

Seasonal analysis and trend of heat stress in Iran using ERA5 data

Kadkhoda, E.¹  | Omidvar, K.¹  | Zarrin, A.²  | Mazidi, A.¹ 

1. Department of Geography, Faculty of Humanities & Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

2. Department of Geography, Faculty of Dr. Ali Shariati Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: komidvar@yazd.ac.ir

(Received: 26 Oct 2022, Revised: 7 Dec 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 15 Nov 2023)

Summary

To assess thermal comfort of residences, several different factors as meteorological, physiological, and socio-cultural, should be considered. The integrated effect of these variables on thermal stress can be obtained and evaluated using thermal comfort indices. Thermal comfort as a bio-meteorological index is of special importance. The purpose of this research is to analyze the seasonality and trend of heat stress in Iran in the period from 1981 to 2020. In this research, the Universal Thermal Climate Index (UTCI) index as a common thermal index was evaluated for outdoor thermal comfort, using ERA5 dataset. ERA5 is the fifth generation ECMWF reanalysis data for the global climate and weather for the past 4 to 7 decades. The ERA5 provides hourly estimates for a large number of atmospheric, ocean-wave, and land-surface quantities. An uncertainty estimate is evaluated by an underlying 10-member ensemble at three-hour intervals. Such uncertainty estimates are closely related to the information content of the available observing system which has improved considerably over time. They also indicate flow-dependent sensitive areas (Hersbach et al., 2020). Also, root mean square error (RMSE), Percent bias (PBIAS), Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE), and Root Mean Standard Deviation Ratio (RSR) metrics were used to evaluate the quality of ERA5 dataset.

The seasonal variability of the UTCI index shows that this index has significant regional heterogeneity in Iran. The increase in UTCI from the north to the south of Iran leads to an increase in thermal stress. The spatial distribution of areas that do not have thermal stress during the hot period of the year are mainly consistent with the altitudes. During the cold seasons of the year, areas with elevations of more than 3,000 meters in Iran have moderate cold stress. The investigation of the trend of thermal stress during the last four decades, which was analyzed with the modified Mann-Kendall test, shows that the UTCI in Iran has a dominant increasing trend. The UTCI index shows an increasing trend in the spring and autumn seasons by 100%, and in the winter and summer seasons at 99.83 and 99.75% of the country, respectively. The maximum significant increasing trend of the index at the level of 0.05 was achieved in the spring. In the same way, the highest value of Sen's slope estimator test of the area-averaged trend is also seen with the value of 0.52 °C in this season in the study period. The results of this study for climatology and the trend of the UTCI index in Iran show that: 1- There is a close relationship between heat and cold stresses in Iran and topography, but this relationship is not a linear; 2- Along with global warming, the UTCI index in Iran during the years 1981-2020 has shown an increasing trend; 3- In general, areas with UTCI cold stress in the country are decreasing and areas with heat stress are increasing; 4- One of the key findings in this study is the significant increase in trend of the UTCI index in the spring season.

Keywords: Climate comfort, Trend analysis, UTCI, Metrics, Tourism.

Cite this article: Kadkhoda, E., Omidvar, K., Zarrin, A., & 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: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350315.1007466>

E-mail: (1) kadkhoda.e70@gmail.com | mazidi@yazd.ac.ir (2) zarrin@um.ac.ir



تحلیل فصلی تنش گرمایی و روند آن در ایران با استفاده از داده‌های ERA5

الهام کدخدا^۱ | کمال امیدوار^۱ | آذر زرین^۲ | احمد مزیدی^۱

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۲. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: komidvar@yazd.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۸/۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۸/۲۴)

چکیده

تنش گرمایی با ترکیب عوامل زیست-هواشناسی متعدد تعیین می‌شود و تأثیرات شدیدی بر سلامت انسانی و اکوسیستم دارد. هدف از این پژوهش بررسی الگوی فضایی تغییرات فصلی تنش گرمایی در ایران با استفاده از شاخص شاخص جهانی اقلیم-گرمایی (UTCI) است. برای این منظور از داده‌های ERA5 از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. تغییرات تنش گرمایی فصلی با استفاده از تحلیل شیب سن و آزمون من-کندال تصحیح شده بررسی شد. همچنین برای درستی سنجی داده‌ها سنج‌های آماری RMSE، PBIAS، NSE و RSR مورد استفاده قرار گرفت. بررسی فصلی شاخص UTCI نشان داد که این شاخص ناهمگونی منطقه‌ای قابل توجهی در ایران دارد. افزایش UTCI از شمال به جنوب ایران منجر به افزایش تنش گرمایی می‌شود. پراکنش فضایی پهنه‌هایی که در دوره گرم سال تنش گرمایی ندارند، عمدتاً منطبق با ارتفاعات است. در فصول سرد سال مناطقی با ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر در ایران دارای تنش گرمایی خفیف تا متوسط هستند. بررسی روند تنش گرمایی طی چهار دهه گذشته که با آزمون من-کندال تصحیح شده مورد بررسی گرفت نشان داد که UTCI در ایران روند غالب افزایشی دارد. شاخص UTCI در فصول بهار و پاییز در ۱۰۰ درصد و فصول زمستان و تابستان به ترتیب در ۹۹/۸۳ و ۹۹/۷۵ درصد از کشور روند افزایشی را نشان می‌دهد. بیشینه روند افزایشی معنی‌دار شاخص در سطح ۰/۰۵ در فصل بهار ۹۸/۰۲ به دست آمده است. به همین ترتیب بالاترین مقدار شیب روند متوسط پهنه‌ای کشور نیز با مقدار ۰/۵۲ درجه سلسیوس در همین فصل دیده می‌شود که در سطح آلفا ۵ درصد معنی‌دار است.

واژه‌های کلیدی: آسایش اقلیمی، تحلیل روند، UTCI، سنج آماری، گردشگری.

۱. مقدمه

متحمل خواهد شد. به عنوان مثال، گرمادگی می‌تواند باعث مرگ ناگهانی شود یا همچنین ممکن است به اعضای اصلی بدن و عملکردهای فیزیولوژیکی آن آسیب برساند. تنش‌های گرمایی می‌تواند احتمال ابتلا به بیماری‌های قلبی-عروقی را افزایش دهند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۵).

تنش گرمایی به عنوان یک شاخص زیستی هواشناسی برای بررسی آسایش انسان پیشنهاد شده است و کاربردهای مختلفی در زمینه‌های مختلف از جمله اکولوژی، محیط زیست، سلامت انسان، تجارت، گردشگری و تفریح دارد (زننگ و همکاران، ۲۰۲۰). تنش گرمایی مرتبط با انسان با استفاده از شاخص‌های مختلفی اندازه‌گیری

از اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی، متوسط دمای جهان به سرعت افزایش یافته است. با این حال این افزایش در تمام مناطق زمین یکسان نبوده است. به طوری که میانگین نرخ گرمایش در خشکی‌ها بیشتر از اقیانوس‌ها است. بر اساس آخرین گزارش‌های جهانی گرمایش ناشی از فعالیت‌های انسانی به حدود ۱/۰۷ درجه سلسیوس رسیده است (IPCC، ۲۰۲۱).

فعالیت‌های انسانی تحت تأثیر تغییر اقلیم و فرین‌های اقلیمی مانند امواج گرمایی (HW) و امواج سرمایی (CW) است (برتون و همکاران، ۲۰۰۹). در واقع، انسان نسبت به دمای محیطی بسیار حساس است. انسان در نتیجه قرار گرفتن در مواجهه با محیط‌هایی با دمای بالا، عواقب وخیمی را

استناد: کدخدا، الهام؛ امیدوار، کمال؛ زرین، آذر و مزیدی، احمد (۱۴۰۲). تحلیل فصلی تنش گرمایی و روند آن در ایران با استفاده از داده‌های ERA5. مجله فیزیک زمین و فضا،

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350315.1007466> ۶۹۸-۶۸۵، (۳)۴۹

رایانامه: (۱) kadkhoda.e70@gmail.com | mazidi@yazd.ac.ir (۲) zarrin@um.ac.ir

تغییرات زمانی-مکانی تنش گرمایی را نشان می‌دهد (بلاوزیچ و همکاران، ۲۰۱۲؛ مالدرز، ۲۰۱۹).

با توجه به اهمیت پدیده تنش گرمایی تحقیقات زیادی در جهان و ایران انجام شده است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین این تحقیقات پرداخته می‌شود. این مطالعات می‌توان در دو دسته بررسی روند و تغییرات زمانی مکانی شاخص‌های تنش گرمایی دسته‌بندی کرد. روند شاخص‌های مرتبط با تنش گرمایی در مناطق مختلفی از جهان همچون کشورهای اروپایی با شاخص‌های UTCI و PET (پانتاوو و همکاران، ۲۰۱۸)، سواحل بالتیک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مقاصد گردشگری کشور لهستان (کومیسکی و میچالسکا، ۲۰۱۹)، شرایط بیوکلیمایی روسیه (وینوگرادوا، ۲۰۲۰) و تنش گرمایی اروپا با استفاده از داده‌های ERA5 (آنتونسکو و همکاران، ۲۰۲۱) انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان از روند کلی افزایشی شاخص‌های تنش گرمایی به‌خصوص شاخص UTCI در مناطق مختلف بوده است. به‌طوری‌که پانتاوو و همکاران (۲۰۱۸) روند افزایشی حدود ۰/۶ درجه سلسیوس را برای هفت شهر اروپایی آتن، تسالونیک، میلان، فرایبرگ، کاسل، کمبریج و شفیلد در دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۷۱ گزارش کردند. کومیسکی و میچالسکا (۲۰۱۹) نیز روند افزایشی بیشتر تنش گرمایی در فصل تابستان در سواحل بالتیک را نشان دادند. این روند افزایشی برای روسیه (وینوگرادوا، ۲۰۲۰) نیز به غیر از مرزهای غربی این کشور، کوهپایه‌های قفقاز و سواحل دریاهای سیاه نیز گزارش شده است.

دسته دیگر از مطالعات به بررسی تنش گرمایی و تغییرات زمانی-مکانی آن پرداختند که می‌توان به مطالعات انجام شده توسط طلحی و همکاران (۲۰۲۰) برای طراحان فضاهای شهری در کشور الجزایر، بررسی تنش گرمایی در طول رخداد امواج گرمایی در کشور صربستان (پچلج و همکاران، ۲۰۲۰)، شهر Belo Horizonte واقع جنوب شرقی برزیل (سیلوا و هیراشیما، ۲۰۲۱) و بررسی شاخص UTCI و نقش آن در مرگ‌ومیر اروپا (اربن و همکاران، ۲۰۲۱) اشاره کرد.

می‌شود (برتون و همکاران، ۲۰۰۹). از سال ۱۹۵۰، گزارش‌ها و شاخص‌های متعددی در خصوص آسایش گرمایی انسان در محیط‌های داخلی و خارجی ارائه شده است که منجر به مقایسه‌های عددی و حتی مبتنی بر نمودار شد (عبدل غنی و همکاران، ۲۰۱۳). بیش از ۶۰ شاخص تنش گرمایی برای بررسی شرایط محیطی با دمای بالا و پیش‌بینی احتمال فشار گرمایی برای بدن انسان پیشنهاد شده است. هر یک از این شاخص‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود هستند (برتون و همکاران، ۲۰۰۹). داده‌های ورودی برای محاسبه این شاخص‌ها شامل بسیاری از متغیرهای جوی مانند تندی باد، دما، رطوبت، تابش خورشیدی و غیره است. این شاخص‌ها به گروه‌های تحلیلی-عقلانی (بر اساس اصول تبادل گرمایی انسان)، تجربی (بر اساس پاسخ انسان به عوامل مختلف محیطی) و مبتنی بر آسایش (که از طریق آزمایش‌های انجام شده بر روی انسان‌ها اندازه‌گیری می‌شود) تقسیم می‌شوند (پانتاوو و همکاران، ۲۰۱۴).

در طول قرن گذشته، شاخص‌های آسایش گرمایی متعددی برای بررسی شرایط زیست اقلیمی انسان ایجاد شده است. در میان آنها، شاخص جهانی اقلیم گرمایی (UTCI) به‌عنوان یکی از جامع‌ترین شاخص‌ها برای محاسبه تنش گرمایی در فضای باز در نظر گرفته شده است (اولا و همکاران، ۲۰۲۲). شاخص UTCI همچنین به تغییرات محرک‌های محیطی مانند دما، تابش خورشیدی، رطوبت و به‌ویژه تندی باد بسیار حساس است (بلاوزیچ و همکاران، ۲۰۱۲). ثابت شده است که شاخص UTCI بهتر از شاخص‌هایی مانند شاخص گرما، شاخص WGBT، شاخص humidex و کمی بهتر از شاخص‌های دمای ظاهری و دما مؤثر است. این امر به‌خصوص در شرایط اقلیمی مطابقت بالایی با مدل‌هایی مانند دمای معادل فیزیولوژیک، دمای ادراکی و دمای مؤثر استاندارد دارد (زارع و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، از آنجایی که UTCI نسبت به تغییر در محرک‌های محیطی بسیار حساس است، بهتر از سایر شاخص‌ها، شرایط اقلیمی و

تنش گرمایی باعث شده است که اطلاع دقیقی از وضعیت تنش گرمایی کشور در مناطق فاقد ایستگاه همانند مناطق داخلی و کوهستانی نداشته باشیم. این مطالعه با هدف بررسی تنش گرمایی ایران با استفاده از شاخص استاندارد جهانی UTCI با استفاده از داده‌های ERA5 انجام شده است که از یک سوء امکان ارزیابی فیزیولوژیکی از شرایط گرمایی را برای انسان را فراهم کند و از سوی دیگر دیدگاه بهتری از الگوهای زمانی-مکانی تنش گرمایی در ایران ارائه دهد. مطالعه تنش گرمایی با شاخص UTCI و روند آن در طی سال‌های اخیر به‌عنوان یک شاخص ترکیبی از مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی (دما، تندی باد و رطوبت نسبی) دید بهتری از تغییر اقلیم ایران ارائه خواهد داد که بر این اساس نتایج این مطالعه برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان مفید خواهد بود.

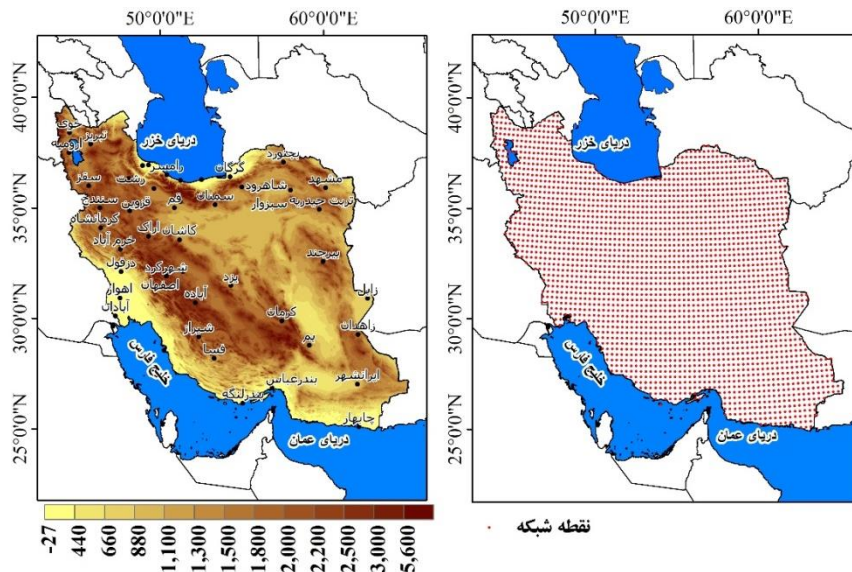
۲. روش تحقیق

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش کشور ایران در جنوب غربی آسیا است (شکل ۱). اقلیم غالب کشور ایران خشک و نیمه‌خشک است اما به جهت گسترش زیاد آن در عرض جغرافیایی و وجود ارتفاعات پهناوری همچون البرز و زاگرس و مجاورت با پهنه‌های آبی همچون دریای خزر، دریای عمان و خلیج فارس دارای اقلیم‌های متنوع است. گستردگی زیاد و وجود رشته‌کوه‌های عظیم زاگرس و البرز آسایش گرمایی ایران را تحت‌تأثیر خود قرار داده است. به‌طوری‌که مناطق جنوبی ایران در دوره گرم سال دارای تنش‌های گرمایی زیاد و مناطق کوهستانی ایران طی دوره سرد سال دارای تنش سرمایی مختلف هستند.

در ایران نیز مطالعاتی به بررسی شرایط تنش گرمایی پرداختند. اما این مطالعات به جهت کمی و تکنیک‌های مورد استفاده قابل‌مقایسه با پژوهش‌های انجام شده در سطح جهانی نیستند که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره خواهد شد. در بیشتر از این مطالعات از شاخص‌های دمای معادل فیزیولوژی (PET) و شاخص متوسط پیش‌بینی‌شده (PMV) برای بررسی آسایش گرمایی استفاده است که می‌توان به پژوهش‌های احمدی و همکاران (۱۳۹۵) در شهر سبزوار، تغییرات فصلی تنش‌های گرمایی طی نیم‌قرن اخیر در چند نمونه اقلیمی ایران (فلاح‌قاله‌ری و همکاران، ۱۳۹۵) و تغییرات آسایش گرمایی شهر مشهد (ثناگر دربانی و همکاران، ۱۳۹۷) اشاره کرد. این مطالعات نشان دادند که به‌طور کلی تنش گرمایی در طول فصل تابستان بسیار زیاد است و برای سلامتی انسان نیز خطر دارد. همچنین این مطالعات روند افزایشی را برای تنش‌های گرمایی کشور نشان داده‌اند. از معدود مطالعات انجام‌شده که از شاخص UTCI در ایران استفاده کرده‌اند می‌توان به پژوهش باعقیده و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد که تنش‌های گرمایی را در سواحل شمال و جنوب ایران بررسی کرده و نشان دادند که در دوره گرم سال، شدیدترین تنش‌های گرمایی در سواحل جنوب به‌ویژه جزایر به‌وقوع می‌پیوندد اما در سواحل شمالی تنها تنش‌های سرمایی ثبت‌شده است.

بررسی مطالعات انجام شده نشان داد که بیشتر مطالعات انجام شده در ایران تنش گرمایی را با داده‌های ایستگاهی بررسی کرده‌اند و تاکنون پژوهشی به بررسی تنش گرمایی ایران با داده‌های شبکه‌ای نپرداخته است. عدم استفاده از داده‌های شبکه‌ای برای بررسی



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقطه شبکه‌های ۰/۲۵ درجه قوسی مجموعه داده ERA5 (به دلیل نزدیکی ایستگاه‌ها برچسب تمامی ایستگاه‌ها ارائه نشده است).

جوی جهانی مرکز ECMWF است که به دنبال نسخه‌های قبلی همانند ERA-15، ERA-40 و ERA-Interim ارائه شده است. این مجموعه داده از تکنیک داده‌گذاری ۴ بعدی (4D-var) سامانه پیش‌بینی یکپارچه (IFS) Cy41r2 استفاده می‌کند. داده بازتحلیل ERA5 یک مجموعه داده اقلیمی است که یک مدل اقلیم جهانی (نمایش عددی فرآیندهای فیزیکی و شار انرژی که در جو زمین، اقیانوس‌ها و سطوح زمین رخ می‌دهد) را با مشاهدات هواشناسی و ماهواره‌ای ادغام می‌کند (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰؛ اسدی رحیم بیگی و همکاران، ۱۴۰۰). طول دوره آماری این مجموعه داده از سال ۱۹۷۹ تا امروز را شامل می‌شود و بر روی شبکه‌ای با طول و عرض جغرافیایی منظم حدود 25×25 کیلومتر و به شکل ساعتی ارائه می‌شود. در این تحقیق از داده‌های ۰/۲۵ درجه قوسی برای دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۲۰ برای متغیرهای دما، رطوبت نسبی و تندی باد برای محاسبه شاخص UTCI استفاده شده است.

۲-۳. شاخص جهانی اقلیمی گرمایی (UTCI)

در سال ۱۹۹۹ انجمن بین‌المللی بیومتئورولوژی کمیونی جهت توسعه شاخص جهانی اقلیمی گرمایی تأسیس کرد که هدف آن استخراج یک شاخص گرمایی بر اساس

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل دو دسته داده‌های ایستگاه‌های همدید سازمان هواشناسی کشور و مجموعه داده بازتحلیل ERA5 می‌باشد که شرح هر یک از داده‌های مورد استفاده در ادامه ارائه شده است.

۲-۲-۱. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید

داده‌های ۴۹ ایستگاه هواشناسی همدید که موقعیت آنها در شکل ۱ نشان داده شده است برای درستی‌سنجی داده دمای مجموعه ERA5 مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای انتخاب این ۴۹ ایستگاه به کارگیری حداکثری ایستگاه‌ها بر اساس پراکنش جغرافیایی مناسب آنها در تمامی مناطق جغرافیایی ایران با کمترین داده مفقود می‌باشد. سری زمانی مفقود برای برخی از ایستگاه‌ها که کمتر از ۱۰ درصد کل سری بوده است با روش زنجیره مارکوف مونت کارلو (MCMC) بازسازی شده است. طول دوره آماری ایستگاه‌های هواشناسی مطابق با طول دوره داده‌های ERA5 در این پژوهش از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ است.

۲-۲-۲. مجموعه داده بازتحلیل ERA5

مجموعه داده بازتحلیل ERA5 پنجمین محصول بازتحلیل

شبه‌سازی شده و مشاهده شده را اندازه می‌گیرد. روش RSR به‌عنوان یک شاخص مکمل برای RMSE انتخاب می‌شود. مقدار بهینه RSR برابر صفر است و مقدار بالاتر آن نشان‌دهنده کارایی کمتر مدل است (اسدی رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰). روش محاسبه و جزئیات این شاخص‌ها توسط اسدی رحیمی و همکاران (۱۴۰۰) ارائه شده است.

۲-۵. تحلیل روند و شیب روند شاخص UTCI

جهت تعیین روند شاخص UTCI از آزمون من-کندال تصحیح شده (MMK) و جهت بررسی شیب روند از آزمون شیب خط سن استفاده شد. آزمون من-کندال (MK) یک روش ناپارامتریک برای بررسی روند است و توسط من (۱۹۴۵) و کندال (۱۹۴۸) توسعه یافته است. آزمون من-کندال تصحیح شده (MMK) توسط حامد و راثو (۱۹۹۸) پیشنهاد شده است. این آزمون یک ضریب تصحیح را به محاسبات واریانس بر اساس اندازه نمونه مؤثر (ESS) اضافه می‌کند تا از تأثیر خودهمبستگی سری زمانی داده‌ها بر مقدار روند جلوگیری شود. آزمون MMK نسبت به آزمون MK برای محاسبه روند داده‌های اقلیمی قابل‌اعتمادتر و بهتر است (دوفرن و همکاران، ۲۰۰۹). آماره آزمون (S) در آزمون MK و MMK به‌صورت رابطه (۲) برآورد می‌شود.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (2)$$

واریانس [V(S)] برای برآورد آماره Z جهت تعیین اهمیت روند استفاده می‌شود.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

MMK فقط در صورتی قابل‌استفاده است که Z در آزمون MK معنادار باشد. آزمون MMK خود همبستگی را از سری زمانی حذف می‌کند (حامد، ۲۰۰۸)، و سپس سری زمانی را رتبه‌بندی می‌کند (Ri). اهمیت H با استفاده از زمان‌های اول و دوم برای $H = 0.5$ تعیین می‌شود. برای H معنی‌دار، واریانس S به‌صورت زیر برآورد می‌شود.

پیشرفته‌ترین مدل ترموفیزیولوژیکی بود. پس بررسی‌های گوناگون شاخص UTCI به‌عنوان دمای شرایط مرجع که منجر به پاسخ مدل مشابه در شرایط مساوی می‌شود، توسط این مرکز ارائه شد. شاخص UTCI یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین شاخص‌های بیولوژیکی است و به‌طور گسترده‌ای در چندین رویکرد علمی مانند تأثیر کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت محیط جوی بر بدن انسان، مطالعات پزشکی و در بسیاری از جنبه‌های تحقیقات گردشگری یا بیوکلیمای شهری استفاده شد (استایگر و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین استفاده از این شاخص تنش گرمایی در سرویس هواشناسی عمومی، خدمات بهداشت عمومی، برنامه‌ریزی‌های مبتنی بر ریسک یا تحقیقات در مورد تغییر اقلیم مفید است (بلاوزیچ و همکاران، ۲۰۱۳). مقدار شاخص به دما، تندی باد، رطوبت نسبی، و میانگین دمای تابشی بستگی دارد و بر اساس رابطه (۱) می‌شود.

$$UTCI = f(Ta; Tmrt; Va; Vp) = Ta + \text{offset}(Ta; Tmrt; Va; Vp) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Ta : دمای هوا، $Tmrt$: میانگین دمای تابشی، Va : تندی باد؛ Vp : فشار بخار آب است (بلاوزیچ و همکاران، ۲۰۱۲).

۲-۴. درستی‌سنجی داده‌های ERA5 برای دمای ایران

برای درستی‌سنجی داده‌های ERA5 در مقابل داده‌های مشاهداتی؛ روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مطالعه از سنجه‌های آماری مجذور میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلایف (NSE)، درصد اریبی (PBIAS) و نسبت RMSE به انحراف‌معیار (RSR) استفاده شده است. سنجه آماری RMSE یک روش مرسوم برآورد خطاست و هر چه خروجی آن به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر خطای کمتر در داده‌های شبه‌سازی شده می‌باشد. سنجه نش-ساتکلایف بزرگی نسبی واریانس باقیمانده را در مقایسه با واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین می‌کند و مقدار آن از $-\infty$ تا ۱ متغیر است. سنجه PBIAS تفاوت بین کمیت

مقدار ۰/۹۹ در زابل، چابهار و آبادان دیده می‌شود. متوسط شاخص NSE برای متغیر دمای ERA5 در ایران ۰/۹۲ است که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین داده‌های بازتحلیل و داده‌های مشاهداتی ایستگاهی مربوطه است (شکل ۲). بررسی توزیع فضایی مقادیر RMSE نشان می‌دهد که داده‌های بازتحلیل ERA5 حداقل ۰/۴ درجه سلسیوس در چابهار و حداکثر ۴/۶۷ درجه سلسیوس در فسا از مقادیر مشاهداتی با داده‌های ایستگاهی انحراف دارند (شکل ۲). نتیجه به‌دست آمده از سنج RMSE در تأیید دو سنج PBIAS و NSE است. به‌طوری‌که ایستگاه چابهار در جنوب شرقی ایران بیشینه مقدار NSE و کمینه مقدار PBIAS را نشان داده است. مقدار شاخص RSR در ایران بین ۰/۰۶ تا ۰/۷۱ در تغییر است. کمترین مقادیر RSR در ایستگاه‌هایی است که بالاترین NSE و پایین‌ترین RMSE را داشته‌اند. برای مثال RSR در آبادان، اهواز و چابهار کمینه مقدار را نشان داده است که برای NSE همین ایستگاه‌ها بالاترین مقدار را نشان داده‌اند.

بررسی نتایج سنج آماری PBIAS نشان می‌دهد که بیشینه مقدار درصد اریبی با ۱۲/۰۶ درصد در ایستگاه رامسر و کمینه آن در ایستگاه فسا با مقدار ۸/۳۶- درصد می‌باشد. از ۴۹ ایستگاه مورد بررسی در ۱۲ ایستگاه هواشناسی هم‌دید شامل ایستگاه‌های اهواز، فسا، بابلسر، بوشهر، تربت حیدریه، زابل، زاهدان، سقز، نوشهر، همدان، آبادان و بندرلنگه دما در مجموعه داده ERA5 کمتر از مقدار واقعی آن برآورد شده است که به‌عبارت دیگر ERA5 دارای کم‌برآوردی است. دمای داده‌های بازتحلیل ERA5 در مناطق ساحلی دریای خزر دارای بیش برآوردی بیشتری نسبت به سایر مناطق هستند که در شکل ۲ نتایج آن دیده می‌شود. اریبی دمای بازتحلیل ERA5 با افزایش عرض جغرافیایی و ارتفاع افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد سطح ناهمواری و نوع کاربری زمین در مقدار اریبی دمای داده‌های ERA5 در ایران نقش دارند.

$$Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}, \quad (4)$$

در این رابطه، $V(S) H'$ برآورد واریانس S است که می‌تواند با استفاده از یک ضریب تصحیح (B) حذف شود.

آزمون شیب سن، بزرگی روند یا شیب روند را محاسبه می‌کند. شیب روند به روش (SSE) را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) محاسبه کرد (مغربی و ال‌اوتایی، ۲۰۱۸).

$$f(1) = Qt + C \quad (5)$$

در این رابطه C ثابت و Q شیب است که از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$Q_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (6)$$

۲-۶. پهنه‌بندی مقدار شاخص UTCI در ایران

روش‌های درونیایی زمین آمار دقت بالاتری را نسبت سایر روش‌های درونیایی موجود دارند. در این روش پراش برآورد شده که اندازه‌گیری عدم قطعیت را برای برآوردها فراهم می‌کند، به حداقل ممکن می‌رسد (زرین و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین روش‌های زمین آمار به دلیل نحوه وزن‌دهی برای مناطق فاقد داده پیشرفت‌های قابل‌توجهی نسبت به سایر روش‌های موجود دارند (گوارتس، ۲۰۰۰). بر این اساس در این پژوهش برای پهنه‌بندی فصلی شاخص UTCI در ایران از روش زمین آمار کریجینگ معمولی استفاده شده است.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (7)$$

در رابطه ۷، $z^*(x_0)$ مقدار برآورد شده، λ_i وزنی که به نمونه $z(x_i)$ تعلق می‌گیرد، است (لیو و همکاران، ۲۰۰۴).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. درستی سنجی دمای مجموعه داده بازتحلیل

ERA5

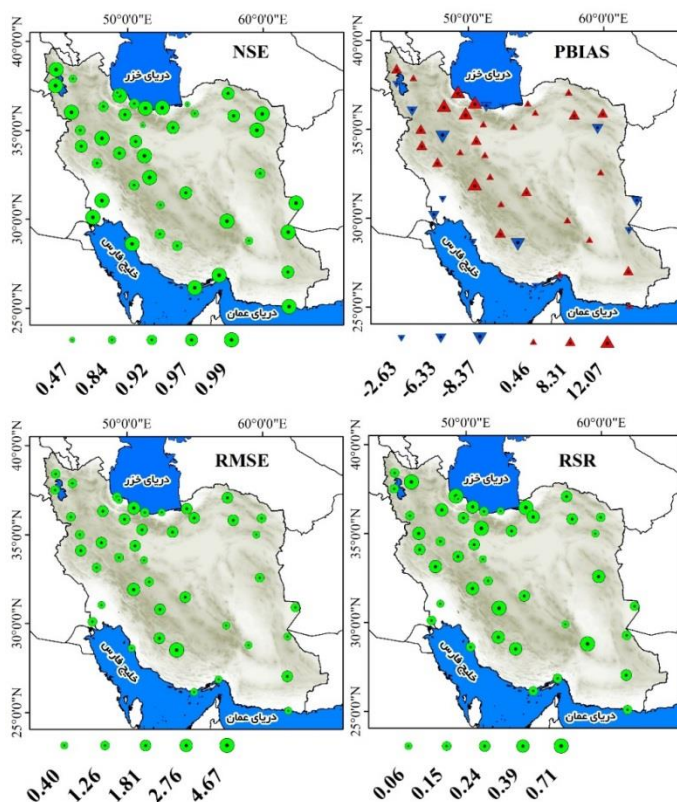
سنج‌های آماری مورد بررسی در هر ایستگاه محاسبه و نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. آماره NSE در اکثر ایستگاه‌ها بالاتر از ۰/۷ است. به‌طوری‌که مناطقی با

۳-۲. الگوی فضایی تنش گرمایی در ایران

برای بررسی وضعیت تنش گرمایی ایران، ابتدا توزیع میانگین UTCI از نظر اقلیم‌شناسی (۱۹۸۱-۲۰۲۰) بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ناهمگنی فضایی قابل توجهی در توزیع UTCI ایران برای فصول مختلف وجود دارد (شکل ۳). شاخص UTCI در ایران از شمال به جنوب و غرب به شرق افزایشی است.

شاخص UTCI در ایران منطبق بر توپوگرافی است. مناطق مرتفع، شمال‌غربی، غربی و شمال‌شرقی تنش سرمایی متوسط را تجربه می‌کنند، در حالی که مناطق جنوبی و مناطق پست داخلی تنش گرمایی متوسط تا تنش گرمایی قوی را نشان می‌دهند. در فصل زمستان مقدار شاخص UTCI زیر ۱- درجه سلسیوس (شرایط تنش سرمایی متوسط) در اکثر مناطق مرتفع ایران نشان داده است. درصد هر یک از پهنه‌های تنش گرمایی برای فصول مختلف سال در جدول ۱ آمده است. به دلیل ارتفاع زیاد و توزیع یخبندان در مناطق مرتفع البرز و زاگرس و به‌خصوص در شمال غربی ایران، میانگین شاخص UTCI

در فصل زمستان به ۱۱/۱- درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۳). با این حال، میانگین UTCI در مناطق جنوبی تا ۱۹/۳ درجه سلسیوس نیز می‌رسد. این مقدار از شاخص نشان می‌دهد که این مناطق در فصل زمستان از تنش گرمایی برخوردار نیستند. در مناطق داخلی ایران شاخص بین ۵ تا ۱۳ درجه سلسیوس در تغییر است. نکته جالب توجه در این پژوهش این است که در تمامی فصول در مناطق خزرشرقی به خصوص استان گلستان، شاخص تنش گرمایی با مناطقی مانند سمنان برابری می‌کند که از این نظر استان گلستان الگویی متفاوت را برای شاخص تنش گرمایی نسبت به سایر مناطق بالاتر از عرض ۳۵ درجه شمالی و سواحل خزری نشان می‌دهد. در فصل زمستان هیچ بخشی از ایران تنش گرمایی را تجربه نمی‌کند. در این فصل ۳۴/۹۱ درصد از مناطق کشور که عمدتاً در برگرفته مناطق کوهستانی کشور است تنش سرمایی متوسط را تجربه می‌کنند. تنش سرمایی خفیف نیز در فصل زمستان در ایران برای یک دوره اقلیم‌شناسی چهل ساله ۴۶/۳۸ درصد است (جدول ۱).



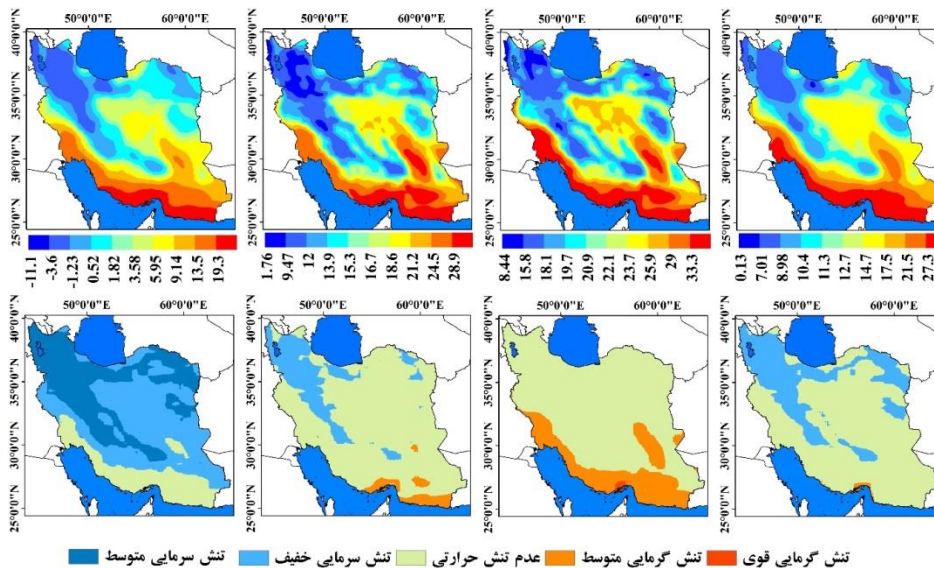
شکل ۲. درستی سنجی دمای پایگاه ERA5 طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ برای ۴۹ ایستگاه هواشناسی هم‌دید ایران.

جدول ۱. درصد تنش گرمایی در ایران در فصول مختلف با شاخص UTCI با استفاده از داده‌های ERA5

فصل	تنش سرمایی متوسط	تنش سرمایی خفیف	عدم تنش گرمایی	تنش گرمایی متوسط	تنش گرمایی قوی
زمستان	۳۴/۹۱	۴۶/۳۸	۱۸/۷۱	-	-
بهار	-	۱۷/۴۶	۷۷/۸۸	۴/۶۶	-
تابستان	-	-	۷۷/۹۸	۲۱/۵۴	۰/۴۸
پاییز	-	۲۷/۱۱	۷۲/۳۵	۰/۵۴	-

از یک پنجم کشور را شامل می‌شود برای ایران به‌دست آمده است. همچنین تنش گرمایی قوی برای یک دوره اقلیم‌شناسی چهار ساله در ۰/۴۸ درصد (حدود نیم درصد از کشور) به‌دست آمده است. در فصل پاییز با سردتر شدن هوا تنش گرمایی محدود به باریکه تنگه هرمز در جنوب ایران می‌شود و مقدار شاخص تنش گرمایی بین ۰/۱۳ تا ۱۷/۳ درجه سلسیوس در تغییر است. در این فصل تنش سرمایی خفیف مجدد در ۲۷/۱۱ درصد از مساحت کشور دیده می‌شود. در ۷۲/۳۵ درصد از مساحت کشور تنش گرمایی وجود ندارد و مناطق با تنش گرمایی محدود که حدود ۰/۵۴ درصد از مساحت کشور را شامل می‌شود در مناطق اطراف تنگه هرمز دیده می‌شود. مناطقی با نبود تنش گرمایی بر مناطق کم ارتفاع و عرض جغرافیایی کم (دوره سرد سال) متمرکز شده‌اند و در دوره گرم سال پهنه‌هایی با نبود تنش گرمایی عمدتاً به ارتفاعات ایران مربوط می‌شود.

پراکنش فضایی فصلی شاخص UTCI در ایران ویژگی‌های اقلیمی متمایزی را نشان می‌دهد (شکل ۳). در فصول بهار و تابستان، شاخص UTCI به‌ترتیب بین ۱/۷۶ تا ۲۸/۹ درجه سلسیوس و ۸/۴۴ تا ۳۳/۳ درجه سلسیوس در تغییر است که در برگیرنده مناطقی با تنش سرمایی خفیف تا تنش گرمایی متوسط است. تنش سرمایی متوسط در فصل بهار در ایران به‌دلیل افزایش دما از بین رفته است و مناطقی با تنش سرمایی خفیف ۱۷/۴۶ درصد از مناطق کشور را در بر می‌گیرند. در فصل بهار در بیش از ۷۷ درصد از مساحت کشور تنش گرمایی وجود ندارد. در این فصل باریکه کوچکی از سواحل جنوب شرق تا تنگه هرمز که ۴/۶۶ درصد از کشور را بر می‌گیرند دارای تنش گرمایی متوسط هستند. در فصل تابستان با افزایش مقدار شاخص UTCI به ۳۳/۳ درجه سلسیوس برای مناطقی با تنش گرمایی متوسط نیز افزوده شده است. در این فصل تنش گرمایی متوسط در ۲۱/۵۴ درصد از کشور که بیش



شکل ۲. متوسط بلندمدت اقلیمی فصلی شاخص UTCI در ایران برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ با داده‌های بازتحلیل ERA5؛ از سمت چپ به راست ستون‌ها معرف فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز. ردیف اول میانگین فصلی شاخص UTCI و ردیف دوم پهنه‌های معرف شاخص

UTCI.

۳-۳. روند شاخص UTCI در ایران

روند شاخص UTCI در ۴۰ سال گذشته (۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰) با استفاده از آزمون من-کندال تصحیح شده برای مقادیر فصلی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳). شاخص UTCI روند افزایشی را در غالب مناطق ایران را نشان داده است. این نتیجه به روشنی نشان می‌دهد که UTCI در ایران تحت تأثیر گرمایش جهانی قرار دارد. همان‌طور که شکل ۳ نشان داده شد شاخص UTCI در طول فصول انتقالی سال یعنی بهار و پاییز روند افزایشی بیشتری را نسبت به سایر فصول سال دارد. در تمامی فصول سواحل جنوبی ایران، به‌خصوص سواحل خلیج فارس شاخص UTCI روند افزایشی دارد. کانون اصلی روند افزایشی شاخص UTCI در ایران در شمال غرب و سواحل خلیج فارس می‌باشد. بیشینه شیب روند در ایران در مقیاس فصلی مربوط به فصل زمستان است.

در فصل زمستان روند غالب افزایشی که در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است در شمال‌غربی ایران و رشته‌کوه زاگرس دیده می‌شود. در این فصل شیب شاخص UTCI در مناطق واقع در شمال‌غربی از سبلان تا زنجان و قزوین به‌ازای هر دهه ۱/۹۶ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. این مقدار قابل‌توجه از روند افزایشی یک تهدید آشکار برای زیست‌پذیری این مناطق و همچنین افزایش تنش گرمایی و ذوب برف و کاهش ذخیره گاه‌های برفی این مناطق خواهد بود. روند کاهشی در مناطق جنوب شرقی کشور با مقدار نمره Z آزمون MMK، ۰/۱- دیده می‌شود که این مقدار از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد. شیب کاهشی روند فصل زمستان نیز در جنوب شرقی کشور دیده می‌شود. همان‌طور که گفته شد این مقدار به‌حدی ناچیز است (۰/۰۲- به‌ازای هر دهه) که قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

شاخص UTCI در مناطق واقع در شمال غرب ایران در فصل تابستان و پاییز به‌ترتیب به‌ازای هر دهه ۰/۸ درجه سلسیوس و ۰/۷ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. به‌همین ترتیب در تمامی مناطق جنوب غرب و سواحل خلیج فارس شاخص در حال افزایش است. بیشینه شیب روند

افزایشی در فصل بهار ۱ درجه سلسیوس به‌ازای هر دهه برای مناطق داخلی، نوار شرقی و تا مناطق غربی ایران دیده می‌شود. بیشینه روند افزایشی فصل تابستان به ۰/۸۱ می‌رسد. به‌عبارت دیگر تنها زمستان و بهار شیب روند افزایشی بیش یک و بیش از یک درجه سلسیوسی را در کشور تجربه می‌کنند و این مقدار برای فصول تابستان و پاییز کمتر از یک درجه سلسیوس به‌ازای هر دهه است.

فصل بهار در مقایسه با فصول دیگر دارای الگوی متفاوتی است به‌گونه‌ای که در این فصل مناطق خشک داخلی، دشت کویر، دشت لوت و مناطق شرقی ایران دارای روند شاخص UTCI بیشینه هستند (شکل ۳). با توجه به جدول ۲ و شکل ۳، فصول اعتدالین دارای روند افزایشی صد درصدی شاخص UTCI در ایران هستند. در فصل زمستان ۹۹/۸۳ درصد و در فصل تابستان ۹۹/۷۵ درصد از کشور روند افزایشی برای شاخص UTCI مشاهده می‌شود. روند کاهشی تنها در فصول زمستان و تابستان به میزان ناچیز و حدود ۰/۱۷ و ۰/۲۵ درصد می‌باشد. روند کاهشی در هیچ فصلی در ایران معنی‌دار نبوده است. در فصل زمستان ۷۱/۹۸ درصد روند معنی‌دار افزایشی در سطح ۰/۰۵ و در فصول بهار، تابستان و پاییز به‌ترتیب ۹۸/۰۲، ۸۴/۰۵، ۵۶/۰۷ می‌باشد. بیشینه مناطقی با روند معنی‌دار افزایشی در فصل بهار مشاهده می‌شود.

الگوی فضایی بیشینه روند و شیب روند افزایشی فصول تابستان و پاییز برای شاخص UTCI در ایران بسیار جالب توجه است. در این دو فصل شمال‌غربی ایران به‌همراه سواحل خزری بالاترین مقدار شیب روند و روند را در کشور نشان می‌دهند. این روند افزایشی برای شاخص UTCI می‌تواند در سال‌های آینده پهنه‌هایی که دارای تنش گرمایی متوسط تا قوی هستند را افزایش دهد. روند افزایشی غالب برای مناطق کوهستانی همچنین یک تهدید جدی برای زیستگاه‌های طبیعی و به‌خصوص ذخیره-گاه‌های برف و سرچشمه رودهای بزرگی ایران باشد. از طرف دیگر افزایش تنش‌هایی گرمایی برای مناطق و

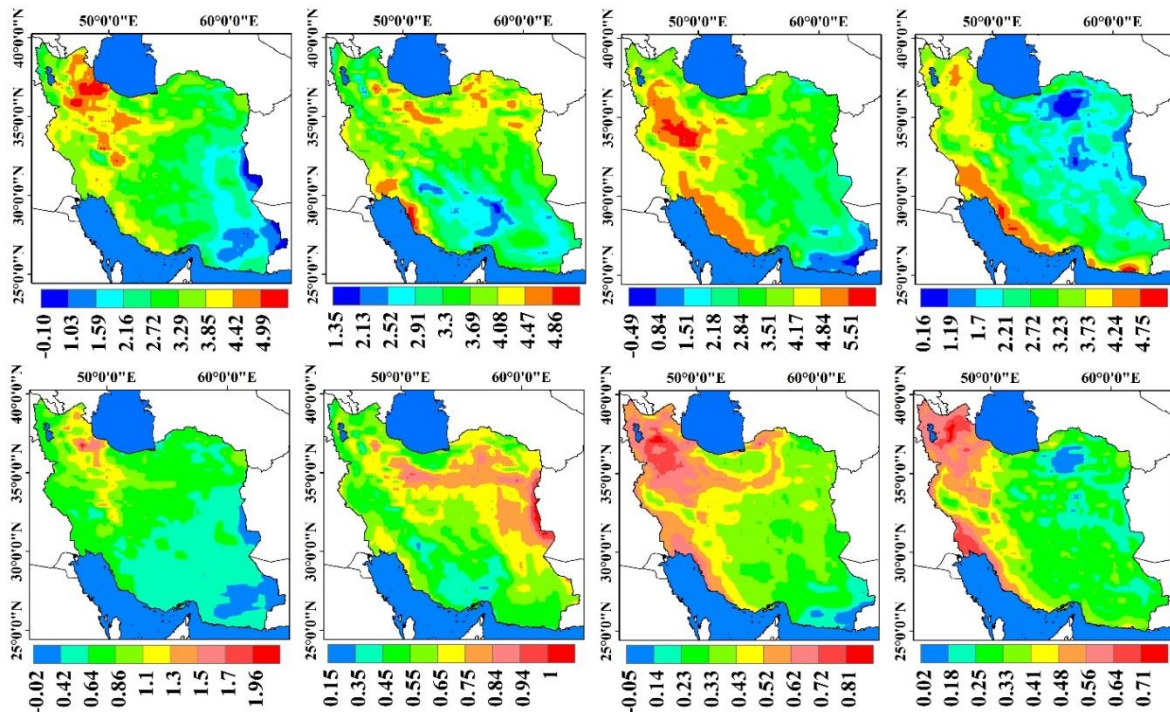
روند فصلی شاخص UTCI در تمامی فصول در ایران افزایشی است. شیب روند برای متوسط کشور در فصل زمستان ۰/۴۹ درجه سلسیوس/دهه، فصل بهار ۰/۵۴ درجه سلسیوس/دهه، فصل تابستان ۰/۳۵ درجه سلسیوس/دهه و در فصل پاییز ۰/۲۸ درجه سلسیوس/دهه به دست آمده است. روند بیشینه افزایشی برای فصول بهار و زمستان یک تهدید آشکار برای تنش گرمایی و به تبع آن زیست‌پذیری شهری و همچنین ذوب سریع برف خواهد بود.

شهرهای واقع در مناطق کوهستانی می‌تواند منجر به افزایش بیماری‌های مختلف و همچنین افزایش انرژی برای سردکردن مناطق به‌خصوص در دوره گرم سال باشد.

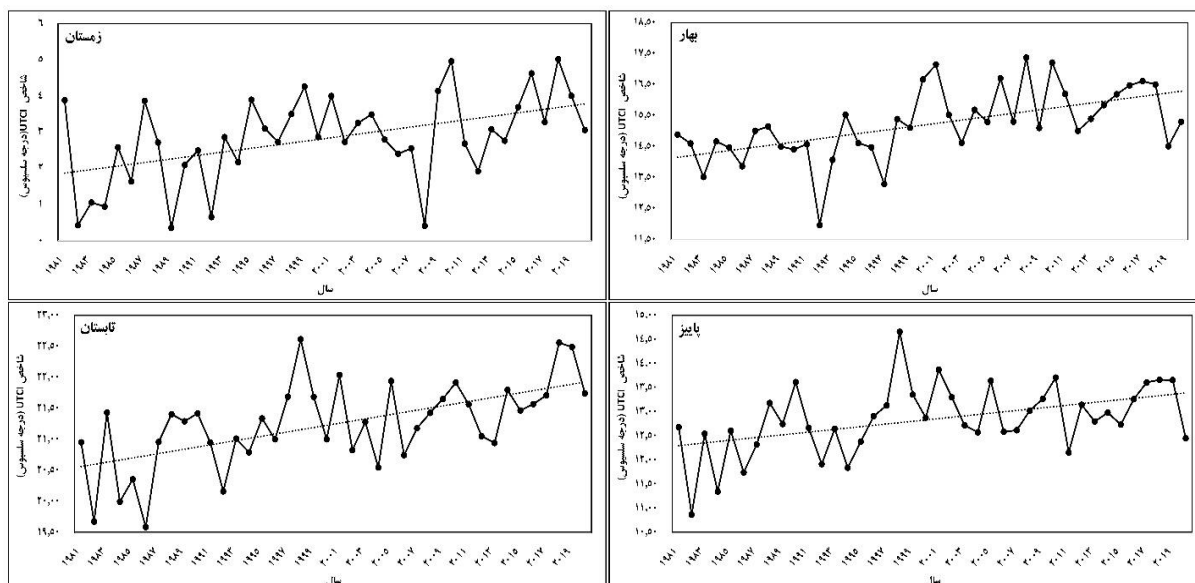
برای نمایش بهتر روند شاخص UTCI در ایران، نمودار روند متوسط پهنه‌ای شاخص با داده‌های بازتحلیل ERA5 برای دوره ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ برای کشور ترسیم و در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود،

جدول ۲. درصد روند فصلی تنش گرمایی در ایران با شاخص UTCI با استفاده از داده‌های ERA5.

فصل	روند افزایشی	روند کاهشی	روند معنی‌دار افزایشی در سطح ۰/۰۵	روند معنی‌دار کاهشی در سطح ۰/۰۵
زمستان	۹۹/۸۳	۰/۱۷	۷۱/۹۸	-
بهار	۱۰۰	-	۹۸/۰۲	-
تابستان	۹۹/۷۵	۰/۲۵	۸۴/۰۵	-
پاییز	۱۰۰	-	۵۶/۰۷	-



شکل ۴. روند و شیب روند فصلی شاخص UTCI در ایران برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ با داده‌های ERA5؛ از سمت چپ به راست ستون‌ها معرف فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز. ردیف اول شاخص من-کندال تصحیح شده و ردیف دوم شیب سنس.



شکل ۴. روند متوسط پهنه‌های کشور برای شاخص UTCI با استفاده از داده‌های ERA5 برای دوره ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰

۴. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی الگوی فضایی تغییرات فصلی تنش گرمایی در ایران با استفاده از شاخص شاخص جهانی اقلیم-گرمایی (UTCI) بوده، که با استفاده از مجموعه داده ERA5 برای یک دوره ۴۰ ساله مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج درستی داده‌های دمای مجموعه داده ERA5 که با داده‌های ۴۹ ایستگاه هواشناسی همدید برای دوره چهل‌ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) با استفاده از سنج‌های آماری مجذور میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، درصد اریبی (PBIAS) و نسبت RMSE به انحراف معیار (RSR) مورد بررسی قرار گرفته نشان داد که داده‌های بازتحلیل ERA5 با توجه به تفکیک افقی بالا (۰/۲۵ درجه قوسی) برای بررسی دما مناسب هستند. نتایج بررسی سنج آماری NSE نشان داد که دمای مجموعه داده بازتحلیل ERA5 در غالب ایستگاه‌های ایران همبستگی بالای ۰/۷ دارد که کارایی بالای آن را در برآورد دما در ایران نشان می‌دهد. دقت بالای ERA5 و نسخه‌های مختلف آن توسط اسدی رحیم‌بیگی و همکاران (۱۴۰۰) برای سایر متغیرهایی اقلیمی همانند بارش نیز در ایران تأیید شده است.

نتایج این مطالعه برای اقلیم‌شناسی و روند شاخص UTCI

در ایران نشان داد که: ۱- بین تنش‌هایی گرمایی و سرمای در ایران با توپوگرافی رابطه وجود دارد اما این رابطه یک رابطه خطی ساده نیست. ۲- همگام با گرمایش جهانی، شاخص UTCI در ایران طی سال‌های ۱۹۸۱-۲۰۲۰ به‌طور قابل توجهی روند افزایشی را نشان داده است؛ ۳- به‌طور کلی، پهنه‌هایی با تنش سرمایی UTCI در کشور در حال کاهش و مناطقی با تنش گرمایی در حال افزایش است. ۴- از یافته‌های کلیدی در خصوص روند افزایشی معنی‌دار شاخص UTCI در ایران روند این شاخص در فصل بهار است. در این فصل شاخص بیش از ۹۸ درصد از ایران به‌ویژه در مناطق مرتفع روند افزایشی را دارد. این روند یک تهدید جدی برای ذوب برف‌ها و افزایش تنش گرمایی برای انسان و محیط‌زیست می‌باشد.

بررسی منطقه‌ای روند شاخص UTCI نشان داد که دو منطقه شمال‌غرب و غرب دو کانون اصلی روند افزایشی معنی‌دار این شاخص در کشور هستند. به جهت پراکنش فضایی پهنه‌های دارای روند افزایشی ایران، فقط فصل بهار الگویی متفاوت با سایر فصول ارائه داده است. در این فصل مناطق مرکزی و نوار شرقی کشور بیشینه روند افزایشی کشور را نشان داده‌اند. در سایر فصول به‌خصوص تابستان و پاییز بیشینه روند افزایشی و شیب روند در شمال‌غرب و سپس سواحل جنوبی در خلیج فارس

بارش‌های فرین در ایران با استفاده از پایگاه AgERA5. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲(۱۱)، ۲۷۲۳-۲۷۳۷.

باعقیده، م.؛ شاکری، ف. و میوانه، ف. (۱۳۹۶). بررسی مقایسه‌ای تنش‌های حرارتی در سواحل شمال و جنوب ایران. *مجله تحقیقات سلامت در جامعه*، ۳(۳)، ۱۱-۱.

زرین، آ.؛ داداشی رودباری، ع. و کدخدای، ا. (۱۴۰۱). پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست و یکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، پذیرفته شده برای انتشار.

تتاگر دربانی، ا.؛ رفیعیان، م.؛ حنایی، ت. و منصفی پراپری، د. (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر تغییرات آسایش حرارتی بیرونی با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی (PET) در شهر مشهد. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۳(۳)، ۳۸-۵۷.

فلاح قاهری، غ.؛ اسماعیلی، ر. و شاکری، ف. (۱۳۹۵). ارزیابی روند تغییرات فصلی تنش‌های گرمایی طی نیم قرن اخیر در چند نمونه اقلیمی ایران. *سلامت و محیط‌زیست*، ۹(۲)، ۲۳۳-۲۴۶.

قابل مشاهده است. بیشینه شیب روند شاخص UTCI در ایران مربوط به فصول زمستان و بهار به ترتیب با مقادیر ۱/۹۶ و ۱ درجه سلسیوس/دهه به دست آمده است. به طور کلی امواج گرمایی طی سال‌های اخیر روند افزایشی قابل ملاحظه‌ای داشتند. همان‌طور که نشان داده شد فصل پاییز به همراه فصل بهار بیشینه روند افزایشی شاخص UTCI را در چهار دهه گذشته داشته است که نشان می‌دهد فصول انتقالی سال در ایران آهنگ گرمایش بیشتری را نسبت به سایر فصول تجربه می‌کنند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در توسعه گردشگری، حوزه سلامت، انرژی و کشاورزی و درک بهتر چگونگی تأثیر تغییر اقلیم بر توزیع جمعیت در ایران مفید باشد.

مراجع

احمدی، م.؛ اسدی، م. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۵). تعیین تقویم آسایش حرارتی شهر سبزوار با استفاده از شاخص‌های دمای معادل فیزیولوژی (PET) و متوسط نظر پیش‌بینی شده (PMV)، *فصلنامه جغرافیایی فضای گردشگری*، ۵(۱۹)، ۴۱-۵۸.

اسدی رحیم‌بیگی، ن.؛ زرین، آ.؛ مفیدی، ع. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۰). تحلیل پراکنش فصلی

Abdel-Ghany, A. M., Al-Helal, I. M., & Shady, M. R. (2013). Human thermal comfort and heat stress in an outdoor urban arid environment: a case study. *Advances in Meteorology*, 2013.

Antonescu, B., Mărmureanu, L., Vasilescu, J., Marin, C., Andrei, S., Boldeanu, M., Ene, D., & Țilea, A. (2021). A 41-year bioclimatology of thermal stress in Europe. *International Journal of Climatology*, 41(7), 3934-3952.

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International journal of biometeorology*, 56(3), 515-535.

Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5-10.

Burton, I., Ebi, K. L., & McGregor, G. (2009). Biometeorology for adaptation to climate variability and change. *In Biometeorology for*

Adaptation to Climate Variability and Change, (pp. 1-5). Springer, Dordrecht.

Daufresne, M., Lengfellner, K., & Sommer, U. (2009). Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(31), 12788-12793.

Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology*, 228(1-2), 113-129.

Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of hydrology*, 349(3-4), 350-363.

Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., & Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal*

- Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- IPCC, (2021). Climate Change 2021: the Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2021)
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.
- Koźmiński, C., & Michalska, B. 2019, UTCI Assessment of bioclimatic conditions for recreation and tourism in the Polish Baltic coastal zone using the UTCI index. *Przegląd Geograficzny*.
- Liu, X. M., Xu, J. M., Zhang, M. K., Huang, J. H., Shi, J. C., & Yu, X. F. (2004). Application of geostatistics and GIS technique to characterize spatial variabilities of bioavailable micronutrients in paddy soils. *Environmental geology*, 46(2), 189-194.
- Maghrabi, A. H., & Alotaibi, R. N. (2018). Long-term variations of AOD from an AERONET station in the central Arabian Peninsula. *Theoretical and Applied Climatology*, 134, 1015-1026.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- Mölders, N. (2019). Outdoor Universal Thermal Comfort Index Climatology for Alaska. *Atmospheric and Climate Sciences*, 9(04), 558.
- Pantavou, K., Lykoudis, S., Nikolopoulou, M., & Tsiros, I. X. (2018). Thermal sensation and climate: A comparison of UTCI and PET thresholds in different climates. *International journal of biometeorology*, 62(9), 1695-1708.
- Pantavou, K., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Theoharatos, G. (2014). Empirical calibration of thermal indices in an urban outdoor Mediterranean environment. *Building and environment*, 80, 283-292.
- Pecelj, M. M., Lukić, M. Z., Filipović, D. J., Protić, B. M., & Bogdanović, U. M. (2020). Analysis of the Universal Thermal Climate Index during heat waves in Serbia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 2021-2036.
- Silva, T. J. V., & Hirashima, S. Q. S. (2021). Predicting urban thermal comfort from calibrated UTCI assessment scale-A case study in Belo Horizonte city, southeastern Brazil. *Urban Climate*, 36, 100652.
- Staiger, H., Laschewski, G., & Matzarakis, A. (2019). Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere*, 10(1), 18.
- Talhi, A., Barlet, A., Bruneau, D., & Aichour, B. (2020). Towards a prediction of outdoor human thermal comfort adapted for designers of urban spaces: examining UTCI and APCI in the context of Algiers (Algeria). *International Journal of Biometeorology*, 1-12.
- Ullah, S., You, Q., Wang, G., Ullah, W., Sachindra, D.A., Yan, Y., Bhatti, A.S., Abbas, A., & Jan, M.A. (2022). Characteristics of human thermal stress in South Asia during 1981–2019: Environmental Research Letters, 17(10), 104018.
- Urban, A., Di Napoli, C., Cloke, H.L., Kysely, J., Pappenberger, F., Sera, F., Schneider, R., Vicedo-Cabrera, A.M., Acquaotta, F., Ragetti, M.S., & Íñiguez, C. (2021). Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe. *Environmental research*, 198, 111227.
- Vinogradova, V. (2020). Using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) for the assessment of bioclimatic conditions in Russia. *International journal of biometeorology*.
- Zare, S., Hasheminejad, N., Shirvan, H. E., Hemmatjo, R., Sarebanzadeh, K., & Ahmadi, S. (2018). Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. *Weather and climate extremes*, 19, 49-57.
- Zeng, D., Wu, J., Mu, Y., Deng, M., Wei, Y., & Sun, W. (2020). Spatial-temporal pattern changes of UTCI in the China-Pakistan economic corridor in recent 40 years. *Atmosphere*, 11(8), 858.
- Zhao, Y., Ducharme, A., Sultan, B., Braconnot, P., & Vautard, R. (2015). Estimating heat stress from climate-based indicators: present-day biases and future spreads in the CMIP5 global climate model ensemble. *Environmental Research Letters*, 10(8), 084013.