



Spatial and temporal analysis of historical and future extreme temperature events in Iran under the influence of climate change

Morteza Miri^{1*}, Mehran Zand², Mohammad Reza Kousari³ and Mojtaba Rahimi⁴

¹ Assistant Professor, Department of Drought and climate change, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Drought and climate change, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Drought and climate change, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

⁴ PhD of Climatology, Department of Geography, Fars Province Department of Education, Shiraz, Iran

Received: 17 April 2024

Accepted: 10 August 2024

Extended abstract

Introduction

One of the most significant impacts of climate change has been the alteration in the average value of meteorological variables, which has led to noticeable changes in the characteristics of meteorological extremes. The warming and ongoing increase in global temperatures primarily exert profound impacts worldwide on human societies, ecosystems, and the environment through the increased occurrence of climatic extremes. Compared to climatic averages, extreme climatic events cause more significant changes in the natural and human environment, and due to their disastrous environmental and socio-economic consequences, they are of great concern to the general public, governments, and academic communities. Based on studies conducted by universities and other research institutions, the most significant consequence of climate change in Iran is the increased occurrence of extreme climatic events, particularly extreme warm temperature events. The increase in extreme events affects various sectors of the environment, socio-economy, agriculture, and others at national, regional, and local levels. The decrease in the number of rainy days and the lengthening of the dry season, along with the increase in extreme warm temperature events and the decrease in extreme cold temperature events, lead to reduced water availability for irrigation and increased crop water demand, this also promotes the spread of pests and diseases in agricultural crops, causes delays in planting and harvesting, results in poor plant growth, reduces cultivation efficiency, alters cropping patterns and crop types, and ultimately leads to a decline in agricultural yields. Therefore, investigating extreme climate events and analyzing their spatio-temporal changes in the past and future of Iran is of great importance for making necessary decisions to confront and mitigate their consequences, which is the primary focus of this research.

Materials and methods

To investigate the spatio-temporal change of extreme temperature events in Iran during the observational period as well as the future periods, daily maximum and minimum temperature data from 123 synoptic stations across the country were used, along with data from the CNRM-CM6-1 model for the period 2020–2060 under two scenarios: the optimistic SSP126 and the pessimistic SSP585. The quantitatively and qualitatively control of the receive data was carried out using the Climact2 software. To calculate cold and warm extreme temperature indices over different periods, 14 temperature indices recommended by the CCL/CLIVAR expert group were used. The calculation of the indices and their final outputs were performed in the MATLAB software.

Results and discussion

Overall, the calculation of warm extreme temperature indices during the observational period showed that for most stations, the frequency and trend of warm indices—such as warm nights, warm days, the number

* Corresponding author: morteza.miri64@gmail.com

of summer days, and the number of tropical nights—have exhibited an upward and increasing trend. In contrast, the temporal changes in cold indices showed that for most stations, the trends of cold indicators such as cold days, cold nights, and the number of frost days have generally been decreasing and declining. An analysis of the frequency of the SU25 index as one of the most common extreme warm indices revealed that the highest occurrence of this index was recorded at Konarak (Airport) station with 363 days, while the lowest value occurred at Ardabil station with 21 days. The maximum value of the frost days (FD) index—one of the most common extreme cold indices in the country—was recorded at Sarab station with 179 days, while the lower limit, indicating the absence of frost, was observed at some stations in the southwestern part of the country. An analysis of future temperature indices for the period 2020–2060 indicates that the behavior of extreme cold and warm temperature indices does not depend on the geographical location and topographical conditions of different regions of the country. This is because, according to the outputs of the CNRM-CM6-1 model for the two scenarios, SSP126 and SSP585 during the period 2020–2060, the trend of extreme warm indices in regions with higher-elevation and higher-latitude regions did not differ significantly compared to lower-elevation and lower-latitude. The trend behavior across areas with different geographical characteristics is quite similar, with only minor variations.

Conclusions

In summary, based on the findings of this study and similar research, it can be concluded that warm temperature extremes in Iran have increased in the past and are projected to continue increasing in the future, while cold extreme have decreased, and the rate of these changes varies considerably across different regions of the country. This condition is particularly evident when comparing indices of the lowest minimum and maximum temperatures and the highest minimum and maximum temperatures. This situation indicates a warming climate in Iran, a shift in the climate types of various regions, and a trend toward increased aridity. One of the main reasons for this situation, in addition to local characteristics, is the change in the Earth's energy balance and the higher rate of warming at the poles compared to the equator, this has altered the Earth's energy equilibrium, ultimately leading to changes in atmospheric conditions and shifts in climate patterns. Therefore, it is necessary for decision-makers at various management levels to adopt appropriate measures to confront or mitigate the potential consequences of rising temperatures and extreme warm events in different regions of Iran.

Keywords: CMIP, Extreme indices, Frost days, Summer days, Trend

Cite this article: Miri, M., Zand, M., Kousari, M.R., Rahimi, M., 2025. Spatial and temporal analysis of historical and future extreme temperature events in Iran under the influence of climate change. *Water. Eng. Manag.* 17(3), 267-284.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



واکاوی تغییرات مکانی-زمانی رخدادهای حدی دمایی تاریخی و آینده ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم

مرتضی میری^{۱*}، مهران زند^۲، محمدرضا کوثری^۳ و مجتبی رحیمی^۴

^۱ استادیار، گروه خشکسالی و تغییر اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۲ دانشیار، گروه خشکسالی و تغییر اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۳ استادیار، گروه خشکسالی و تغییر اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۴ دکتری اقلیم‌شناسی، گروه آموزشی جغرافیا، اداره کل آموزش و پرورش استان فارس، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

چکیده مبسوط

مقدمه

یکی از مهم‌ترین اثرات تغییر اقلیم، تغییر در مقادیر میانگین متغیرهای هواشناسی بوده که تغییرات قابل توجهی در خصوصیات حدی متغیرهای هواشناسی را ایجاد کرده است. گرم شدن و ادامه روند افزایشی درجه حرارت کره زمین، عمدتاً از طریق رخداد بیشتر حدی‌های اقلیمی تأثیرات عمیقی در سراسر جهان بر جوامع انسانی، اکوسیستم‌ها و محیط زیست دارد. رویدادهای حدی اقلیمی در مقایسه با متوسط‌های اقلیمی تغییرات معنی‌دارتری در محیط طبیعی و انسانی ایجاد می‌کند و به دلیل پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی-اجتماعی فاجعه‌بار مورد توجه عموم مردم یک جامعه، دولت و جوامع دانشگاهی است. بر اساس مطالعات انجام شده در دانشگاه‌ها و سایر مراکز تحقیقاتی، مهم‌ترین پیامد تغییر اقلیم در ایران افزایش رخدادهای حدی اقلیمی به‌ویژه حدی‌های حدی دمایی گرم است. افزایش رخدادهای حدی بخش‌های مختلف محیط زیست، اقتصادی-اجتماعی، کشاورزی و غیره را در سطوح ملی، منطقه‌ای و محلی تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش تعداد روزهای بارندگی و افزایش فصل خشک، افزایش رخدادهای حدی دمایی گرم و کاهش حدی‌های دمایی سرد موجب کاهش آب موجود برای آبیاری و افزایش نیاز آبی محصولات کشاورزی، توسعه آفت‌ها و بیماری‌ها در محصولات کشاورزی، تأخیر در کشت و برداشت محصولات، رشد نامناسب گیاهان، کاهش راندمان کشت، تغییر الگوی کشت و نوع محصولات و در نهایت کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود. از این‌رو، بررسی رخدادهای حدی اقلیمی و بررسی تغییر مکانی و زمانی آنها در گذشته و آینده ایران زمین به‌منظور اتخاذ تصمیم‌گیری‌های لازم برای مقابله و کاهش پیامدهای آن از اهمیت بالایی برخوردار است که در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است.

* مسئول مکاتبات: morteza.miri64@gmail.com

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تغییرات مکانی-زمانی رخداد‌های حدی دمایی ایران طی دوره مشاهداتی و همچنین دوره آینده از داده‌های متوسط بیشینه و کمینه روزانه ۱۲۳ ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور و داده‌های مدل CNRM-CM6-1 برای دوره ۲۰۶۰-۲۰۲۰ تحت دو سناریو خوش‌بینانه SSP126 و بدبینانه SSP585 استفاده شد. کنترل کمی و کیفی داده‌های دریافت شده با نرم‌افزار Climact2 بررسی شد. به‌منظور محاسبه شاخص‌های حدی دمایی سرد و گرم طی دوره‌های مختلف، از ۱۴ شاخص دمای توصیه شده از سوی گروه کارشناسی CCL/CLIVAR استفاده شد. محاسبه شاخص‌ها و خروجی‌های نهایی آن‌ها در محیط نرم‌افزار Matlab انجام شده است.

نتایج و بحث

در حالت کلی، محاسبه شاخص‌های حدی دمایی گرم طی دوره مشاهداتی نشان داد که برای بیشتر ایستگاه‌ها فراوانی روند شاخص‌های گرم مانند شب‌های گرم، روزهای گرم، تعداد روزهای تابستانی، تعداد شب‌های حاره‌ای روند صعودی و افزایشی داشته است. در مقابل تغییرات زمانی رخداد شاخص‌های سرد نشان داد که برای بیشتر ایستگاه‌ها در حالت کلی روند شاخص‌های سرد مانند روزهای سرد، شب‌های سرد و تعداد روزهای یخبندان، نزولی و کاهشی بوده است. بررسی فراوانی رخداد شاخص SU25 به‌عنوان یکی شایع‌ترین شاخص‌های حدی گرم نشان داد که بیشترین فراوانی رخداد این شاخص برای ایستگاه کنارک (فرودگاه) با ۳۶۳ روز و کمترین مقدار رخ داده مربوط به ایستگاه اردبیل ۲۱ روز است. بیشینه شاخص روزهای یخبندان (FD) که یکی از شایع‌ترین شاخص‌های حدی سرد در کشور است برای ایستگاه سراب با ۱۷۹ روز و حد پایینی آن با عدم رخداد یخبندان برای برخی از ایستگاه‌های جنوب غربی کشور هست. بررسی شاخص‌های دمایی آینده طی دوره ۲۰۶۰-۲۰۲۰ نشان عدم تابعیت رفتار شاخص‌های حدی دمایی سرد و گرم از موقعیت جغرافیایی و شرایط توپوگرافی مناطق مختلف کشور است. چرا که بر اساس خروجی‌های مدل CNRM-CM6-1 برای دو سناریو ssp126 و ssp585 طی دوره ۲۰۶۰-۲۰۲۰، روند شاخص‌های حدی گرم در مناطق با ارتفاعات زیاد و عرض جغرافیایی بالاتر در مقایسه با مناطق با ارتفاع و عرض جغرافیایی کمتر تفاوتی زیادی ندارد و رفتار روند در مناطق مختلف با ویژگی‌های جغرافیایی متفاوت با اختلاف کمی مشابه هم‌دیگر است.

نتیجه‌گیری

در مجموع، براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش و پژوهش‌های مشابه می‌توان مطرح کرد که حدی‌های دمایی گرم ایران طی دوره گذشته و آینده با افزایش و بیشتر حدی‌های سرد ایران با کاهش همراه هستند که نرخ تغییرات آنها در مناطق مختلف کشور با شدت و ضعف متفاوتی همراه است. این شرایط به‌ویژه با مقایسه شاخص‌های کمترین‌های دمای کمینه و بیشینه و بیشترین‌های دمای کمینه و بیشینه مشخص می‌شود. این شرایط بیان‌کننده گرم‌تر شدن اقلیم ایران و تغییر نوع اقلیم مناطق مختلف ایران و گرایش به سمت خشکی بیشتر است. یکی از دلایل اصلی این شرایط علاوه بر ویژگی‌های محلی، تغییر در توازن انرژی زمین و نرخ بیشتر گرم شدن قطب نسبت به استوا است که موازنه انرژی زمین و در نهایت تغییر در شرایط جوی و تغییر در الگوی آب و هوایی شده است. بنابراین لازم است که در سطح مختلف مدیریتی تصمیم‌گیری‌های لازم به‌منظور مقابله یا کاهش پیامدهای احتمالی افزایش دما و رخداد‌های حدی گرم دمایی برای مناطق مختلف ایران اتخاذ شود.

واژه‌های کلیدی: روزهای تابستانی، روزهای یخبندان، شاخص‌های فرین، روند، CMIP6

مقدمه

می‌کند که گرم شدن کره زمین واضح است و انتشار

بیشتر گازهای گلخانه‌ای موجب گرم شدن بیشتر اقلیم

زمین و تغییر در همه اجزای سامانه اقلیم کره زمین

هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم در پنجمین گزارش

ارزیابی خود از شرایط اقلیمی کره زمین گزارش

اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نشان داد که فرین های دمایی گرم به طور قابل توجهی افزایش و فرین های دمایی سرد کاهش پیدا می کنند. (Almazroui et al., 2021) با استفاده از داده های مدل های CMIN6 تغییرات رخدادهای شدید بارش و دما را طی دوره های ۲۰۳۶-۲۰۶۵ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ بررسی کردند. نتایج آنها بیانگر افزایش دما و افزایش فراوانی رخدادهای حدی دما و بارش است.

(Miri et al., 2021) با استفاده از داده های ایستگاه های هم دیدی و چهار مدل CMIP5 در ابتدا به ارزیابی صحت خروجی های مدل در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۴ پرداختند و در ادامه و تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 تغییرات مکانی و زمانی دمای ایران را طی دوره ۲۰۶۰-۲۰۱۴ بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در مقیاس ماهانه مدل های CMIP5 در برآورد دما از دقت خوبی برخوردارند. همچنین مشخص شد که در حالت کلی شرایط دمایی ایران در آینده با افزایش همراه خواهد بود که بیشترین تغییرات در فصل های زمستان و پاییز و از نظر مکانی در نواحی کوهستانی رخ خواهد داد.

(Babaousmail et al., 2022) با استفاده از داده های مدل های CMIP6 تغییرات رخدادهای حدی دمایی در محدوده دریای مدیترانه و ساها را طی دوره های ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی کردند. نتایج آنها بیانگر کاهش فراوانی روزها و شب های سرد و در مقابل افزایش مداوم گرما است. (Ayugi et al., 2023) با بررسی تغییرات رخدادهای حدی اقلیمی در آفریقا با استفاده از مدل های CMIP6 گزارش کردند که کل قاره با افزایش دما همراه خواهد شد و رخدادهای حدی دمایی افزایش پیدا می کند.

بر اساس مطالعات انجام شده، حدی های اقلیمی در مناطق مختلف جهان رخ می دهند. با وجود این، مناطق خشک و نیمه خشک در برابر پدیده های آنها آسیب پذیرتر هستند. کشور ایران با توجه به تنوع محیطی زیاد و موقعیت جغرافیایی خود از گذشته همواره با مخاطرات طبیعی زیادی مواجه بوده است. مطالعه مخاطرات طبیعی همواره در سطح کشور مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. (BabaiFini et al., 2014)، اثر تغییر اقلیم بر روند شاخص های حدی بارش ایران را طی دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۴۰ تحت تأثیر

می شود (IPCC, 2013). یکی از مهم ترین اثرات تغییر اقلیم، تغییر در مقادیر میانگین متغیرهای هوا شناسی بوده که تغییرات قابل توجهی در ویژگی های حدی متغیرهای هواشناسی را ایجاد کرده است. افزایش رخدادهای حدی آب و هوایی یک از پیامدهای مهم گرم شدن کره زمین است.

گرم شدن و ادامه روند افزایشی درجه حرارت کره زمین، عمدتاً از طریق رخداد بیشتر حدی های اقلیمی تأثیرات عمیقی در سراسر جهان بر جوامع انسانی، بوم سازگان ها و محیط زیست دارد (Field et al., 2012؛ Zhou et al., 2014). رویدادهای حدی اقلیمی در مقایسه با متوسط های اقلیمی تغییرات معنی داری در محیط طبیعی و انسانی ایجاد می کند و به دلیل پیامدهای زیست محیطی، اقتصادی- اجتماعی فاجعه بار مورد توجه عموم مردم یک جامعه، دولت و جوامع دانشگاهی است (An et al., 2019).

با توجه به پیامدهای زیاد حدی های اقلیمی، هیئت بینا لدول تغییر اقلیم یک گروه متخصص از مرکز هدلی را برای درک تغییرات شدید اقلیمی تحت عنوان گروه تحقیقاتی شناسایی تغییر اقلیم و نمایه ها، به منظور بررسی مشکلات ناشی از رویدادهای حدی و محاسبه شاخص های حدی سازمان دهی کرد (Peterson et al., 2002؛ Houghton et al., 2001). این گروه تعداد ۲۷ شاخص را برای بررسی و محاسبه حدی های اقلیمی پیشنهاد کردند که در سطح جهان مورد توجه پژوهشگران علوم جوی قرار گرفته و مطالعات زیادی بر اساس این شاخص ها برای دوره تاریخی و آینده انجام شده است.

(IM et al., 2010) ویژگی های زمانی و مکانی روند شاخص های حدی کره جنوبی را بین سال های ۲۱۰۰-۱۹۷۱ بررسی کردند. نتایج نشان داد که شاخص های مربوط به دمای کمینه، روند افزایشی و شاخص های مربوط به دمای بیشینه روند خاصی را در برابر گرمایش کره زمین نشان نمی دهند. (Alexandera and Arblaster, 2017) با استفاده از ۲۴ شاخص حدی طی دوره طولانی مدت ۲۰۱۰-۱۹۱۱ روند داده های تاریخی و پیش بینی شده دما و بارش استرالیا را با استفاده از داده های مجموع مدل CMIP5 بررسی کردند. نتایج آنها برای شاخص های حدی آینده بر

سناریوهای A2 و A1B بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که تحت سناریوی A2 رویدادهای بیشینه‌ای بارش یک روزه در بیشتر نقاط کشور افزایش پیدا خواهد کرد. در مقابل تحت سناریوی A1B روزه‌های بیشینه بارش یک روز در بیشتر قسمت‌های کشور با کاهش همراه است.

(Varshavian et al., 2011)، طی یک دوره ۴۴ ساله (۲۰۰۴-۱۹۶۱) با بررسی مقادیر حدی دمای کمینه، بیشینه و میانگین روزانه گزارش کردند که دمای کمینه در تمامی صدک‌ها به جز صدک ۹۵، روند افزایشی دارد. روند تغییرات حدی دمای شهر مشهد را طی یک دوره ۶۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۵۱) در مقیاس‌های مختلف زمانی با استفاده از شاخص‌های حدی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که روند افزایشی دمای کمینه سالانه دو برابر دمای بیشینه است.

(Koozegaran et al., 2015)، با بررسی رویدادهای حدی اقلیمی استان‌های خراسان رضوی و جنوبی طی دوره ۲۰۱۲-۱۹۹۲ گزارش کردند که شاخص‌های حدی گرم روند افزایشی و شاخص‌های حدی سرد در دوره مورد مطالعه روند کاهشی دارند. (Karimi et al., 2018)، در پژوهشی روند تغییرات و پیش‌بینی پارامترهای حدی دمای سواحل جنوبی دریای خزر را با استفاده از مدل‌های SDSM و من-کندال بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که برای هر سه ایستگاه مورد مطالعه روند مثبت و معنی‌داری در کمینه و بیشینه دمای ماهانه و سالانه رخ داده است.

(Fathian et al., 2023)، با تحلیل مکانی نمایه‌های حدی دما تحت تأثیر تغییر اقلیم طی دوره مشاهداتی و آینده گزارش کردند که نمایه‌های گرم همانند تعداد روزهای تابستانی و تعداد روزهای حاره‌ای در بیشتر ایستگاه‌ها برای هر دو دوره مشاهداتی و آینده روند مثبتی داشته‌اند در مقابل، نمایه‌های سرد مانند تعداد روزهای یخبندان در بیشتر ایستگاه‌ها روند کاهشی داشته‌اند.

همان‌طور که مطالعات مختلف در سطح جهان نشان می‌دهد، حدی‌های اقلیمی در تمامی مناطق مختلف جهان با شدت ضعف و متفاوت رخداد دارند که مناطق خشک و نیمه‌خشک در برابر پیامدهای آنها آسیب‌پذیرتر هستند. کشور ایران با توجه به تنوع

محیطی زیاد و موقعیت جغرافیایی خود از گذشته همواره با مخاطرات طبیعی زیادی مواجه بوده است. رخدادهای حدی اقلیمی از جمله امواج گرما، امواج سرما، یخبندان، بارش‌های سیل‌آسا، خشکسالی‌های شدید و متوالی، پدیده گرد و غبار از مهم‌ترین حدی‌های اقلیمی هستند که در قسمت‌های مختلف ایران با شدت و ضعف متفاوت رخ می‌دهند.

این رخدادهای حدی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست طبیعی (گیاهان، جانوران) و انسانی (کشاورزی، زیرساخت‌های شهری، بهداشت و سلامت جامعه) ایران زمین داشته باشد.

بنابراین شناسایی رخدادهای حدی اقلیمی با بیشترین تکرار از نظر زمانی و مکانی در مناطق مختلف ایران طی دوره مشاهداتی و آینده یکی از موارد مهم و مورد توجه پژوهشگران جامعه علمی کشور و عموم مردم است که می‌تواند نقش مهمی در مدیریت و کنترل پیامدهای ناشی از این رخدادهای در سطح ایران زمین داشته باشد. از این‌رو، در این پژوهش سعی بر این است که با استفاده از داده‌های دمای کمینه و بیشینه روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک کشور و مدل‌های CMIP6 شرایط رخدادهای دمایی در سطح ایران بررسی شود.

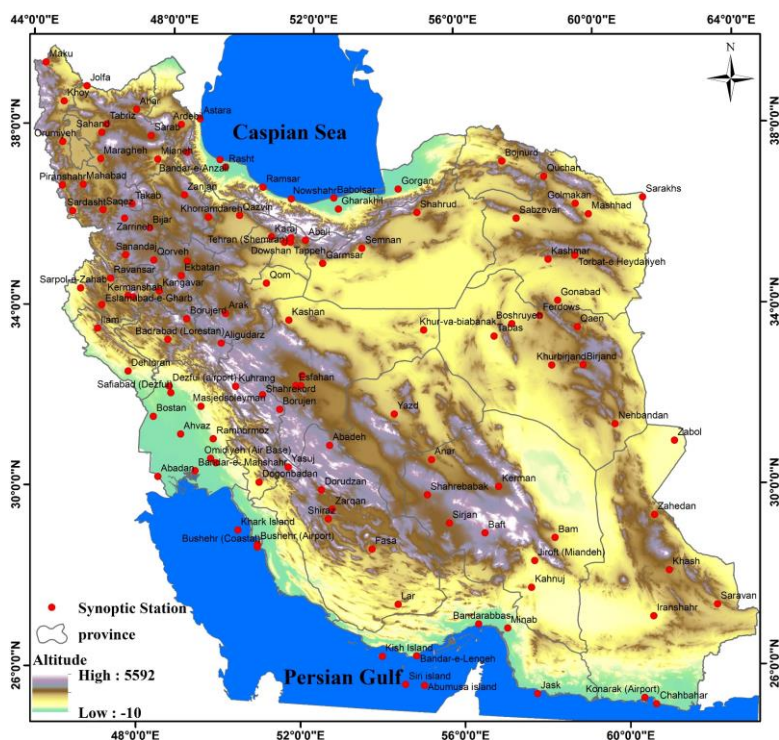
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کل سطح کشور است. داده‌های مورد استفاده دربرگیرنده داده‌های متوسط کمینه و بیشینه روزانه ۱۲۳ ایستگاه سینوپتیک طی دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸ و داده‌های متوسط کمینه و بیشینه روزانه حاصل از خروجی مدل‌های CMIP6 است.

در راستای رسیدن به هدف پژوهش، ترکیبی از روش‌های آماری و مدل‌سازی استفاده شد. در ابتدا با مراجعه به سازمان هواشناسی، داده‌های روزانه متوسط کمینه و بیشینه ۱۲۳ ایستگاه سینوپتیک طی دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸ با پراکنش مناسب در سطح کشور دریافت شد. همچنین، با مراجعه به تارنمای

طی دوره مشاهداتی و آینده با استفاده از آزمون‌های آماری مناسب (همچون؛ آزمون ران تست، نمودار باکس پلات) در محیط R و با استفاده از افزونه Climpack2 بررسی شد.

پایگاه کوپرنیکس^۱ داده‌های متوسط کمینه و بیشینه دمای مدل CNRM-CM6-1 برای دوره ۲۰۶۰-۲۰۲۰ تحت دو سناریو خوش‌بینانه SSP126 و بدبینانه SSP585 دریافت شد. در ادامه ویژگی‌های کمی و کیفی داده‌های دریافت شده برای ایستگاه‌ها و مدل



شکل ۱- توزیع مکانی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب طی دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷

Fig. 1. Spatial distribution and geographical position of selected synoptic stations during the period 2017-1988

گرفتن سطح مجاز بازسازی (کمتر از ۳۰ درصد)، بازسازی داده‌ها برای زمان‌های فاقد آمار انجام شد. در این روش، ایستگاه‌های همجوار که از لحاظ میانگین پارامتر دما به ایستگاه دارای کمبود آماری نزدیک‌تر بودند، وزن بیشتری در بازسازی داده کمبود داشت. محاسبه این روش با رابطه (۱) انجام شد.

$$\frac{P_x}{N_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N_i} \quad (1)$$

که در آن، P_x مقدار کمبود آماری دما است که باید تخمین زده شود. N_x میانگین دما در ایستگاهی است که کمبود آماری دارد، یعنی ایستگاه هدف، N تعداد ایستگاه‌های همجوار یا ایستگاه شاهد که در بازسازی کمبود آماری استفاده می‌شود. P_i مقدار دما در هر یک از ایستگاه‌های همجوار و همزمان با کمبود

با توجه مقیاس زمانی مورد مطالعه (روزانه) برای برخی از ایستگاه‌ها گپ داده مشخص شد. برای رفع گپ داده از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که بسته به نوع متغیر و همچنین شرایط اقلیمی و محیطی حاکم بر مناطق مختلف هر یک از روش‌ها نتایج متفاوتی ارائه می‌کنند. در مطالعه انجام شده به‌وسیله Miri et al., (2022) برای بازسازی دمای روزانه از چهار روش رایج بازسازی شامل روش نسبت نرمال، رگرسیون خطی، رگرسیون چند متغیره و عکس مجذور فاصله (IDW) استفاده شد.

نتایج آنها نشان داد که برای بازسازی روزانه دما در سطح کشور روش نسبت نرمال از دقت مناسبی برخوردار است. از این‌رو، با استفاده از روش نسبت نرمال و در نظر گرفتن ایستگاه‌های اطراف و همچنین در نظر

¹ Copernicus

آماري P_x و N_i مقدار میانگین دما در ایستگاه‌های همجوار است.

پس از انتخاب ایستگاه‌های مورد مطالعه و رفع داده های گپ، بررسی داده‌های پرت ایستگاه‌ها با استفاده از نمودارهای باکس پلات انجام شد. پس از بررسی ویژگی‌های داده‌ها و برطرف کردن مشکلات احتمالی مربوط به داده‌ها و اطمینان از صحت آنها، ماتریس داده‌های روزانه کمینه دما و بیشینه دما برای هر یک از ایستگاه‌ها و نقاط مدل CNRM-CM6-1 طی دوره آمار مشترک تهیه و با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار R رخدادهای حدی رخ داده در سطح کشور ایران برای دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸ و دوره آینده ۲۰۶۰-۲۰۲۰ محاسبه شد.

در این پژوهش، برای بررسی رخدادهای حدی از شاخص‌های حدی بارش و دمای توصیه شده از سوی گروه کارشناسی CCL/CLIVAR استفاده شده است. قابل ذکر است که هر چند افزونه‌های Climact2 و rclimdex در محیط نرم‌افزار R شاخص‌های حدی بارش و دما را محاسبه می‌کنند، با وجود این تبدیل نتایج به نقشه نیازمند عملیات مجدد است، از این‌رو در این

پژوهش تمامی عملیات پردازش داده‌ها، محاسبه شاخص‌ها، محاسبه روند با آزمون من-کندال، تهیه نمودار و نقشه در قالب یک کد Matlab برنامه‌نویسی و مورد استفاده قرار گرفت. بررسی روند شاخص‌های حدی مورد استفاده بر اساس آزمون من-کندال انجام شده است. این آزمون، یک آزمون دو طرفه است. بنابراین در صورتی که $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ باشد، در سطح اطمینان α فرض صفر پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت، فرض صفر رد خواهد شد.

مقادیر مثبت و منفی آماره Z به ترتیب بیانگر روند افزایشی و روند کاهشی در سری داده‌های مورد بررسی است. سطح معنی‌داری روند منفی و مثبت آماره Z من-کندال براساس مقایسه مقادیر این آماره با مقدار $Z_{\alpha/2}$ جدول توزیع نرمال استاندارد در سطح اطمینان $Z_{\alpha/2}$ تعیین می‌شود. بدین صورت که اگر $|Z| \leq 1/64$ ، $|Z| \leq 1/96$ و $|Z| \leq 2/57$ باشد، به ترتیب فرض صفر (عدم وجود روند) در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد، در سطح معنی‌داری پنج درصد و در سطح معنی‌داری ۰/۱ درصد رد و وجود روند در سری داده‌ها پذیرفته می‌شود (Miri and Rahimi, Kumar et al., 2009). (2015)

جدول ۱- شاخص‌های حدی دمای توصیه شده گروه کارشناسی CCL/CLIVAR و مورد استفاده در پژوهش

Table 1. List of threshold temperature indices recommended by the CCL/CLIVAR expert group and used in research		
Index	Definition	Units
FD (Frost Days)	Number of days when $TN < 0^\circ C$ (Days when minimum temperature is below $0^\circ C$)	(days)
SU25 (Summer days)	Number of days when $TX > 25^\circ C$ (Days when maximum temperature exceeds $25^\circ C$)	(days)
ID (Ice Days)	Number of days when $TX < 0^\circ C$ (Days when maximum temperature is below $0^\circ C$)	(days)
TR20 (Tropical nights)	Number of days when $TN > 20^\circ C$ (Days when minimum temperature exceeds $20^\circ C$)	(days)
TXx (Max TX)	Warmest daily TX (Hottest day)	$^\circ C$
TNx (Max TN)	Warmest daily TN (Hottest night)	$^\circ C$
TXn (Min TX)	Coldest daily TX (Coldest day)	$^\circ C$
TNn (Min TN)	Coldest daily TN (Coldest night)	$^\circ C$
TX90 P (Amount of hot days)	Percentage of days when $TX > 90$ th percentile (Fraction of days with hot daytime temperatures)	(%)
TN90 P (Amount of warm nights)	Percentage of days when $TN > 90$ th percentile (Fraction of days with warm night time temperatures)	(%)
TX10 P (Amount of cool days)	Percentage of days when $TX < 10$ th percentile (Fraction of days with cool day time temperatures)	(%)
TN10 P (Amount of cold nights)	Percentage of days when $TN < 10$ th percentile (Fraction of days with cold night time temperatures)	(%)
CSDI (Cold spell duration indicator)	Annual number of days contributing to events where 6 or more consecutive days experience $TN < 10$ th percentile	(days)
WSDI (Warm spell duration indicator)	Annual number of days contributing to events where 6 or more consecutive days experience $TX > 90$ th percentile	(days)

نتایج و بحث

دوره مشاهداتی: شکل ۲ تغییرات شاخص‌های حدی گرم طی دوره مشاهداتی برای ۱۲۳ ایستگاه سینوپتیک کشور را طی دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷ نشان می‌دهد. در حالت کلی، همان‌طور که روی شکل مشخص است براساس نتایج آماره Z آزمون من-کندال برای پهنه ایران زمین شاخص‌های حدی با افزایش همراه هستند که این افزایش برای برخی از شاخص‌های حدی گرم در سطح قابل توجهی از کشور معنی‌دار و جهت‌دار است و برای برخی از شاخص‌ها معنی‌داری روند افزایش تنها در نقاط محدودی از کشور رخ داده است. بر اساس شکل ۲، روند شاخص روزهای تابستانی (SU25) برای تمامی ایستگاه‌های منتخب طی دوره مورد مطالعه از روند افزایشی برخوردارند که این روند افزایشی برای ۸۱/۳ درصد از ایستگاه‌ها در سطح پنج درصد معنی‌دار (۱۰۰ ایستگاه) و برای ۱۸/۷ درصد ایستگاه روند افزایش در سطح خاصی معنی‌دار نیست. طی دوره مورد مطالعه، روند شاخص شب‌های حاره‌ای (TR20) (دمای کمینه روزانه بیشتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد) برای نزدیک به ۹۰ درصد از ایستگاه افزایشی است که از این مقدار، روند افزایشی ۶۸/۳ درصد ایستگاه‌ها (۸۴ ایستگاه) در سطح پنج درصد معنی‌دار هست و روند افزایشی ۲۰/۳ درصد از ایستگاه‌ها بر اساس دامنه آزمون من-کندال در سطح خاصی معنی‌دار نیست.

برای این شاخص حدود ۱۴ ایستگاه از روند منفی برخوردار هستند که نیمی از این ایستگاه دارای روند منفی معنی‌دار و نیمی دیگر بدون معنی‌داری در سطح خاصی باشند. ایستگاه‌های همچون قوچان در استان خراسان رضوی، شیراز و سد درودزن در فارس و ایستگاه یاسوج در استان کهگیلویه و بویر احمد دارای روند منفی برای شاخص TR20 طی دوره بحث هستند. یکی دیگر از شاخص‌های حدی گرم مورد بررسی شاخص بیشینه ماهانه دمای بیشینه روزانه (TXx) است که بر اساس نتایج به‌دست آمده از محاسبه فراوانی و روند این شاخص مشخص شد که ۹۷ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی از روند افزایشی و تنها سه درصد از روند منفی برخوردارند. با وجود این، نکته قابل توجه برای این شاخص عدم معنی‌داری روند

افزایشی برای ۱۰۵ ایستگاه (۸۵/۴ درصد) است. همان‌طور که بر شکل ۲ نشان می‌دهد، روند شاخص کمینه ماهانه دمای بیشینه روزانه (TNx) نیز همانند شاخص TXx برای سطح قابل توجهی از کشور افزایشی است، با این تفاوت که روند افزایشی در صد بیشتری از ایستگاه‌های مورد بررسی در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده که این شرایط بیان‌کننده افزایش بیشتر دماهای کمینه نسبت به دمای بیشینه است.

روند شاخص‌های روزهای گرم (TX90P) و شب‌های گرم (TN90P) نیز همانند سایر شاخص‌های حدی گرم دمایی در حالت کلی از روند افزایشی برخوردار است. روند افزایشی این شاخص‌ها به‌ترتیب برای ۹۲ و ۹۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح پنج درصد معنی‌دار است. در بین ایستگاه‌های مورد بررسی برای شاخص شب‌های گرم بیشترین مقدار آماره Z من-کندال مربوط به ایستگاه‌های بوشهر و گرمسار و برای شاخص روزهای گرم بیشترین مقدار Z آزمون من-کندال برای کمترین مقدار آن مربوط به ایستگاه درود زن است.

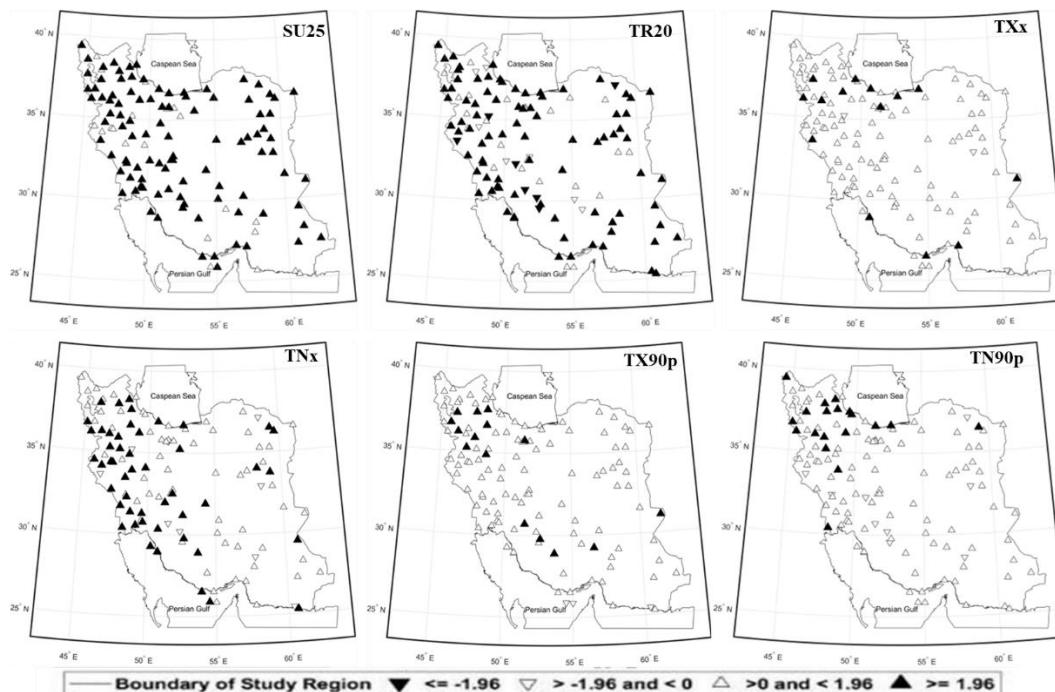
محاسبه و بررسی شاخص طول مدت گرما (WSDI) در سطح ایران نشان داد که از مجموع ۱۲۳ ایستگاه سینوپتیک مورد بررسی، تعداد ۱۱۷ ایستگاه دارای روند مثبت هستند (۹۵ درصد) که از این تعداد، روند افزایشی برای ۶۵ ایستگاه (۵۲/۸ درصد) در سطح پنج درصد معنی‌دار و جهت‌دار است.

شکل ۳ روند تغییرات حدی‌های حدی سرد ایستگاه‌های منتخب در سطح کشور طی دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. بر اساس شکل یاد شده، در یک نگاه کلی روند شاخص‌های حدی سرد کاهشی است به‌عبارتی دیگر فراوانی رخدادهای حدی سرد دمایی ایران کاهش یافته است.

روند شاخص روزهای یخبندان (FD) برای سطح قابل توجهی از کشور کاهشی و برای برخی مناطق به ویژه مناطق شمال غرب، مناطق کوهستانی و شمالی کشور این روند کاهشی معنی‌دار است. یکی از نکات قابل توجه برای این شاخص مقدار بیشینه شاخص Z من-کندال برای ایستگاه شهرکرد ۳/۲ است که به‌طور معمول به دماهای سرد قابل توجه شناخته می‌شود. از مجموع ۱۲۳ ایستگاه منتخب مورد بررسی،

نشان داد که این شاخص نیز همانند شاخص (FD) در بیشتر نقاط کشور منفی است با این تفاوت که روند منفی شاخص روزهای یخی به جز در منطقه شمال غرب در سایر مناطق کشور معنی‌دار نیست.

روند ۷۳ درصد از ایستگاه‌ها (۷۹ ایستگاه) منفی است که از این مقدار روند ۳۷/۴ درصد در سطح پنج درصد معنی‌دار است. بررسی شاخص روزهای یخی (ID) نیز



شکل ۲- روند تغییرات شاخص‌های حدی گرم برای ایستگاه‌های منتخب در سطح ایران طی دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷
Fig. 2. The trend of changes in extreme warm indices for selected stations across Iran during the 1988-2017 period

بررسی روند شاخص روزهای سرد نشان داد که تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی دارای روند کاهشی روزهای سرد هستند که این روند کاهشی برای ۱۱۷ ایستگاه (۹۵/۱ درصد) معنی‌دار است. شاخص شب‌های سرد نیز برای سطح قابل توجهی از کشور منفی است که این روند کاهشی برای ۸۷ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی معنی‌دار هست. درنهایت، بررسی روند شاخص طول مدت سرما (CSDI) برای ایستگاه‌های منتخب نشان داد که این شاخص نیز در حالت کلی از روند منفی برخوردار شده است. براساس محاسبات انجام شده برای ۷۷ درصد ایستگاه‌ها، روند این شاخص منفی است که این روند منفی در ۲۸/۵ درصد آن معنی‌دار هست.

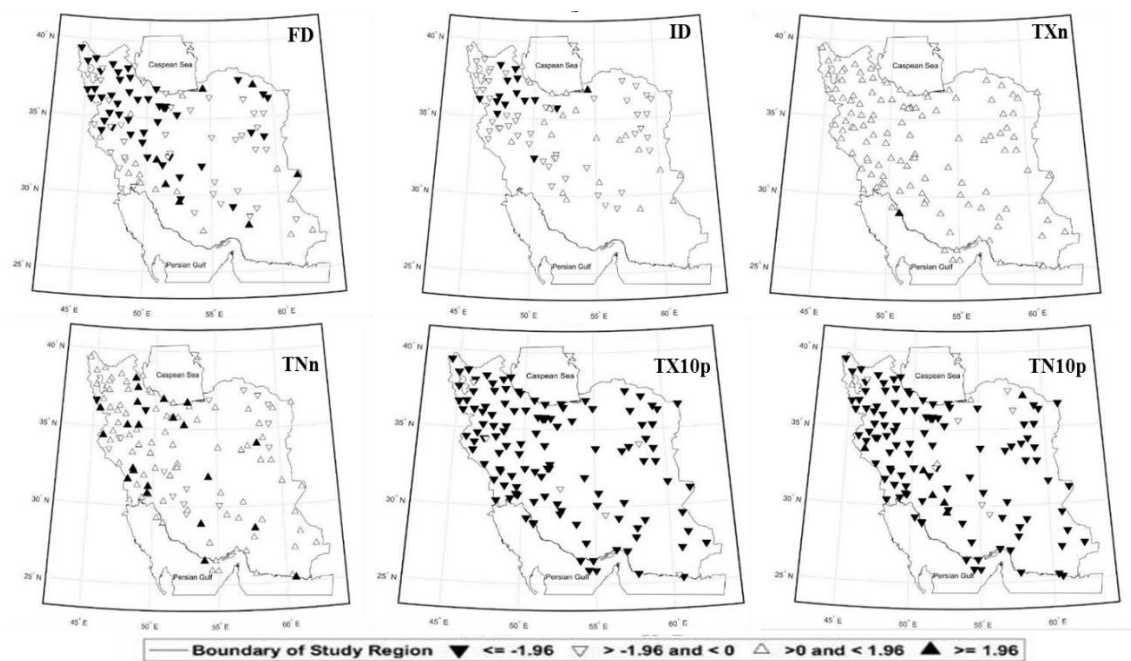
دوره آینده: براساس مقادیر جدول ۲ شاخص‌های SU25، TXx و TNx برای تمامی نقاط مدل CNRM-CM6-1 در پهنه ایران زمین طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰ با روند افزایشی و معنی‌دار در سطح پنج درصد و بالاتر

بررسی روند شاخص بی‌شینه ماهانه دمای کمینه روزانه (TXn) نشان داد که روند این شاخص در تمامی نقاط کشور مثبت است، به عبارتی دیگر دماهای بی‌شینه ماهانه کمینه روزانه در حال افزایش و گرم‌تر شدن هستند هر چند روند این شاخص در تمامی نقاط کشور مثبت است، این روند مثبت از نرخ بالایی برخوردار نیست و در محدوده معنی‌داری قرار نمی‌گیرد.

بر اساس شکل ۳ روند شاخص کمینه ماهانه دمای کمینه روزانه (TNn) نیز در حالت کلی افزایشی است اما نسبت به شاخص‌های قبلی با تغییرات مکانی بیشتری همراه است. به طوری که روند این شاخص در بیشتر ایستگاه‌های شمال شرق کشور منفی و در سایر مناطق کشور افزایشی است. عدم معنی‌داری روند منفی و روند افزایشی این شاخص در بیشتر مناطق کشور است و تنها در برخی از مناطق شمالی، شمال غربی و جنوب غرب روند افزایشی این شاخص معنی‌دار (۱۸ درصد از ایستگاه‌ها) است.

کشور ایران با افزایش قابل توجهی همراه هست، چرا که تنها سه درصد از نقاط مدل از روند مثبت و بدون معنی‌داری در سطح خاصی برخوردارند و ۹۷ درصد از سطح کشور همانند شاخص‌های قبلی با روند افزایشی و معنی‌دار در سطح پنج درصد و بالاتر همراه می‌شوند.

همراه خواهند شد. به عبارت دیگر طی دوره آینده تمامی این شاخص‌ها در قسمت‌های مختلف ایران با روند افزایشی و معنی‌دار مواجه خواهند شد. بررسی مقادیر روند شاخص TR20 نشان داد که در حالت کل این شاخص نیز طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰ در سطح



شکل ۳- روند تغییرات شاخص‌های حدی سرد برای ایستگاه‌های منتخب در سطح ایران طی دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷

Fig. 3. The trend of changes in extreme cold indices for selected stations across Iran during the 1988-2017 period

بررسی مقادیر شاخص WSDI طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰ تحت سناریو ssp126 نشان داد که ۵۰ درصد از نقاط مدل برای این شاخص از روند افزایشی بدون معنی‌داری خاصی برخوردار خواهند شد و تنها ۳۱ درصد از نقاط مدل با روند افزایشی معنی‌دار در سطح پنج درصد همراه می‌شوند.

بررسی مقادیر شاخص‌های روزهای گرم و شب‌های گرم نشان داد که هر چند روند این دو شاخص با افزایش همراه است با وجود این بیش از نیمی از نقاط مدل برای سطح کشور ایران در محدوده بین صفر الی $\pm 1/96$ آزمون من-کندال است که این مقدار بیان‌کننده عدم وجود روند در سطح پنج درصد است.

جدول ۲- درصد فراوانی شاخص‌های حدی دمایی گرم تحت سناریو ssp126 طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰

Table 2. The percentage of frequency of extreme warm temperature indices under the ssp126 scenario during the 2020-2060 period.

>= 1.96	> 0 and < 1.96	> -1.96 and < 0	<= -1.96	Index
100.00	0.00	0.00	0.00	SU25
97.00	3.00	0.00	0.00	TR20
12.00	64.00	22.00	3.00	TX90 P
8.00	50.00	38.00	4.00	TN90 P
100.00	0.00	0.00	0.00	TXx
100.00	0.00	0.00	0.00	TNx
31.00	50.00	19.00	0.00	WSDI

در جدول ۳ نتایج بررسی روند شاخص‌های حدی حدی دمایی گرم بر اساس سناریو بدبینانه ssp585 طی دوره آینده مورد بحث (۲۰۲۰-۲۰۶۰) در سطح کشور ایران نشان داده شده است. به‌طور کلی می‌توان مطرح کرد که شاخص حدی دمایی گرم تحت سناریو ssp585 نیز همانند سناریو ssp126 در بیشتر سطح کشور با روند افزایشی قابل توجهی برخوردارند چرا که روند بیشتر شاخص‌های حدی گرم بر اساس آزمون من-کندال افزایشی و معنی‌دار است.

بر اساس مقادیر جدول ۲، شاخص‌های SU25، CNRM-CM6-1 و TXx برای تمامی نقاط مدل ss585 در پهنه ایران زمین طی دوره

۲۰۲۰-۲۰۶۰ با روند افزایشی و معنی‌دار در سطح پنج درصد همراه خواهند شد. بررسی مقادیر روند شاخص TR20 نشان داد که تنها یک درصد از نقاط مدل از روند منفی و بدون معنی‌داری در سطح خاصی برخوردارند و ۹۹ درصد از سطح کشور همانند شاخص‌های قبلی با روند افزایشی و معنی‌دار در سطح پنج درصد همراه می‌شود. بررسی مقادیر شاخص WSDI طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰ تحت سناریو ssp585 نشان داد که ۵۰ درصد از نقاط مدل برای این شاخص از روند افزایشی بدون معنی‌داری خاصی برخوردار خواهند شد و تنها ۳۸ درصد از نقاط مدل با روند افزایشی معنی‌دار در سطح پنج درصد همراه می‌شوند.

جدول ۳- درصد فراوانی شاخص‌های حدی دمایی گرم تحت سناریو ssp585 طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰

Table 3. The percentage of frequency of extreme warm temperature indices under the ssp585 scenario during the 2020-2060 period

>= 1.96	>0 and < 1.96	> -1.96 and < 0	<= -1.96	Index
1.00	0.00	0.00	0.00	SU25
0.99	0.00	0.00	0.01	TR20
1.00	0.00	0.00	0.00	TXx
1.00	0.00	0.00	0.00	TXn
0.22	0.53	0.26	0.00	TX90 P
0.10	0.62	0.28	0.00	TN90 P
0.38	0.49	0.13	0.00	WSDI

شکل ۴ روند شاخص‌های روزهای تابستانی و بیشینه ماهانه دمای بیشینه روزانه آینده ایران با استفاده از داده‌های مدل CNRM-CM6-1 مبتنی بر سناریو ssp126 و ssp585 طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که روی شکل یاد شده مشخص است، روند بیشینه ماهانه دمای بیشینه روزانه و روزهای تابستانی تحت هر دو سناریو طی در دوره آینده در نقاط مختلف کشور افزایشی و معنی‌دار در سطح پنج درصد است. با توجه به جدول ۳ از نظر مکانی سایر شاخص‌های فرین گرم نیز در سطح قابل توجهی از کشور افزایشی هستند که روند افزایشی این شاخص‌ها معنی‌دار در سطح پنج درصد است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که روند افزایشی شاخص‌های گرم برای آینده در سطح کشور فراگیر است.

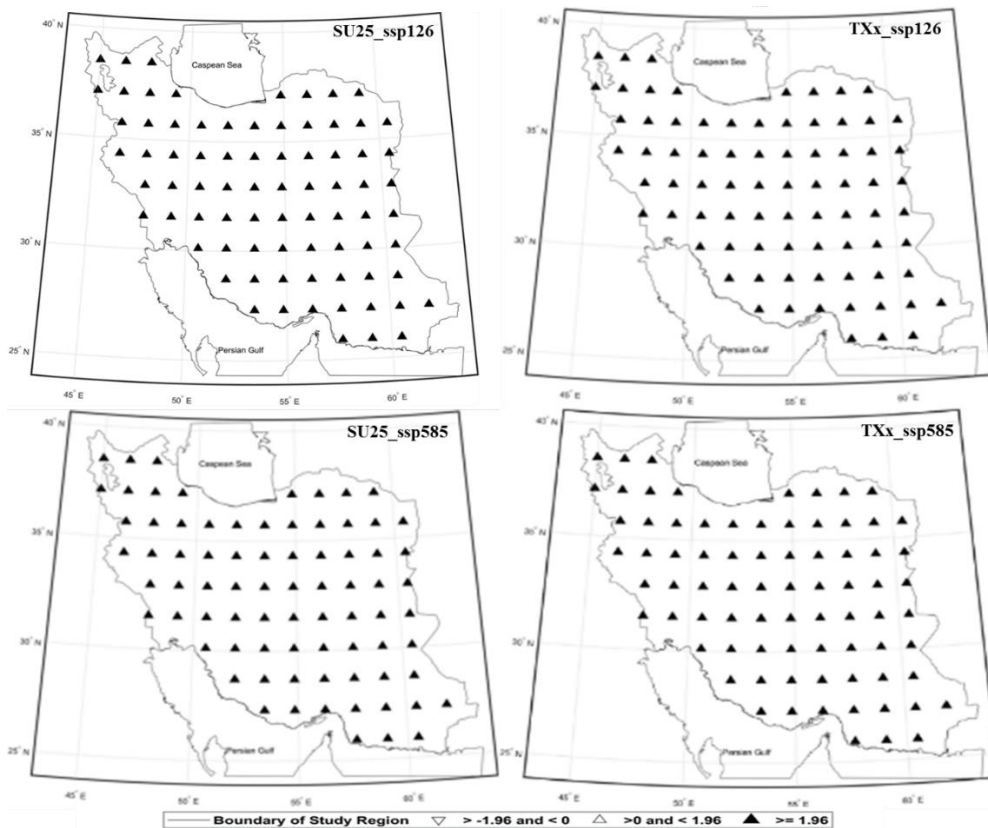
در جدول ۴ نتایج بررسی روند شاخص‌های حدی سرد بر اساس سناریو خوش‌بینانه ssp126 طی دوره

آینده مورد بحث در سطح کشور ایران نشان داده شده است. در حالت کلی می‌توان گفت که شاخص حدی دمایی سرد تحت سناریو ssp126 در بیشتر سطح کشور با روند کاهشی همراه هستند، چرا که روند بیشتر شاخص‌های حدی سرد بر اساس آزمون من-کندال در محدوده منفی قرار گرفته است.

بر اساس مقادیر جدول ۴ شاخص‌های FD و ID که به‌ترتیب بیان‌کننده روزهای یخبندان و روزهای یخی هست با کاهش فراوانی رخداد همراه می‌شود. همان‌طور که در جدول یاد شده مشاهده می‌شود تعداد روزهای یخبندان برای از ۹۷ درصد از سطح کشور با روند منفی است که البته ۲۱ درصد از نقاط دارای روند کاهشی معنی‌دار و ۷۶ درصد دارای روند منفی ولی بدون معنی‌داری در سطح خاصی هستند. شاخص روزهای یخی (ID) نیز همانند شاخص FD است با این تفاوت که برای این شاخص تنها یک درصد نقاط از روند منفی معنی‌دار برخوردارند و ۷۴ درصد

در سطح پنج درصد است.

نقاط در محدوده بین صفر الی $\pm 1/96$ آزمون من-کندال است که این مقدار بیان کننده عدم وجود روند



شکل ۴- روند تغییرات شاخص های حدی گرم آینده ایران با استفاده از مدل CNRM-CM6-1 مبتنی بر سناریوهای ssp126 و ssp585 طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰

Fig. 4. The trend of changes in Iran's future extreme warm indices using the CNRM-CM6-1 model based on ssp126 and ssp585 scenarios during the 2020-2060 period

آینده برای ۹۳ درصد از نقاط مدل با روند کاهشی همراه خواهد شد که پنج درصد نقاط دارای روند منفی بدون معنی داری و ۸۸ درصد نقاط دارای روند منفی و معنی دار در سطح پنج درصد هستند. بررسی شاخص روزهای یخی (ID) در سطح کشور نشان داد که طی دوره آینده روند این شاخص نیز در حالت کلی منفی است چراکه ۷۷ درصد از نقاط مدل در پهنه ایران از روند منفی برخوردارند.

از مجموع نقاط دارای روند منفی، ۴۲ درصد در محدوده بین صفر الی $-1/96$ آزمون من-کندال است که این دامنه بیانگر عدم معنی داری روند است. بررسی مقادیر در صد روزها و شب های سرد برای دوره آینده نشان داد که این دو شاخص از روند مشخصی برخوردار نیست چرا که برای شاخص شب های سرد تمامی نقاط مدل و برای شاخص روزهای سرد ۹۷ درصد نقاط مدل تحت سناریو SSp585 در پهنه ایران در محدوده بین

بررسی مقادیر شاخص های کمینه ماهانه دمای بیشینه روزانه (TXn)، کمینه ماهانه دمای کمینه روزانه (TNn) طی دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۶۰ تحت سناریو ssp126 نشان داد که مقادیر کمینه دمایی بیشینه و کمینه روزانه ایران زمین با افزایش همراه است که برای شاخص TXn در تمامی نقاط ایران زمین این افزایش رخ داده است و برای شاخص TNn در ۹۲ درصد از نقاط مدل برای پهنه کشور روند افزایشی قابل مشاهده است. هرچند کمینه های کمینه و بیشینه دمای روزانه در پهنه کشور با افزایش همراه است، با وجود این افزایش رخ داده در سطح خاصی معنی دار نیست.

نتایج بررسی شاخص های حدی سرد دمایی برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰ تحت سناریو ssp585 در جدول ۵ برای کشور نشان داده شده است. بر اساس مقادیر جدول یادشده، شاخص روزهای یخبندان طی دوره

صفر الی $\pm 1/96$ آزمون من-کندال است و که این محدوده بیانگر وجود روند افزایشی یا کاهششی بدون معنی‌داری در سطح خاصی است.

جدول ۴- درصد فراوانی شاخص‌های حدی دمایی سرد تحت سناریو ssp126 طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰

Table 4. The percentage of frequency of extreme cold temperature indices under the ssp126 scenario during the 2020-2060 period

Index	≤ -1.96	> -1.96 and < 0	> 0 and < 1.96	≥ 1.96
FD	0.21	0.76	0.03	0.00
ID	0.01	0.74	0.10	0.00
TNn	0.00	0.08	0.92	0.00
TXn	0.00	0.00	1.00	0.00
TX10 P	0.00	0.18	0.67	0.15
TN10 P	0.00	0.09	0.55	0.36
CSDI	0.00	0.06	0.76	0.18

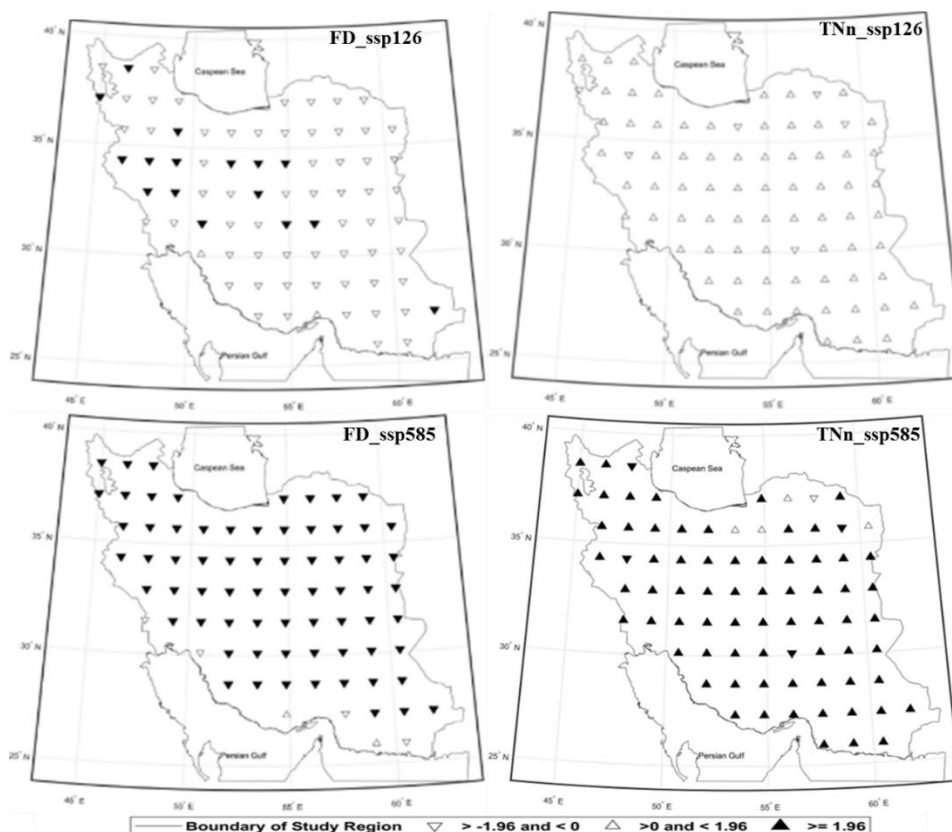
محاسبه و بررسی مقادیر شاخص‌های کمینه ماهانه دمای بیشینه روزانه (TXn)، کمینه ماهانه دمای کمینه روزانه (TNn) طی دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۶۰ تحت سناریو ssp585 نشان داد که در حالت کلی مقادیر این دو شاخص که در واقع بیان‌کننده مقادیر کمینه دمایی ایران زمین هستند با افزایش همراه خواهد شد. بر اساس مقادیر جدول ۵ تمامی نقاط مدل برای شاخص در پهنه ایران زمین کمینه ماهانه دمای بیشینه روزانه (TXn) طی دوره آینده با افزایش همراه خواهد شد که این روند افزایشی در سطح پنج در صد معنی‌دار است.

برای شاخص کمینه ماهانه دمای کمینه روزانه (TNn) ۸۸ درصد نقاط از روند افزایشی معنی‌دار در سطح پنج در صد و تنها پنج در صد از روند افزایشی و بدون معنی‌داری در سطح خاصی برخوردار خواهند شد. طی دوره آینده برای این شاخص، هفت درصد نقاط از روند منفی برخوردار خواهند شد که برای پنج در صد نقاط روند منفی در سطح پنج در صد معنی‌دار است. در حالت کلی می‌توان مطرح کرد که افزایش مقادیر کمینه دمایی بیانگر افزایش درجه حرارت و در مقابل کاهش فراوانی شاخص‌های حدی سرد است.

جدول ۵- درصد فراوانی شاخص‌های حدی دمایی سرد تحت سناریو ssp585 طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰

Table 5. The percentage of frequency of extreme cold temperature indices under the ssp585 scenario during the 2020-2060 period

Index	≤ -1.96	> -1.96 and < 0	> 0 and < 1.96	≥ 1.96
FD	0.88	0.05	0.03	0.00
ID	0.35	0.42	0.08	0.00
TNn	0.05	0.01	0.05	0.88
TXn	0.00	0.00	0.72	0.28
TX10 P	0.00	0.21	0.77	0.03
TN10 P	0.00	0.14	0.86	0.00
CSDI	0.00	0.42	0.58	0.00



شکل ۵- روند تغییرات شاخص‌های حدی سرد آینده ایران با استفاده از مدل CNRM-CM6-1 مبتنی بر سناریوهای ssp126 و ssp585 طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۰

Fig. 5. The trend of changes in Iran's future extreme cold indices using the CNRM-CM6-1 model based on ssp126 and ssp585 scenarios during the 2020-2060 period..

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی تغییرات شاخص‌های حدی دمایی ایران‌زمین طی دوره مشاهداتی ۱۹۸۸-۲۰۱۷ و دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۶۰ مبتنی بر استفاده از داده‌های ۱۲۳ ایستگاه سینوپتیک و همچنین خروجی‌های مدل‌های CMIP6 تحت دو سناریو خوش‌بینانه SSP126 و بدبینانه SSP585 است. در حالت کلی نتایج بررسی تغییرات مکانی شاخص‌های حدی دمایی گرم و سرد در مناطق مختلف کشور بیانگر تابعیت رفتار این شاخص‌ها از موقعیت جغرافیایی و شرایط توپوگرافی و محیطی منطقه پژوهش است.

به‌طوری‌که در مناطق با ارتفاعات زیاد و عرض جغرافیایی بالاتر مقادیر این شاخص‌های حدی گرم از کمترین مقدار و در مناطق پست و کم ارتفاع این شاخص‌ها از بیشینه مقدار خود برخوردارند و در مقابل شاخص‌های حدی سرد در مرتفع (عمدتاً رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس) مقادیر بیشتری را به خود اختصاص

داده، نواحی پست و کم ارتفاع مرکزی و جنوبی کشور، عکس این حالت حکم‌فرما بوده است. بررسی نتایج حاصل از محاسبه فراوانی شاخص روزهای تابستانه (SU25) و شب‌های حاره‌ای (TR20) و همچنین شاخص‌های سرد روزهای یخبندان (fd) و روزهای یخی (id) به خوبی تأثیرگذاری تغییرات ارتفاع و عرض جغرافیایی بر شرایط دمایی و رخدادهای حدی دمایی را نشان می‌دهد. بررسی فراوانی رخداد شاخص SU25 به‌عنوان یکی از شایع‌ترین شاخص‌های حدی گرم نشان داد که بیشترین فراوانی رخداد این شاخص برای ایستگاه کنارک (فرودگاه) با ۳۶۳ روز و کمترین مقدار رخ داده مربوط به ایستگاه اردبیل ۲۱ روز است.

در مقابل بیشینه روزهای یخبندان یا شاخص fd که یکی از شایع‌ترین شاخص‌های حدی سرد در کشور است برای ایستگاه سراب با ۱۷۹ روز و حد پایینی آن با عدم رخداد یخبندان برای برخی از ایستگاه‌های جنوب غربی کشور است.

بررسی چگونگی تغییرات زمانی رخداد شاخص‌های

و گرم از موقعیت جغرافیایی و شرایط توپوگرافی و محیطی مناطق مختلف کشور است. چراکه بر اساس خروجی‌های مدل CNRM-CM6-1 برای دو سناریو ssp126 و ssp585 طی دوره ۲۰۶۰-۲۰۲۰ روند شاخص‌های حدی گرم در مناطق با ارتفاعات زیاد و عرض جغرافیایی بالاتر در مقایسه با مناطق با ارتفاع و عرض جغرافیایی کمتر، تفاوتی زیادی ندارد و رفتار روند در مناطق مختلف با ویژگی‌های جغرافیایی متفاوت با اختلاف کمی مشابه هم‌دیگر است. این شرایط برای شاخص‌های حدی سرد نیز قابل مشاهده است. بخشی از این نتایج می‌تواند تحت تأثیر عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو باشد که نمی‌توانند شرایط محیطی و پیچیدگی‌های توپوگرافی مناطق مختلف را در مدل‌سازی‌های اقلیمی به‌خوبی در نظر بگیرند.

در مجموع بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش و پژوهش‌های مشابه ذکر شده می‌توان گفت که حدی‌های دمایی گرم ایران طی دوره گذشته و آینده با افزایش و بیشتر حدی‌های سرد ایران با کاهش همراه هستند که نرخ تغییرات آنها در مناطق مختلف کشور با شدت و ضعف متفاوتی همراه خواهد بود. این شرایط به‌ویژه با مقایسه شاخص‌های کمترین دمای کمینه و بیشینه و بیشترین دمای کمینه و بیشینه مشخص می‌شود. این شرایط بیان‌کننده گرم‌تر شدن اقلیم ایران و تغییر نوع اقلیم مناطق مختلف ایران و گرایش به سمت خشکی بیشتر است. یکی از دلایل اصلی این شرایط علاوه بر ویژگی‌های محلی، تغییر در توازن انرژی زمین و نرخ بیشتر گرم شدن قطب نسبت به استوا است که موازنه انرژی زمین و در نهایت تغییر در شرایط جوی و تغییر در الگوی های آب و هوایی شده است؛ بنابراین لازم است که در سطح مختلف مدیریتی تصمیم‌گیری‌های لازم به‌منظور مقابله با کاهش پیامدهای احتمالی افزایش دما و رخدادهای حدی گرم دمایی برای مناطق مختلف ایران اتخاذ شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان "بررسی تغییرات رخدادهای فرین اقلیمی در دوره تاریخی و آینده ایران با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای

گرم طی دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸ در سطح کل کشور با استفاده از آزمون من-کندال (در سطح اعتماد پنج درصد) نشان داد که برای بیشتر ایستگاه‌ها در حالت کلی روند شاخص‌های گرم مانند شب‌های گرم، روزهای گرم، تعداد روزهای تابستانی، تعداد شب‌های حاره‌ای روند صعودی و افزایشی بوده است. در مقابل تغییرات زمانی رخداد شاخص‌های سرد با استفاده از آزمون من-کندال (در سطح اعتماد پنج درصد) نشان داد که برای بیشتر ایستگاه‌ها در حالت کلی روند شاخص‌های سرد مانند روزهای سرد، شب‌های سرد و تعداد روزهای همراه با یخبندان با روند نزولی و کاهشی همراه بوده است.

بنابراین نکته اصلی و مهمی که از بررسی کلی مجموع شاخص‌های حدی گرم و سرد در کشور برداشت می‌شود، حاکمیت روند گرمایشی در دوره آماری مورد نظر است. بررسی و تحلیل نقشه‌های ترسیم شده روند شاخص‌های حدی گرم و سرد در سطح کشور حاکی از آن است که روندهای صعودی و نزولی شاخص‌های مورد بحث در نواحی مختلف کشور با شدت و ضعف متفاوتی رخ داده که عمدتاً ناشی از تفاوت شرایط توپوگرافی، اقلیمی و محیطی مناطق مورد نظر است. نتایج این پژوهش در رابطه با رخدادهای حدی دمایی، با نتایج تحقیقات (Zhang et al., 2005; Alexander et al., 2006; Varshavian et al., 2011; Zhao et al., 2012; Miri and Rahimi, 2015; Karimi et al., 2018) که به بررسی شاخص‌های حدی دمایی پرداختند، مطابقت دارد. در تحقیقات نامبرده شده نیز بر روند افزایشی شاخص‌های حدی گرم و روند کاهشی شاخص‌های حدی سرد تأکید شده است.

نتایج بررسی شاخص‌های حدی دمایی سرد و گرم آینده ایران زمین بر اساس گزارش ششم IPCC در حالت کلی نیز نشان داد که شاخص‌های حدی سرد آینده ایران با کاهش و شاخص‌های گرم حدی آینده ایران زمین با افزایش همراه خواهند شد که روند افزایشی مقادیر شاخص حدی گرم برای بیشتر شاخص‌ها و در سطح قابل توجهی از نقاط کشور معنی‌دار است. یکی از نکات قابل توجه در بررسی مقادیر روند شاخص‌های حدی گرم و سرد از منظر مکانی عدم تابعیت رفتار شاخص‌های حدی دمایی سرد

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان قرار دارد.

و مجموعه مدل‌های CMIP" در پژوهشکده حفاظت

خاک و آب‌خیزداری است که با حمایت مالی این پژوهشکده انجام شده است که بدین‌وسیله مراتب تقدیر و تشکر اعلام می‌شود.

منابع مورد استفاده

- Alexandera, L.V., J.M., Arblaster., 2017. Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. *Weather Clim. Extrem* 15, 34-56. doi.org/10.1016/j.wace.2017.02.001
- Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., AzharEhsan, M., Islam, M.N., Adnan Abid, M., O'Brien, E., Kamil, S., Rashid, I., Nadeem, I., 2021. Projected changes in cimate extremes using CMIP6 simulations over SREXregions. *Earth Syst. Environ.* 5, 481-497. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00250-5
- An, A., Du, Y., Berndtsson, R., Niu, Z., Zhang L., Yuan, F., 2019. Evidence of climate shift for temperature and precipitation extremes across Gansu Province in China. *Theor. Appl. Climatol.* 139, 1137-1149. doi.org/10.1007/s00704-019-03041-1.
- Ayugi, B.O., Chung, E.S., Zhu, H., Ogega. O.M., Babousmail, H., Ongoma, V., 2023. Projected changes in extreme climate events over Africa under 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C global warming levels based on CMIP6 projections. *Atmos. Res.* 292, 106872. doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106872.
- Babai Fini, O., Ghasemi, E., Fattahi, E., 2014. Effect of climate change on the trends of extreme precipitation indices in Iran. *J. Spat. Anal. Environ. Hazards.* 1(3), 85-103 (in Persian).
- Babaousmail, H., Ayugi, B., Rajasekar, A., Zhu, H., Oduro, C., Mumo, R., Ongoma, V., 2022. Projection of extreme temperature events over the mediterranean and sahara using Bias-Corrected CMIP6 models. *Atmos.* 13(5), 741. doi.org/10.3390/atmos13050741
- Fathian, F., Ghadami, M., Dehghan, Z., 2023. Spatial Analysis of extreme temperature indices under climate change based on CORDEX data and a developed bias correction method in Iran. *J. Hydro. Soil Sci.* 26(4), 137-160 (in Persian).
- Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M., 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption. Cambridge University Press, New York. doi.org/10.1017/CBO9781139177245.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 2001. *Climate Change: The Scientific Basis*, 881 pages, Cambridge Univ. Press, New York.
- Im, E.S., Jung, I.W., Bae. D.H., 2011. The temporal and spatial structures of recent and future trends in extreme indices over Korea from a regional climate projection. *Int. J. Climatol.* 31(1), 72-86.
- Karimi, M., Sotoudeh F., Rafati, S., 2018. The trend analysis and forecasting of extreme temperature parameters in Southern Part of The Caspian Sea. *J. Appl. Res. Geogr. Sci.* 18(48), 93-79 (in Persian).
- Koozegaran, S., Mousavi Baigi, M., 2015. Investigation of meteorological extreme events in the North-East of Iran. *J. Water Soil.* 29 (3), 764-750 (in Persian).
- Kumar S., Merwade, V., Kam, J., Thurner, K., 2009. Streamflow trends in Indiana: Effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *J. Hydrol.* 374, 171-183.
- Miri, M., Kousari, M., Zand, M., 2022. Investigation of the efficiency of common methods of infilling missing data in the arid regions of Iran. *Watersh Manag. Eng.* 14(1), 26-39 (in Persian).
- Miri, M., Masoompour Samakosh, J., Razinei, T., Jalilian, A., Mahmodi, M., 2021. Spatial and temporal variability of temperature in Iran for the Twenty-First Century Foreseen by the CMIP5 GCM Models. *Pure Appl. Geophys.* 178, 169-184.
- Miri, M., Rahimi, R., 2015. Spatial and temporal trend analysis of temperature parameters in Iran. *Geogr. J. Territ.* 12(47), 65-79 (in Persian).
- Peterson, T.C., Taylor, M.A., Demeritte, R., Duncombe, D., Burton, L.S., Thompson, F., Porter, A., M. Mercedes, M., Villegas, E., Semexant Fils, R., Klein Tank, A., Martis, A., Warner, R., Joyette, A., Mills, W., Alexander, L., Gleason, B., 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *J. Geophys. Res.* 107 (D21), 1-19. doi.org/10.1029/2002JD002251.
- Shams, Sh., Mousavi baygi, M., 2014. The investigation of Mashhad extremum temperature in different scales. *J. Water Soil.* 28(1), 46-60. doi.10.22067/jsw.v0i0.35750 (in Persian).
- Varshavian, V., Khalili, A., Ghahraman, N., Hojam, S., 2011. Trend analysis of minimum, maximum, and mean daily temperature extremes in several climatic regions of Iran. *J. Earth Space phys.* 37(1), 179-169 (in Persian).

- Zhang, X., 2005. Trend in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *J. Geophys. Res.* 110, D22104. doi: 10.1029/2005JD006181.
- Zhou, W., Wen, Q.H., Xu, Y., Song, L., Zhang, X., 2014. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 Multimodel Ensembles. *Am. Meteorol. Soc.* 27(17), 6591-6611. doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00761.1.