶۱	۲۹.۴۷۱	قروه	۴۷.۷۸۶	۳۵.۱۸	خلخال	۴۸.۵۳۸	۳۷.۶۰۹
یافت	۵۶.۵۸	۲۹.۲۳۹	پروجرد	۴۸.۷۵۸	۳۳.۹۱۵	بندر انزلی	۴۹.۴۵۸	۳۷.۴۸
بم	۵۸.۳۵	۲۹.۰۸	ملایر	۴۸.۸۲	۳۴.۲۸	رشت	۴۹.۶۲۴	۳۷.۳۲۳
زاهدان	۶۰.۹	۲۹.۴۷۲	گناباد	۵۸.۶۸۳	۳۴.۳۵	بجنورد	۵۷.۳۰۳	۳۷.۴۸۸
بوشهر (ساحلی)	۵۰.۸۲۱	۲۸.۹۰۴	اسلام‌آباد غرب	۴۶.۴۷	۳۴.۱۲	پیرانشهر	۴۵.۱۴۷	۳۶.۶۹۸
فسا	۵۳.۷۱۹	۲۸.۸۹۹	ایلام	۴۶.۳۹۸	۳۳.۵۸۸	سردشت	۴۵.۴۸	۳۶.۱۵
جیرفت (میانده)	۵۷.۸۲	۲۸.۵۸	خرم‌آباد	۴۸.۲۹۵	۳۳.۴۳۳	مهاباد	۴۵.۷۱۵	۳۶.۷۵۳
خاش	۶۱.۱۹	۲۸.۲۲	الیگودرز	۴۹.۷۰۳	۳۳.۴۰۸	سقز	۴۶.۳۱۱	۳۶.۲۲۱
لار	۵۴.۳۷۵	۲۷.۶۷	کاشان	۵۱.۴۸	۳۳.۹۶۷	تکاب	۴۷.۱	۳۶.۳۹
بندرعباس	۵۶.۳۷۳	۲۷.۲۱۵	داران	۵۰.۴۰۷	۳۲.۹۸۸	زنجان	۴۸.۵۲۲	۳۶.۶۶
میناب	۵۷.۰۸۹	۲۷.۱۰۷	خور و بیابانک	۵۵.۰۸۱	۳۳.۷۷	خرمدره	۴۹.۲۱۱	۳۶.۱۹۵
کهنوج	۵۷.۷۱۳	۲۷.۹۹۴	رباط پشت بادام	۵۵.۵۵۸	۳۳.۰۱۲	قزوین	۵۰.۰۴۵	۳۶.۲۴۵
سراوان	۶۲.۳۱۹	۲۷.۳۹	طیس	۵۶.۹۵	۳۳.۶	رامسر	۵۰.۶۸۴	۳۶.۹۰۵
ایران‌شهر	۶۰.۷۱۸	۲۷.۲۳	فردوس	۵۸.۱۸۴	۳۴.۰۳۱	نوشهر	۵۱.۴۶۶	۳۶.۶۶۱
جزیره قشم	۵۵.۸۹۱	۲۶.۷۵۲	قاین	۵۹.۱۷۶	۳۳.۷۴	بابلسر	۵۲.۶۴۳	۳۶.۶۹۹
جزیره سیری	۵۴.۵۵۱	۲۵.۸۹۸	صفی‌آباد (دزفول)	۴۸.۴۳۳	۳۲.۲۵۳	قره‌خیل	۵۲.۱۰۸	۳۶.۴۸۷
جزیره ابوموسی	۵۵.۰۱۳	۲۵.۸۷۴	دهلران	۴۷.۲۸۱	۳۲.۶۸۱	گرگان	۵۴.۴۱۳	۳۶.۹۰۵
جاسک	۵۷.۷۷	۲۵.۶۳۸	کوه‌رنگ	۵۰.۱۲۵	۳۲.۴۵۸	شاهرود	۵۴.۹۲۹	۳۶.۳۸
چابهار	۶۰.۶۵۱	۲۵.۲۸۱	شهرکرد	۵۰.۸۴	۳۲.۲۹۳	قوچان	۵۸.۴۵	۳۷.۱۱۷
جم	۵۲.۳۵۶	۲۷.۸۱۶	اردستان	۵۲.۳۷۶	۳۳.۳۵۵	سرخس	۶۱.۱۴۹	۳۶.۵۳۷
عسلویه (فرودگاه)	۵۲.۶۲	۲۷.۴۸	اصفهان	۵۱.۷۰۷	۳۲.۵۱۸	بیارجمند	۵۵.۸۰۵	۳۶.۰۸۶
تهران (ژئوفیزیک)	۵۱.۳۸۷	۳۵.۷۴۷	نائین	۵۳.۰۷۹	۳۲.۸۵۱	سیزووار	۵۷.۶۴۹	۳۶.۲۰۷
ساوه	۵۰.۳۷	۳۵.۰۸	اصفهان (فرودگاه)	۵۱.۸۶۳	۳۲.۴۹۳	گلمکان	۵۹.۲۸۳	۳۶.۴۸۳
بشرویه	۵۷.۴۲	۳۳.۸۵	کبوترآباد	۵۱.۸۳۴	۳۲.۵۱۵	مشهد	۵۹.۶۳۱	۳۶.۲۳۶
گلپایگان	۵۰.۲۶۱	۳۳.۴۷۷	بیرجند	۵۹.۲۵	۳۲.۹	نیشابور	۵۸.۸	۳۶.۲۶۷
نطنز	۵۱.۹۳۱	۳۳.۴۹	بستان	۴۸.۰۱	۳۱.۷۰۸	سنندج	۴۷.۰۱۵	۳۵.۲۵۵
بروجن	۵۱.۲۹۹	۳۱.۹۷۹	اهواز	۴۸.۷۴۴	۳۱.۳۴۴	بیجار	۴۷.۶۲۱	۳۵.۸۸۶
سرارود (کرمانشاه)	۴۷.۲۹	۳۴.۳۳	مسجدسلیمان	۴۹.۲۴۱	۳۱.۹۸۳	زربنه	۴۶.۹۱۴	۳۶.۰۶
زهک	۶۱.۶۸۳	۳۰.۹	رامهرمز	۴۹.۵۹۶	۳۱.۲۷۳	مریوان	۴۶.۱۵۲	۳۵.۴۹۷
یزد	۵۴.۲۸	۳۱.۹	آباده	۵۲.۶۱۷	۳۱.۱۹۸			
کرج	۵۰.۹۵۴	۳۵.۸۰۷	تهران (شمیران)	۵۱.۴۸۵	۳۵.۷۹۹			

در این مطالعه از بین شاخص‌های آسایش حرارتی، دو شاخص دمای مؤثر خالص و بیکر به دلیل قابل محاسبه بودن با داده‌های باز تحلیل ERA5-Land انتخاب شدند. در گام نخست، شاخص‌های آسایش حرارتی با استفاده از داده‌های ۱۳۰ ایستگاه منتخب سازمان هواشناسی محاسبه شد. در ادامه، داده‌های بازتحلیل ERA5-Land برای مختصات نزدیک به ایستگاه‌های هواشناسی استخراج گردید. در این پژوهش، جهت یکپارچه‌سازی مقیاس مکانی داده‌های مشاهداتی با داده‌های شبکه‌ای ERA5-Land، از روش استخراج مقدار شبکه متناظر با نزدیک‌ترین سلول (Nearest-Neighbor Extraction) استفاده شد. در این روش، مختصات هر ایستگاه هواشناسی با ماتریس شبکه ERA5-Land منطبق شده و مقدار سلولی که کمترین فاصله مکانی را با ایستگاه دارد، به عنوان نماینده داده‌های مدل برای آن ایستگاه انتخاب گردید. باتوجه به اینکه داده‌های سازمان هواشناسی در ساعت‌های مشخص (۰۰، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱) UTC گزارش می‌شوند، داده‌های بازتحلیل ERA5-Land نیز در همان فواصل زمانی و بر مبنای UTC استخراج گردید. این امر به منظور ایجاد همخوانی زمانی کامل میان دو منبع داده و فراهم‌سازی امکان مقایسه مستقیم و معتبر انجام شد تا امکان مقایسه با داده‌های ایستگاهی فراهم شود. شاخص‌های منتخب در هر دو مجموعه داده، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون، در مقیاس ساعتی و برای یک دوره آماری ۳۰ ساله محاسبه شدند. در نهایت، نقشه‌های پهنه‌بندی فصلی شاخص‌ها با روش درون‌یابی IDW تهیه و تحلیل شد. در درون‌یابی فضایی با روش IDW، مقدار توان برابر ۲ و تعداد همسایه‌ها ۱۲ نقطه در نظر گرفته شده است. انتخاب این پارامترها بر اساس پراکنش مکانی ایستگاه‌ها و با هدف ایجاد تعادل میان همواربودن سطح و حفظ تغییرات واقعی انجام شده است. برای ارزیابی دقت درون‌یابی، از روش حذف متقابل استفاده شده است؛ به این صورت که مقدار هر ایستگاه به طور جداگانه حذف و با استفاده از سایر ایستگاه‌ها برآورد شد و اختلاف مقدار واقعی و تخمینی ثبت گردید. نتایج این ارزیابی نشان داد که تنظیمات انتخاب‌شده دقت مناسبی برای تولید سطوح پیوسته فراهم می‌کنند. همچنین برای درک بهتر تفاوت‌های اقلیمی و اعتبارسنجی نتایج، میانگین شاخص‌های حرارتی در دو ناحیه اقلیمی متمایز شامل منطقه سرد و خشک در شمال غرب کشور (منطقه ۱) و منطقه گرم و مرطوب در سواحل جنوبی کشور (منطقه ۲) محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. در پایان، برای بررسی دقت و قابلیت اعتماد داده‌های بازتحلیل نسبت به مشاهدات واقعی، میزان همبستگی (ضریب همبستگی)، ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطاها (MAE) و میانگین خطا (Bias) بین شاخص‌های محاسبه‌شده در دو مجموعه داده محاسبه شد. همچنین برای ارزیابی معنی‌داری آماری این ارتباط‌ها، مقدار احتمال (p-value) نیز مورد بررسی قرار گرفت. این شاخص‌ها کمک کردند تا مشخص شود که تا چه میزان می‌توان به داده‌های بازتحلیل برای تحلیل‌های اقلیمی و حرارتی اعتماد کرد.

شاخص‌های آسایش حرارتی

دمای مؤثر خالص

یکی از رایج‌ترین معیارها برای بررسی شرایط آسایش حرارتی که نخستین بار در ۱۹۲۳، هوتون و یاگلو^۱ برای انجمن مهندسان تأسیسات آمریکا ایجاد کردند، دمای مؤثر است. در این شاخص با در نظر گرفتن دما و رطوبت، شرایط آسایش یک منطقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که به نظر می‌رسد تنها برای شرایط آب‌وهوایی گرم کاربرد دارد. با گسترش این شاخص و در نظر گرفتن میدان باد، شاخص دمای مؤثر خالص معرفی شد که قابل استفاده برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی در هر منطقه می‌باشد (Hentschel, 1987; Li & Chan, 2000). فرمول پذیرفته شده برای محاسبه این شاخص به شرح زیر است (جوزباشیچ و همکاران، ۲۰۲۲):

1. Houghten & Yaglou

$$NET = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014RH + \frac{1}{1.76 + 1.4v^{0.75}}} - 0.29T(1 - 0.01RH) \quad (۱)$$

که در آن T ، RH و V به ترتیب دمای سطحی روزانه (درجه سلسیوس)، رطوبت نسبی (درصد) و سرعت باد (متر بر ثانیه) هستند. در شاخص دمای مؤثر خالص، سرعت باد باید در ارتفاعی استفاده شود که نمایانگر اثر واقعی باد بر تبادل حرارتی بدن انسان باشد. طبق استانداردهای فیزیولوژیکی و مطالعات انجام شده (Havenith et al., 2012)، ارتفاع ۱.۲ متری به عنوان ارتفاع متوسط ناحیه تأثیرپذیر بدن انسان (در وضعیت ایستاده یا نشسته) در نظر گرفته می شود. این ارتفاع به طور گسترده در محاسبه شاخص های حرارتی مرتبط با آسایش و تنش گرمایی انسان به کار می رود. با توجه به اینکه داده های ERA5-Land سرعت باد را تنها در ارتفاع ۱۰ متری ارائه می کنند، مقدار سرعت باد مورد نیاز برای محاسبه شاخص NET با فرض نمایه لگاریتمی باد و شرایط لایه های پایین جو (سطح صاف و طول زبری ۰.۰۱ متر) از ارتفاع ۱۰ متر به ارتفاع ۱.۲ متر تبدیل شده است. این فرض و روش تبدیل، در شاخص های حرارتی یک رویه پذیرفته شده و استاندارد به شمار می رود. از آنجاکه داده های سرعت باد در ERA5-Land به صورت مؤلفه های نصف النهاری (V) و مداری (U) ارائه می شود و مقدار مستقیم سرعت باد در خروجی این پایگاه داده وجود ندارد، ابتدا سرعت باد ۱۰ متری برای هر نقطه شبکه و برای هر گام زمانی با استفاده از رابطه استاندارد زیر محاسبه شد:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (۲)$$

سپس این سرعت برای تبدیل به ارتفاع ۱.۲ متری که نمایانگر ارتفاع متوسط ناحیه حساس بدن انسان به شرایط حرارتی (در حالت ایستاده یا نشسته) است، با استفاده از نمایه لگاریتمی باد تخمین زده شد:

$$V_a = V_{z_r} \frac{\log(\frac{Z}{Z_0})}{\log(\frac{Z_r}{Z_0})} \quad (۳)$$

در این رابطه، Z ارتفاع (بر حسب متر) مرکز بدن از سطح زمین است (در این مورد ۱.۲ متر). V_{z_r} سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه در ارتفاع مرجع اندازه گیری هواشناسی (یعنی ۱۰ متر) است. Z_0 طول زبری بر حسب متر است که فرض می شود ۰.۰۱ متر باشد و V_a سرعت باد در ارتفاع ۱.۲ متر می باشد (Havenith et al., 2012).

از آنجاکه داده های ERA5-Land شامل رطوبت نسبی نیست، مقدار رطوبت نسبی با استفاده از دمای هوا (T) و دمای نقطه شبنم (T_d) محاسبه گردید. برای حفظ دقت زمانی، این محاسبات به صورت ساعتی و برای هر نقطه شبکه انجام شد؛ به طوری که تمامی داده های ساعتی دما و دمای نقطه شبنم در واحد درجه سلسیوس استخراج و رابطه لارنس (۲۰۰۵) برای هر ساعت اعمال شد:

$$RH = 100 * \exp(17.625T_d / 243.04 + T_d) / \exp(17.625T / 243.04 + T) \quad (۴)$$

در این رابطه، T_d دمای نقطه شبنم (درجه سلسیوس) و T میانگین دما (درجه سلسیوس) است.

شاخص بیکر

لندزبرگ^۱ (۱۹۷۲) شاخص بیکر را به عنوان ابزاری برای ارزیابی احساس آسایش حرارتی انسان با استفاده از دمای خشک و سرعت باد تعریف کرد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$CP = (0.26 + 0.34V^{0.632})(36.5 - T) \quad (۵)$$

این رابطه CP برحسب کالری بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه، V سرعت متوسط باد برحسب متر بر ثانیه، T متوسط دمای روزانه برحسب درجه سلسیوس است. درواقع این شاخص باتوجه به اختلاف بین دمای بدن و دمای هوا محاسبه می‌شود. بر اساس این شاخص، CPI وقتی بین ۵ تا ۲۰ قرار دارد شرایط آسایش حرارتی وجود خواهد داشت و وقتی کمتر از ۵ و یا بیشتر از ۲۰ باشد تنش‌های گرمایی و سرمایی بروز خواهد کرد. در حالت اول به علت دمای زیاد و در حالت دوم به علت برودت محیط شرایط عدم آسایش به وجود می‌آید (شکور و پناهی، ۱۳۹۴).

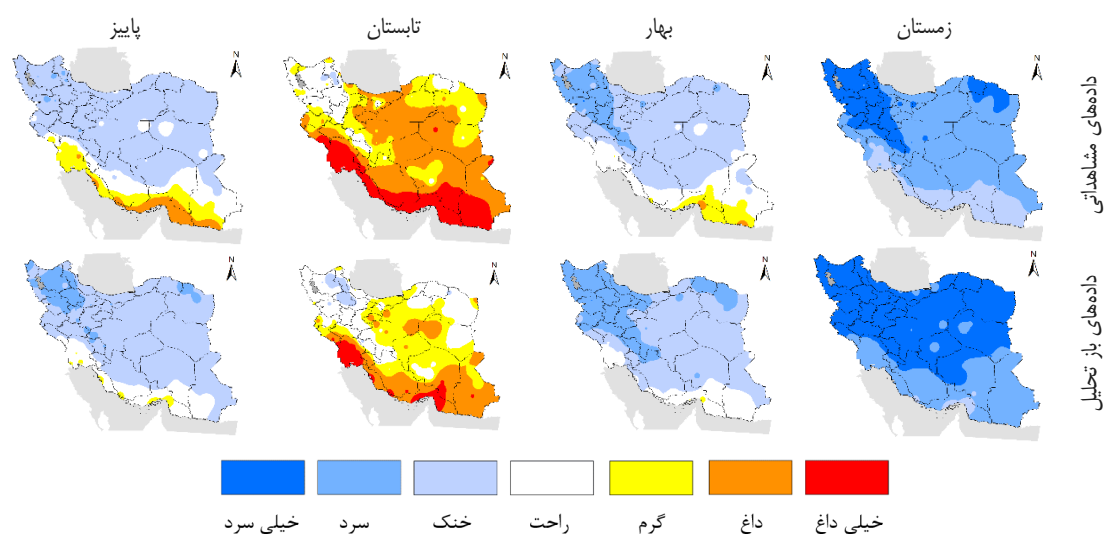
جدول ۲. مقیاس‌های ارزیابی شاخص‌های دمای مؤثر خالص و شاخص بیکر

طبقه‌بندی عمومی	NET (°C)		CPI (mcal cm ⁻² s)	
	شرایط محیطی	طبقه‌بندی اصلی	شرایط محیطی	طبقه‌بندی اصلی
تنش سرمایی	-۴	-	۵۰ - ۵۹	فوق‌العاده سرد
	-۳	خیلی سرد	۴۰ - ۴۹	خیلی سرد
	-۲	سرد	۳۰ - ۳۹	سرد
	-۱	خنک	۲۰ - ۲۹	خنک
بدون تنش	۰	راحت	۱۰ - ۱۹	راحت
تنش گرمایی	۱	گرم	۵ - ۹	گرم و مطلوب
	۲	داغ	۰ - ۴	گرم و نامطلوب
	۳	خیلی داغ	-	-
	۴	-	-	-

یافته‌ها

در شکل ۲، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص دمای مؤثر در چهار فصل سال برای ایران ارائه شده‌اند. این نقشه‌ها بر اساس دو مجموعه داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های همدیدی و داده‌های باز تحلیل ERA5-Land ترسیم شده‌اند. در فصل زمستان، تقریباً تمامی پهنه ایران در دمایی پایین‌تر از آستانه آسایش حرارتی قرار دارد. هر دو مجموعه داده این الگو را تأیید می‌کنند، به‌گونه‌ای که مناطق شمالی، غربی، شمال شرقی و بخش‌هایی از مرکز کشور در محدوده‌ی «خیلی سرد» تا «سرد» واقع شده‌اند. در مقابل، نواحی جنوبی کشور، به‌ویژه سواحل خلیج فارس، دریای عمان و بخش‌هایی از جنوب شرقی، در وضعیت «خنک» تا «راحت» قرار دارند. مقایسه بین دو مجموعه داده نشان می‌دهد که اگرچه همپوشانی خوبی بین الگوهای فضایی مشاهده می‌شود، داده‌های ERA5-Land اندکی گستره بیشتری از مناطق سرد را نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند. با ورود به فصل بهار، شرایط آب‌وهوایی در بیشتر مناطق کشور بهبود یافته و وضعیت دمایی در محدوده‌ی «خنک» تا «راحت» تثبیت شده است. تنها نواحی کوهستانی غرب و شمال غرب کشور همچنان دمایی پایین‌تری را تجربه می‌کنند. در همین حال، مناطق جنوبی کشور، روند افزایش دما و گذار به وضعیت «گرم» را آغاز کرده‌اند. تطابق دو مجموعه داده در این فصل همچنان مطلوب ارزیابی می‌شود، گرچه در برخی نواحی تفاوت‌هایی جزئی مشاهده می‌گردد. در فصل تابستان که گرم‌ترین دوره سال در ایران است، بیشترین فشار گرمایی در مناطق جنوبی، مرکزی و شرقی کشور مشاهده می‌شود. سواحل خلیج فارس و دریای عمان، مطابق هر دو مجموعه داده، در محدوده‌ی «خیلی داغ» قرار دارند و بیشترین سطح استرس گرمایی را نشان می‌دهند. در مقایسه بین داده‌های مشاهداتی و ERA5-Land، الگوی کلی توزیع حرارت مشابه است؛ با این حال، در برخی نواحی مرکزی و مرتفع، داده‌های باز تحلیل دمای پایین‌تری را نسبت به واقعیت مشاهداتی گزارش می‌کنند، که ممکن است به محدودیت‌های بازنمایی توپوگرافی در داده‌های باز تحلیل مربوط باشد. در فصل پاییز، روند کاهش دما آغاز می‌شود و اکثر نواحی کشور از وضعیت «گرم» تابستان به وضعیت «راحت» یا «خنک» انتقال می‌یابند. بر اساس داده‌های مشاهداتی، نواحی جنوبی کشور هنوز تا حدی گرم هستند، اما شدت گرما نسبت به

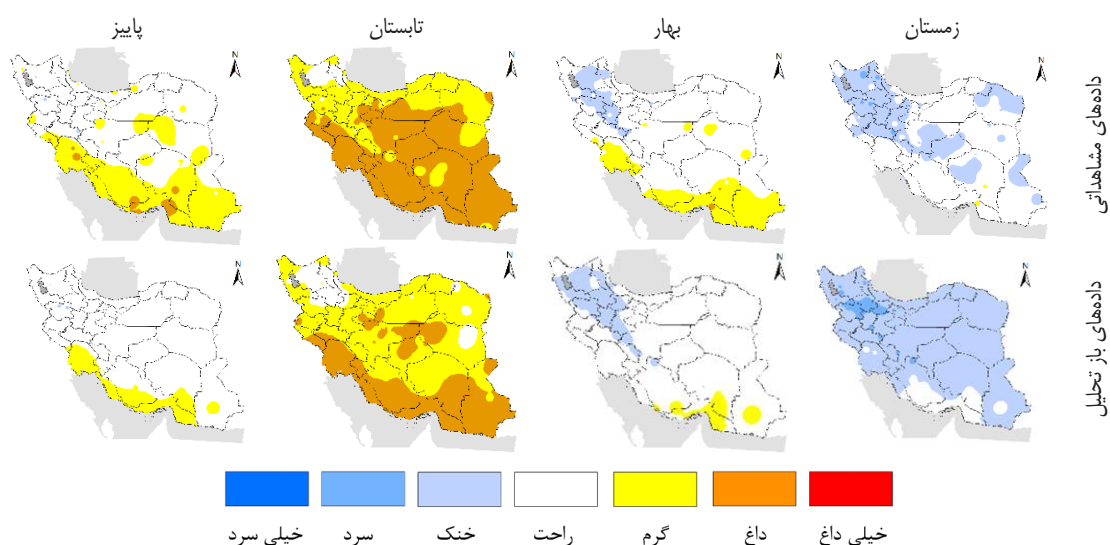
تابستان کاهش محسوسی دارد. در مقابل، داده‌های ERA5-Land این میزان گرما در جنوب کشور را به خوبی نشان نمی‌دهند و دمای شبیه‌سازی شده در این نواحی کمتر از مقادیر مشاهداتی هستند.



شکل ۲. پهنه‌بندی شاخص دمای مؤثر بر اساس داده‌های مشاهداتی و داده‌های باز تحلیل ERA5_Land در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان و پاییز طی دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰

در شکل ۳، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص بیکر در چهار فصل سال، بر اساس داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های همدیدی و داده‌های باز تحلیل ERA5-Land، طی دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰، ارائه شده‌اند. این شاخص، میزان تأثیر عوامل جوی مانند سرعت باد، رطوبت نسبی و دمای هوا را در ایجاد حس خنک‌تر بودن هوا نسبت به دمای واقعی اندازه‌گیری می‌کند. در فصل زمستان، بر اساس داده‌های باز تحلیل، نواحی شمالی، غربی و مرکزی کشور عمدتاً در دسته‌ی خنک تا سرد قرار گرفته‌اند. این امر نشان‌دهنده آن است که وزش باد و سایر عوامل، به طور مؤثری باعث کاهش دما در این مناطق شده‌اند. در همین حال، نواحی جنوبی کشور، به‌ویژه مناطق ساحلی حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، عمدتاً در محدوده «بدون تنش حرارتی» قرار دارند، این وضعیت نشان می‌دهد که ترکیب عوامل جوی مانند دما، رطوبت و وزش باد در این مناطق به گونه‌ای بوده که شاخص بیکر در محدوده آسایش باقی مانده است. مقایسه نقشه‌های دو مجموعه داده نشان می‌دهد که داده‌های ERA5-Land معمولاً گستره بیشتری از مناطق با تنش سرمایی را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ثبت کرده‌اند. این الگو با یافته‌های مشابه از شاخص دمای مؤثر هم‌راستا است. در فصل بهار، به تدریج از شدت خنک‌کنندگی هوا کاسته می‌شود. در این فصل، بیشتر مناطق کشور در محدوده خنک تا راحت قرار دارند. تأثیر عوامل جوی در تعدیل دما به‌ویژه در نیمه شمالی و نواحی مرتفع غربی کشور همچنان محسوس است. با این حال، مناطق جنوبی ایران به‌ویژه در استان‌های ساحلی، روند گرم شدن را آغاز کرده‌اند. داده‌های مشاهداتی و باز تحلیل در این فصل نیز الگوی نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهند؛ هرچند داده‌های باز تحلیل، همچون فصل زمستان، گرایش به نشان دادن دماهای پایین‌تر نسبت به مشاهدات دارند. در فصل تابستان، که گرم‌ترین زمان سال است، مقدار شاخص بیکر کاهش می‌یابد. این پدیده به‌ویژه در مناطق مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی کشور مشهود است؛ به طوری که اغلب این نواحی در محدوده‌ی گرم تا داغ قرار گرفته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که در تابستان، باد و سایر عوامل جوی قادر به کاهش محسوس دمای محسوس نیستند و جمعیت ساکن این مناطق، گرمای شدیدتری را نسبت به فصول دیگر تجربه می‌کنند. مقایسه دو مجموعه داده در تابستان بیانگر آن است که گستره نواحی دچار تنش گرمایی شدید در داده‌های ERA5-Land اندکی کمتر از مشاهدات

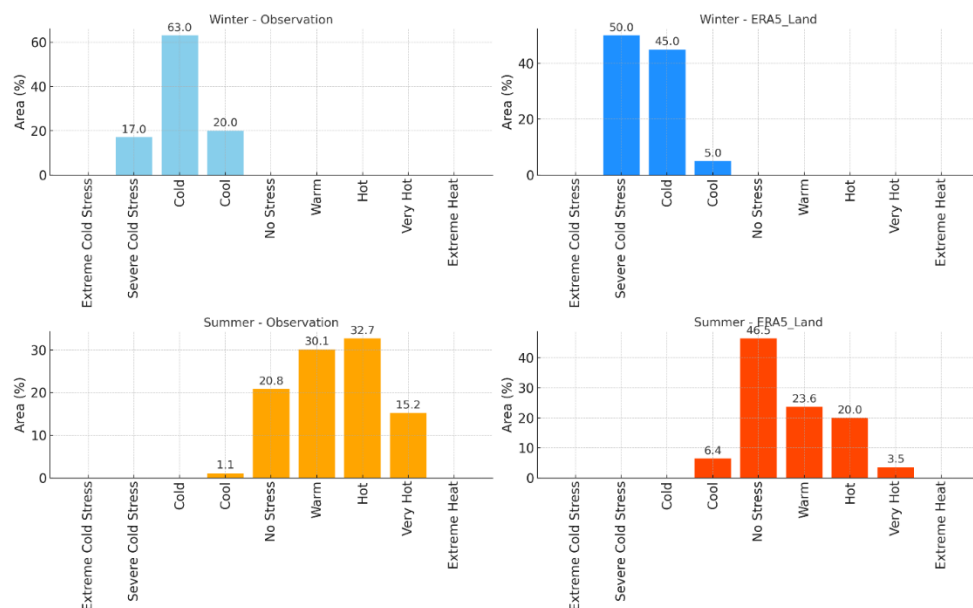
است. با این حال، الگوی کلی توزیع دما مشابه است و اختلافات میان دو مجموعه در این فصل از نظر مکانی چندان گسترده نیستند. در فصل پاییز، دمای هوا رو به کاهش می‌گذارد و شرایط آسایش حرارتی در سطح کشور بهبود می‌یابد. بر اساس داده‌های باز تحلیل، بیشتر مناطق کشور در این فصل در محدوده «راحت» قرار دارند، در حالی که تنها نواحی جنوبی همچنان مقادیر نسبتاً بالاتری از گرما را تجربه می‌کنند. برخلاف تابستان، در پاییز تأثیر عوامل جوی مانند باد در تعدیل دما بیشتر قابل مشاهده است. مقایسه داده‌های مشاهداتی و ERA5-Land در این فصل نیز نشان می‌دهد که تطابق نسبتاً خوبی بین دو مجموعه وجود دارد و الگوی مکانی اختلافات مشابه فصول سرد است؛ به این معنا که داده‌های باز تحلیل در برخی مناطق گرایش به نشان دادن دمای حس‌شده پایین‌تر دارند.



شکل ۳. پهنه‌بندی شاخص قدرت خنک‌کنندگی بر اساس داده‌های مشاهداتی و داده‌های باز تحلیل ERA5_Land در فصل‌های زمستان، پاییز، بهار و تابستان طی دوره اقلیمی ۱۹۹۱-۲۰۲۰

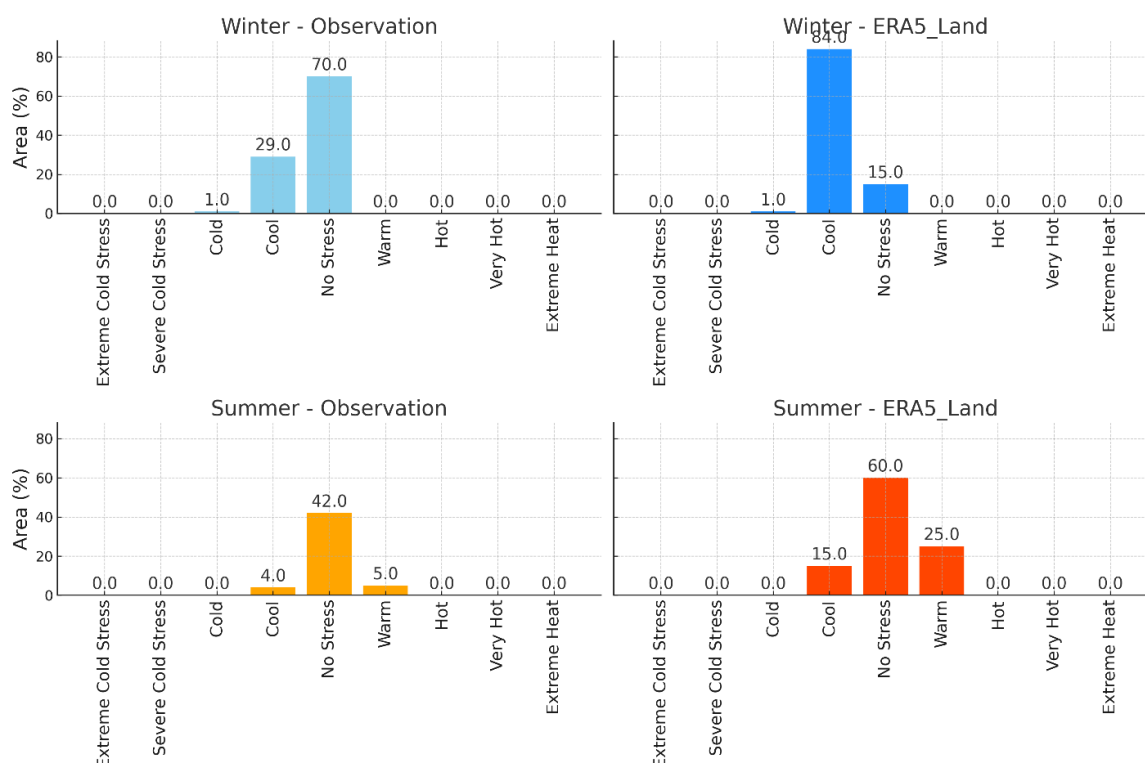
Error! Reference source not found. درصد مساحت تنش‌های گرمایی و سرمایی در ایران بر اساس داده‌های مشاهداتی و داده‌های باز تحلیل ERA5-Land در فصول تابستان و زمستان را نشان می‌دهد. در فصل زمستان و بر اساس داده‌های مشاهداتی تنش سرمایی متوسط با ۶۳ درصد بیشترین مساحت را پوشش می‌دهد. پس از آن، تنش سرمایی خفیف با ۱۶ درصد و تنش سرمایی بسیار خفیف با ۲۰ درصد دیده می‌شوند. در فصل تابستان، تنها ۱.۱ درصد از مساحت تحت تأثیر تنش سرمایی بسیار خفیف قرار دارد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در تابستان، ۲۰.۸ درصد از مساحت ایران شرایط بدون تنش را تجربه می‌کند. این در حالی است که در زمستان، هیچ منطقه‌ای شرایط بدون تنش ندارد. در فصل تابستان، بیشترین درصد مربوط به تنش گرمایی متوسط (درجه ۲) با ۳۲.۷ درصد و تنش گرمایی خفیف (درجه ۱) با ۳۰.۱۲ درصد است. این نشان می‌دهد که ۶۲.۸ درصد از مساحت ایران در تابستان تحت تأثیر تنش‌های گرمایی خفیف تا متوسط قرار دارد. تنش گرمایی شدید (درجه ۳) با ۱۵.۲ درصد کمتر رایج است و تنش گرمایی بسیار شدید (درجه ۴) اصلاً مشاهده نشده است. بر اساس داده‌های باز تحلیل ERA5-Land، در زمستان، بیشترین درصد مربوط به تنش سرمایی متوسط (درجه ۳-) با ۵۰ درصد و تنش سرمایی خفیف (درجه ۲-) با ۴۵ درصد است. این نشان می‌دهد که ۹۵ درصد از مساحت ایران در زمستان تحت تأثیر تنش‌های سرمایی خفیف تا متوسط قرار دارد. در تابستان، تنش سرمایی بسیار کم است و تنها ۶.۳۸ درصد از مساحت تحت تأثیر تنش سرمایی بسیار خفیف (درجه ۱-) قرار دارد. در تابستان، ۴۶.۵ درصد از مساحت ایران شرایط بدون تنش را تجربه می‌کند. در تابستان، بیشترین درصد مربوط به تنش گرمایی خفیف (درجه ۱) با ۲۳.۶۲

درصد و تنش گرمایی متوسط (درجه ۲) با ۲۰ درصد است که به طور کلی ۴۳.۶۲ درصد از مساحت ایران در تابستان تحت تأثیر تنش های گرمایی خفیف تا متوسط قرار دارد و تنش گرمایی بسیار شدید (درجه ۴) اصلاً مشاهده نشده است.



شکل ۴. مساحت تنش های گرمایی و سرمایی در ایران بر اساس شاخص NET و با استفاده از داده های مشاهداتی و داده های باز تحلیل-ERA5 Land در فصول تابستان و زمستان طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰

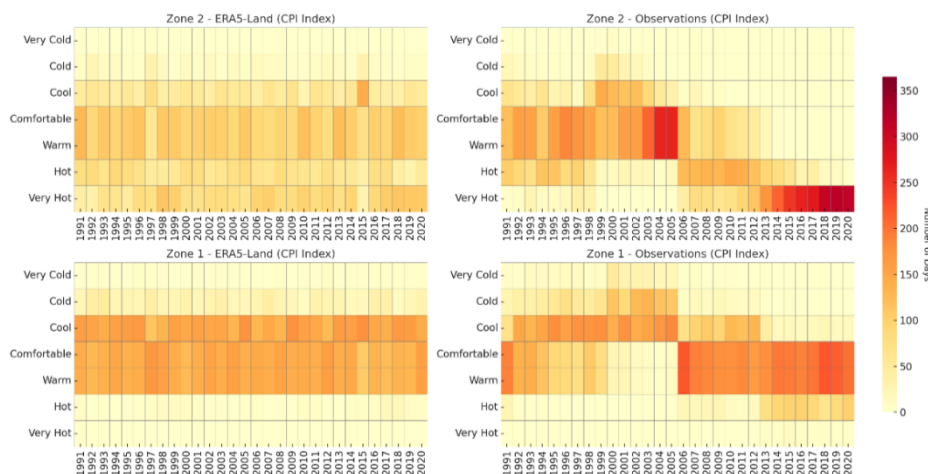
Error! Reference source not found. درصد مساحت مناطق تحت تأثیر تنش های سرمایی و گرمایی را در دو فصل تابستان و زمستان، بر اساس داده های مشاهداتی و ERA5-Land، نشان می دهد. شاخص مورد استفاده در این بخش، قدرت خنک کنندگی است که درجه بندی تنش ها از ۴- (تنش سرمایی شدید) تا ۴ (تنش گرمایی شدید) را شامل می شود. بر اساس داده های مشاهداتی، در زمستان ۳۰ درصد از مساحت ایران تحت تأثیر تنش های سرمایی قرار دارد که شامل ۱ درصد تنش سرمایی خفیف و ۲۹ درصد تنش سرمایی بسیار خفیف می شود. در تابستان، تنها ۴ درصد از مساحت ایران تحت تأثیر تنش سرمایی بسیار خفیف قرار دارد. از سوی دیگر، ۷۰ درصد از مساحت ایران در زمستان و ۴۲ درصد در تابستان شرایط بدون تنش (درجه ۰) را تجربه می کنند. در مورد تنش های گرمایی، تنها ۵ درصد از مساحت ایران در تابستان تحت تأثیر تنش گرمایی خفیف (درجه ۱) قرار دارد و در زمستان هیچ منطقه ای تحت تأثیر تنش گرمایی نیست. داده های ERA5-Land نشان می دهند که در زمستان ۸۵ درصد از مساحت ایران تحت تأثیر تنش های سرمایی قرار دارد که شامل ۱ درصد تنش سرمایی خفیف (درجه -۲) و ۸۴ درصد تنش سرمایی بسیار خفیف (درجه -۱) است. در تابستان، ۱۵ درصد از مساحت ایران تحت تأثیر تنش سرمایی بسیار خفیف قرار دارد. شرایط بدون تنش در زمستان ۱۵ درصد و در تابستان ۶۰ درصد از مساحت ایران را شامل می شود. در مورد تنش های گرمایی، ۲۵ درصد از مساحت ایران در تابستان تحت تأثیر تنش گرمایی خفیف (درجه ۱) قرار دارد و در زمستان هیچ منطقه ای تحت تأثیر تنش گرمایی نیست.



شکل ۵. مساحت تنش‌های گرمایی و سرمایگی در ایران بر اساس شاخص CPI و با استفاده از داده‌های مشاهداتی و داده‌های باز تحلیل-ERA5 Land در فصول تابستان و زمستان طی دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰

شکل ۶ روند تغییرات زمانی شاخص بیکر (CPI) را بر اساس داده‌های باز تحلیل ERA5-Land داده‌های مشاهداتی در منطقه اقلیمی سرد و خشک در شمال غرب کشور طی یک دوره آماری سی‌ساله نشان می‌دهد. بررسی داده‌های بازتحلیل نشان می‌دهد بیشترین فراوانی روزها در کلاس‌های خنک، بدون تنش و گرم باقی‌مانده و تغییرات شدید در توزیع دمایی مشاهده نمی‌شود. در مقابل، داده‌های مشاهداتی روندی متفاوت و قابل توجه‌تر را نشان می‌دهند. از اوایل دهه ۲۰۰۰، تعداد روزهای با شرایط بدون تنش و به‌ویژه گرم به طور پیوسته افزایش یافته است. هم‌زمان، کلاس‌های خنک و سرد روندی کاهشی داشته‌اند و از سال‌های پایانی دوره، روزهای داغ نیز شروع به افزایش کرده‌اند. این تفاوت‌ها نمایانگر گرمایش محسوس در منطقه سرد و خشک هستند که در داده‌های مشاهداتی به‌وضوح ثبت شده‌اند، اما در داده‌های EraLand به‌خوبی بازتاب نیافته‌اند. شاخص قدرت خنک‌کنندگی در منطقه اقلیمی گرم و مرطوب در سواحل جنوبی ایران (منطقه ۲) بر اساس داده‌های باز تحلیل EraLand نشان‌دهنده‌ی ثبات نسبی در الگوی دمایی منطقه هستند. به‌طوری‌که در بیشتر سال‌ها، بخش عمده‌ای از روزها در کلاس‌های راحت و گرم قرار داشته است. این روند بیانگر تغییرات محدود در شدت گرمای هوا از دیدگاه داده‌های باز تحلیل است و حاکی از آن است که در داده‌های EraLand، تغییرات اقلیمی شدیدی در این منطقه بازتاب نیافته‌اند. با این حال، در داده‌های مشاهداتی تصویری کاملاً متفاوت ارائه شده است. تا میانه دهه ۲۰۰۰، توزیع دما بین کلاس‌های راحت، گرم و خیلی گرم نسبتاً متعادل بوده، اما از سال ۲۰۰۰ به بعد، روندی آشکار از افزایش تعداد روزهای خیلی گرم دیده می‌شود. به‌ویژه از سال ۲۰۱۳، تعداد این روزها به‌سرعت افزایش یافته و در پایان دوره، تقریباً تمام سال را پوشش می‌دهد. هم‌زمان، کلاس‌های راحت و حتی گرم کاهش چشمگیری یافته‌اند. این روند نشان‌دهنده یک تغییر اقلیمی محسوس و مستمر در منطقه گرم و مرطوب است که با افزایش تعداد روزهای همراه با تنش شدید گرمایی

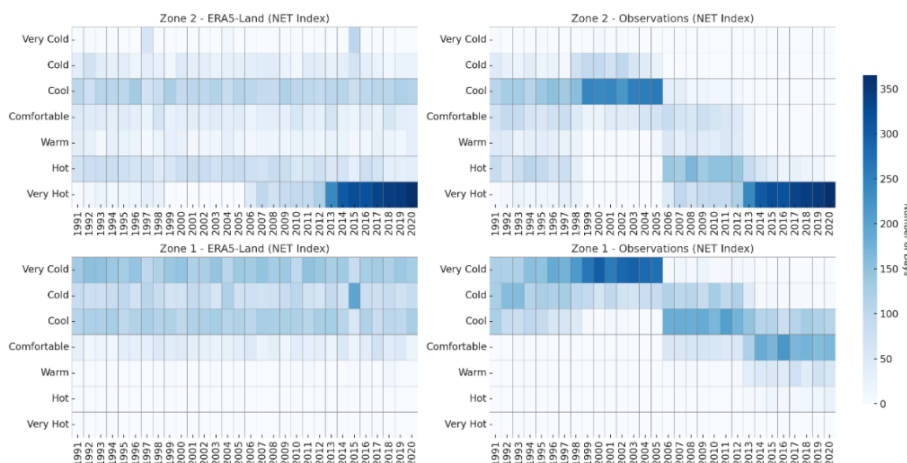
همراه بوده، درحالی که داده‌های باز تحلیل نتوانسته‌اند این تغییر را با دقت کافی بازتاب دهند. این تفاوت، اهمیت استفاده از داده‌های مشاهداتی برای تحلیل دقیق‌تر وضعیت‌های اقلیمی محلی را برجسته می‌سازد.



شکل ۶. مقایسه فراوانی روزه‌های همراه با تنش‌های سرمایی و گرمایی بر اساس شاخص بیکر (CPI) بر اساس داده‌های باز تحلیل ERA5-Land و داده‌های مشاهداتی در دو منطقه گرم و مرطوب (ردیف بالا) و سرد و خشک (ردیف پایین)

بر اساس شاخص NET در منطقه اقلیمی گرم و مرطوب، داده‌های باز تحلیل EraLand در بازه ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۲ نوسانات محدودی در توزیع تعداد روزها در طبقات مختلف حرارتی نشان می‌دهد. در این بازه، تعداد روزهای طبقه "خیلی گرم" کمتر از ۵۰ روز در سال باقی‌مانده و بخش قابل‌توجهی از سال، به طبقات "خنک" و "راحت" اختصاص داشته است؛ به‌طوری که میانگین روزهای "خنک" حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ روز و "راحت" حدود ۵۰ تا ۷۰ روز در سال بوده است. با این حال، از سال ۲۰۱۳ به بعد، تغییر محسوسی در الگوی توزیع حرارتی دیده می‌شود، به‌طوری که روزهای "خیلی گرم" به طور پیوسته افزایش یافته و در سال‌های پایانی دوره آماری به بیش از ۳۰۰ روز در سال رسیده‌اند. با وجود این روند افزایشی، EraLand همچنان سهم اندکی برای طبقات "خنک" و "راحت" حفظ کرده است. در مقابل، داده‌های مشاهداتی روندی پویاتر و پر تغییرتر را نشان می‌دهند. در دهه نخست دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۰۰)، تعداد روزهای طبقه "خنک" به طور میانگین بین ۱۲۰ تا ۱۸۰ روز در سال بوده و طبقه "خیلی گرم" تقریباً وجود نداشته است. اما از اوایل دهه ۲۰۰۰ تا حدود ۲۰۱۰، سهم طبقه "خنک" با شیب نسبتاً تندی کاهش یافته و از سال ۲۰۱۳ به بعد تقریباً به صفر رسیده است. به موازات این تغییر، طبقه "خیلی گرم" از کمتر از ۵۰ روز در اوایل دهه ۲۰۰۰ به بیش از ۳۵۰ روز در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. در واقع، در بازه انتهایی دوره آماری، تقریباً تمام سال در این طبقه قرار گرفته و سایر طبقات حرارتی حذف شده‌اند. این تغییرات سریع و گسترده در داده‌های مشاهداتی، نشانه‌ای روشن از وقوع یک گذار اقلیمی شدید در منطقه است که در داده‌های باز تحلیل، به دلیل عدم بازنمایی کامل گرمایش محلی، کمتر بازتاب یافته است. در **Error! Reference source not found.** NET بر اساس داده‌های EraLand نشان‌دهنده ثبات نسبی در وضعیت دمایی هستند. بخش عمده‌ای از روزها در کلاس‌های خیلی سرد، سرد و خنک قرار دارند و تغییرات اندکی در طول زمان دیده می‌شود. با این حال، در داده‌های مشاهداتی، تصویری متفاوت ارائه شده است. از ابتدای دهه ۱۹۹۱ تا میانه دهه ۲۰۰۰، روزهای خیلی سرد سهم قابل‌توجهی داشته‌اند، اما از سال ۲۰۰۵ به بعد این کلاس حرارتی با کاهش شدید مواجه شده است. به موازات آن، تعداد روزهای خنک و سپس بدون تنش به شدت افزایش یافته است و در سال‌های پایانی، حتی کلاس گرم نیز پدیدار

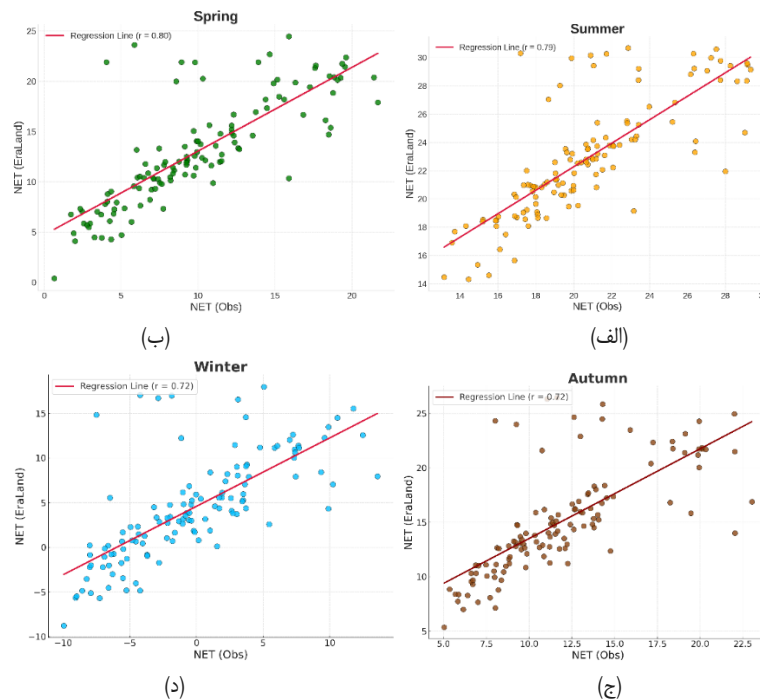
شده است. این روند بیانگر یک تغییر اقلیمی واضح در منطقه است که در آن، تعداد روزهای بسیار سرد به نفع روزهای معتدل و گرم‌تر کاهش یافته است. درحالی‌که داده‌های باز تحلیل چنین تغییراتی را به‌خوبی ثبت نکرده‌اند، داده‌های مشاهداتی بازتاب‌دهنده روند گرمایش در سطح محلی هستند.



شکل ۷. مقایسه فراوانی روزه‌های همراه با تنش‌های سرمایی و گرمایی بر اساس شاخص دمای مؤثر بر اساس داده‌های باز تحلیل EraLand و داده‌های مشاهداتی در دو منطقه گرم و مرطوب (ردیف بالا) و سرد و خشک (ردیف پایین)

در این بخش، مقایسه‌ای میان شاخص دمای مؤثر استاندارد (NET) محاسبه‌شده از داده‌های مشاهداتی و داده‌های باز تحلیل ERA5-Land در چهار فصل سال (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) ارائه شده است. نمودارهای پراکنش موجود، عملکرد دو پایگاه داده را با هم مقایسه می‌کند. خط رگرسیون ترسیم شده در هر نمودار نشان‌دهنده میزان مشابهت در رفتار نتایج دو پایگاه داده در برآورد مقادیر شاخص دمای مؤثر می‌باشد. در فصل بهار، ضریب همبستگی بین شاخص محاسبه شده از داده‌های مشاهداتی و داده‌های ERA5-Land برابر با $0/8$ و ضریب تعیین $0/64$ است. به عبارتی می‌توان گفت نتایج از دو پایگاه داده در 64 درصد موارد مشابه هستند. پراکندگی نقاط نسبتاً منظم بوده و بیشتر داده‌ها در اطراف خط رگرسیون متمرکز شده‌اند، که حاکی از دقت بالای داده‌های باز تحلیل در برآورد شاخص دمای مؤثر در این فصل است. در فصل تابستان نیز نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. ضریب همبستگی $0/79$ و ضریب تعیین $0/62$ حاکی از همبستگی زیاد میان داده‌هاست. باتوجه به اینکه تابستان از نظر حرارتی یکی از فصول چالش‌برانگیز است، این عملکرد داده‌های باز تحلیل نقطه قوت برای قابلیت اعتماد به آن محسوب می‌شود. در فصل پاییز، ضریب همبستگی کاهش یافته و به $0/72$ رسیده است. هرچند این مقدار همچنان همبستگی متوسط به بالا را نشان می‌دهد، اما نسبت به فصول بهار و تابستان اندکی ضعیف‌تر است. در این فصل نتایج به‌دست‌آمده از دو پایگاه داده در 51 درصد موارد مشابه هستند ($R^2=0/51$). برخی نقاط به طور محسوسی از خط رگرسیون فاصله دارند که ممکن است ناشی از نوسانات دمایی خاص این فصل باشد. باین حال، داده‌های EraLand همچنان عملکرد قابل‌قبولی در فصل پاییز دارد. در فصل زمستان نیز ضریب همبستگی $0/72$ گزارش شده است؛ با این تفاوت که دامنه مقادیر NET در این فصل بسیار وسیع‌تر است و شامل مقادیر منفی نیز می‌شود. پراکندگی داده‌ها در نمودار زمستان بیشتر است و نشان‌دهنده کاهش دقت داده باز تحلیل در بازسازی شرایط دمایی این فصل می‌باشد که مشابه با فصل پاییز، در فصل زمستان نیز نتایج به‌دست‌آمده از دو پایگاه داده در 51 درصد موارد مشابه هستند. بر اساس مقدار p-value محاسبه‌شده، تفاوت میان داده‌های باز تحلیل و داده‌های مشاهداتی از لحاظ آماری در سطح 5 درصد معنی‌دار است؛ به‌ویژه در فصول بهار و تابستان که حداکثر سطح معنی‌داری بین دو پایگاه داده در برآورد شاخص

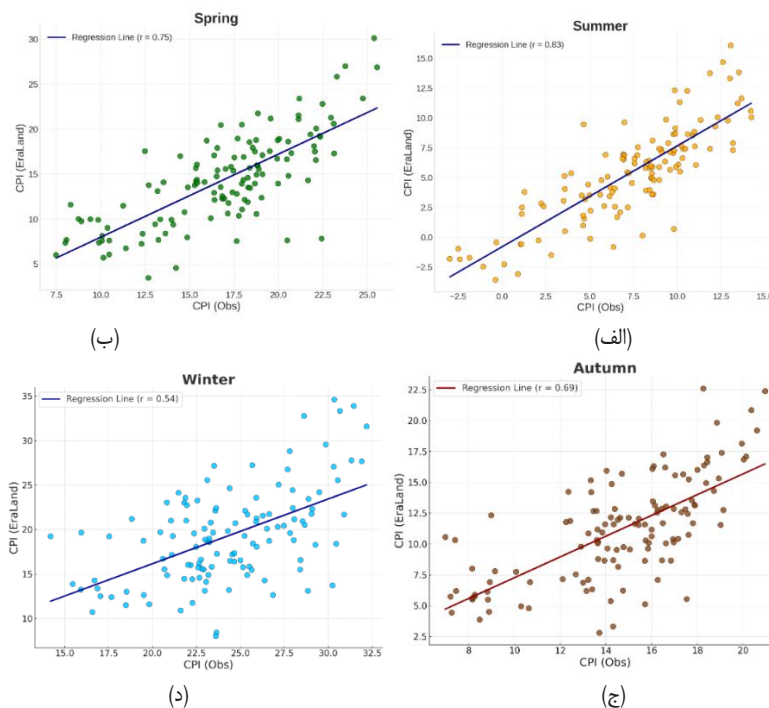
دمای مؤثر مشاهده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که داده‌های EraLand در زمستان با چالش بیشتری در برآورد شاخص دمای مؤثر مواجه است. به طور خلاصه، مدل EraLand در فصول بهار و تابستان عملکرد بهتری در تخمین شاخص NET از خود نشان داده است، در حالی که در پاییز و به‌ویژه زمستان، دقت داده‌های باز تحلیل کاهش یافته و نیاز به بررسی و کالیبراسیون بیشتری دارد. این تحلیل می‌تواند به پژوهشگران و متخصصان کمک کند تا از مدل مذکور با درک بهتر از توانمندی‌ها و محدودیت‌های فصلی آن استفاده کنند.



شکل ۸. همبستگی شاخص دمای مؤثر استاندارد بین دو پایگاه داده مشاهداتی و EraLand در فصل (الف) تابستان، (ب) بهار، (ج) پاییز و (د) زمستان

در فصل پاییز، ضریب همبستگی بین شاخص محاسبه شده از داده‌های مشاهداتی و داده‌های ERA5-Land همبستگی مثبت و نسبتاً قوی به مقدار 0.69 و ضریب تعیین 0.48 را نشان می‌دهد. این بدان معناست که داده‌های باز تحلیل در این فصل توانسته تا حد خوبی الگوی تغییرات را دنبال کند، اما پراکندگی نسبی نقاط نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها با مقداری خطا همراه هستند. در فصل بهار، مقدار ضریب همبستگی به 0.75 افزایش یافته است که بیانگر بهبود در دقت داده‌های باز تحلیل نسبت به پاییز است. ضریب تعیین در این فصل نشان می‌دهد در 56 درصد موارد نتایج به دست آمده از هر دو پایگاه داده مشابه هستند. نقاط به صورت فشرده‌تری در اطراف خط رگرسیون قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده هماهنگی بهتر بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی است. در فصل تابستان، بیشترین مقدار همبستگی با عدد 0.83 مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که مدل در این فصل عملکرد بسیار دقیقی دارد. توزیع منظم نقاط پیرامون خط رگرسیون، حاکی از تطابق بالا بین دو شاخص است و دقت داده‌های باز تحلیل در این زمان از سال در بالاترین سطح قرار دارد و نتایج در 69 درصد موارد مشابه هستند. در مقابل، در فصل زمستان، مقدار همبستگی به 0.54 کاهش می‌یابد که کمترین مقدار در میان فصول است و تشابه نتایج به 29 درصد کاهش یافته است. پراکندگی بیشتر نقاط و فاصله آن‌ها از خط رگرسیون، بیانگر کاهش دقت داده‌های باز تحلیل در این فصل است. این افت عملکرد می‌تواند ناشی از عوامل فصلی مانند نوسانات شدیدتر داده‌ها یا ویژگی‌های خاص در زمستان باشد. به طور کلی، می‌توان گفت که مدل در تابستان بهترین عملکرد را دارد و در زمستان

ضعیف‌ترین دقت را نشان می‌دهد. بر اساس مقدار p-value محاسبه‌شده، تفاوت میان داده‌های بازتحلیل و داده‌های مشاهداتی از نظر آماری برای مقادیر به دست آمده از شاخص بیکر در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. بیشترین سطح معنی‌داری در فصل بهار مشاهده شد که نشان‌دهنده دقت بالای داده‌های بازتحلیل در برآورد شاخص دمای مؤثر است، درحالی‌که در فصل زمستان، اگرچه رابطه همچنان از نظر آماری معنادار بود، اما دقت مدل کاهش‌یافته و همبستگی ضعیف‌تری نسبت به سایر فصول نشان داده است.



شکل ۹. همبستگی شاخص بیکر بین دو پایگاه‌داده مشاهداتی و EraLand در فصل (الف تابستان، ب بهار، ج پاییز و د زمستان)

بررسی نتایج سنجه‌های درستی‌سنجی برای شاخص‌های NET و CPI در فصول مختلف (جدول ۴) نشان می‌دهد که داده‌های باز تحلیل EraLand در فصول گرم‌تر سال، عملکرد قابل قبول و نسبتاً دقیقی ارائه می‌دهد. برای شاخص NET، کمترین میزان خطا در تابستان مشاهده می‌شود؛ جایی که RMSE حدود ۲/۱ و MAE برابر ۱/۹ است. این ارقام نشان می‌دهد که مدل توانسته در شرایط حرارتی پایدار و یکنواخت تابستان، تخمین‌های بسیار نزدیک‌تری به واقعیت ارائه دهد. فصل‌های بهار و پاییز نیز مقادیر خطایی در محدوده متوسط و قابل انتظار دارند، که بیانگر نگرانی نسبتاً صحیح تغییرات دمای مؤثر است. اگرچه بالاترین خطای NET در زمستان دیده می‌شود، اما رفتار مدل در این فصل نشان‌دهنده الگوی مشخص و قابل اصلاحی است؛ به این معنا که میزان خطا جهت‌دار و عمدتاً به صورت کم‌برآوردی رخ داده است. وجود چنین الگوی منظم در Bias این امکان را فراهم می‌کند که با اعمال تنظیمات ساده یا تصحیح‌های آماری، عملکرد مدل در فصل سرد نیز بهبود یابد. در مورد شاخص CPI، مدل در تابستان بهترین کارایی را نشان داده است؛ RMSE برابر ۲/۵ و MAE برابر ۲/۱ نشان می‌دهد که همبستگی خوبی بین مقادیر دو پایگاه‌داده وجود دارد. حتی در فصل‌های بهار و پاییز نیز مقادیر خطا در سطح قابل قبولی قرار دارند. بیشترین خطا در زمستان دیده می‌شود.

جدول ۴. نتایج محاسبه سنج‌های درستی‌سنجی برای شاخص دمای مؤثر خالص و بیکر در فصول مختلف سال

	NET			CPI		
	RMSE	MAE	Bias	RMSE	MAE	Bias
پاییز	۲/۹	۲/۶	-۲/۶	۳/۹	۳/۴	۳/۱
زمستان	۴/۵	۴	-۴	۶	۵/۲	۴/۶
بهار	۲/۹	۲/۶	-۲/۵	۳/۳	۲/۸	۲/۱
تابستان	۲/۱	۱/۹	-۱/۸	۲/۵	۲/۱	۱/۸

بحث

نتایج پهنه‌بندی و درستی‌سنجی نشان می‌دهد ERA5-Land در بازتولید الگوهای کلان مکانی شاخص‌های آسایش حرارتی در ایران عملکرد قابل قبولی دارد، اما سوگیری‌های فصلی و ناحیه‌ای مشخصی نیز مشاهده می‌شود. تمایل ERA5-Land به صورت گسترش بیشتر کلاس‌های سرد/تنش سرمای در شاخص‌هایی مانند NET و CPI دیده می‌شود، می‌تواند ناشی از تفکیک مکانی شبکه بازتولید و میانگین‌گیری فضایی باشد؛ موضوعی که در مناطق با ناهمگنی شدید توپوگرافی مانند البرز و زاگرس به هموارشدن شرایط محلی و افزایش خطا می‌انجامد. همچنین تفاوت ارتفاع مؤثر شبکه بازتولید با ارتفاع ایستگاه‌ها، می‌تواند به خطای سیستماتیک به‌ویژه در نواحی مرتفع منجر شود. در فصول گرم و به‌ویژه تابستان، ERA5-Land در برخی نواحی گرمای حس شده و تنش گرمایی را کمتر از مشاهدات برآورد می‌کند و در نتیجه سهم طبقه «بدون تنش» را (خصوصاً در نتایج درصد مساحت) افزایش می‌دهد. افزون بر این، تحلیل روندهای زمانی نشان داد مشاهدات گذار گرمایشی واضح‌تری را، به‌ویژه از اوایل دهه ۲۰۰۰ و جهش پس از ۲۰۱۳ در جنوب، ثبت کرده‌اند، درحالی‌که ERA5-Land روندی هموارتر و کم‌دامنه‌تر ارائه می‌دهد؛ اختلافی که می‌تواند به محدودیت بازتولید در بازتاب گرمایش‌های محلی (جزیره حرارتی شهری، تغییر کاربری زمین، تغییرات رطوبت خاک و آبیاری) مربوط باشد. با این حال، نقش کیفیت و پیوستگی داده‌های ایستگاهی نیز مهم است و جابه‌جایی ایستگاه، تغییر ابزار یا تغییر پیرامون ایستگاه می‌تواند در اختلاف روندها اثرگذار باشد؛ بنابراین کنترل همگنی داده‌ها و/یا همگن‌سازی برای تفسیر دقیق‌تر ضروری است. الگوی اصلی مشاهده‌شده در این پژوهش غلبه تنش سرمای در زمستان، تمرکز تنش گرمایی در تابستان به‌خصوص در جنوب و نواحی کم‌ارتفاع، و مناسب‌تر بودن بهار و پاییز از منظر آسایش با نتایج مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. برای نمونه، اصغری و همکاران (۲۰۲۵) با تحلیل ۳۰ سال داده از ۴۹ ایستگاه و شاخص UTCI بر مطلوب‌تر بودن فصل‌های انتقالی و شدت‌گیری تنش‌ها در تابستان در اقلیم‌های خشک تأکید کرده‌اند. محمدی و همکاران (۲۰۱۸) نیز با داده‌های ۲۸۸ ایستگاه و شاخص‌های UTCI و PET نشان داده‌اند که سهم قابل توجهی از کشور در ماه‌های انتقالی در محدوده آسایش قرار می‌گیرد. همچنین فرج‌زاده و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند شاخص‌های مبتنی بر تراز انرژی انسان‌مانند UTCI و PET همبستگی بالایی دارند، اما شاخص‌های ساده‌تر به دلیل در نظر نگرفتن کامل مؤلفه تابش می‌توانند اختلاف بیشتری نشان دهند؛ بنابراین بخشی از تفاوت‌های مشاهده‌شده میان ERA5-Land و داده‌های ایستگاهی، به‌ویژه در مناطق مرتفع و جنوب، می‌تواند ناشی از حساسیت بالای شاخص‌هایی مانند CPI و NET به خطاهای کوچک در دما، باد و رطوبت باشد که به صورت جابه‌جایی بین طبقات تنش ظاهر می‌شود. در نهایت، می‌توان گفت ERA5-Land در مقیاس ملی برای بازنمایی الگوهای کلی فصلی آسایش حرارتی ایران کارآمد است، اما برای تحلیل‌های محلی/شهری و بررسی روندهای شدید، رویکرد ترکیبی بازتولید و مشاهدات ایستگاهی همراه با کالیبراسیون یا تصحیح آماری، قابل انکاتر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

مقایسه شاخص‌های آسایش حرارتی بر اساس دو منبع داده یعنی ایستگاه‌های همدیدی و داده‌های بازتحلیل ERA5-Land، نشان‌دهنده همخوانی قابل قبول در تحلیل وضعیت حرارتی کشور ایران در طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ است. یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که اگرچه الگوهای کلی فضایی بین این دو مجموعه داده در اغلب فصول دارای شباهت خوبی هستند، اما در برخی مناطق، خصوصاً نواحی مرتفع و مناطق جنوبی، تفاوت‌هایی دیده می‌شود که نقش مهمی در تحلیل دقت و قابلیت اعتماد به داده‌های بازتحلیل ایفا می‌کند. در زمستان، هر دو مجموعه داده حاکی از پوشش گسترده تنش سرمایی در بیش از ۹۰٪ از مساحت کشور هستند؛ با این حال، ERA5-Land مساحت بیشتری از تنش سرمایی را نسبت به داده‌های مشاهداتی گزارش کرده که نشان‌دهنده گرایش این مدل به بیش‌برآورد سرمایش در این فصل است. شاخص CPI نیز در زمستان اختلافی مشابه را نشان می‌دهد. در بهار، شرایط اقلیمی به سمت آسایش حرارتی بیشتر پیش رفته و تطابق نسبتاً مناسبی بین دو منبع مشاهده می‌شود (ضریب همبستگی ۰/۸). اگرچه برخی اختلافات جزئی در برآورد دما وجود دارد، اما عملکرد کلی ERA5-Land قابل قبول است. در تابستان، اختلاف میان دو مجموعه داده بارزتر می‌شود. ERA5-Land در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، تمایل به کم‌برآورد تنش گرمایی دارد و سهم بیشتری از کشور را در وضعیت بدون تنش حرارتی نشان می‌دهد. شاخص CPI نیز بیانگر آن است که اثر تعدیل‌کننده باد در این فصل کاهش یافته و اکثر مناطق، به‌ویژه نواحی مرکزی و جنوبی، شرایط «داغ» تا «خیلی داغ» را تجربه می‌کنند. در پاییز، هر دو مجموعه داده بازگشت نسبی به شرایط آسایشی را در اکثر مناطق کشور نشان می‌دهند؛ اگرچه ERA5-Land در برخی نواحی جنوبی دماهای پایین‌تری را برآورد کرده که ممکن است منجر به نادیده گرفتن تنش گرمایی شود. در تحلیل روند زمانی طی سه دهه گذشته، داده‌های مشاهداتی تغییرات قابل توجهی به‌ویژه در مناطق سرد و خشک (افزایش روزهای گرم، کاهش روزهای سرد) و مناطق گرم و مرطوب (افزایش چشمگیر روزهای بسیار گرم از ۲۰۱۳ به بعد) ثبت کرده‌اند. در مقابل، داده‌های ERA5-Land روند پایدارتری را نشان داده و تغییرات حرارتی شدید را به طور کامل بازتاب نداده‌اند. این اختلافات نشانگر محدودیت‌های داده‌های بازتحلیل در شبیه‌سازی دقیق ویژگی‌های اقلیمی محلی باشند. با این حال خطاهای اندازه‌گیری در داده‌های ایستگاهی نیز می‌تواند یکی از عوامل مهم در ایجاد این تفاوت‌ها باشد و اهمیت استفاده ترکیبی از منابع داده‌های مختلف در ارزیابی‌های اقلیمی است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه داده‌های بازتحلیل ERA5-Land در شناسایی الگوهای کلی آسایش حرارتی و توزیع دمای مؤثر در مقیاس کلان عملکرد نسبتاً خوبی دارند و در فصل‌های بهار و تابستان همبستگی زیاد با داده‌های مشاهداتی از خود نشان داده‌اند، اما در بازنمایی دقیق تغییرات محلی و روندهای اقلیمی، خصوصاً در مناطق کوهستانی، مرتفع و مرطوب جنوبی، با محدودیت‌هایی مواجه‌اند. این یافته‌ها لزوم استفاده ترکیبی از داده‌های مشاهداتی و داده‌های بازتحلیل را در تحلیل‌های اقلیمی محلی، به‌ویژه برای برنامه‌ریزی شهری، مدیریت منابع انرژی و تطبیق با تغییر اقلیم برجسته می‌سازد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

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

تضاد و منافع

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

تقدیر و تشکر

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

منابع

- انتظاری، علیرضا؛ احمدی، حمزه؛ کرمی، مختار و احمدی، طالب. (۱۳۹۶). تحلیلی بر شرایط زیست‌اقلیمی و درجه روزهای نیاز گرمایشی و سرمایشی شهر اسلام‌آباد غرب. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۱(۵۹)، ۱-۲۱.
- قانقرمه، عبدالعظیم؛ روشن، غلامرضا و شاهکویی؛ اسماعیل. (۱۳۹۷). بازنگری در تعیین دمای پایه آسایش حرارتی مناطق اقلیمی متفاوت ایران به منظور محاسبه شاخص درجه - روز مورد نیاز سرمایشی و گرمایشی. *اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۷(۱۰۵)، ۱۲۷-۱۴۳.
- کدخدا، الهام؛ امیدوار، کمال؛ زرین، آذر و مزیدی، احمد. (۱۴۰۲). تحلیل فصلی تنش گرمایی و روند آن در ایران با استفاده از داده‌های ERA5. *فصلنامه فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۳)، ۶۸۵-۶۹۸. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350315.1007466>
- لکزشکور، قاسم و پناهی، فهیمه. (۱۳۹۴). ارزیابی شاخص زیست‌اقلیمی بیکر: (CPI) مطالعه موردی استان هرمزگان. *دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی، ایران*.
- موسوی، سید سعید؛ رضایی، پرویز و رمضانی، بهمن. (۱۴۰۳). تحلیل و ارزیابی آسایش حرارتی در فضاهای باز شهر رشت. *جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۱۳(۴۹)، ۱-۱۲.
- میر، فاطمه؛ خسروی، محمود و شجاع، فائزه. (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های بهینه آسایش اقلیمی و آینده نگری تنش‌های گرمایی در شهر زاهدان؛ (راهبردی جهت سازگاری با تغییر اقلیم). *نشریه جغرافیا و آمایش شهری منطقه ای*، ۵۴(۱۵)، ۳۳-۱. <https://doi.org/10.22111/gaij.2025.50467.3247>

References

- De Freitas, C. R., & Grigorieva, E. A. (2015). A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*, 59(1), 109–120. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0819-3>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Entazari, A., Ahmadi, H., Karami, M., & Ahmadi, T. (2017). An analysis of bioclimatic conditions and heating and cooling degree-days in Eslamabad-e Gharb City. *Geography and Planning*, 21(59), 1–21. [in persian].
- Farajzadeh, H., Saligheh, M., Alijani, B., & Matzarakis, A. (2015). Comparison of selected thermal indices in the northwest of Iran. *Natural Environment Change*, 1(1), 1–20.
- Gao, X.-J., Wu, J., Shi, Y., Han, Z.-Y., Zhang, D.-F., Tong, Y., & Wu, J. (2018). Future changes in thermal comfort conditions over China based on multi-RegCM4 simulations. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 11(4), 291–299. <https://doi.org/10.1080/16742834.2018.1471578>
- Ghanbari Gorme, A., Roshan, G., & Shahkooie, E. (2018). A revision of determining the base temperature of thermal comfort in different climatic regions of Iran for calculating the degree-

- day index required for cooling and heating. *Geographical Information (Sepehr)*, 27(105), 127–143. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.31481> [In Persian].
- Havenith, G., Fiala, D., & Richards, M. (2012). The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 461–470. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>
- Hentschel, G. A. (1987). A human biometeorology classification of climate for large and local scales. In *Proceedings of WMO/HMO/UNEP Symposium on Climate and Human Health* (WCPA No. 1). World Meteorological Organization.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Houghten, F. C., & Yaglou, C. P. (1923). Determining lines of equal comfort. *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, 29, 165–176.
- Juzbasic, A., Ahn, J., Cha, D., Chang, E., & Min, S. (2022). Changes in heat stress considering temperature, humidity, and wind over East Asia under RCP8.5 and SSP5-8.5 scenarios. *International Journal of Climatology*, 42(12), 7636–7659. <https://doi.org/10.1002/joc.7636>
- Khadkhoda, E., Omidvar, K., Zarrin, A., & Mazidi, A. (2023). Seasonal analysis of heat stress and its trend in Iran using ERA5 data. *Journal of Earth and Space Physics*, 49(3), 685–698. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350315.1007466> [In Persian].
- Khan, N., Pour, S. H., Shahid, S., Ismail, T., Ahmed, K., Chung, E.-S., Nawaz, N., & Wang, X. (2022). Characteristics of human thermal stress in South Asia during 1981–2019. *Environmental Research Letters*, 17(10), Article 104017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8fa6>
- Kjellstrom, T., Briggs, D., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M., & Hyatt, O. (2016). Heat, human performance, and occupational health: A key issue for the assessment of global climate change impacts. *Annual Review of Public Health*, 37, 97–112. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032315-021740>
- Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health*, 29, 41–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>
- Landsberg, H. E. (1972). *The assessment of human bioclimate: A limited review of physical parameters* (Technical Note No. 123, WMO-No. 331). World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/index.php?id=6303&lvl=notice_display
- Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225–234. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- Lekzashkour, G., & Panahi, F. (2015). *Evaluation of Baker's Climate Index (CPI): A case study of Hormozgan Province* [Conference session]. The 2nd International Conference on Research in Engineering, Science, and Technology, Iran. [In Persian].
- Li, P. W., & Chan, S. T. (2000). Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. *Meteorological Applications*, 7(4), 369–375. <https://doi.org/10.1017/S1350482700001602>
- Lin, T.-P., Tsai, K.-T., Hwang, R.-L., & Matzarakis, A. (2012). Quantification of the effect of thermal indices and sky view factor on park attendance. *Landscape and Urban Planning*, 107(2), 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.05.011>
- Luo, M., & Lau, N.-C. (2021). Increasing human-perceived heat stress risks exacerbated by urbanization in China: A comparative study based on multiple metrics. *Earth's Future*, 9(7), Article e2020EF001848. <https://doi.org/10.1029/2020EF001848>
- Mir, F., Khosravi, M., & Shoja, F. (2025). Evaluation of optimal climatic comfort indices and forecasting of heat stress in Zahedan City: A strategy for adaptation to climate change. *Journal of Regional Urban Geography and Spatial Planning*, 15(54), 1–32. <https://doi.org/10.22111/gaij.2025.50467.3247> [In Persian]

- Mohammadi, B., Gholizadeh, M. H., & Alijani, B. (2018). Spatial distribution of thermal stresses in Iran based on PET and UHCI indices. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(5), 5423–5445. https://doi.org/10.15666/aeer/1605_54235445
- Mohan, M., Gupta, A., & Bhati, S. (2014). A modified approach to analyze thermal comfort classification. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4(1), 7–19. <https://doi.org/10.4236/acs.2014.41002>
- Mousavi, S. S., Rezaei, P., & Ramazani, B. (2024). Analysis and evaluation of thermal comfort in the open spaces of Rasht City. *Geography and Environmental Studies*, 13(49), 1-12. [In Persian]
- Polydoros, A., & Cartalis, C. (2014). Assessing thermal risk in urban areas – An application for the urban agglomeration of Athens. *Advances in Building Energy Research*, 8(1), 74–83. <https://doi.org/10.1080/17512549.2014.890536>
- Raymond, C., Matthews, T., & Horton, R. M. (2020). The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances*, 6(19), Article eaaw1838. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1838>
- Rong, Y. L., Zhang, X., & He, Q. (2017). Study and analysis of meteorological effect on Shanghai Sheshan National Tourist Resorts in Shanghai. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5(3), 11–22. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.53002>
- Sailor, D. J., Georgescu, M., Milne, J. M., & Hart, M. A. (2015). Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities. *Atmospheric Environment*, 118, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.016>
- Schwingshackl, C., Sillmann, J., Russo, S., & Vogel, M. M. (2021). Heat stress indicators in CMIP6: Estimating future trends and exceedances of impact-relevant thresholds. *Earth's Future*, 9(3), Article e2020EF001885. <https://doi.org/10.1029/2020EF001885>
- Siple, P. A., & Passel, C. F. (1945). Measurements of dry atmospheric cooling in sub-freezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89(1), 177–199.
- Yan, Y., Xu, Y., & Yue, S. (2021). A high-spatial-resolution dataset of human thermal stress indices over South and East Asia. *Scientific Data*, 8, Article 229. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01010-w>
- Zhou, Y., Wang, J., & Wang, Y. (2019). Estimation of travel climate comfort degree in the cross-border region between China and Russia based on GIS. *Journal of Resources and Ecology*, 10(6), 657–666. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2019.06.006>