



Lorestan University

Online ISSN: 2717-2325

Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas

Journal homepage: <http://www.gsma.lu.ac.ir>

Research Paper

Simulation and prediction of Iran's future heat waves based on general circulation models

Nasibeh Baharvandi ^a, Firouz Mojarrad ^{b*}, Jafar Masompour Samakoosh ^c

^aPh.D. Candidate of Climatology, Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

^bAssociate Professor of Climatology, Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

^cAssociate Professor of Climatology, Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19 March 2023;

Accepted: 4 June 2023

Available online: 18 May 2024

Keywords:

Heat waves, Iran, GCMs, CanESM2, SDSM.

ABSTRACT

In the 21st century, climate change, especially the change in the extreme values of climatic elements, is considered as a great threat to human societies and the natural environment. The main goal of the current research is to simulate and predict Iran's heat waves based on general circulation models. To identify heat waves, the "Heat Wave Magnitude Index daily" (HWMId) was used based on the maximum daily temperatures of 44 synoptic stations in the country in a 31-year period (1985 to 2015). Also, to predict the country's future heat waves with this index between 2015 and 2045, the CanESM2 GCM data has been downscaled under the RCP4.5 scenario with SDSM. The results of the research showed that, in general, there is a good match between observation and simulated maps. The average frequency of predicted annual waves in different regions of the country is between 2 and 12 occurrences, the majority of which are located on Shiraz, Shahrekord and Omidyeh stations. The biggest and greatest heat waves in the future are predicted first for summer and then with a significant difference for winter and spring. Different patterns of the spatial distribution of predicted heat waves can be observed in Iran. In the spring and summer, as well as on an annual scale, the maximum "magnitude" and "number" of the simulated heat waves are concentrated on the southwest and the western half of Iran and Gorgan station. In the autumn, the center of the maximum is located in the inner regions of Iran and it stretches in the form of an oval from the north-west to the south-east of the country. In terms of the relationship with geographical factors, in summer, by moving to higher latitudes and in spring, by moving towards the east of the country, we see a significant decrease in heat waves. The number and magnitude of heat waves in the country will increase in annual and seasonal scales until 2045, and the highest rate of increase belongs to summer. The highest number of heat waves is predicted for 2043 with 10.5 events.

1. Introduction

Heat wave is an extremely important event related to temperature and has a great impact on human health. With the current trend of global warming, heat waves are likely to appear in the future with more frequency and intensity in most areas of the world. Iran has always been exposed to heat waves due to its special climatic conditions. Therefore, forecasting the future heat waves of the country in order to plan the environment and deal with possible risks is essential. The main goal of the current research is to simulate and predict Iran's heat waves based on general circulation models.

2. Methodology

In this research, to identify heat waves, the "Heat Wave Magnitude Index Daily" (HWMId) was used based on the maximum daily temperatures of 44 synoptic stations in the country in a 31-year period (1985 to 2015). Also, in order to simulate the daily maximum temperature and predict the future heat waves of the country with this index, the data of the CanESM2 GCM under the RCP4.5 scenario between the years 2015 to 2045 has been downscaled with SDSM. The input data of SDSM includes historical data of CanESM2 GCM (1961

*Corresponding Author.

Email Addresses: nasib.araban@yahoo.com (N. Baharvandi), f_mojarrad@yahoo.com (F. Mojarrad), j.mclimate27@gmail.com (J. Masompour Samakoosh).

To cite this article:

Baharvandi, N., Mojarrad, F., Masompour Samakoosh, J. (2024). Simulation and prediction of Iran's future heat waves based on general circulation models. *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, 5(17), 169-184

Doi: 10.22034/GSMA.2024.714362

to 2005), NCEP reanalysis data (1961 to 2005) and CanESM2 GCM data (2006 to 2100) under RCP4.5 scenario. Based on the HWMId, a heat wave is a wave greater than or equal to three consecutive days with a maximum temperature above the daily threshold in the reference period. The magnitude of the heat wave in each day is calculated based on the maximum temperature of that day and the 25th and 75th percentiles of the annual maximum temperature time series in the reference period, and the magnitude of each heat wave is the sum of the magnitude values of all days of that wave. The waves were extracted in each season, based on the separate percentile threshold of that season in each station. Annual values of each station were also obtained from seasonal values. Finally, annual and seasonal maps of average "magnitude" and "number" of observed and simulated heat waves of the country with HWMId and their time trend charts were prepared and analyzed.

3. Results

In general, there is a good agreement between observation and simulated maps. The average frequency of predicted annual waves in different regions of the country is between 2 and 12 occurrences, most of which are located on Shiraz, Shahrekord and Omiyeh stations. The biggest and greatest heat waves in the future are predicted first for summer and then with a significant difference for winter and spring. Different patterns of the spatial distribution of predicted heat waves can be observed in Iran. In spring and summer, as well as on an annual scale, the maximum "magnitude" and "number" of the simulated heat waves are concentrated on the southwest and the western half of Iran and Gorgan station. In autumn, the center of the maximum is located in the inner regions of Iran and it stretches in the form of an oval from the north-west to the south-east of the country. In terms of the relationship with geographical factors, in summer by moving to higher latitudes and in spring by moving to the east of the country, we see a significant decrease in heat waves. The number and magnitude of heat waves in the country will increase in annual and seasonal scales until 2045, and the highest rate of increase is in summer. The most heat waves are predicted for the year 2043 with the number of 10.5 events.

4. Discussion

Normally, it is expected that the intensity and frequency of heat waves will be higher in the southern regions of the country. But according to the output of the model used in this research, different patterns of seasonal and annual distribution of predicted heat waves can be observed in Iran. This is related to the index used to define heat waves in this research, that is, the HWMId index, which has a percentage basis, and for this reason, the distribution patterns of the phenomenon in the country are out of the uniform and expected state; In such a way that even in the cold seasons of the year, heat waves occur in different regions of the country. For example, winter accounts for 23% of the total heat waves and 26% of the predicted severe heat waves. Nevertheless, summer is still the leading number of predicted heat waves in the country with 41% frequency. Despite the relative concept of HWMId in the definition of heat wave, the relationship between the occurrence of heat waves and some important geographical factors in the country is in accordance with the expectation, so that in the summer by moving to higher latitudes and in the spring by moving to the east of the country, we see a significant decrease in heat waves. Most likely, this reflects the role of external factors in the occurrence of heat waves in Iran, especially the greater impact of the Azores high pressure on the south-west and south of the country, which, of course, requires more studies.

5. Conclusion

Although heat waves occur in most regions of the country, in all maps, the cores of most heat waves can be seen in the center and southwest of the country around the provinces of Fars, Khuzestan and Hormozgan, and in some cases in the west of the country, which become more frequent and intense in summer. It should be acknowledged that the ability of all models, including the model used in this research, to communicate between all the factors and elements influencing Iran's heat waves, both in terms of time and space, is limited. Therefore, in order to achieve better results, it is suggested to test the ability of other models and scenarios in estimating the country's heat waves.



دانشگاه لرستان

شاپای الکترونیکی: ۲۳۲۵-۲۷۱۷

فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی

http://www.gsma.lu.ac.ir



مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی و پیش‌بینی امواج گرمایی آینده ایران بر پایه مدل‌های گردش عمومی جو

نسبیه بهاروندی^۱؛ فیروز مجرد^{۲*}؛ جعفر معصوم‌پور سماکوش^۳

^۱ دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

^{۲*} دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

^۳ دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله:

۱۴۰۱/۱۱/۱۸

پذیرش نهایی:

۱۴۰۲/۰۳/۱۴

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۰۲/۲۹

چکیده

در قرن بیست و یکم، تغییر اقلیم به‌خصوص تغییر در مقادیر حدی عناصر اقلیمی به‌عنوان یک تهدید بزرگ برای جوامع بشری و محیط طبیعی مطرح است. هدف اصلی پژوهش حاضر، شبیه‌سازی و پیش‌بینی امواج گرمایی ایران بر پایه مدل‌های گردش عمومی است. برای شناسایی امواج گرمایی، از «شاخص روزانه بزرگی موج گرما» (HWMId) بر پایه دماهای حداکثر روزانه ۴۴ ایستگاه سینوپتیک کشور در یک دوره ۳۱ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵) استفاده شده است. همچنین برای پیش‌بینی امواج گرمایی آینده کشور با این شاخص بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵، داده‌های مدل CanESM2 تحت سناریوی RCP4.5 توسط مدل SDSM ریزمقیاس‌نمایی شده است. نتایج تحقیق نشان داد که در مجموع، انطباق مناسبی بین نقشه‌های دیدبانی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. میانگین فراوانی امواج پیش‌بینی شده سالانه در مناطق مختلف کشور بین ۲ تا ۱۲ رخداد است که هسته بیشینه آنها بر روی ایستگاه‌های شیراز، شهرکرد و امیدیه قرار می‌گیرد. بیشترین و بزرگ‌ترین امواج گرمایی در آینده ابتدا برای فصل تابستان و سپس با فاصله برای فصول زمستان و بهار پیش‌بینی می‌شود. الگوهای متفاوتی از توزیع مکانی امواج گرمایی پیش‌بینی شده در ایران مشاهده می‌شود. در فصول بهار و تابستان، و همچنین در مقیاس سالانه، بیشینه «بزرگی» و «تعداد» امواج گرمایی شبیه‌سازی شده، بر روی جنوب غرب و نیمه غربی ایران و ایستگاه گرگان متمرکز است. در فصل پاییز مرکز بیشینه بر روی مناطق داخلی ایران قرار می‌گیرد و به‌صورت یک بیضی از شمال غرب تا جنوب شرق کشور کشیده می‌شود. از نظر ارتباط با عوامل جغرافیایی، در فصل تابستان با حرکت به عرض‌های جغرافیایی بالاتر و در فصل بهار با حرکت به سمت شرق کشور، شاهد کاهش معنی‌دار امواج گرمایی هستیم. تعداد و بزرگی امواج گرمایی کشور در مقیاس‌های سالانه و فصلی تا سال ۲۰۴۵ افزایش می‌یابد که بیشترین نرخ افزایشی متعلق به فصل تابستان است. بیشترین تعداد امواج گرمایی برای سال ۲۰۴۳ با ۱۰/۵ واقعه پیش‌بینی شده است.

واژگان کلیدی:

امواج گرمایی، ایران، مدل-

های گردش عمومی جو، مدل

CanESM2، مدل SDSM.

* نویسنده مسئول:

پست الکترونیک نویسندگان: nasib.araban@yahoo.com (ن، بهاروندی)؛ f_mojarrad@yahoo.com (ف، مجرد)؛ j.mclimate27@gmail.com (ج، معصوم‌پور سماکوش).

نحوه استناددهی به مقاله: بهاروندی، نسبیه، مجرد، فیروز، معصوم‌پور سماکوش، جعفر (۱۴۰۳). شبیه‌سازی و پیش‌بینی امواج گرمایی آینده ایران بر پایه مدل‌های گردش عمومی جو. فصلنامه مطالعات جغرافیایی

مناطق کوهستانی. سال پنجم، شماره ۱ (۱۷)، صص ۱۸۴-۱۶۹.

۱. مقدمه

دما و ... به عنوان متغیرهای وابسته در مقیاس منطقه‌ای، محلی و حتی نقطه‌ای استوار است (Abkar et al., 2014: 2). از میان روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، روش‌های آماری از نظر محاسباتی کم‌هزینه‌ترین هستند (Kristvik et al., 2018: 1641) و می‌توان در عرض چند ثانیه، ریزمقیاس‌نمایی را برای یک مکان یا ایستگاه مشخص طی چندین دهه انجام داد؛ درحالی‌که روش‌های دینامیکی معمولاً با محدودیت زمانی مواجه هستند (Ashraf et al., 2011: 941). از جمله مدل‌های آماری، مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری^۳ (SDSM) است که ترکیبی از مدل‌های آماری و مدل‌های تابع انتقالی می‌باشد (Wilby et al., 2007: 13). این مدل یک مدل قدرتمند برای ارزیابی تغییرات اقلیمی است (Siabi et al., 2021: 1) و به طور گسترده‌ای در سراسر جهان از آن استفاده می‌شود (Hussain et al., 2015: 271). طی پژوهش‌های جداگانه‌ای، Samadi Neghab et al. (2011) در بکارگیری مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های GCM بارش و دما در ایران، Rezaei et al. (2015) در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک کرمان و بم، Sobhani Neghab et al. (2015) در شبیه‌سازی دماهای کمینه و بیشینه روزانه و نیز بارش روزانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، Abbasnia & Toros (2016) در بررسی تغییرات دمای حداکثر آینده در برخی ایستگاه‌های ایران، Zehtabian et al. (2016) در ارزیابی عملکرد مدل‌های SDSM و CLIMGEN در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دشت قزوین، و Asakereh et al. (2019) در ارزیابی تغییرات و پیش‌بینی دمای کمینه در غرب استان مازندران از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM استفاده کرده و همگی کمابیش به کارایی این مدل در برآورد متغیرهای هواشناسی و افزایش دما در مناطق مورد مطالعه اذعان نموده‌اند. Abkar et al. (2014) نیز در پیش‌بینی شاخص‌های دمایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با دو مدل گردش عمومی جو و مدل SDSM، روند دما را در کرمان افزایشی و وقوع پدیده‌های مربوط به افزایش دما را شدیدتر و فراوان‌تر پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین خارج از کشور، Mahmood & Babel (2014) در بررسی وقایع حدی دمایی حوضه رودخانه جلوم پاکستان، Dibike et al. (2008) در بررسی عدم قطعیت ریزمقیاس‌نمایی آماری رژیم‌های

طبق گزارش هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم^۱ (IPCC: 2021)، میانگین دمای سطح جهانی بین دوره‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۱ و ۱۸۵۰-۱۹۰۰ به میزان ۱/۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته که این نرخ پس از دهه ۱۹۷۰ شتاب گرفته است. همچنین گرمایش جهانی با نرخ ۰/۱۵ تا ۰/۲۰ درجه سانتی‌گراد در هر دهه از اواخر دهه ۱۹۷۰ رخ داده است (Allen et al., 2018: 1; Morice et al., 2020: 1). پیش‌بینی می‌شود که احتمالاً این روند گرم شدن کره زمین در طول قرن ۲۱ تحت تمامی سناریوهای انتشار (RCP) ادامه یابد (Abbasnia & Toros, 2016: 1). امواج گرمایی از جمله خطرناک‌ترین تهدیدات آب‌وهوایی مرتبط با گرم شدن کره زمین هستند که بر روی جامعه، اقتصاد و محیط زیست تأثیر می‌گذارند (Keggenhoff, 2015: 308). موج گرما رویدادی بسیار مهم است، زیرا این رویداد حدی مرتبط با دماست و تأثیر زیادی بر سلامت انسان دارد و احتمال دارد که در آینده با فراوانی و شدت بیشتری در بیشتر نواحی جهان ظاهر شود. به همین دلیل به منظور توسعه استراتژی‌های انطباق و کاهش اثرات آنها در مقیاس محلی، تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی تغییرات مربوط به موج گرما ضروری است.

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد که معتبرترین آنها استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو^۳ (GCM) می‌باشد (Rezaei et al., 2015: 118). مدل‌های GCM تنها قادر به شبیه‌سازی داده‌های مدل گردش عمومی جو در سطوح بزرگ هستند. حتی اگر مدل‌های آب‌وهوای جهانی برای پیش‌بینی آینده با قدرت تفکیک بالا نیز اجرا و به کار گرفته شوند، نیاز به «ریزمقیاس‌نمایی» نتایج حاصل از این مدل‌ها در مقیاس ایستگاهی وجود خواهد داشت (Samadi et al., 2011: 741). روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به چهار گروه دینامیکی، سینوپتیکی، آماری و تابع انتقالی طبقه‌بندی می‌شود (Wilby et al., 2007: 8). اصول کلی تمام این روش‌ها بر پایه برقراری ارتباط بین متغیرهای مدل‌های گردش عمومی جو زمین (رطوبت، فشار هوا، باد و ...) به عنوان متغیر مستقل و متغیر اقلیمی نظیر بارش

3General Circulation Model

4Statistical Downscaling Model

1Intergovernmental Panel on Climate Change

2Representative Concentration Pathway

– شاخص روزانه بزرگی موج گرما HWMId

در این تحقیق برای شناسایی امواج گرمایی، از «شاخص روزانه بزرگی موج گرما»^۴ (HWMId) استفاده شده است. این شاخص بر پایه تجزیه و تحلیل دماهای حداکثر روزانه، به منظور طبقه‌بندی امواج گرمایی قوی استوار است و نابهنجاری‌های مربوط به تداوم دما را برای وقایع گرمایی شدید، به صورت یک عدد ارائه می‌کند و می‌تواند امواج گرمایی را در مکان‌ها و زمان‌های مختلف، با طول و بزرگی متفاوت، با هم مقایسه کند. بر اساس شاخص HWMId، موج گرمایی موجی است بزرگتر- مساوی سه روز متوالی با حداکثر دمای بالاتر از آستانه روزانه در دوره مرجع. آستانه، صدک ۹۰ام دماهای حداکثر روزانه است. بنابراین آستانه برای هر روز مشخص d ، عبارت است از صدک ۹۰ام سری داده A_d .

حداقل تعداد روزهای گرم متوالی، که به عنوان موج گرما در نظر گرفته می‌شود، ممکن است در مناطق مختلف متفاوت باشد. محاسبه HWMId برای یک سال خاص، یک فرایند چندمرحله- ای شامل تعیین آستانه روزانه، انتخاب موج گرما و محاسبه بزرگی شاخص HWMId است که با استفاده از مجموع بزرگی روزهای متوالی تشکیل‌دهنده یک موج گرمایی محاسبه می‌شود. مقدار بزرگی در هر روز، با رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Russo et al., 2015: 2).

$$M_d(T_d) = \begin{cases} \frac{T_d - T_{30y25p}}{T_{30y75p} - T_{30y25p}} & \text{if } T_d > T_{30y25p} \\ 0 & \text{if } T_d \leq T_{30y25p} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن T_d دمای حداکثر روزانه در روز d موج گرمایی، و T_{30y25p} و T_{30y75p} به ترتیب صدک‌های ۲۵ام و ۷۵ام سری- های زمانی ۳۱ ساله دمای حداکثر سالانه در دوره مرجع (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵) هستند. طبق تعریف، مقدار شیب $M_d(T_d)$ در هر مکان خاص، بر اساس مقادیر T_{30y25p} و T_{30y75p} مشخص می‌شود که مقدار آن در مکان‌های با آب‌وهوای مختلف متفاوت است. بر پایه توضیحات فوق، در این تحقیق استخراج امواج در هر فصل بر اساس آستانه صدکی جداگانه آن فصل در هر ایستگاه انجام شد.

دما و بارش در شمال کانادا، Getachew & Manjunatha (2021) در پیش‌بینی تغییرات بارش و دمای آینده در حوضه رودخانه «آبی» کشور اتیوپی با مدل CanESM2، و Eingrüber & Korres (2022) در شبیه‌سازی تغییر اقلیم و تحلیل روند بارش‌های شدید و سیلاب‌ها در حوضه «رور» در غرب آلمان، عملکرد مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM را در شبیه‌سازی دما مورد تأیید قرار داده‌اند.

استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM به منظور پیش‌بینی رویداد حدی امواج گرمایی در گستره ایران، که موضوع تحقیق حاضر است، امکان استفاده کاربردی از خروجی مدل‌های اقلیمی را برای تعدیل و کاهش اثرات این بحران در آینده امکان- پذیر می‌کند. تا آنجا که اطلاع در دست است، قبلاً مطالعه‌ای در زمینه پیش‌بینی امواج گرمایی با مدل‌های گردش عمومی جو در ایران به انجام نرسیده است. لذا با تولید داده‌های آب‌وهوایی آینده و پیش‌بینی وضعیت امواج گرمایی در ایران می‌توان گام‌های ضروری را در زمینه مدیریت خشکسالی و منابع آب و مقابله با سایر آثار سوء رخداد امواج گرمایی برداشت.

۲. روش تحقیق

– داده‌ها

در تحقیق حاضر برای شناسایی امواج گرمایی، از داده‌های دماهای حداکثر روزانه ۴۴ ایستگاه سینوپتیک کشور در یک دوره ۳۱ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵) که از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده، استفاده شده است. نیز برای شبیه‌سازی دمای حداکثر روزانه و پیش‌بینی امواج گرمایی آینده کشور بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵ با این شاخص، داده‌های مدل CanESM2 تحت سناریوی RCP4.5 توسط مدل SDSM ریزمقیاس‌نمایی شده است.^۲ داده‌های ورودی مدل SDSM، شامل داده‌های تاریخی مدل CanESM2 (۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵)، داده‌های بازتحلیل NCEP (۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵) و داده‌های CanESM2 (۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰) تحت سناریوی RCP4.5 است.^۳

1 The second-generation Canadian Earth System Model

۲ – برای دانلود مدل SDSM به سایت زیر مراجعه شود:
<https://sdsms.org.uk/sdsmsmain.html>

۳ – برای دانلود داده‌های مدل CanESM2 به سایت زیر مراجعه شود:

<http://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2>
4 Heat Wave Magnitude Index daily

است. به علاوه، اثرات فوران‌های آتشفشانی نیز گنجانده شده است (Chylek et al., 2011: 22897). آزمایش‌های CanESM2 شبیه‌سازی‌هایی را شامل می‌شود که توسط تغییرات کاربری زمین برای هر سناریوی RCP انجام می‌شود، لیکن شبیه‌سازی‌های اضافی بدون تغییر کاربری زمین به منظور تفکیک اثرات کاربری زمین بر روی اقلیم مورد نیاز است (Hua et al., 2015: 3662).

- مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM

Wilby et al (2002) مدل SDSM را برای ریزمقیاس‌نمایی اطلاعات بارش و دما با استفاده از روش‌های آماری ارائه کردند. این مدل با هدف تولید اطلاعات اقلیمی با قدرت تفکیک بالا (روزانه) از داده‌های شبیه‌سازی‌های درشت‌مقیاس مدل‌های گردش عمومی جو طراحی شده است. طبق پژوهش‌های انجام‌شده، SDSM به عنوان بهترین ترکیب حاصل از مولد تصادفی آب‌وهوا و روش‌های رگرسیون چندگانه خطی شناخته شده است (Koochi et al., 2014: 562).

پس از تنظیم داده‌های دمای حداکثر دیدبانی بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۶ و همچنین آماده‌سازی داده‌های بزرگ مقیاس NCEP و CanESM2، برای ورود به SDSM، ابتدا کنترل کیفیت داده‌ها به وسیله مدل انجام شد و در مرحله Screenvariables، مدل با استفاده از معادله رگرسیونی، رابطه بین داده‌های مشاهده‌ای و ۲۶ پارامتر پیش‌بینی‌کننده NCEP را محاسبه کرد تا پارامترهایی که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی دارند، انتخاب شوند و در مرحله کالیبره کردن مدل مورد استفاده قرار گیرند. پس از انتخاب پارامترهایی که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهده‌ای هر ایستگاه داشتند، مدل، با انتخاب حالت سالانه، کالیبره شد، و پس از اطمینان از همبستگی بالای بین داده‌های NCEP و داده‌های مشاهده‌ای، صحت‌سنجی مدل با داده‌های دوره ۱۹۹۸-۲۰۰۶ انجام گرفت. سپس بر اساس مدل CanESM2 تحت سناریوی RCP4.5، مقادیر حداکثر دما بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۴۵ در ۴۴ ایستگاه ریزمقیاس‌نمایی و نقشه‌های مربوطه تهیه گردید.

مقادیر سالانه هر ایستگاه با استفاده از مقادیر فصلی محاسبه گردید. بدین ترتیب که جمع تعداد امواج فصول، مشخص‌کننده تعداد امواج سالانه، و میانگین بزرگی تمام امواج فصول، مشخص‌کننده میانگین بزرگی امواج سالانه هر ایستگاه در نظر گرفته شد. بزرگی هر موج گرمایی، مجموع ارقام بزرگی تمام روزهای آن موج است. در گام بعدی، نقشه‌های میانگین بزرگی امواج گرمایی سالانه و فصلی (برای تمامی امواج گرمایی و نیز شدیدترین امواج گرمایی) و همچنین نقشه‌های میانگین تعداد امواج گرمایی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کشور با این شاخص با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به روش توابع پایه شعاعی^۱ و تابع کرنل Spline-TENSION تهیه گردید. پس از مقایسه روش‌های مختلف میان‌یابی، روش یادشده، که از جمله روش‌های قطعی میان‌یابی است، به دلیل اینکه هموارسازی را انجام نمی‌داد و میان‌یابی را بر اساس ارقام واقعی انجام می‌داد، انتخاب شد. به منظور بررسی رابطه بین متغیرها از ضریب همبستگی پیرسون، و بررسی روند تغییرات شدت و تعداد امواج گرمایی از معادلات رگرسیون خطی استفاده شد.

- نسل دوم مدل سیستم زمین کانادا (CanESM2)

مدل CanESM2 یک مدل کرین-اقلیمی جامع و کاملاً جفت-شده است که جزء سری مدل‌های CMIP5 به شمار می‌آید. این مدل شامل جو، اقیانوس و سطح زمین از طریق تبادل انرژی، تکانه، آب و گازهای کمیاب مانند CO2 است. قدرت تفکیک افقی اجزای اتمسفری و زمینی CanESM2 حدود ۲/۸ درجه است، در حالی که قدرت تفکیک افقی فیزیکی اقیانوسی آن تقریباً ۱/۴۱ درجه طول جغرافیایی در ۰/۹۴ درجه عرض جغرافیایی است (Hua et al., 2015: 3662). مدل CanESM2 ترکیبی از نسخه چهارم مدل گردش عمومی اقیانوس-اتمسفر جفت‌شده کانادا (CanCM4)^۴ و چرخه کرین زمینی بر پایه مدل اکوسیستم زمینی کانادا (CTEM)^۵ است که تبادل کرین زمین-اتمسفر را مدل‌سازی می‌کند. مدل CTEM تمام فرآیندهای اولیه اکوسیستم زمینی از جمله تغییر کاربری زمین را بر اساس تغییرات تاریخی در مناطق زراعی مدل‌سازی می‌کند. غلظت گازهای گلخانه‌ای و تغییرپذیری خورشیدی بر اساس توصیه‌های CMIP5

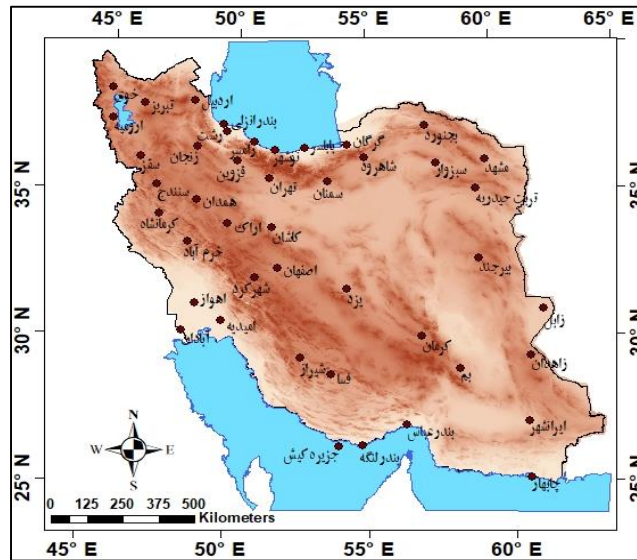
4fourth version of the Canadian coupled ocean-atmosphere general circulation model
5Canadian Earth Ecosystem Model

1Radial Basis Functions
2Deterministic Methods
3Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

۱.۲. معرفی محدوده مورد مطالعه

جغرافیایی $۴۴^{\circ}۰۲'$ تا $۶۳^{\circ}۲۰'$ شرقی در غرب آسیا و منطقه خاورمیانه قرار گرفته است (شکل ۱).

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، کشور ایران است که با مساحت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع و جمعیت تقریبی ۸۳ میلیون نفر بین عرض‌های جغرافیایی $۲۵^{\circ}۰۳'$ تا $۳۹^{\circ}۴۷'$ شمالی و طول‌های



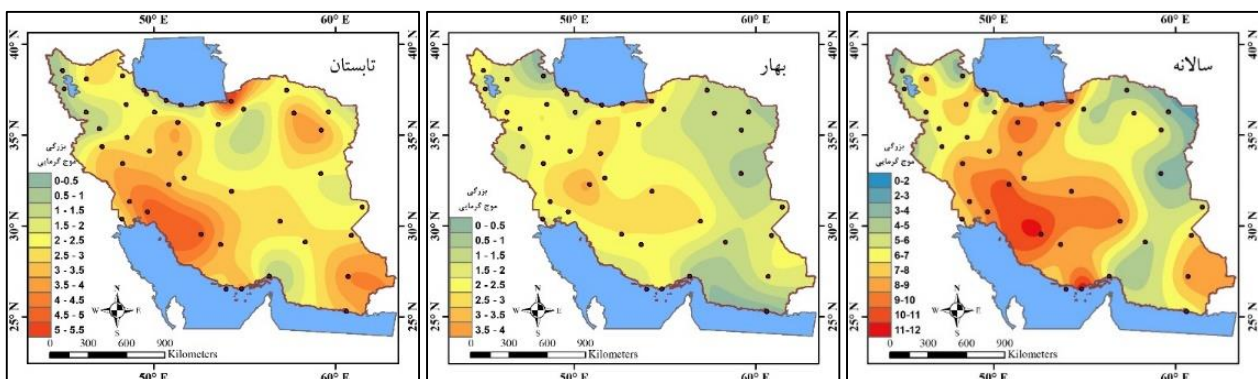
شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه (Research findings, 2021)

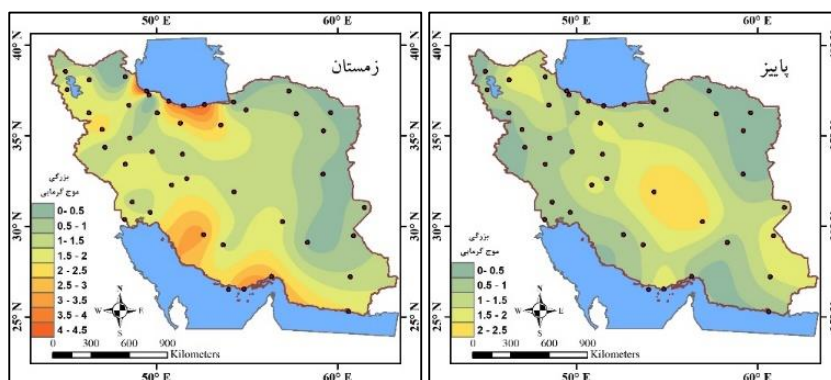
۳. یافته‌های پژوهش

توزیع جغرافیایی سالانه و فصلی تعداد امواج گرمایی پیش‌بینی شده به وسیله مدل CanESM2

به منظور درک الگوی پراکندگی مکانی تعداد امواج گرمایی پیش‌بینی شده توسط مدل آماری SDSM، نقشه‌های میانگین تعداد امواج گرمایی مربوط به دوره ۲۰۱۵-۲۰۴۵ در شکل ۲ رسم شد. بر اساس این شکل، بیشترین فراوانی امواج گرمایی در آینده برای فصول تابستان و زمستان پیش‌بینی شده است. میانگین فراوانی امواج سالانه پیش‌بینی شده در مناطق مختلف کشور بین ۲ تا ۱۲ رخداد است که هسته بیشینه آنها بر روی ایستگاه‌های شیراز،

شهرکرد و امیدیه قرار گرفته است. به طور کلی همه نقشه‌های فصلی و سالانه، به جز پاییز، بیشترین تعداد امواج گرمایی را برای جنوب غرب، غرب، سواحل دریای خزر و قسمت‌های کوچکی از جنوب شرقی کشور نشان می‌دهند. در تابستان یک هسته بیشینه در شمال شرق کشور به مناطق مذکور اضافه می‌شود. در مقابل، مناطقی از شمال غرب کشور و سواحل جنوبی دریای خزر غیر از گرگان از این محدوده خارج می‌شوند. در فصل پاییز هسته بیشینه روی مناطق داخلی ایران به سمت جنوب شرق و شمال غرب کشور قرار می‌گیرد.



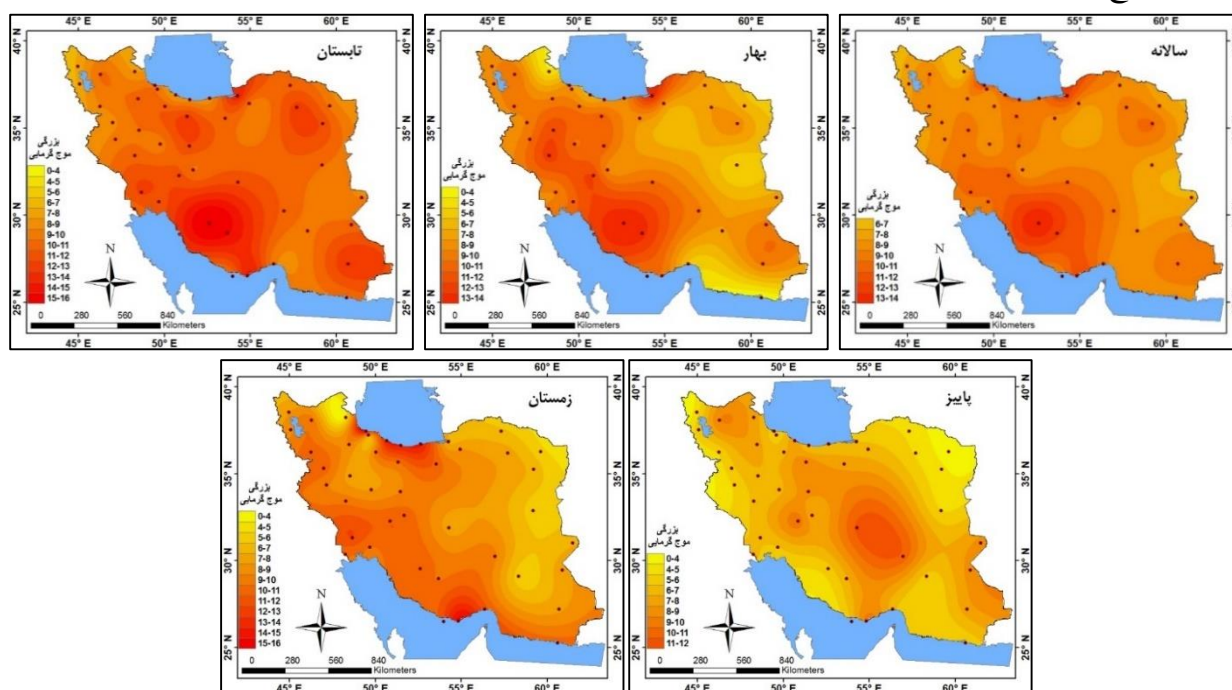


شکل ۲. توزیع سالانه و فصلی میانگین «تعداد» امواج گرمایی با مدل CanESM2 (۲۰۱۵-۲۰۴۵) (Research findings, 2021)

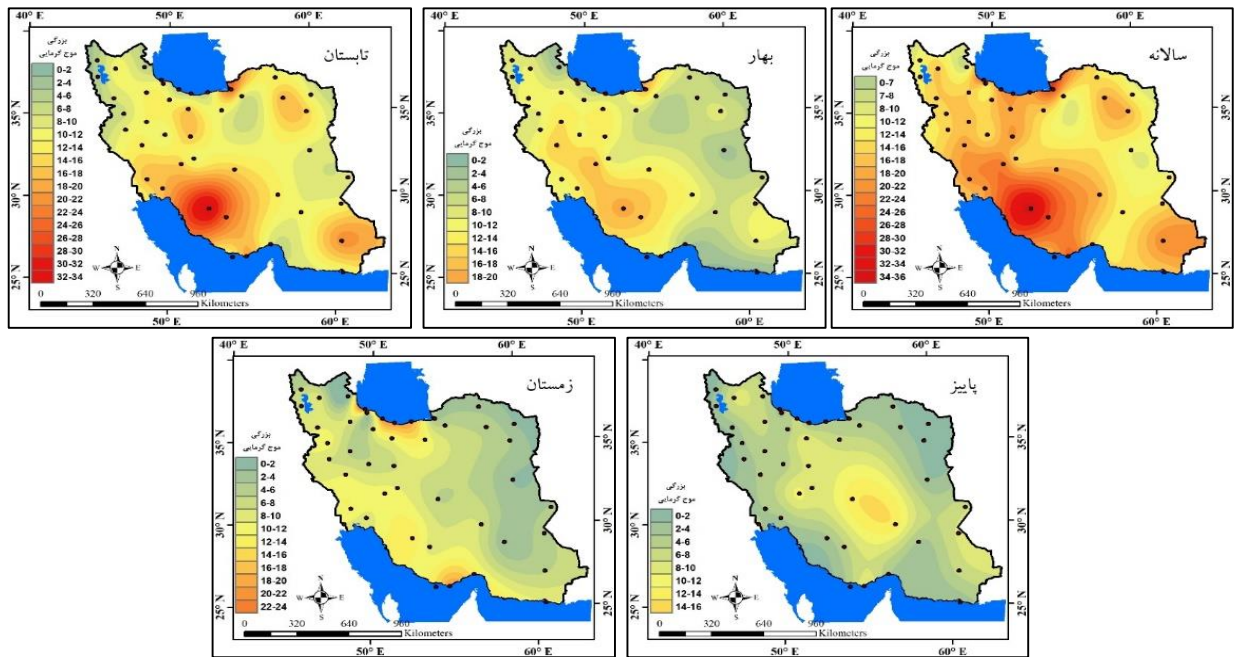
دریای خزر، سواحل خلیج فارس و دریای عمان و به طور کلی نیمه غربی کشور به جز ایستگاه‌های اراک، همدان، رشت و اردبیل مشاهده می‌شود. در فصل پاییز نیز همانند الگوی پراکندگی تعداد، نواحی داخلی ایران تحت سیطره امواج گرمایی بزرگ قرار می‌گیرد و این امواج به سمت شمال‌غرب و جنوب شرقی ایران کشیده می‌شوند. «تمام» امواج فصول تابستان و زمستان در سطح منطقه، بین مقادیر ۰ تا ۱۶ قرار می‌گیرد؛ در حالی که این رقم برای امواج بهار بین ۰ تا ۱۴ و پاییز بین ۰ تا ۱۲ است (شکل ۳). اما بزرگی «شدیدترین» امواج در طی فصول، اختلاف بیشتری با یکدیگر پیدا می‌کند (شکل ۴)، به نحوی که در تابستان بین ۰ تا ۳۴ و در پاییز بین ۰ تا ۱۲ قرار می‌گیرد.

الگوی بزرگی امواج گرمایی پیش‌بینی شده به وسیله مدل CanESM2

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب توزیع سالانه و فصلی میانگین بزرگی «تمام» و «شدیدترین» امواج گرمایی پیش‌بینی شده را با مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM نشان می‌دهد. الگوی توزیع شدت امواج گرمایی در تمام فصول و سال کاملاً بر الگوی پراکندگی تعداد امواج گرمایی منطبق است. بزرگ‌ترین امواج گرمایی ایران به طور میانگین در فصول بهار و تابستان و نیز سال بر روی ایستگاه‌های شیراز و فسا دیده می‌شود و از آنجا به سمت مناطق جنوب‌غرب و غرب گسترش پیدا می‌کند. هسته‌های بیشینه دیگری نیز بر روی نواحی شمال شرق، جنوب شرق، گرگان، تهران و کاشان قرار دارد. در زمستان امواج گرمایی شدید در نواحی جنوب‌غرب، سواحل



شکل ۳. توزیع سالانه و فصلی میانگین بزرگی «تمام» امواج گرمایی پیش‌بینی شده با مدل CanESM2 (۲۰۱۵-۲۰۴۵) (Research findings, 2021)

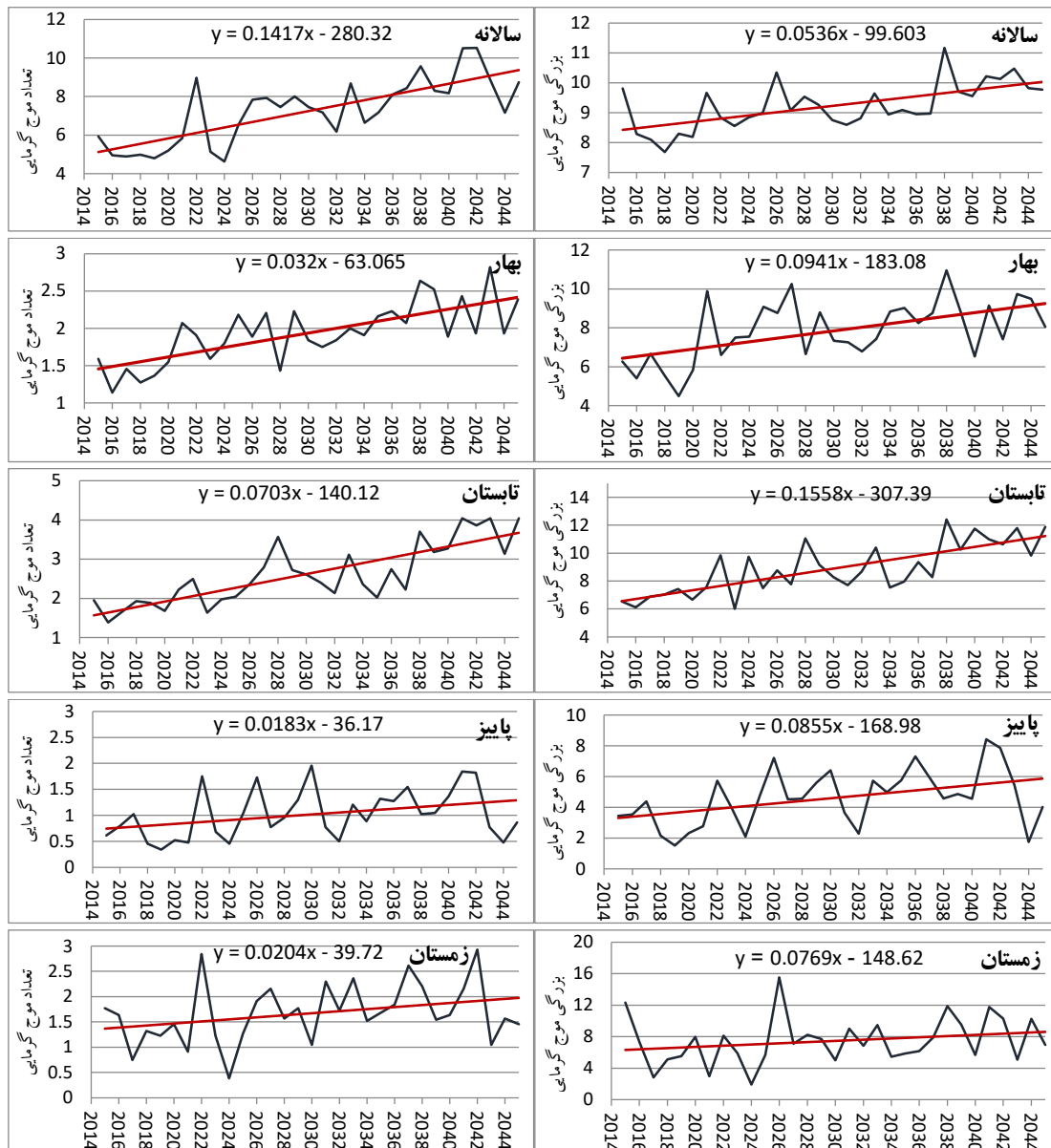


شکل ۴. توزیع فصلی میانگین بزرگی «شدیدترین» امواج گرمایی پیش‌بینی شده با مدل CanESM2 (۲۰۱۵-۲۰۴۵) (Research findings, 2021)

– روند زمانی بزرگی امواج گرمایی پیش‌بینی شده با مدل CanESM2

شکل ۵ روندهای سالانه و فصلی «بزرگی» (نمودارهای سمت راست) و «تعداد» (نمودارهای سمت چپ) امواج گرمایی پیش‌بینی شده توسط مدل جهانی CanESM2 و مدل SDSM را در دوره ۲۰۱۵-۲۰۴۵ نشان می‌دهد. «بزرگی» سالانه امواج گرمایی ایران (نمودارهای سمت راست) با شیب ۰/۰۵ در حال افزایش است. فصل تابستان با شیب سالانه ۰/۱۵ بیشترین نرخ افزایشی را در بین فصول دارد و پس از آن به ترتیب فصول بهار،

پاییز و زمستان با نرخ افزایشی کمتر قرار می‌گیرند. زمستان سال ۲۰۲۶ گرم‌ترین فصل تمام دوره پیش‌بینی است. میانگین بزرگی تمام موج‌های این فصل ۱۵/۵ برآورد شده است. همچنین روند سالانه «تعداد» امواج گرمایی پیش‌بینی شده (نمودارهای سمت چپ) نشان دهنده افزایش میانگین ۰/۱۴ موج در هر سال است. در بین فصول، فصل تابستان، همانند بزرگی امواج، با شیب ۰/۰۷ موج در سال بیشترین روند افزایشی را در بین فصول داراست. بیشترین تعداد امواج گرمایی برای سال ۲۰۴۳ با میانگین ۱۰/۵ واقعه پیش‌بینی شده است.



شکل ۵. روند سالانه و فصلی بزرگی (نمودارهای سمت راست) و تعداد (نمودارهای سمت چپ) امواج گرمایی پیش‌بینی شده با مدل CanESM2 (۲۰۱۵-۲۰۴۵) (Research findings, 2021)

عرض جغرافیایی در سطح ۰/۰۱ و امواج گرمایی بهار با عامل طول جغرافیایی در سطح ۰/۰۵ رابطه معکوس نشان می‌دهند. یعنی در فصل تابستان با حرکت به سمت شمال کشور و در فصل بهار با حرکت به سمت شرق کشور از تعداد امواج گرمایی کاسته می‌شود.

بررسی ارتباط بین عوامل جغرافیایی و امواج گرمایی پیش‌بینی شده با مدل CanESM2

به منظور درک ارتباط بین عوامل جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع) با امواج گرمایی پیش‌بینی شده، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد (جدول ۱). بر پایه ضرایب جدول، امواج گرمایی زمستان با عامل ارتفاع رابطه معنی دار و معکوس در سطح ۰/۰۵ دارند؛ به عبارتی هرچه ارتفاع بالاتر باشد، امواج گرمایی کمتر رخ می‌دهد. همچنین امواج گرمایی تابستان با عامل

جدول ۱. ضرایب همبستگی پیرسونی بین ارتفاع و عرض و طول جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه با میانگین سالانه و فصلی بزرگی امواج گرمایی پیش‌بینی شده (۲۰۱۵-۲۰۴۵)

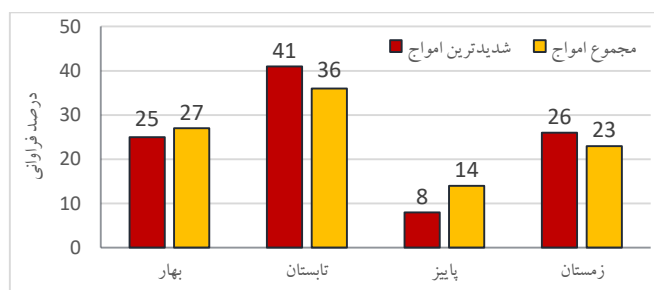
بهار	زمستان	تابستان	پاییز	سالانه	
۰/۱۹۷	*-۰/۳۱۲	-۰/۰۳۰	۰/۰۳۲	-۰/۱۴۸	ارتفاع
*-۰/۳۰۶	-۰/۲۹۳	۰/۲۹۰	۰/۰۳۱	-۰/۰۰۲	طول جغرافیایی
-۰/۰۴۷	-۰/۱۵۰	** -۰/۴۴۰	-۰/۲۵۱	-۰/۲۱۶	عرض جغرافیایی

**معنی دار در سطح ۰/۰۱، *معنی دار در سطح ۰/۰۵ (Research findings, 2021)

بایلسر، بندرانزلی، بندرعباس، رامسر و نوشهر بیشترین امواج خود را در زمستان تجربه می کنند. از نظر «شدیدترین» امواج گرمایی پیش بینی شده بر اساس خروجی مدل CanESM2، از بین ۴۴ ایستگاه، ۲۷ ایستگاه در تابستان، ۲ ایستگاه در پاییز، ۹ ایستگاه در بهار و ۱۱ ایستگاه در زمستان بیشتر امواج شدید خود را تجربه خواهند کرد. برای ایستگاه های ارومیه و سنندج بیشترین امواج شدید به طور مساوی بین دو فصل بهار و زمستان، آبادان و چابهار بین دو فصل تابستان و زمستان، و خرم آباد بین دو فصل تابستان و بهار برآورد می شود. پیش بینی می شود برای همه ایستگاه های ساحلی شدیدترین امواج در فصل زمستان به وقوع بپیوندد.

- سهم فصول سال از امواج گرمایی پیش بینی شده با مدل CanESM2

به طور کلی طبق پیش بینی های مدل CanESM2 بیشترین درصد تعداد «مجموع» و «شدیدترین» امواج گرمایی در فصل تابستان اتفاق می افتد. سهم فصول بهار و زمستان از شدیدترین امواج تقریباً مساوی است. فصل پاییز نیز کمترین سهم را هم از تعداد و هم از شدیدترین امواج داراست (شکل ۶). در بررسی ایستگاهی بر روی «تمام» امواج گرمایی، از کل ۴۴ ایستگاه، بیشترین درصد وقوع امواج گرمایی ۳۳ ایستگاه در تابستان، ۷ ایستگاه در زمستان و ۴ ایستگاه در بهار است. ایستگاه های ساحلی



شکل ۶. درصد فراوانی «مجموع» و «شدیدترین» امواج گرمایی پیش بینی شده (۲۰۱۵-۲۰۴۵) (Research findings, 2021)

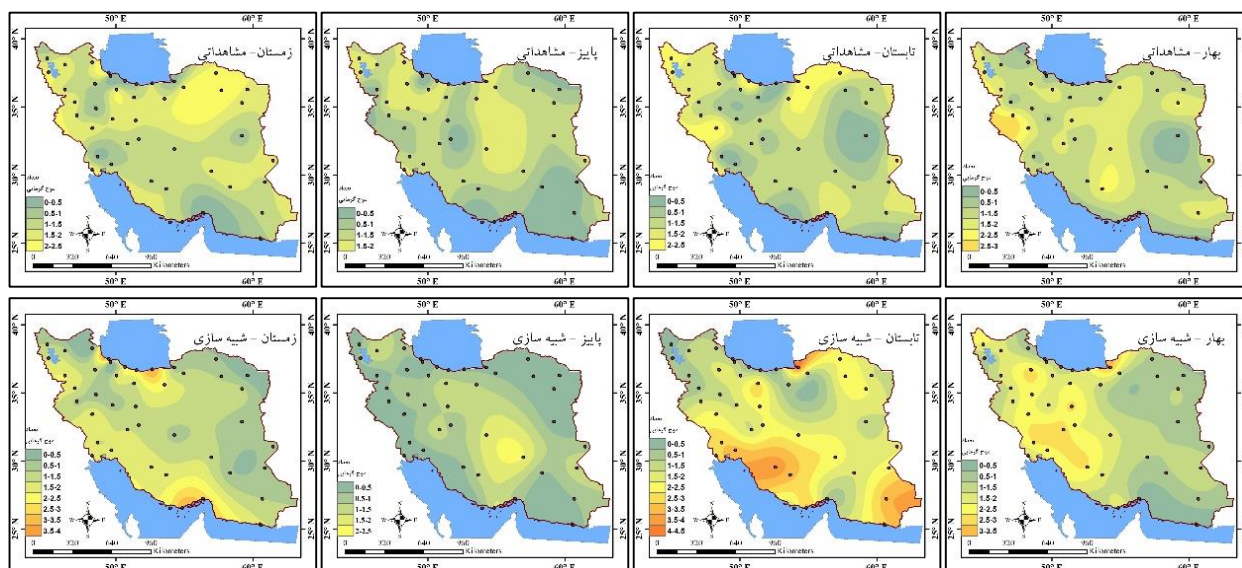
سقز، ارومیه و خوی و یک مرکز بیشینه دیگر بر روی شیراز، در فصل زمستان بر روی رشته کوه های البرز، شمال شرق کشور و همچنین شمال غرب کشور، و در فصل پاییز بر روی شمال غرب کشور، مناطق داخلی و منطقه گرگان منطبق است. بیشینه تعداد امواج گرمایی «شبه سازی شده» در فصل تابستان منطبق بر جنوب غربی و جنوب شرقی ایران و همچنین گرگان است. فراوانی امواج گرمایی شبه سازی شده در نیمه غربی کشور در فصل بهار بیشتر است و بیشینه آن بر جنوب غربی کشور و نیز منطقه گرگان قرار دارد. در فصل زمستان، این بیشینه بر سواحل دریای

- مقایسه الگوی مکانی امواج گرمایی دیدبانی و شبیه سازی شده

شکل ۷ نقشه های نمونه میانگین تعداد امواج گرمایی دیدبانی و شبیه سازی شده مدل SDSM را در دوره زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ نشان می دهد. در کل، انطباق مناسبی بین نقشه های دیدبانی و شبیه سازی شده وجود دارد. بیشینه تعداد امواج گرمایی «دیدبانی» در فصل تابستان بر روی برخی از مناطق شمال و شمال غرب ایران، دشت کویر و شمال تنگه هرمز، در فصل بهار بر روی قسمت محدودی از غرب کشور شامل ایستگاه های خرم آباد، کرمانشاه،

بیشترین تعداد امواج گرمایی در پاییز مربوط به قسمت‌های داخلی ایران است که به اطراف گسترده و البته از تعداد آنها کاسته شده است.

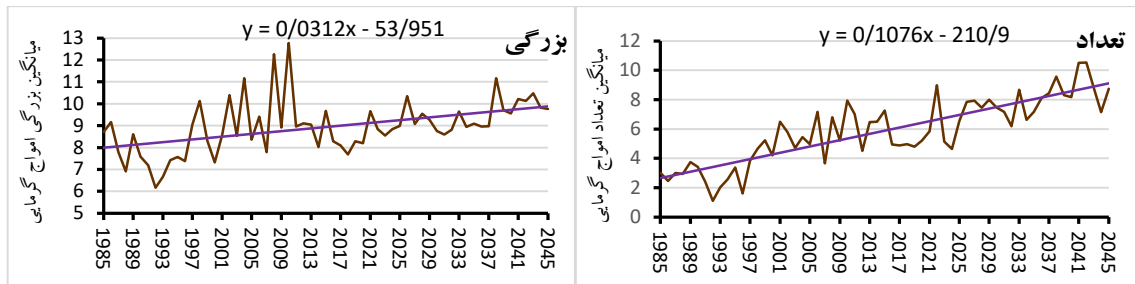
خزر و سواحل خلیج فارس و دریای عمان منطبق است. مدل SDSM تعداد امواج گرمایی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ را برای مناطق مختلف کشور به طور متوسط بین ۰ تا ۵ برآورد کرده است.



شکل ۷. مقایسه الگوهای مکانی تعداد امواج گرمایی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده فصلی (۲۰۰۶-۲۰۱۵) (Research findings, 2021)

بر اساس نمودار شکل ۸، به طور کلی تعداد امواج گرمایی ایران در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۴۵ با شیب ۰/۱ در سال، و بزرگی این امواج با شیب ۰/۰۳ در سال افزایش خواهد یافت.

- مقایسه روند زمانی امواج گرمایی مشاهداتی و پیش‌بینی شده
 به منظور مقایسه روند زمانی بزرگی و تعداد امواج گرمایی مشاهداتی و پیش‌بینی شده، میانگین سالانه امواج گرمایی در دوره‌های مشاهداتی و پیش‌بینی بر روی نمودار نشان داده شد (شکل ۸).



شکل ۸. روند تعداد و بزرگی امواج گرمایی ایران (۱۹۸۵-۲۰۴۵) (Research findings, 2021)

۴. بحث و نتیجه‌گیری

بین رخداد امواج گرمایی و برخی عوامل مهم جغرافیایی در کشور مطابق با انتظار است. به طوری که در فصل تابستان با حرکت به عرض‌های جغرافیایی بالاتر و در فصل بهار با حرکت به سمت شرق کشور، شاهد کاهش معنی‌دار امواج گرمایی هستیم. به احتمال زیاد این امر منعکس‌کننده اثر عوامل بیرونی در رخداد امواج گرمایی ایران به‌خصوص موقعیت استقرار غالب زبانه‌های پرفشار جنب‌حاره‌ای آزرور در جنوب‌غرب و جنوب کشور است که البته نیازمند انجام مطالعات بیشتری است.

در تمام نقشه‌ها، هسته‌های بیشینه امواج گرمایی مشخصی در مرکز و جنوب‌غرب کشور حوالی استان‌های فارس، خوزستان و هرمزگان و در مواردی غرب کشور مشاهده می‌شود که در تابستان فراوانی و شدت بیشتری پیدا می‌کند. تعداد سالانه پیش‌بینی‌شده امواج گرمایی در مناطق مختلف کشور بین ۲ تا ۱۲ رخداد است که هسته بیشترین آنها بین ایستگاه‌های شیراز، شهرکرد و امیدیه واقع شده است. الگوی توزیع بزرگی امواج گرمایی در کشور نیز با همین وضعیت تطابق دارد. روند تعداد و بزرگی امواج گرمایی در کشور افزایشی و در فصل تابستان نسبت به بقیه فصول چشمگیرتر است. تعداد امواج گرمایی ایران در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵ با شیب ۰/۱۴ در سال، و بزرگی این امواج با شیب ۰/۰۵ در سال افزایش خواهد یافت. در مجموع، انطباق مناسبی بین نقشه‌های دیدبانی و شبیه‌سازی شده وجود دارد.

تا آنجا که اطلاع در دست است، قبلاً مطالعه‌ای در زمینه پیش‌بینی امواج گرمایی با مدل‌های گردش عمومی جو در ایران به انجام نرسیده است؛ لذا امکان مقایسه خروجی‌های این تحقیق با تحقیقات مشابه داخلی وجود ندارد. اما به طور

کشور ایران به لحاظ برخورداری از شرایط خاص آب-وهوایی همواره در معرض هجوم امواج گرمایی قرار داشته است. از این رو پیش‌بینی امواج گرمایی آینده کشور به منظور برنامه‌ریزی محیطی و مقابله با خطرات احتمالی از ضروریات است. این مطالعه با هدف پیش‌بینی امواج گرمایی ایران و مقایسه الگوهای مکانی و روندهای زمانی آن به انجام رسیده است. در حالت عادی، انتظار بر این است که شدت و فراوانی امواج گرمایی در مناطق جنوبی کشور بیشتر باشد. اما طبق خروجی مدل به کار برده شده در این تحقیق، یعنی مدل CanESM2 و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM، الگوهای متفاوتی از توزیع فصلی و سالانه امواج گرمایی پیش‌بینی شده در ایران مشاهده می‌شود. این امر به شاخص مورد استفاده برای تعریف امواج گرمایی در این تحقیق، یعنی شاخص HWMid برمی‌گردد که مبنای صدکی دارد و به همین علت الگوهای توزیع پدیده را در کشور از حالت یکنواختی و مورد انتظار خارج می‌کند؛ به نحوی که حتی در فصول سرد سال نیز رخداد امواج گرمایی در مناطق مختلف کشور دور از انتظار نیست؛ تا جایی که فصل زمستان ۲۳ درصد از مجموع امواج گرمایی و ۲۶ درصد از امواج گرمایی شدید پیش‌بینی شده، و فصل نسبتاً سرد بهار ۲۷ درصد از مجموع امواج گرمایی و ۲۵ درصد از امواج گرمایی شدید پیش‌بینی شده را به خود اختصاص می‌دهند. با این وصف، تعداد امواج گرمایی دو فصل بهار و زمستان تقریباً مساوی است. اما هنوز فصل تابستان پیشرو تعداد امواج گرمایی پیش‌بینی شده در کشور با ۴۱ درصد فراوانی است. با وجود مفهوم نسبی شاخص صدک‌محور HWMid در تعریف موج گرمایی، باز ارتباط

اگر پیش‌بینی‌های میانگین دمای جهانی تفاوت عمده‌ای نداشته باشند. پس مطالعه یادشده از نظر رخداد موج گرمای بزرگ‌تر در آینده در اروپا، با نتایج تحقیق حاضر کاملاً مطابقت دارد.

باید اذعان کرد که توانایی تمام مدل‌ها از جمله مدل به-کاربرده شده در این تحقیق در برقراری ارتباط بین همه عوامل و عناصر تأثیرگذار روی امواج گرمایی ایران چه در بُعد زمان و چه در بُعد مکان، محدود است. لذا برای دستیابی به نتایج بهتر پیشنهاد می‌شود توانایی سایر مدل‌ها و سناریوها در برآورد امواج گرمایی کشور مورد آزمون قرار گیرد.

فهرست منابع

Abbasnia, M., & Toros, H. (2016). Future changes in maximum temperature using the statistical downscaling model (SDSM) at selected stations of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, Vol. 2, No. 68, 1-7. [10.1007/s40808-016-0112-z](https://doi.org/10.1007/s40808-016-0112-z).

Abkar, A. J., Habibnejad Roshan, M., Solaimani, K., & Naghavi, H. (2014). Investigation efficiency SDSM model to simulate temperature indexes in arid and semi-arid regions. *Irrigation and Water Engineering*, Vol. 4, No. 2, 1-17. (In Persian).

Allen, M., Dube, O., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., & Mulugetta, Y. (2018). Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable

غیرمستقیم چون رخداد امواج گرمایی با افزایش دما در ارتباط است، نتایج تحقیق حاضر در زمینه افزایش «بزرگی» و «تعداد» امواج گرمایی در آینده و نیز در زمینه کارایی مدل SDSM در برآورد دمای آینده، با نتایج اغلب تحقیقات داخلی قبلی، نظیر *Abkar et al. (2014)*، *Ashraf et al. (2011)*، *Razaei et al. (2015)*، *Zehtabian et al. (2016)*، و برخی تحقیقات خارجی مانند *Siabi et al. (2021)* و *Getachew & Manjunatha (2021)* در زمینه افزایش دما در آینده، سازگار است. اما مرتبط با نتایج تحقیق حاضر، *Russo et al. (2015)* اعتقاد دارند که احتمال تجربه یک موج گرمای بزرگ اروپایی در دهه‌های آینده در سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP4.5 است، حتی

development, and efforts to eradicate poverty. In: *Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*.

Asakereh, H., Shahbaee Kotenae, A., & Foroumadi, M. (2019). Evaluating Changes and Forecasting Minimum Temperature in the West of Mazandaran Province Using Statistical Downscaling Model SDSM. *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, Vol. 23, No. 1, 101-119. (In Persian).

Ashraf, B., Mousavi Baygi, M., Kamali, G., & Davari, K. (2011). Prediction of Seasonal Variations of Climatological Parameters over Next 20 Years by Using Statistical Downscaling Method of HADCM3 Data (Case Study: Khorasan Razavi Province). *Water and Soil*, Vol. 25, No. 4, 940-952. [10.22067/jsw.v0i0.10267](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.10267). (In Persian).

- Chylek, P., Li, J., Dubey, M. K., Wang, M., & Lesins, G. (2011). Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, Vol. 11, No. 8, 22893-22907. [10.5194/acpd-11-22893-2011](https://doi.org/10.5194/acpd-11-22893-2011).
- Dibike, Y. B., Gachon, P., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., & Nguyen, Van T.-V. (2008). Uncertainty analysis of statistically downscaled temperature and precipitation regimes in Northern Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 91, 149-170. [10.1007/s00704-007-0299-z](https://doi.org/10.1007/s00704-007-0299-z).
- Eingrüber, N., & Korres, W. (2022). Climate change simulation and trend analysis of extreme precipitation and floods in the mesoscale Rur catchment in western Germany until 2099 using Statistical Downscaling Model (SDSM) and the Soil & Water Assessment Tool (SWAT model). *Science of the Total Environment*, Vol. 838, Part 1. [10.1016/j.scitotenv.2022.155775](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155775).
- Getachew, B., & Manjunatha, B. R. (2021). Climate change projections and trends simulated from the CMIP5 models for the Lake Tana sub-basin, the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges*, Vol. 5, doi: [10.1016/j.envc.2021.100385](https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100385).
- Hua W., Chen, H., Sun, S., & Zhou, L. (2015). Assessing climatic impacts of future land use and land cover change projected with the CanESM2 model. *International Journal of Climatology*, Vol. 35, No. 12, 3661-3675. [10.1002/joc.4240](https://doi.org/10.1002/joc.4240).
- Hussain, M., Yusof, K. W., Mustafa, M. R., & Afshar, N. R. (2015). Application of statistical downscaling model (SDSM) for long term prediction of rainfall in Sarawak, Malaysia. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, Vol. 196, 269-278. [10.2495/WRM150231](https://doi.org/10.2495/WRM150231).
- IPCC. (2021). Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., P'ean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, In Press.
- Keggenhoff, I., Elizbarashvili, M., & King, L. (2015). Heat wave events over Georgia since 1961: Climatology, Changes and Severity. *Climate*, Vol. 3, No. 2, 308-328. [10.3390/cli3020308](https://doi.org/10.3390/cli3020308).
- Kristvik, E., Kleiven, G. H., Lohne, J., & Muthanna, T. M. (2018). Assessing the robustness of raingardens under climate change using SDSM and temporal downscaling. *Water Science & Technology*, Vol. 77, No. 6, 1640-1650. [10.2166/wst.2018.043](https://doi.org/10.2166/wst.2018.043).
- Koohi, M., & Sanainejad, S. H. (2014). Investigating Climate Change Scenarios Based on the Results of Two Micro-Scale Statistical Calibration Methods for Reference Evapotranspiration Variables in Urmia Region. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, Vol. 7, No. 4, 559-574. (In Persian).
- Mahmood, R., & Babel, M. S. (2014). Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum River basin. *Weather and Climate Extremes*, Vol. 5-6, No. 1, 56-66. [10.1016/j.wace.2014.09.001](https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.09.001).
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Winn, J., Hogan, E., Killick, R., Dunn, R., Osborn, T., Jones, P., & Simpson, I. (2020). An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 126, No. 3, 1-28. [10.1029/2019JD032361](https://doi.org/10.1029/2019JD032361).
- Rezaei, M., Nohtani, M., Abkar, A., Rezaei, M., & Mirkazehi Rigi, M. (2015). Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Temperature Indexes in Two Arid and Hyper Arid Regions (Case Study: Kerman and Bam). *Journal of Watershed Management Research*, Vol. 5, No. 10, 117-131. (In Persian).
- Russo, S., Sillmann, J., & Fischer, E. M. (2015). Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, Vol. 10, 1-15. [10.1088/1748-9326/10/12/124003](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003).
- Samadi, S., Ehteramian, K., & Sari Sarraf, B. (2011). SDSM ability in simulate predictors for climate detecting over Khorasan province. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 19, 741-749. [10.1016/j.sbspro.2011.05.193](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.193).
- Samadi Neghab, S., Habibi Nokhandan, M., & Zabol Abbasi, F. (2011). Using SDSM Model to Downscaling Precipitation and Temperature GCM Data for Study Station Climate Predictions over Iran. *Journal of Climate Research*, Vol. 2, No. 5-6, 57-68. (In Persian).
- Siabi, E. K., Kabobah, A. T., Akpoti, K., Anornu, G. K., Amo-Boateng, M., & Nyantakyi, E. K. (2021). Statistical downscaling of global

- circulation models to assess future climate changes in the Black Volta basin of Ghana. *Environmental Challenges*, Vol. 5, 1-18. [10.1016/j.envc.2021.100299](https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100299).
- Sobhani, B., Eslahi, M., & Babaeian, I. (2015). Efficiency of Statistical Downscaling Models of SDSM and LARS-WG in the Simulation of Meteorological Parameters in Lake Urmia Basin. *Physical Geography Research Quarterly*, Vol. 47, No. 4, 499-516. [10.22059/jphgr.2015.56046](https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.56046). (In Persian).
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 17, No. 2, 145-157. [10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3).
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2007). SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Version 4.2 User Manual, Lancaster University, Lancaster/ Environment Agency of England and Wales, Lancaster, 1-94.
- Zehtabian, Gh. R., Salajegheh, A., Malekian, A., Boroomand, N., & Azareh, A. (2016). Evaluation and comparison of performance of SDSM and CLIMGEN models in simulation of climatic variables in Qazvin plain. *Desert*, Vol 21, No. 2, 147-156. [10.22059/jdesert.2016.60348](https://doi.org/10.22059/jdesert.2016.60348).