

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

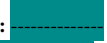
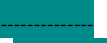


Journal of Natural Environmental Hazards, Vol. ---, Issue ---, ---

Intensification of Compound Heat-Humidity Stress on Human Physiological Survivability Driven by Climate Change in Iran

Abbasali Dadashi-Roudbari^{1*} 

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Email: a-dadashi@um.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9308-1019>

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received:  Revised:  Accepted:  Published: </p> <p>Keywords: Compound heat-humidity stress, NOAA Heat Index, Critical thresholds, CMIP6, Iran..</p>	<p>The interaction between dry-bulb temperature and relative humidity, exacerbated by global warming, profoundly impairs human thermoregulation by restricting latent heat dissipation. This study provides a comprehensive evaluation of heat stress dynamics across Iran using a bias-corrected CMIP6 multi-model ensemble under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios to calculate the NOAA Heat Index (NOAA-HI). Analysis of the ensemble outputs reveals substantial spatial heterogeneity in the climatological distribution of the NOAA-HI. High temperature and humidity levels are already triggering severe thermal stress, most notably along Iran's northern coastlines and throughout its southern territories. In these high-impact zones, the combined effects of solar radiation and ambient humidity push the index beyond 30 °C, placing these environments firmly within established danger classifications. Conversely, the northwestern and mountainous regions currently remain within the caution category. Under the high-emission SSP5-8.5 scenario, anticipated shifts in the bioclimatic regime will systematically alter the frequency of heat stress thresholds, leading to an acute intensification of thermal stress along the eastern and southern coasts. Quantitatively, the proportion of days categorized as "danger" is projected to surge from a historical baseline of 1.4% to 12.8% in the far future. This escalation is accompanied by a massive expansion of the "extreme caution" category, projected to dominate 42.8 of the year a level of prolonged exposure that will severely erode the adaptive capacity of local biological systems. Ultimately, the progression of the NOAA-HI beyond safe physiological thresholds (>26.7 °C) into critical territory represents an existential threat to outdoor survivability and habitability across Iran's lower latitudes and lowland plains. These findings underscore the urgent need for targeted mitigation and adaptation policies in vulnerable regions, providing a vital strategic framework for regional policymakers and environmental managers.</p>

How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (--), ----.



© The Author/Authors

DOI: 00000000000000000000

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Driven by the accelerating pace of global warming, the Earth's climate system has undergone profound transformations. The fallout from these shifts now poses an unprecedented threat to public health, delicate ecosystems, and critical socio-economic infrastructure. Drawing on comprehensive assessments conducted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global mean surface temperatures climbed by a substantial 0.92 °C (with an uncertainty range spanning 0.68°C to 1.17 °C) between the years 1880 and 2012. In the wake of such climate disruptions, the dynamics of extreme thermal events have fundamentally altered. This emerging pattern stands in stark contrast to historical norms; whereas in the distant past, severe cold snaps were widely recognized as the primary driver of climate-related mortality.

Situated within the global arid belt, Iran a developing nation faces an exceptionally high risk of extreme heat events. This inherent vulnerability is largely driven by the physical reality that landmasses are warming at a significantly steeper rate than oceans. Socio-demographically, the country's structural susceptibility to heatwaves is compounding exponentially. A densely packed population, acting in tandem with an alarmingly rapid aging demographic, fundamentally exacerbates this risk in a non-linear fashion. Physiologically, the anticipated co-occurrence of elevated temperatures and high atmospheric moisture threatens to disrupt vital human thermoregulatory mechanisms, particularly the body's capacity for evaporative cooling. Such physiological stress inevitably paves the way for severe public health crises, characterized by sharp spikes in heat-related morbidity and mortality. Despite the profound severity of these projections, a comprehensive understanding of this multifaceted threat remains elusive across the country. This critical knowledge gap stems primarily from a conspicuous scarcity of regional-scale studies utilizing composite metrics, such as the NOAA-HI. Consequently, from a strategic standpoint, the present research represents an absolute imperative. It provides the essential empirical foundation required to formulate robust national climate adaptation policies and to safeguard the long-term resilience of Iran's healthcare infrastructure.

DATA AND METHODOLOGY

Accurately assessing combined thermo-hygrometric stress through General Circulation Model (GCM) outputs inherently relies on a robust observational framework across diverse climate regions. To build this empirical foundation, daily air temperature and relative humidity records were extracted from 10 meteorological stations representing Iran's varied climate zones. These selected stations comprising Mashhad, Shiraz, Babolsar, Bandar Abbas, Tabriz, Bam, Zahedan, Kermanshah, Isfahan, and Sanandaj provided the necessary ground-truth data over the historical period of 1990 to 2014. Using these two primary variables, we computed the NOAA- HI at the station. The core validation strategy of this study then hinged on correlating these localized observational values with outputs from a multi-model ensemble (MME), the specific mechanics of which are detailed in the subsequent section. Statistical evaluations revealed a strong alignment between the ground-based data and the ensemble estimates. Specifically, the observed correlation coefficients ranged from a minimum of 0.71 at the Sanandaj station to a peak of 0.84 in Bandar Abbas. Such robust statistical agreement firmly substantiates the capability of the CMIP6-MME framework to reliably reproduce historical NOAA-HI patterns.

Simulation of the NOAA-HI index relied on outputs from 16 General Circulation Models (GCMs) participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The selected suite comprised ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, CanESM5, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, FGOALS-g3, GFDL-CM4, GFDL-ESM4, INM-CM4-8, INM-CM5-0, KIOST-ESM, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM, and NorESM2-MM. Because the native horizontal resolutions of these models vary considerably, the direct execution of downstream procedures such as

multi-model ensemble analyses is inherently problematic. We resolved this structural heterogeneity by employing a bilinear interpolation algorithm.

RESULTS AND DISCUSSION

Ensemble outputs from CMIP6 project pervasive warming across the entirety of Iran's geographical landscape. When evaluated against the historical baseline of 1990–2014, anticipated anomalies for the NOAA-HI heat index register positive shifts ranging from 1.36 to 7.4 °C. This distinctively non-linear behavior in the NOAA-HI emerges from a synergistic interplay between atmospheric dry-bulb temperature and relative humidity. Governed by the Clausius-Clapeyron relation, the atmosphere's enhanced capacity to retain water vapor fundamentally disrupts human thermoregulatory sweating. Consequently, apparent temperature is driven upward at an exponential rate.

During the near-future timeline, the inherent thermal inertia of the ocean-atmosphere system masks any significant divergence between distinct radiative forcing pathways. Anomaly fluctuations thus remain confined to a narrow band of 1.5 to 2.5 °C under both evaluated scenarios. However, profound thermodynamic divergence materializes by the mid-future period. While the climate system's response under the SSP2-4.5 stabilizes within a boundary of 3 to 4 °C, the SSP5-8.5 triggers acute shifts. This high-emission pathway severely amplifies thermal stress across the thermodynamically sensitive southern and eastern halves of the country, ultimately pushing index anomalies to extreme values between 4 and 5 °C.

CONCLUSION

Bias-corrected multi-model ensemble outputs from CMIP6 reveal that the spatial distribution of the NOAA-HI across Iran is directly governed by large-scale physiographic and latitudinal forcings. Ranging between 12.3 and 18.6 °C along the Zagros and Alborz mountain, the index establishes a stark thermodynamic contrast when compared to the country's lower latitudes. Over the historical (1990–2014), the synergistic interplay of shortwave radiation (sensible heat) and the continuous advection of moisture flux (latent heat) from the Persian Gulf and the Sea of Oman propelled index values in Khuzestan and the southern coastal strip into a critical domain of 30 to 34.9 °C. Falling squarely within the extreme caution classification (>32.2 °C), these low-lying regions underscore the systemic vulnerability of southern Iran to compounding heat and humidity stresses.

Projected shifts in the NOAA-HI under various Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) point toward a non-linear, escalating thermal burden on the Iran climate system, a direct manifestation of the Clausius-Clapeyron relation. As the atmosphere's water vapor holding capacity increases, natural human thermoregulation via sweating becomes severely compromised. By the end of the century, assuming the SSP5-8.5 scenario, anomalies in the southern and coastal strips are projected to surge to unprecedented levels, shifting by 6 to 7.4 °C. Breaching the 40 °C threshold will thrust these coastal lowlands unequivocally into the danger category. Conversely, despite enduring localized warming of 4 to 5 °C, the elevated mountainous zones are expected to safely remain below the 26.7 °C hazard benchmark.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors

REFERENCES

References (in Persian)

Almasi, F. , Farajzadeh, M. and Ghavidel Rahimi, Y. (2023). Assessing the risk of mortality caused by heat stress in Iran's metropolises. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(38), 131-148. doi: 10.22111/jneh.2023.45769.1963 [In Persian]

Kadkhoda, E., Omidvar, K., Zarrin, A. and Mazidi, A. (2023). Seasonal analysis and trend of heat stress in Iran using ERA5 data. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 685-698. doi: 10.22059/jesphys.2023.350315.1007466 [In Persian]
Khoorani, A., Moradi, A. and Moradi, A. (2023). Projecting changes in the thermal comfort of coastal tourists in Hormozgan province. *Physical Geography Research*, 55(2), 71-87. doi: 10.22059/jphgr.2023.359547.1007773 [In Persian]
Pakbaz H, Khosravi M, Tavousi T, Mahmoudi P. (2018). Analysis of Spatial Patterns of Discomfort Index (DI) Classes in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5 (2), 73-90. [In Persian]

References (in English)

- Buzan, J. R., Oleson, K., & Huber, M. (2015). Implementation and comparison of a suite of heat stress metrics within the Community Land Model version 4.5. *Geoscientific Model Development*, 8(2), 151–170. <https://doi.org/10.5194/gmd81512015>
- Cheng, Y., Niu, J., & Gao, N. (2012). Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*, 47, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.011>
- Chindapol, S. (2016). Thermal comfort and heat stress of the elderly in hot-humid summers in Thailand [Unpublished doctoral dissertation]. University of New South Wales.
- De Freitas, C. R., & Grigorieva, E. A. (2014). A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 1–12.
- Dixon, P. G., Brommer, D. M., Hedquist, B. C., Kalkstein, A. J., Goodrich, G. B., Walter, J. C., & Cerveny, R. S. (2005). Heat mortality versus cold mortality: a study of conflicting databases in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(7), 937–944.
- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., et al. (2014). Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Huang, C., Barnett, A. G., Wang, X., Vaneckova, P., FitzGerald, G., & Tong, S. (2011). Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: A systematic review. *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1681–1690. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103456>
- Huang, J., Li, Q., & Song, Z. (2022). Historical global land surface air apparent temperature and its future changes based on CMIP6 projections. *Science of the Total Environment*, 816, Article 151656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151656>
- IPCC. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... & B. Zhou (Eds.), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Knutson, T. R., & Ploshay, J. J. (2016). Detection of anthropogenic influence on a summertime heat stress index. *Climatic Change*, 138(1), 25–39. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1708-z>
- Lange, S. (2019). Earth2Observe, WFDEI and ERA-interim data merged and bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI).
- Lange, S., Menz, C., Gleixner, S., Cucchi, M., Weedon, G. P., Amici, A., Bellouin, N., Schmied, H. M., Hersbach, H., Buontempo, C., & Cagnazzo, C. (2021). WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5 v2.0).
- Lin, Y.-K., Chang, C.-K., Li, M.-H., Wu, Y.-C., & Wang, Y.-C. (2012). High-temperature indices associated with mortality and outpatient visits: Characterizing the association with elevated temperature. *Science of The Total Environment*, 427–428, 41–49.
- National Weather Service. Heat Index. (2016). URL <https://www.weather.gov/media/epz/wxcalc/heatIndex.pdf>
- National Weather Service. Heat Index. (2018). URL <https://www.weather.gov/safety/heat-index>.
- Nguyen, J. L., & Dockery, D. W. (2016). Daily indoor-to-outdoor Temperature and humidity relationships: a sample across seasons and diverse climatic regions. *International Journal of Biometeorology*, 60, 221–229. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1019-5>
- NOAA 2012, Heat. A Major Killer. National Oceanic & Atmospheric Administration, National Weather Service, WI, USA, Available from: <http://www.nws.noaa.gov/om/heat/index.shtml>
- Rahman, M. B., Salam, R., Islam, A. R. M. T., Tasnuva, A., Haque, U., Shahid, S., Hu, Z., & Mallick, J. (2021). Appraising the historical and projected spatiotemporal changes in the heat index in Bangladesh. *Theoretical and Applied Climatology*. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03705-x>
- Rothfusz, L. P. (1990). The heat index equation. Fort Worth, TX: National Weather Service Technical Attachment (SR 90–23).
- Schwingshackl, C., Sillmann, J., Vicedo-Cabrera, A. M., Sandstad, M., & Aunan, K. (2021). Heat stress indicators in CMIP6: Estimating future trends and exceedances of impact-relevant thresholds. *Earth's Future*, 9, e2020EF001885. <https://doi.org/10.1029/2020EF001885>
- Scoccimarro, E., Fogli, P. G., & Gualdi, S. (2017). The role of humidity in determining scenarios of perceived temperature extremes in Europe. *Environmental Research Letters*, 12(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8cdd>
- Spangler, K. R., Weinberger, K. R., & Wellenius, G. A. (2018). Suitability of gridded climate datasets for use in environmental epidemiology. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(6), 777–789. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0105-2>
- UNISDR. (2018). The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, annual report 2018. <https://www.undrr.org/publication/united-nations-office-disaster-risk-reduction-2018-annual-report>.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Walikewitz, N. (2017). Urban climate and heat stress hazards – an indoor perspective [Unpublished doctoral dissertation]. Humboldt-Universität zu Berlin.


Yuan, J., Stein, M. L., & Kopp, R. E. (2020). The evolving distribution of relative humidity conditional upon daily maximum temperature in a warming climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(19). <https://doi.org/10.1029/2019jd032100>.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ... شماره ...

تشدید تنش گرمایی-رطوبتی در مرزهای زیست‌پذیری فیزیولوژیک انسان بر اثر تغییر اقلیم در ایران

عباسعلی داداشی رودباری *

۱. استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: a-dadashi@um.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9308-1019>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: --/-- تاریخ ویرایش: --/-- تاریخ پذیرش: --/-- تاریخ انتشار: --/--</p> <p>واژه‌های کلیدی: تنش گرمایی-رطوبتی، شاخص NOAA-HI، آستانه‌های بحرانی، CMIP6، ایران.</p>	<p>برهم‌کنش هم‌افزای دمای خشک و رطوبت نسبی تحت واداشتهای گرمایش جهانی، سازوکار تنظیم گرمای فیزیولوژیک انسان را از طریق محدودسازی دفع گرمای نهان مختل می‌کند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل تنش گرمایی در ایران انجام شد. برای این منظور یک چندمدلی همادی تصحیح‌اریبی شده CMIP6 تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای محاسبه شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبتی NOAA-HI توسعه داده شد. تحلیل خروجی‌های همادی چندمدلی تصحیح‌اریبی شده CMIP6 ناهمگنی فضایی قابل‌توجهی را در توزیع شاخص NOAA-HI در اقلیم ایران آشکار می‌سازد. ترکیب دما و رطوبت نسبی به‌ویژه در مناطق جنوبی و مناطق ساحلی شمال ایران، شرایط تنش‌زای گرمایی شدیدی ایجاد کرده است. در این مناطق، هم‌افزایی تابش خورشیدی و رطوبت، شاخص NOAA-HI را به مقادیر بالای ۳۰ تا ۳۴/۹ درجه سلسیوس رسانده و در نهایت باعث ورود این مناطق به کلاس‌های خطر می‌شود. در حالی که مناطق (کوهستانی و شمال‌غربی) کشور همچنان در محدوده احتیاط باقی می‌مانند. پیش‌نگری‌ها حاکی از آن است که تغییرات شاخص NOAA-HI در آینده، به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5، موجب افزایش شدید تنش گرمایی در نوار ساحلی جنوبی و مناطق شرقی کشور خواهد شد. جابجایی رژیم بیوکلیمایی ساختار فراوانی آستانه‌های تنش گرمایی را به طور اساسی تغییر خواهد داد. سهم روزهای منطبق بر کلاس خطر در متوسط پهنه‌ای کشور از ۱/۴ درصد در دوره تاریخی به ۱۲/۸ درصد تحت سناریو SSP5-8.5 در آینده دور افزایش می‌یابد. هم‌زمان، کلاس احتیاط شدید با استیلا بر ۴۲/۸ درصد از روزهای سال ظرفیت تطبیقی سیستم‌های بیولوژیک را به شدت کاهش می‌دهد. بطور کلی عبور سیستماتیک شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبتی از آستانه‌های ایمن $C < 0.267$ و نفوذ به مرزهای بحرانی، تهدیدی ذاتی برای زیست‌پذیری فضای باز در مناطق پست و عرض‌های پایین ایران محسوب می‌شود. نتایج این تحقیق ضرورت اتخاذ سیاست‌های مقتضی برای کاهش اثرات تنش‌های گرمایی، به‌ویژه در نواحی حساس را نشان می‌دهد و توصیه‌های کلیدی برای مدیران و سیاست‌گذاران ارائه می‌دهد.</p>

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ و نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله، مخاطرات محیط طبیعی، --/--. ---

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

سامانه اقلیمی زمین تحت تأثیر روند شتابان گرمایش جهانی، تغییرات چشمگیری را تجربه کرده که پیامدهای آن به شکل بی‌سابقه‌ای سلامت عمومی، اکوسیستم‌ها و زیرساخت‌های اقتصادی-اجتماعی را به مخاطره انداخته است (هوانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۱؛ کنوتسون و پلوشی^۲، ۲۰۱۶). بر پایه ارزیابی‌های جامع هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)، میانگین دمای سطح زمین در بازه زمانی ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ افزایش قابل توجهی برابر با ۰/۹۲ درجه سلسیوس (با دامنه عدم قطعیت ۰/۶۸ تا ۱/۱۷ درجه سلسیوس) داشته است (IPCC, 2021). با این وجود، داده‌های جدیدتر نشان‌دهنده شدت یافتن این روند گرمایشی است؛ به طوری که طبق گزارش سالانه اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA)، سال ۲۰۲۴ گرم‌ترین سال از زمان آغاز ثبت رکوردهای جهانی در سال ۱۸۵۰ بوده است. بر اساس این گزارش، میانگین دمای جهانی ۱/۲۹ درجه سلسیوس بالاتر از میانگین قرن بیستم و ۱/۴۶ درجه سلسیوس بالاتر از میانگین دوران پیشاصنعتی بود؛ دوره‌ای که NOAA آن را بازه زمانی ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ تعریف می‌کند (NOAA, 2026).

در پی این تغییرات، رخدادهای فرین گرمایی تغییرات گسترده‌ای را تجربه کردند؛ به گونه‌ای که اگرچه در گذشته‌های دور، امواج سرمایایی عامل اصلی مرگ‌ومیرهای اقلیمی محسوب می‌شدند (دیکسون و همکاران^۳، ۲۰۰۵)، اما امروزه تنش‌های گرمایی به مخرب‌ترین تهدید علیه سلامت عمومی تبدیل شده است (فیلد^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). آمارهای دفتر کاهش خطرپذیری بلایای سازمان ملل (UNISDR) نشان می‌دهد که تنها طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ بیش از ۱۶۶۰۰۰ نفر جان خود را در اثر مواجهه با امواج گرمایی از دست داده‌اند (UNISDR, 2018).

با وجود پیامدهای مخرب گرمایش جهانی، تکیه صرف بر متغیر دمای هوای محیطی^۵ برای سنجش مواجهه و آسیب‌پذیری انسان در برابر گرما، رویکردی به‌شدت ناقص و ناکارآمد است. درک کمی تنش‌های گرمایی وارده بر فیزیولوژی انسان، نیازمند مدل‌سازی تبادل گرمایی پیچیده‌ای است که فراتر از دمای هوا خشک عمل می‌کند (چنگ و همکاران^۶، ۲۰۱۲). از منظر هواشناسی زیستی، ظرفیت تطبیق‌پذیری بدن با شرایط جوی، پاسخی هم‌افزا به ترکیب دمای هوا، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و تندی باد است (نوین و داکری^۷، ۲۰۱۶؛ اسکوچیمارو^۸ و همکاران، ۲۰۱۷). در سازوکار طبیعی بدن، تعریق ابزار کلیدی برای دفع گرمای متابولیک است. با این حال، هنگامی که افزایش دما با سطوح بالای رطوبت نسبی مقارن می‌گردد، سازوکار خنک‌سازی تبخیری پوست دچار اختلال شده و عملاً متوقف می‌شود (بوزان^۹ و همکاران، ۲۰۱۵). این پدیده منجر به تجمع خطرناک گرمای مازاد در بدن شده و می‌تواند به گرم‌زدگی‌های مرگبار بینجامد. به همین دلیل، دمایی که توسط انسان احساس می‌شود می‌تواند بسیار فراتر از ارقام ثبت‌شده توسط دماسنج‌ها باشد (کوچیمارو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷).

¹ Huang

² Knutson & Ploshay

³ Dixon

⁴ Field

⁵ Ambient Temperature

⁶ Cheng

⁷ Nguyen & Dockery

⁸ Scoccimarro

⁹ Buzan

¹⁰ Scoccimarro

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

برای رفع محدودیت‌های محاسباتی گفته شده در بالا، شاخص‌های تنش گرمایی مبتنی بر دمای ظاهری^۱ توسعه یافته است (اسپنگلر^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). در میان بیش از ۱۷۰ شاخص موجود، شاخص‌های ترکیبی گرمایی-رطوبتی، به‌ویژه شاخص NOAA-HI به دلیل کارایی بالا در پایش آسایش گرمایی و استفاده گسترده در سامانه‌های هشدار زودهنگام، از مقبولیت علمی بالایی برخوردارند (دفریتاس و گریگوریوا^۳، ۲۰۱۴). اهمیت راهبردی این شاخص‌های ترکیبی در پیش‌نگری‌های اقلیمی زمانی دوچندان می‌شود که به ویژگی هم‌افزای میان دما و رطوبت توجه شود. شواهد حاکی از آن است که در اقلیم در حال تغییر، تنش‌های گرمایی به دلیل افزایش توامان رطوبت، با شیب بسیار تندتری تشدید خواهند شد (یوان^۴ و همکاران، ۲۰۲۰).

ایران به عنوان کشوری در حال توسعه واقع در کمربند خشک جهان، با توجه به شتاب به مراتب تندتر گرمایش بر فراز خشکی‌ها نسبت به اقیانوس‌ها، پتانسیل بسیار بالایی برای رخداد‌های فرین گرمایی دارد. هم‌زمان از بعد اجتماعی و جمعیتی، تراکم بالای جمعیت در کنار پدیده هشداردهنده پیری جامعه، آسیب‌پذیری ساختاری در برابر امواج گرمایی را به شکلی غیرخطی و تصاعدی در کشور تشدید کرده است. در بعد فیزیولوژیک و سلامت، هم‌رخدادی محتمل دما و رطوبت بالا در ایران می‌تواند سازوکار حیاتی تبخیر و خنک‌سازی بدن انسان را مختل کرده و به بحران‌های جدی افزایش مرگ‌ومیر و ابتلا به بیماری‌های گرمایی بینجامد. با این حال، فقدان مطالعات مبتنی بر شاخص‌های ترکیبی نظیر NOAA-HI در مقیاس منطقه‌ای، مانع از درک صحیح این تهدید چندوجهی در کشور شده است. از منظر راهبردی، این پژوهش جهت تدوین استراتژی‌های ملی سازگاری با تغییر اقلیم و حفاظت از تاب‌آوری سیستم‌های سلامت در ایران، ضروری است.

تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن، به‌ویژه رخداد‌های فرین گرمایی، دیگر صرفاً یک تهدید زیست‌محیطی مربوط به آینده نیستند، بلکه به یک بحران ملموس در بهداشت عمومی و برنامه‌ریزی شهری تبدیل شده‌اند. مرور ادبیات علمی در این حوزه نشان‌دهنده یک سیر تکاملی از ارزیابی‌های آسایش گرمایی به سوی مدل‌سازی‌های پیچیده جهانی و استفاده از شاخص‌های ترکیبی نظیر شاخص گرمایی نوآ (NOAA-Heat Index) است. پژوهش‌های انجام شده در حوزه تنش گرمایی بسیار گسترده است. این پژوهش‌ها در ابتدا بر پاسخ‌های ذهنی و فیزیولوژیک متمرکز بودند؛ بطوریکه چنداپل^۵ (۲۰۱۶) نشان داد آستانه‌های آسایش گرمایی در سالمندان پدیده‌ای سیال است و دمای ۳۸ درجه سلسیوس عنوان مرز شرایط غیرقابل‌قبول شناسایی شد. در همین راستا والیکویتز^۶ (۲۰۱۷) اثبات کرد دمای محیط‌های بسته یا داخلی به اندازه دمای بیرونی یا محیط باز یک پیش‌بینی‌کننده قدرتمند برای نرخ مرگ‌ومیر است. با این حال، مدل‌سازی این پدیده در مقیاس جهانی با عدم قطعیت زیادی روبرو است بطوریکه شوینگ‌شاکل و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که علی‌رغم روند افزایشی در شاخص‌های تنش گرمایی، پراکندگی و عدم توافق میان شاخص‌های مختلف تنش گرمایی وجود دارد. در همین راستا هوانگ و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که دمای ظاهری که رطوبت را لحاظ می‌کند، به مراتب سریع‌تر از دمای هوای استاندارد در حال افزایش است و تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 می‌تواند تا ۶/۷ درجه سلسیوس افزایش یابد. این پیش‌نگری‌های هشداردهنده جهانی، با مطالعات

¹ Apparent Temperature

² Spangler

³ De Freitas & Grigorjeva

⁴ Yuan

⁵ Chindapol

⁶ Walikewitz

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

منطقه‌ای که از شاخص‌های کاربردی استفاده می‌کنند، همخوانی بالایی دارد؛ به طوری که رحمان و همکاران (۲۰۲۱) با به‌کارگیری شاخص گرمای نوآ (NOAA-HI) در بنگلادش، افزایش چشمگیر شرایط احتیاط شدید را تا اواسط قرن، به ویژه تحت سناریوی RCP 8.5، پیش‌نگری کردند.

تنش گرمایی در ایران هم مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است. از جمله می‌توان به تحقیقات پاکباز و همکاران (۱۳۹۷) اشاره کرد که با بررسی شاخص عدم آسایش نشان دادند توزیع تنش گرمایی در ایران به شدت تابع عرض جغرافیایی و ارتفاع است؛ به طوری که سواحل جنوبی خلیج فارس و دریای عمان بیشترین درگیری و ارتفاعات بالای ۲۳۰۰ متر کمترین تنش را تجربه می‌کنند. در تأیید این ناهمگونی، کدخدا و همکاران (۱۴۰۲) نشان دادند که طی چهار دهه گذشته، تنش گرمایی بر اساس شاخص UTCI در بخش اعظم پهنه ایران دارای یک روند غالب و معنادار افزایشی بوده است. پیامدهای این روند بر سلامت عمومی توسط الماسی و همکاران (۱۴۰۲) در کلان‌شهرهای ایران نشان داده شد؛ بطوریکه تحلیل‌های آن‌ها نشان داد عبور شاخص UTCI از آستانه ۳۵ درجه سلسیوس با افزایش تصاعدی ریسک مرگ‌ومیر همراه است. همچنین پیامدهای این پدیده بر برنامه‌ریزی‌های اقتصادی نیز حائز اهمیت است. خورانی و همکاران (۱۴۰۲) با پیش‌نگری شاخص PMV تحت سناریوهای تغییر اقلیم هشدار دادند که در دهه‌های آینده، ماه‌های دارای شرایط آسایش حرارتی برای گردشگران در سواحل جنوبی به شدت افت کرده و بر فراوانی شرایط غیرقابل تحمل افزوده خواهد شد. با توجه به این پیشینه و خلأهای موجود در ارزیابی‌های جامع آینده‌نگرانه، در پژوهش حاضر تنش گرمایی با استفاده از شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبتی NOAA-HI پیش‌نگری می‌شود. اهمیت استفاده از شاخص NOAA-HI در این پژوهش، قابلیت آن در ارزیابی اثرات هم‌افزای دما و رطوبت نسبی است که با بازتاب بسیار دقیق‌تر اثرات گرمایی انسان و تطابق استاندارد با سامانه‌های هشدار زودهنگام بهداشت عمومی، می‌تواند مبنایی علمی، کارآمد و مکان‌محور برای تدوین برنامه‌های سازگاری با اقلیم در برابر رخداد‌های فرین آینده فراهم آورد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده جغرافیایی مورد مطالعه در این پژوهش، کشور ایران است. ایران با برخورداری از ساختار توپوگرافی ناهمگون، تنوع اقلیمی بالایی دارد که بخش اعظم آن تحت سلطه الگوهای خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. با این وجود، مجاورت با پهنه‌های آبی در نوارهای ساحلی شمال (دریای خزر) و جنوب (خلیج فارس و دریای عمان)، گرادپان‌های شدید رطوبتی ایجاد کرده و شرایط ترمودینامیکی مساعدی را برای شکل‌گیری تنش‌های ترکیبی گرمایی-رطوبتی رقم می‌زند. استقرار در کمربند پرفشار جنب‌حاره و حساسیت ذاتی سامانه اقلیمی منطقه به پیامدهای ناشی از گرمایش جهانی، ایران را به یکی از کانون‌های به شدت آسیب‌پذیر در برابر رخداد‌های فرین گرمایی تبدیل کرده است.

داده‌های تحقیق

داده‌های ایستگاهی و ارزیابی پایه

ارزیابی دقیق تنش‌های ترکیبی گرمایی-رطوبتی بر اساس برونداد مدل‌های گردش کلی نیازمند یک ساختار مشاهداتی متن در مناطق مختلف اقلیمی است. برای این منظور، داده‌های روزانه دمای هوا و رطوبت نسبی از ۱۰

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

ایستگاه هواشناسی شامل مشهد، شیراز، بابلسر، بندرعباس، تبریز، بم، زاهدان، کرمانشاه، اصفهان و سنندج استخراج شد. انتخاب این ایستگاه‌ها با هدف پوشش جامع تنوع اقلیمی ایران و بر اساس پهنه‌بندی اقلیمی دومارتن صورت گرفته است تا نمایندگان مناسبی از شرایط اقلیمی متفاوت کشور از خشک و نیمه‌خشک تا مرطوب و معتدل باشند. مختصات جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا هر یک از این ایستگاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. دوره زمانی استخراج داده‌ها مربوط به بازه تاریخی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ است. دلیل محدود شدن دوره آماری به سال ۲۰۱۴، تطابق دقیق و همگام‌سازی داده‌های مشاهداتی با پروتکل‌های استاندارد فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) است؛ چراکه در ساختار مدل‌های CMIP6، شبیه‌سازی‌های دوره تاریخی (Historical Simulations) در پایان سال ۲۰۱۴ خاتمه یافته و داده‌های سال ۲۰۱۵ به بعد، متعلق به سناریوهای پیش‌نگری آینده (SSPs) می‌باشند. در نهایت، مقادیر شاخص ترکیبی NOAA-HI در مقیاس ایستگاهی بر اساس این دو متغیر محاسبه شد. سپس همبستگی این مقادیر مشاهداتی با خروجی چند مدلی همادی که در بخشی بعدی توضیحات آن ارائه شد مبنای درستی سنجی پژوهش قرار گرفت. تحلیل‌های آماری نشان داد ضرایب همبستگی بین داده‌های ایستگاهی و برآورد چند مدلی همادی دارای دامنه تغییراتی از حداقل ۰/۷۱ در ایستگاه سنندج تا حداکثر ۰/۸۴ در ایستگاه بندرعباس است. این رابطه قوی کارایی CMIP6-MME را در بازتولید شاخص‌های NOAA-HI تایید می‌کند.

جدول ۱: ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی منتخب برای درستی سنجی دوره تاریخی CMIP6-MME

اسم ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
مشهد	۳۶/۲۳	۵۹/۶۳	۹۹۹/۲
شیراز	۲۹/۶۱	۵۲/۶۰	۱۴۸۸
بابلسر	۳۶/۶۹	۵۲/۶۴	-۲۱
بندرعباس	۲۷/۲۱	۵۶/۳۷	۹/۸
تبریز	۳۸/۱۲	۴۶/۴۴	۱۳۶۱
بم	۲۹/۱	۵۸/۳۵	۱۰۶۶/۹
زاهدان	۲۹/۴۷	۶۰/۹۰	۱۳۷۰
کرمانشاه	۳۴/۳۵	۴۷/۱۵	۱۳۱۸/۵
اصفهان	۳۲/۷۴	۵۱/۸۶	۱۵۵۱/۹
سنندج	۳۵/۲۴	۴۷/۰۱	۱۳۷۳/۴

مدل‌های CMIP6 و گونه اجرا مورد استفاده

برای شبیه‌سازی شاخص NOAA-HI از خروجی ۱۶ مدل گردش کلی (GCM) از فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) شامل ACCESS-CM2، ACCESS-ESM1-5، CanESM5، EC-Earth3، EC-Earth3-Veg، FGOALS-g3، GFDL-ESM4، GFDL-CM4، INM-CM4-8، INM-CM5-0، KIOST-ESM، MPI-ESM1-2-2، MPI-ESM1-2-LR، HR، MRI-ESM2-0، NorESM2-LM و NorESM2-MM استفاده شد. ناهمگونی در تفکیک افقی ذاتی این مدل‌ها مانع از انجام تحلیل‌های بعدی همانند تولید چند مدلی همادی می‌شود. لذا از الگوریتم درونبندی دو خطی جهت همگام‌سازی تفکیک افقی مدل‌ها یا به عبارت دیگر شبکه‌بندی مجدد به تفکیک افقی واحد (۱۰۰ کیلومتری) انجام شد. پیکربندی تمامی اجراهای استخراج‌شده بر مبنای گونه r1i1p1f1 تنظیم شده است. این گونه اجرا نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت شبیه‌سازی‌های فیزیکی دارد؛ زیرا مجموعه کاملی از واداشتهای خارجی شامل گازهای گلخانه‌ای (GHG) نظیر CO2، N2O، CH4، CFC11، CFC12، CFC113، HCFC22، HFC125،

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

ازن (Oz)، ذرات معلق هواویز سولفات (SA)، واداشتهای خورشیدی (Sl)، فوران‌های آتشفشانی (VI)، کربن سیاه (BC) و کربن آلی (OC) را در محاسبات دینامیک جوی لحاظ می‌کند.

تصحیح اریبی و تولید چند مدلی همادی CMIP6-MME

برای تصحیح اریبی ۱۶ مدل اقلیمی مورد بررسی و حفظ دقیق سیگنال‌های تغییر اقلیم، از روش نگاشت چندک بدون روند (DQM) استفاده شد. برخلاف روش‌های ساده QM که ممکن است روندهای اقلیمی موجود در داده‌ها را مخدوش کنند، تکنیک پیشرفته DQM تضمین می‌کند که سیگنال تغییر اقلیم و روندهای موجود در هر چندک از توزیع داده‌های روزانه کاملاً حفظ شده و تنها انحرافات توزیعی تعدیل گردند (لانگه، ۲۰۱۹). این فرآیند بر مبنای مجموعه داده‌های جهانی و روزانه $W5E5$ (نسخه ۲، با تفکیک ۰/۵ درجه طی دوره ۱۹۷۹-۲۰۱۹) (لانگه و همکاران، ۲۰۲۱) و با استفاده از کتابخانه $qmap$ در محیط زبان برنامه‌نویسی R اجرا گردید. در نهایت، به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ذاتی، فیلتر کردن خطاهای سیستماتیک و افزایش قابلیت اتکای برآوردها، یک چندمدلی همادی ($CMIP6-MME$) از ترکیب این ۱۶ مدل تولید شد تا نسبت سیگنال تغییر اقلیم به نویز سیستم به بهترین شکل برجسته شود.

مقادیر شاخص $NOAA-HI$ در گام نخست برای دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ بر اساس داده‌های تصحیح اریبی شده محاسبه شد. پیش‌نگری تغییرات این شاخص برای سه افق زمانی متمایز شامل آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت دو سناریو اقتصادی-اجتماعی $SSP2-4.5$ و $SSP5-8.5$ محاسبه شد. سناریوی حد واسطه $SSP2-4.5$ تداوم روندهای فعلی توسعه با چالش‌های متوسط در کاهش انتشار را شبیه‌سازی می‌کند. در مقابل سناریوی بسیار بدبینانه $SSP5-8.5$ وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی در غیاب سیاست‌های بازدارنده اقلیمی را به تصویر می‌کشد. بکارگیری این دو سناریو، مبنایی کمی برای درک پاسخ اقلیم ایران به افزایش توأمان دما و رطوبت فراهم کرده و نقش تغییر اقلیم را در نوسانات گرمایی-رطوبتی شاخص $NOAA-HI$ تعیین می‌کند.

روش محاسباتی و مدل‌سازی شاخص $NOAA-HI$

در این تحقیق برای محاسبه شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبتی از شاخص $NOAA-HI$ ارائه شده توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده ($NOAA$) استفاده شد. از این شاخص در ایالات متحده آمریکا و سایر کشورها به عنوان هسته مرکزی سامانه پیش‌بینی و صدور هشدارهای اقلیمی $NOAA$ استفاده می‌شود (سرویس هواشناسی ملی، ۲۰۱۸). خروجی‌های این مدل در ارزیابی پیامدهای نامطلوب تنش گرمایی بر سلامت عمومی کاربرد گسترده‌ای دارد (لین^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). چارچوب محاسباتی $NOAA-HI$ بر اساس یک مدل رگرسیون خطی چندگانه با متغیرهای مستقل دما و رطوبت نسبی بنا شده است (راث‌فوس، ۱۹۹۰). این شاخص از طریق حل یک رابطه چندجمله‌ای غیرخطی با ضرایب ثابت تجربی محاسبه می‌شود (سرویس هواشناسی ملی، ۲۰۱۶). رابطه محاسباتی همانند زیر است.

¹ Lin

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

$$HI = -42.379 + (2.04901523 \times T) + (10.14333127 \times RH) - (0.22475541 \times T \times RH) - (6.83783 \times 10^{-3} \times T^2) - (5.481717 \times 10^{-2} \times RH^2) + (1.22874 \times 10^{-3} \times T^2 \times RH) + (8.5282 \times 10^{-4} \times T \times RH^2) - (1.99 \times 10^{-6} \times T^2 \times RH^2)$$

در این رابطه، T نمایانگر دمای هوا بر حسب فارنهایت ($^{\circ}F$) و RH نشان‌دهنده رطوبت نسبی جو بر حسب درصد (%) است. سیستم طبقه‌بندی خطر (NOAA, 2012) بر مبنای دمای ظاهری مستخرج از این روش، چهار دامنه بحرانی را تفکیک می‌کند (جدول ۲).

جدول ۲: طبقات شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبتی NOAA-HI ارائه شده توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده (NOAA)

ردیف	طبقه	مقدار آستانه (درجه سلسیوس)
۱	احتیاط	$26.7^{\circ}C$
۲	احتیاط شدید	$32.2^{\circ}C$
۳	خطر	$40.6^{\circ}C$
۴	خطر شدید	$54.4^{\circ}C$

نتایج و بحث

توزیع مکانی تنش‌های هم‌افزای گرمایی-رطوبتی NOAA-HI

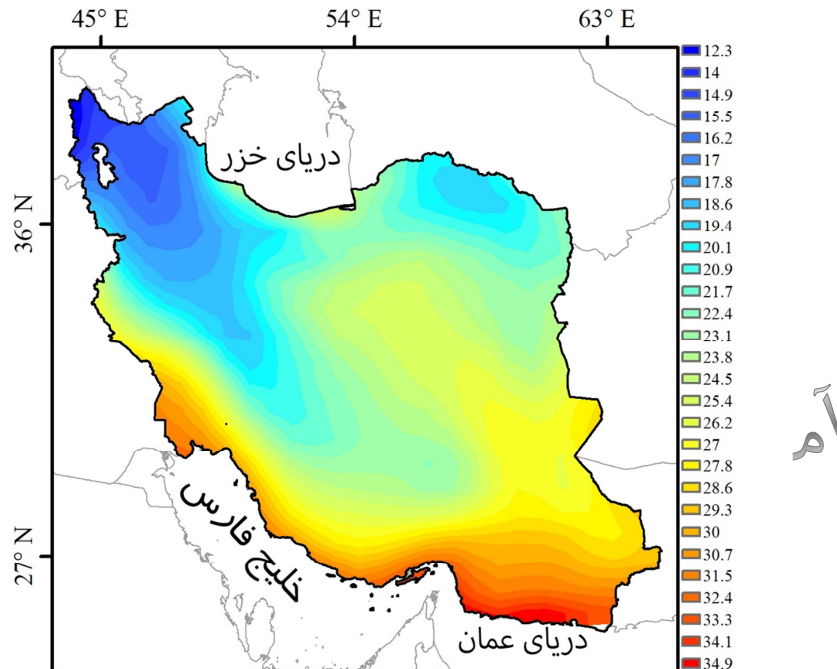
تحلیل خروجی‌های همادی چندمدلی تصحیح‌اریبی شده CMIP6 در دوره تاریخی، نشان‌دهنده شکل‌گیری یک ناهمگنی فضایی ساختاریافته در توزیع شاخص گرمایی-رطوبتی در سطح ایران است. این متغیر بیوکلیمایی نمایانگر اثرات هم‌افزایی دمای خشک و رطوبت نسبی بر سازوکار تنظیم دمای بدن انسان است. افزایش هم‌زمان این دو متغیر ترمودینامیکی موجب سرکوب شدید گرادیان فشار بخار آب بین سطح پوست و جو مجاور می‌شود که در پی آن با کاهش سرمایش تبخیری، دمای محسوس افزایش یافته و تنش گرمایی بروز می‌کند. پراکنش مکانی شاخص گرمایی-رطوبتی در ایران به‌طور مستقیم تحت کنترل واداشت‌های کلان‌مقیاس، به‌ویژه توپوگرافی و عرض جغرافیایی قرار دارد. تأثیر گرادیان بی‌درو (آدیاباتیک) محیطی در نوار شمال‌غربی و امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز سبب شده است تا کمینه مقادیر این شاخص در نواحی مذکور بین بازه $12.3^{\circ}C$ تا $18.6^{\circ}C$ محدود شود (شکل ۱).

در مقابل، عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر در جنوب و جنوب‌شرق کشور، رژیم بیوکلیمایی کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهند. در این مناطق، مقادیر بالای تابش موج‌کوتاه خورشیدی (گرمای محسوس) با تزریق پیوسته شار رطوبتی (گرمای نهان) از سوی پهنه‌های آبی خلیج فارس و دریای عمان ترکیب می‌گردد. این هم‌افزایی ترمودینامیکی باعث افزایش مقادیر شاخص گرمایی-رطوبتی در مناطق پست خوزستان و امتداد نوار ساحلی جنوب به دامنه بحرانی $30^{\circ}C$ تا $34.9^{\circ}C$ شده است.

از سوی دیگر، بیش از نیمی از مساحت کشور شامل پهنه‌های مرکزی، شمالی، شمال‌غربی و شرقی با ثبت میانگین‌های اقلیمی کمتر از $26.7^{\circ}C$ ، در طبقه فاقد تنش پایدار دسته‌بندی می‌شوند. همچنین، پهنه‌های گذار توپوگرافیک شامل کوهپایه‌های جنوبی زاگرس و بخش‌هایی از استان‌های فارس، کرمان، ایلام و جنوب سیستان و بلوچستان با عبور از آستانه $26.7^{\circ}C$ ، در وضعیت رژیم بیوکلیمایی احتیاط قرار گرفته‌اند (شکل ۱).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

نوار ساحلی جنوب شامل استان‌های خوزستان، بوشهر، هرمزگان و محدوده چابهار به دلیل ماهیت جغرافیایی و مجاورت با پهنه‌های آبی، به طور میانگین در طبقه احتیاط شدید ($> 32.2^{\circ}\text{C}$) قرار گرفته‌اند. استقرار میانگین بلندمدت اقلیمی فراتر از آستانه 32°C در این نوار ساحلی، نشان دهنده رخداد‌های مکرر فرین‌های گرمایی روزانه است (شکل ۱). این ساختار ترمودینامیکی، آسیب‌پذیری ذاتی و سیستماتیک نیمه جنوبی ایران را در برابر تنش‌های گرمایی، حتی پیش از اعمال سیگنال‌های تشدیدکننده گرمایش جهانی در دهه‌های آتی اثبات می‌کند.



شکل ۱: پراکنش فضایی تنش گرمایی-رطوبتی بر اساس شاخص NOAA-HI طی دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ (واحد: درجه سلسیوس)

پیش‌نگری رژیم بیوکلیمایی و تشدید تنش ترکیبی گرمایی-رطوبتی در ایران

خروجی‌های همادی CMIP6 نشان دهنده یک گرمایش فراگیر در تمامی گستره جغرافیایی ایران است. بی‌هنجاری‌های پیش‌نگری‌شده شاخص گرمایی NOAA-HI نسبت به دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ بی‌هنجاری مثبت $1/36$ تا $7/4$ درجه سلسیوس را ثبت کرده‌اند. این رفتار غیرخطی شاخص NOAA-HI، برآیند برهم‌کنش هم‌افزای دمای خشک جو و رطوبت نسبی است. بر اساس رابطه کلازیوس-کلاپیرون، افزایش ظرفیت نگهداشت بخار آب در جو سازوکار تعریق انسانی را سرکوب کرده و دمای محسوس را به صورت تصاعدی افزایش می‌دهد (شکل ۲).

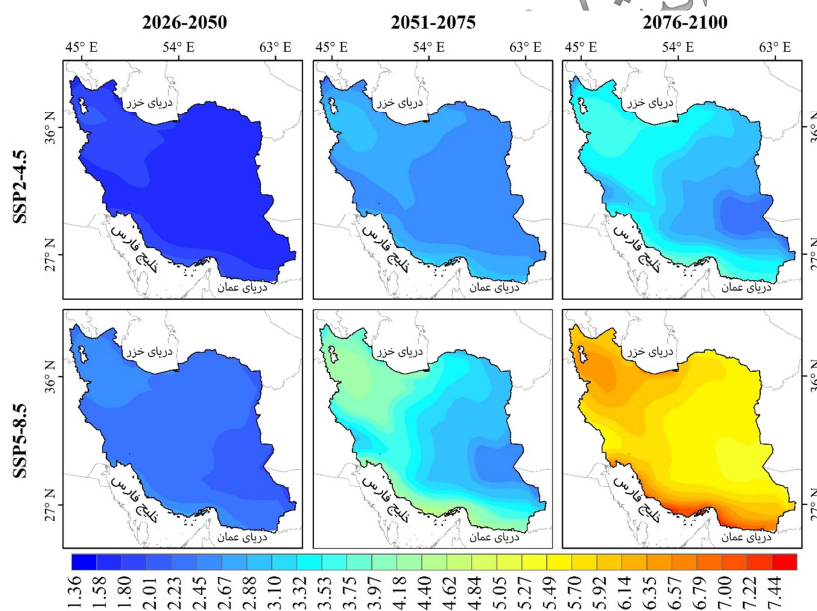
در دوره آینده نزدیک اینرسی حرارتی سامانه جو-اقیانوس مانع از تفکیک معنادار مسیرهای واداشت تابشی می‌شود (میهل^۱ و همکاران، ۲۰۰۵). دامنه نوسان بی‌هنجاری‌ها در هر دو سناریوی مورد بررسی محدود به $1/5$ تا $2/5$ درجه سلسیوس است. واگرایی ترمودینامیکی در دوره آینده میانی آشکار می‌شود. پاسخ سامانه اقلیمی تحت سناریو حد واسط (SSP2-4.5) در بازه ۳ تا ۴ درجه سلسیوس محدود می‌ماند. بر اساس سناریو توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی (SSP5-8.5) بی‌هنجاری‌ها در نیمه جنوبی و شرقی کشور که حساسیت ترمودینامیکی بالاتری دارند به مقادیر ۴ تا ۵ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۲).

¹ Meehl

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تعادل نسبی اقلیم در اواخر قرن تحت سناریوی SSP2-4.5 با میانگین بین ۴ تا ۵ درجه سلسیوس تثبیت می‌شود. اما تحت سناریوی SSP5-8.5 در همین افق زمانی یک فاز تغییر مفرط در اقلیم ایران قابل مشاهده است. بطوریکه گرادیان‌های مکانی بیشینه بی‌هنجاری به مقادیر قابل توجه ۶ تا ۷/۴۴ درجه سلسیوس در نوار جنوبی، سواحل خلیج فارس، دریای عمان و مناطق پست داخلی و شرقی می‌رسد. عرض‌های جغرافیایی پایین و مجاورت با پهنه‌های آبی، به دلیل دریافت تابش حداکثری و پتانسیل بالای نگهداشت رطوبت، تقویت گرمایی شدیدی را تجربه می‌کنند. رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز تحت تاثیر اثر تعدیل‌کننده ارتفاع، کمترین دامنه بی‌هنجاری را در محدوده ۵ تا ۶ درجه سلسیوس را نشان دادند.

افزایش این بی‌هنجاری‌ها نسبت مقادیر تاریخی، ساختار کلاس‌های چهارگانه شاخص NOAA-HI را در گستره ایران به طور اساسی تغییر می‌دهند. نوار ساحلی جنوب و خوزستان با میانگین دوره تاریخی ۳۰ تا ۳۴/۹ درجه سلسیوس (کلاس احتیاط شدید) تحت سناریو SSP5-8.5 در انتهای قرن با بی‌هنجاری قابل توجه ۷ درجه سلسیوس از مرز ۴۰ درجه سلسیوس عبور خواهد کرد. این مناطق مستقیماً وارد کلاس خطر می‌شوند. فلات مرکزی و شرقی ایران با میانگین تاریخی ۲۵ تا ۲۷ درجه سلسیوس در آینده بی‌هنجاری ۵ تا ۶ درجه سلسیوس را تجربه می‌کنند که نشان دهنده کلاس احتیاط شدید است. نواحی کوهستانی زاگرس و شمال‌غرب با مقادیر دوره تاریخی ۱۲ تا ۱۸ درجه سلسیوس علی‌رغم افزایش ۴ تا ۵ درجه سلسیوس و افت محسوس آسایش حرارتی، همچنان در مقیاس بلندمدت زیر آستانه ایمن (26.7°C) باقی می‌مانند (شکل ۲).



شکل ۲: بی‌هنجاری تنش گرمایی-رطوبتی بر اساس شاخص NOAA-HI طی دوره پیش‌نگری تحت سناریوهای حدواسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) (واحد: درجه سلسیوس)

تحلیل سری زمانی متوسط پهنه‌ای شاخص گرمایی-رطوبتی NOAA-HI

تحلیل تغییرات بلندمدت شاخص گرمایی-رطوبتی NOAA-HI در ایران، گذار قطعی سیستم اقلیمی از فاز نوسانات طبیعی به گرمایش انسان‌ساخت را اثبات می‌کند. سری زمانی دوره تاریخی بین ۲۲/۵ تا ۲۴/۵ درجه سلسیوس را

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

نشان می‌دهد. اینرسی حرارتی انباشته در سامانه اقیانوس-جو، یک مسیر گرمایشی اجتناب‌ناپذیر و همگرا را برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) را نشان می‌دهد. پاسخ شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبتی به واداشت‌های تابشی در هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کاملاً منطبق و دارای بی‌هنجاری مثبت است. واگرایی سناریوها پس از اواسط قرن کاملاً واگرا می‌شود. تحت واداشت سناریو حد واسط (SSP2-4.5)، رفتار سامانه اقلیمی به سمت الگویی مجانبی میل می‌کند و میانگین پهنه‌ای شاخص NOAA-HI را در آینده دور به ۲۶ تا ۲۷ درجه سلسیوس می‌رسد. این رژیم گرمایی-رطوبتی مستقیماً مماس بر خط آستانه احتیاط ($> 26.7^{\circ}\text{C}$) نوسان خواهد کرد و تعادل شکننده‌ای را بر جغرافیای ایران تحمیل می‌کند. سناریو SSP5-8.5 رفتار ترمودینامیکی جو را از فاز خطی خارج کرده و یک رشد شبه‌نمایی را ایجاد می‌کند. میانگین پهنه‌ای شاخص حرارتی در افق پایانی قرن به مرز ۳۱ درجه سلسیوس می‌رسد. ثبت این مقدار به عنوان یک میانگین فضایی روی پهنه‌ای با غلبه توپوگرافی کوهستانی، حاکی از یک جایجایی رژیم بیوکلیمایی در کشور است. این رفتار آماری اثبات می‌کند که در پس‌زمینه میانگین کشوری، نواحی کم‌ارتفاع شامل جلگه خوزستان، سواحل خلیج فارس و عرض‌های جنوبی کشور درگیر آستانه‌های احتیاط شدید ($> 32.2^{\circ}\text{C}$) و خطر مطلق ($> 40.6^{\circ}\text{C}$) خواهند بود (شکل ۳). فقدان سیاست‌های کنترل انتشار در دهه‌های جاری، اقلیم ایران را در نیمه دوم قرن به سوی رژیم‌های گرمایی ناسازگار با آستانه‌های تاب‌آوری زیستی سوق می‌دهد.



شکل ۳: سری زمانی متوسط پهنه‌ای شاخص تنش گرمایی-رطوبتی NOAA-HI در ایران طی دوره تاریخی و سناریوهای حدواسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) (واحد: درجه سلسیوس)

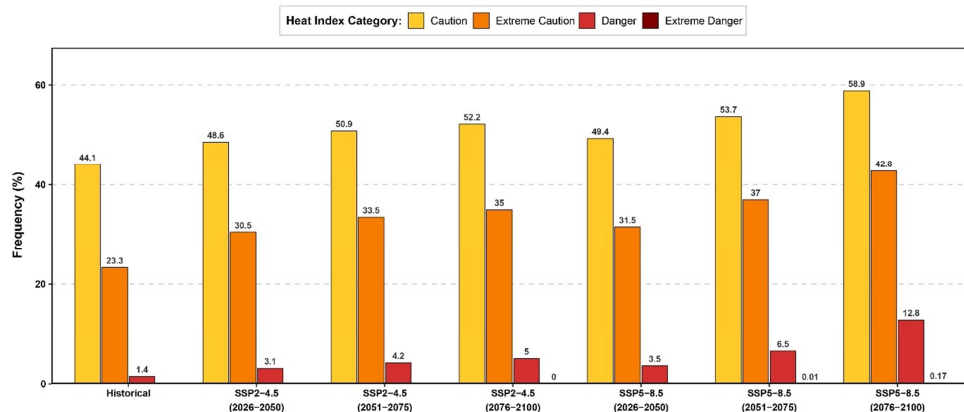
تغییرات فراوانی روزهای همراه با آستانه‌های شاخص NOAA-HI در پاسخ به گرمایش جهانی در ایران تحلیل مبتنی بر تجاوز از آستانه‌های بحرانی، دینامیک غیرخطی سیستم بیوکلیمایی ایران را فراتر از تغییرات میانگین آشکار می‌سازد. در دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴)، فراوانی روزهای فراتر از یک آستانه در شاخص NOAA-HI در میانگین پهنه‌ای حاکی از استیلای کلاس‌های گرمایی پایه است. رخدادهای منطبق بر آستانه احتیاط ($> 26.7^{\circ}\text{C}$) معادل ۴۴/۱ درصد از چرخه سالانه را در میانگین ۲۵ ساله دوره تاریخی به خود اختصاص می‌دهد. سهم کلاس احتیاط شدید ($> 32.2^{\circ}\text{C}$) در این دوره ۲۳/۳ درصد است. به همین ترتیب فراوانی روزهای منطبق بر

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

کلاس خطر (40.6°C) $1/4$ درصد از روزهای مورد بررسی در بر گرفته است (شکل ۴). در نهایت رخدادهای کلاس خطر شدید (54.4°C) در مقیاس پهنه‌ای فاقد فراوانی است.

شاخص NOAA-HI تحت سناریوهای SSP در آینده به شکل قابل توجهی تغییر می‌کند. در افق پایانی قرن تحت سناریو SSP2-4.5، دامنه رخدادهای آستانه احتیاط به $52/2$ درصد می‌رسد. یعنی در نیمی از روزهای سال شاهد این کلاس تنش گرمایی-رطوبتی هستیم. کلاس احتیاط شدید نیز تحت این سناریو به 35 درصد می‌رسد. سناریو SSP5-8.5 در بازه زمانی $2100-2076$ این تغییر رژیم را در جو ایران تثبیت می‌کند. آستانه احتیاط $58/9$ درصد از روزهای سال را در بر می‌گیرد. کلاس احتیاط شدید به $42/8$ درصد می‌رسد (شکل ۴). افزایش این سطوح از شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبت، ظرفیت تطبیقی سیستم‌های بیولوژیک و زیرساختی را تحت یک بارگذاری گرمایی مداوم قرار می‌دهد که پیامدهای جدی برای انسان خواهد داشت.

آستانه خطر (40.6°C) در سناریوی SSP2-4.5 تا 5 درصد افزایش می‌یابد. که نشان‌گر رشد بیش از سه‌برابری نسبت به دوره تاریخی است. واداشت SSP5-8.5 یک جهش نمایی را نشان می‌دهد و این فراوانی را در اواخر قرن به $12/8$ درصد می‌رساند. ثبت این مقدار از روزهای خطرناک در میانگین پهنه‌ای کشوری همچون ایران که یک پهنه غالب کوهستانی است، اثبات‌کننده اشباع مطلق مناطق کم‌ارتفاع و ساحلی از این کلاس گرمایی-رطوبتی در طول دوره گرم سال است. همچنین در پایان قرن حاضر آستانه خطر شدید (54.4°C) آشکار می‌شود. این کلاس گرمایی-رطوبتی که پیش‌تر دوره تاریخی و سناریو حد واسط هم دیده نشد، در اواسط قرن ($2075-2051$) تحت سناریوی SSP5-8.5 با فراوانی $0/1$ آشکار شده و در آینده دور به $0/17$ می‌رسد (شکل ۴). عبور شاخص گرمایی-رطوبتی از مرز 54.4°C نقطه فروپاشی سازوکار تعریف فیزیولوژیک بوده و مبین تهدید زیست‌پذیری انسان در فضای باز عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر است.



شکل ۴: فراوانی روزهای همراه با فراتر از آستانه‌های بحرانی شاخص NOAA-HI در دوره تاریخی و سناریوهای حدواسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5). مقادیر فراتر از 26.7°C طبقه احتیاط، مقادیر فراتر از 32.2°C طبقه احتیاط شدید، دماهای بالاتر از 40.6°C طبقه خطر و مقادیر فراتر از 54.4°C طبقه خطر شدید است. (واحد: درصد)

نتیجه‌گیری

این پژوهش بر اساس خروجی‌های همادی چندمدلی تصحیح‌اریبی‌شده (CMIP6)، شاخص ترکیبی گرمایی-رطوبتی در ایران را از منظر زیست‌اقليمی مورد تحلیل قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ سامانه اقلیمی ایران به گرمایش

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جهانی، از نظر فضایی کاملاً ناهمگن و به شدت تابع واداشت‌های کلان‌مقیاس، توپوگرافی و مجاورت با پهنه‌های آبی است.

گرچه وجود تنش گرمایی پایه در سواحل جنوبی ایران امری بدیهی و ناشی از عرض جغرافیایی پایین است، اما یافته کلیدی و کاربردی این پژوهش، کشف تضاد شدید ترمودینامیکی در سطح کشور و سرعت تصاعدی تبدیل این تنش پایه به بحران زیست‌اقليمی است. مقادیر این شاخص در امتداد سدهای توپوگرافیک زاگرس و البرز در بازه ۱۲/۳ تا ۱۸/۶ درجه سلسیوس قرار دارد؛ اما در مقابل، هم‌افزایی تابش موج‌کوتاه (گرمای محسوس) و تزریق پیوسته شار رطوبتی (گرمای نهان) از خلیج فارس و دریای عمان، یک موتور ترمودینامیکی فعال ایجاد کرده که مقادیر شاخص را در خوزستان و نوار ساحلی جنوب در دوره تاریخی به دامنه بحرانی ۳۰ تا ۳۴/۹ درجه سلسیوس کشانده است. قرارگیری مناطق پست جلگه‌ای در طبقه احتیاط شدید، نشان‌دهنده یک آسیب‌پذیری سیستماتیک و محیطی در نیمه جنوبی کشور است. از منظر جغرافیایی، این الگوی فضایی، نتایج هوانگ و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر تشدید قابل توجه بی‌هنجاری‌های دمای محسوس در عرض‌های جغرافیایی پایین به دلیل انباشت رطوبت و کاهش تندی باد را تایید می‌کند.

تحلیل کاربردی تغییرات شاخص گرمایی-رطوبتی تحت سناریوهای مختلف SSP، نشان دهنده یک گرمایش غیرخطی بوده که برآیند مستقیم رابطه کلازیوس-کلاپیرون است. از منظر پیامدهای محیطی و سلامت انسانی، افزایش ظرفیت نگهداشت بخار آب در جو، سازوکار تعریق و سیستم تنظیم حرارتی بدن انسان را در مناطق ساحلی و جلگه‌ای سرکوب می‌کند. تحت سناریوی مبتنی بر توسعه سوخت‌های فسیلی (SSP5-8.5) در اواخر قرن، دامنه بی‌هنجاری‌ها در نوار جنوبی به ۶ تا ۷/۴ درجه سلسیوس خواهد رسید. عبور از آستانه فیزیولوژیک ۴۰ درجه سلسیوس، مناطق پست ساحلی را از نظر کاربری و زیست‌پذیری مستقیماً وارد کلاس خطر می‌کند؛ در حالی که نواحی کوهستانی با وجود افزایش ۴ تا ۵ درجه‌ای، به عنوان پناهگاه‌های زیست‌اقليمی زیر آستانه ایمن ($26.7^{\circ}C$) باقی می‌مانند. این پاسخ تصاعدی در مناطق مستعد افزایش رطوبت، همسو با یافته‌های رحمان و همکاران (۲۰۲۱) است که اثبات کردند ادغام رطوبت نسبی با دمای خشک در ارزیابی‌های محیطی، برآوردهای تنش گرمایی را در مناطق مرطوب و ساحلی به مراتب واقع‌بینانه‌تر و شدیدتر از پیش‌نگری‌های مبتنی بر دمای منفرد نشان می‌دهد.

در نهایت، تحلیل فراوانی عبور از آستانه‌های بحرانی، حاکی از یک جایجایی قطعی و اشباع سیستم بیوکلیمایی ایران در مواجهه با کلاس‌های گرمایی فرین است. در افق پایانی قرن تحت سناریوی SSP5-8.5، میانگین پهنه‌ای شاخص به مرز ۳۱ درجه سلسیوس خواهد رسید و فراوانی روزهای همراه با آستانه احتیاط و احتیاط شدید بخش وسیعی از تقویم سالانه (به ترتیب ۵۸/۹ و ۴۲/۸ درصد) را در بر می‌گیرد. افزایش فراوانی کلاس از ۱/۴ درصد در دوره تاریخی به ۱۲/۸ درصد در آینده دور، از نظر برنامه‌ریزی محیطی زنگ خطری جدی است. ثبت این حجم از روزهای همراه با رخدادهای فرین ترکیبی در پهنه‌ای با اقلیم غالباً کوهستانی، همراستا با نتایج شوینگ‌شاکل و همکاران (۲۰۲۱) است که نشان دادند رخدادهای فراتر از آستانه‌های تاب‌آوری محیطی و انسانی در دهه‌های آتی به شکل تصاعدی افزایش خواهد یافت و نیازمند بازنگری اساسی در سیاست‌های سازگاری اقلیمی است.

آشکار شدن کلاس خطر شدید ($54.4^{\circ}C <$) در نیمه دوم قرن حاضر، نقطه غیرقابل بازگشت سازوکار تنظیم حرارت بدن انسان در ایران است. این آستانه که در دوره تاریخی فاقد فراوانی بود، تحت سناریوی واداشت SSP5-8.5 از اواسط قرن (۰/۱۱ درصد) پدیدار شده و در آینده دور به ۰/۱۷ درصد می‌رسد. از آنجا که عبور شاخص ترکیبی

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

گرمایی-رطوبتی از مرز ۵۴/۴ درجه سلسیوس به توقف کامل سرمایه‌ش تبخیری ناشی از تعریق می‌انجامد، اتخاذ سیاست‌های سازگاری فوری برای حفظ سلامت عمومی ضروری است؛ در این راستا، تدوین مقرراتی نظیر تغییر و شناورسازی ساعات کاری در فصول گرم، طراحی مسکن و زیرساخت‌های مقاوم به گرما و همچنین ایجاد پناهگاه‌های خنک شهری باید در اولویت برنامه‌ریزی‌های اقلیمی مناطق در مواجهه با خطر قرار گیرد.

منابع

- پاکباز هاجر، خسروی، محمود، طاوسی، تقی، محمودی، پیمان. (۱۳۹۷). تحلیل الگوهای فضایی طبقات شاخص عدم آسایش (DI) در ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۵ (۲)، ۷۳-۹۰.
- خورانی، اسدالله، مرادی، علی، مرادی، عباس. (۱۴۰۲). پیش‌یابی تغییرات آسایش حرارتی گردشگران ساحلی در استان هرمزگان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۵ (۲)، ۷۱-۸۷. doi: 10.22059/jphgr.2023.359547.1007773
- کدخدای، الهام، امیدوار، کمال، زرین، آذر، مزیدی، احمد. (۱۴۰۲). تحلیل فصلی تنش گرمایی و روند آن در ایران با استفاده از داده‌های ERA5. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۹ (۳)، ۶۸۵-۶۹۸. doi: 10.22059/jesphys.2023.350315.1007466
- الماسی، فائقه، فرج زاده، منوچهر، قویدل رحیمی، یوسف. (۱۴۰۲). ارزیابی ریسک مرگ و میر ناشی از تنش گرمایی در کلانشهرهای ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۲ (۳۸)، ۱۳۱-۱۴۸. doi: 10.22111/jneh.2023.45769.1963
- Almasi, F., Farajzadeh, M. and Ghavidel Rahimi, Y. (2023). Assessing the risk of mortality caused by heat stress in Iran's metropolises. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(38), 131-148. doi: 10.22111/jneh.2023.45769.1963 [In Persian]
- Buzan, J. R., Oleson, K., & Huber, M. (2015). Implementation and comparison of a suite of heat stress metrics within the Community Land Model version 4.5. *Geoscientific Model Development*, 8(2), 151-170. <https://doi.org/10.5194/gmd81512015>
- Cheng, Y., Niu, J., & Gao, N. (2012). Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*, 47, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.011>
- Chindapol, S. (2016). Thermal comfort and heat stress of the elderly in hot-humid summers in Thailand [Unpublished doctoral dissertation]. University of New South Wales.
- De Freitas, C. R., & Grigorjeva, E. A. (2014). A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 1-12.
- Dixon, P. G., Brommer, D. M., Hedquist, B. C., Kalkstein, A. J., Goodrich, G. B., Walter, J. C., & Cerveny, R. S. (2005). Heat mortality versus cold mortality: a study of conflicting databases in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(7), 937-944.
- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., et al. (2014). Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Huang, C., Barnett, A. G., Wang, X., Vaneckova, P., FitzGerald, G., & Tong, S. (2011). Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: A systematic review. *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1681-1690. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103456>
- Huang, J., Li, Q., & Song, Z. (2022). Historical global land surface air apparent temperature and its future changes based on CMIP6 projections. *Science of the Total Environment*, 816, Article 151656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151656>
- IPCC. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... & B. Zhou (Eds.), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Kadkhoda, E., Omidvar, K., Zarrin, A. and Mazidi, A. (2023). Seasonal analysis and trend of heat stress in Iran using ERA5 data. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 685-698. doi: 10.22059/jesphys.2023.350315.1007466 [In Persian]
- Khoorani, A., Moradi, A. and Moradi, A. (2023). Projecting changes in the thermal comfort of coastal tourists in Hormozgan province. *Physical Geography Research*, 55(2), 71-87. doi: 10.22059/jphgr.2023.359547.1007773 [In Persian]
- Knutson, T. R., & Ploshay, J. J. (2016). Detection of anthropogenic influence on a summertime heat stress index. *Climatic Change*, 138(1), 25-39. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1708-z>
- Lange, S. (2019). Earth2Observe, WFDEI and ERA-interim data merged and bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI).
- Lange, S., Menz, C., Gleixner, S., Cucchi, M., Weedon, G. P., Amici, A., Bellouin, N., Schmied, H. M., Hersbach, H., Buontempo, C., & Cagnazzo, C. (2021). WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5 v2.0).
- Lin, Y.-K., Chang, C.-K., Li, M.-H., Wu, Y.-C., & Wang, Y.-C. (2012). High-temperature indices associated with mortality and outpatient visits: Characterizing the association with elevated temperature. *Science of The Total Environment*, 427-428, 41-49.
- Meehl, G. A., Washington, W. M., Collins, W. D., Arblaster, J. M., Hu, A., Buja, L. E., ... & Teng, H. (2005). How much more global warming and sea level rise?. *science*, 307(5716), 1769-1772. <https://doi.org/10.1126/science.1106663>

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2026). *Climate change: Global temperature*. [Climate.gov](https://www.climate.gov). Retrieved May 5, 2026, from <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- National Weather Service. Heat Index, (2016). URL <https://www.weather.gov/media/epz/wxcalc/heatIndex.pdf>
- National Weather Service. Heat Index, (2018). URL <https://www.weather.gov/safety/heat-index>.
- Nguyen, J. L., & Dockery, D. W. (2016). Daily indoor-to-outdoor Temperature and humidity relationships: a sample across seasons and diverse climatic regions. *International Journal of Biometeorology*, 60, 221–229. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1019-5>
- NOAA 2012, Heat. A Major Killer. National Oceanic & Atmospheric Administration, National Weather Service, WI, USA, Available from: <http://www.nws.noaa.gov/om/heat/index.shtml>
- Pakbaz H, Khosravi M, Tavousi T, Mahmoudi P. (2018). Analysis of Spatial Patterns of Discomfort Index (DI) Classes in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5 (2), 73-90. [In Persian]
- Rahman, M. B., Salam, R., Islam, A. R. M. T., Tasnuva, A., Haque, U., Shahid, S., Hu, Z., & Mallick, J. (2021). Appraising the historical and projected spatiotemporal changes in the heat index in Bangladesh. *Theoretical and Applied Climatology*. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03705-x>
- Rothfusz, L. P. (1990). The heat index equation. Fort Worth, TX: National Weather Service Technical Attachment (SR 90–23).
- Schwingshackl, C., Sillmann, J., Vicedo-Cabrera, A. M., Sandstad, M., & Aunan, K. (2021). Heat stress indicators in CMIP6: Estimating future trends and exceedances of impact-relevant thresholds. *Earth's Future*, 9, e2020EF001885. <https://doi.org/10.1029/2020EF001885>
- Scoccimarro, E., Fogli, P. G., & Gualdi, S. (2017). The role of humidity in determining scenarios of perceived temperature extremes in Europe. *Environmental Research Letters*, 12(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8cdd>
- Spangler, K. R., Weinberger, K. R., & Wellenius, G. A. (2018). Suitability of gridded climate datasets for use in environmental epidemiology. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(6), 777–789. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0105-2>
- UNISDR. (2018). The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, annual report 2018. <https://www.undrr.org/publication/united-nations-office-disaster-risk-reduction-2018-annual-report>.
- Walikewitz, N. (2017). Urban climate and heat stress hazards – an indoor perspective [Unpublished doctoral dissertation]. Humboldt-Universität zu Berlin.
- Yuan, J., Stein, M. L., & Kopp, R. E. (2020). The evolving distribution of relative humidity conditional upon daily maximum temperature in a warming climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(19). <https://doi.org/10.1029/2019jd032100>.

آماده انتشار بدون شماره مجله