




## Evaluating the effects of climate change on the climatic classification in Iran

Pouya Allahverdipour<sup>1\*</sup>, Mohammad Ali Ghorbani<sup>2</sup>, Esmail Asadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

The average weather condition in a specific region is defined as climate. The diversity of climatic variables is effective in determining the climate of a region and causes the formation of diverse and different climates. One of the effects of climate change is that causes an increase or decrease in a climate zone and, as a result, a shift in climate zones. Climate classification is an attempt to identify and recognize the differences and similarities of climate in different regions and to discover the relationships between different components of the climate system. Climate classification indicators are used to visualize current climate and quantify future changes in climate types as predicted by climate models. The studies conducted on these methods show that climatic variables affecting experimental methods such as temperature and precipitation should be considered effective variables in determining climatic boundaries in a new way. The De Martonne aridity index is an empirical index for climate classification based on two components, precipitation and temperature. Due to its high accuracy, and the use of variables that are more accessible and can be measured at most meteorological stations, De Martonne's index has received more attention from researchers and has been used in many studies of climate change. Therefore, the purpose of this research is to evaluate the effects of climate change on the climatic classification of Iran.

#### Materials and Methods

To investigate the effects of climate change on the climatic classification of Iran, the De Martonne aridity index has been used. To show the effects of climate change in the past and the future on Iran's climate, data from 120 meteorological stations of Iran, which are distributed in different locations with different climates, were collected and analyzed in the statistical period of 1933-2022. The climatic condition of Iran in the base period was determined according to the De Martonne aridity index. In addition, to investigate the effects of climate change in the coming periods on the climatic classification of Iran, the data related to the output of the CanESM2 model, which is one of the CMIP5 models that is hybridized by the Canadian Center for Climate Modeling and Analysis (CCCMA) by combining CanCM4 and CTEM models, were used. To examine the changes in climatic classes of Iran under different scenarios and conditions, the output of two release scenarios, RCP2.6 and RCP8.5, were utilized. Due to the large-scale output of General Circulation Models (GCM), the output of this model was downscaled using the LARS-WG model. The LARS-WG model, which is considered one of the most famous and widely used models for downscaling weather data, was used to generate precipitation values, minimum and maximum temperatures, as well as daily radiation, under base and future climate conditions.

#### Results and Discussion

According to the results, the majority of Iran (90.49%) has an arid and semi-arid climate. The percentage of arid climate is 68.82%, while that of semi-arid climate is 21.97%. Therefore, Iran should be called an arid and semi-arid country in terms of climate. By analysis of the effects of climate change indicates that in future periods, the precipitation and average temperature will increase. This increase will be greater under the RCP8.5 scenario than the RCP2.6 scenario. The study of the climatic classification of Iran in the coming periods indicates that the majority of the country will continue to experience arid and semi-arid climates. The sum of arid and semi-arid climates will reach its lowest level in the period of 2020-2041. This is following the RCP2.6 scenario, after which these climates are expected to expand once more. According to the RCP8.5 scenario, during the periods of 2021-2040, 2041-2060, and 2061-2080, the total area of arid and semi-arid climates will decrease. However, from 2081 to 2100, this trend will

be reversed, increasing in these climates. According to the results of this research and according to the forecast, although according to different release scenarios, the difference in the area of different classes can be seen, in the future, arid and semi-arid climatic zones will still form the majority of Iran.

### Conclusion

In this research, by using the latest available data, Iran's climate is classified by the De Martonne aridity index, and then the changes in Iran's climate classes under the effects of climate change in the future periods, according to the output of the CanESM2 model from the CMIP5 modes, which is downscaled using the LARS-WG model. It has been investigated according to two emission scenarios, RCP2.6 and RCP8.5. The results indicated that the arid climate with 68.82% and the semi-arid climate with 21.97% constitute the largest area of Iran. The remaining climatic classes collectively comprise less than 10% of Iran's area. Therefore, Iran should be called an arid and semi-arid country in terms of climate. Investigating the effects of climate change on precipitation and temperature showed that both precipitation and average temperature will increase in future periods. However, the increase in both variables will be greater under the RCP8.5 scenario. The study of the climatic classification of Iran in the coming periods indicates that the majority of the country will continue to experience arid and semi-arid climates. The findings of this study indicate the necessity of addressing the issue of climate change and the importance of involving experts and macro planners in the analysis of the effects of climate change. It is suggested to use the output of other GCM models in future research due to the uncertainty of climate scenarios. Also, the use of diverse climate classification methods that incorporate other variables is suggested for more precise identification of climate characteristics

**Keywords:** Climate change, Climatic classification, De Martonne aridity index, CanESM2, RCP scenario, LARS-WG

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgment

The authors sincerely thank the Iranian Meteorological Organization for providing the necessary data.

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data availability statement

All data generated during the manuscript analysis are included in the article. Further datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### Authors' contribution

**Pouya Allahverdipour:** Resources, software, writing, original draft preparation; **Mohammad Ali Ghorbani:** Conceptualization, supervision; **Esmail Asadi:** Conceptualization, supervision

\*Corresponding Author, E-mail: a.pouya1400@ms.tabrizu.ac.ir

**Citation:** Allahverdipour, P., Ghorbani, M.A., & Asadi, E. (2024). Evaluating the effects of climate change on the climatic classification in Iran. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 95-112.  
DOI:10.22098/mmws.2023.12755.1271

Received: 21 April 2023, Received in revised form: 16 May 2023, Accepted: 16 May 2023, Published online: 16 May 2023  
*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 95-112

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر طبقه‌بندی اقلیمی ایران

پویا الله‌پوردی پور<sup>۱\*</sup>، محمدعلی قربانی<sup>۲</sup>، اسماعیل اسدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

موضوع تغییر اقلیم به دلیل پیامدهای آن بر تمام ابعاد زندگی بشری، یکی از مباحث مهمی محسوب می‌شود که بررسی تأثیرات مختلف آن علاقه‌مندی فراوانی میان پژوهش‌گران به وجود آورده است. تأثیرات تغییر اقلیم می‌تواند باعث افزایش یا کاهش در سطح یک منطقه اقلیمی شده و در نتیجه موجب جابه‌جایی مناطق اقلیمی شود. هدف از این پژوهش ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر طبقه‌بندی اقلیمی ایران است. در این پژوهش از داده‌های ۱۲۰ ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۲۰۲۲-۱۹۹۳ استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیرات تغییر اقلیم در دوره‌های آتی، برونداد مدل CanESM2 از سری مدل‌های CMIP5 تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 مورد استفاده قرار گرفته و ریزمقیاس‌سازی با مدل LARS-WG انجام شده است. با توجه به نتایج، قسمت اعظم ایران (۹۰/۴۹ درصد) اقلیمی خشک و نیمه‌خشک دارد، به طوری که اقلیم خشک ۶۸/۸۲ درصد و اقلیم نیمه‌خشک ۲۱/۹۷ درصد از آن را تشکیل می‌دهند. بنابراین، باید ایران را از نظر اقلیمی کشوری خشک و نیمه‌خشک نامید. با بررسی تأثیرات تغییر اقلیم مشاهده می‌شود که در دوره‌های آتی میزان بارش و دمای میانگین سالانه افزایش خواهد یافت و این افزایش تحت سناریوی RCP8.5 بیش‌تر از سناریوی RCP2.6 خواهد بود. بررسی طبقه‌بندی اقلیمی ایران در دوره‌های آتی نشان می‌دهد که بیش‌تر مساحت ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک باقی خواهد ماند. مجموع اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۱ و تحت سناریوی RCP2.6 به کم‌ترین میزان خود خواهد رسید و پس از آن، دوباره این اقلیم‌ها گسترش خواهند یافت. طبق سناریوی RCP8.5 در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ مجموع مساحت اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک کاهش خواهد بود، اما پس از آن و در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ این روند برعکس شده و افزایش این اقلیم‌ها را شاهد خواهیم بود. با توجه به نتایج این پژوهش و طبق پیش‌نگری انجام یافته، هرچند که طبق سناریوهای انتشار متفاوت، تفاوت در مساحت طبقه‌های مختلف دیده می‌شود، اما در آینده نیز همچنان طبقه‌های اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قسمت اعظم ایران را تشکیل خواهند داد. نتایج این پژوهش به دلیل قرارگیری ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، لزوم توجه به پدیده تغییر اقلیم و ضرورت توجه صاحب‌نظران و برنامه‌ریزان کلان کشوری به تأثیرات این پدیده را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر اقلیم، سناریوهای RCP، شاخص خشکی دمارتن، طبقه‌بندی اقلیمی، CanESM2، LARS-WG

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.pouya1400@ms.tabrizu.ac.ir

**استناد:** الله‌پوردی پور، پویا، قربانی، محمدعلی، و اسدی، اسماعیل (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر طبقه‌بندی اقلیمی ایران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۹۵-۱۱۲.

DOI:10.22098/mmws.2023.12755.1271

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۹۵ تا ۱۱۲

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

متوسط وضعیت آب و هوایی در یک منطقه به‌عنوان اقلیم و تغییر در متوسط دمای زمین و روند افزایشی آن، با توجه به متوسط آب و هوای سراسر جهان، به‌عنوان تغییر اقلیم توصیف می‌شود (Su et al., 2021). تنوع عناصر اقلیمی در تعیین اقلیم یک ناحیه مؤثر بوده و باعث شکل‌گیری اقلیم‌های متنوع و متفاوت می‌شود (Hedayati Dezfouli and Kakavand, 2012). امروزه موضوع تغییر اقلیم به‌دلیل پیامدهای محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی، به یکی از مباحث مهم تبدیل شده و علاقه‌مندی فراوانی برای آشکارسازی نمودهای مختلف تغییر اقلیم و تحلیل علمی آن در بین پژوهش‌گران ایجاد شده است (Fathizad et al., 2021). امروزه محور اصلی پژوهش‌های تغییر اقلیم استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۱</sup> (GCM) و سناریوهای منتشر شده توسط هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۲</sup> (IPCC) است. این مدل‌ها ابزارهای پیشرفته‌ای هستند که شرایط اقلیمی را در مقیاس جهانی و قاره‌ای توضیح داده و برای بررسی تغییرات اقلیم در گذشته، حال و آینده تحت سناریوهای مختلف تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای<sup>۳</sup> (RCP) استفاده می‌شوند (Jafary Godeneh et al., 2020). پژوهش‌ها در زمینه تغییر اقلیم بر اساس تمام مدل‌های GCM نشان‌دهنده افزایش دما در سطح زمین و افزایش شدت بارش و مقدار آن بر اثر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در قرن حاضر است (Hajam et al., 2008). اما به‌دلیل این که مدل‌های GCM دارای تفکیک افقی پایینی هستند، پیش از استفاده از این مدل‌ها باید آن‌ها را ریزمقیاس‌سازی<sup>۴</sup> کرد (Zarrin et al., 2022). ریزمقیاس‌سازی این مدل‌ها به دو روش آماری و دینامیکی انجام می‌شود که هر دو، روش‌های تثبیت‌شده و قابل‌قبولی هستند. از بین مدل‌های موجود، مدل LARS-WG که جزء روش‌های ریزمقیاس‌سازی آماری محسوب می‌شود به‌دلیل دسترسی راحت‌تر، بررسی سریع‌تر و اجرا روی تمامی سیستم عامل‌ها و هزینه محاسباتی کم‌تر، یکی از بهترین مدل‌های ریزمقیاس‌سازی است که در سطح وسیعی در دنیا به‌کار گرفته می‌شود (Casanueva et al., 2016).

از اثرات تغییر اقلیم این است که باعث افزایش یا کاهش یک منطقه اقلیمی شده و در نتیجه منجر به جابه‌جایی در مناطق اقلیمی می‌شود و این مسأله عامل ایجاد تنش در جوامع گیاهی و جانوری چنین مناطقی می‌شود (Raziei, 2017). طبقه‌بندی اقلیمی تلاشی برای شناسایی و تشخیص تفاوت‌ها و شباهت‌های اقلیمی در مناطق مختلف جغرافیایی و کشف روابط بین اجزای

مختلف سیستم اقلیمی است (Feddema, 2005). سیستم‌های طبقه‌بندی اقلیمی برای تجسم اقلیم کنونی و کمی‌سازی تغییرات آبی در انواع اقلیم، همان‌طور که به‌وسیله مدل‌های آب و هوایی پیش‌بینی می‌شود، استفاده می‌شوند (Navarro et al., 2022). مطالعه سیر تحول روش‌های طبقه‌بندی اقلیمی نشان می‌دهد که شناخت مناطق اقلیمی دغدغه بسیاری از دانشمندان از زمان یونان باستان بوده است و این مسأله به توسعه روش‌های مختلف طبقه‌بندی اقلیمی منجر شده است (Feddema, 2005). روش‌های آماری نوین در طبقه‌بندی اقلیم سعی بر رفع نواقص روش‌های سنتی داشته‌اند. بررسی‌های انجام شده روی این روش‌ها نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی مؤثر بر روش‌های تجربی مانند دما و بارندگی باید به‌عنوان عوامل مؤثر در تعیین مرزهای اقلیمی به روشی نوین مورد توجه واقع شوند (Abbasi et al., 2022). شاخص خشکی دمارتن<sup>۵</sup> یک شاخص تجربی برای طبقه‌بندی اقلیمی است که اساس آن بر دو مؤلفه بارش و دما استوار است. روش دمارتن به‌دلیل دقت بالا، استفاده از داده‌های بارش و دما که دسترسی بیش‌تری به آمار آن‌ها نسبت به دیگر متغیرهای هواشناسی وجود دارد و در همه ایستگاه‌های سینوپتیک قابل اندازه‌گیری می‌باشند، بیش‌تر توسط پژوهش‌گران مورد توجه بوده و برای انجام مطالعات اقلیمی در پژوهش‌های زیادی استفاده شده است.

از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه Rahimi et al. (2013) که تغییرات فضایی طبقه‌های اقلیمی ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم با روش دمارتن گسترش داده شده، اشاره کرد. آن‌ها از مدل‌های CSIRO-MK3، HadCM3 و CGCM3 تحت سناریوهای A1B و A2 که در گزارش چهارم IPCC ارائه شده‌اند، استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که اقلیم بسیار سرد-خشک (A1.1m2) بیش‌ترین مساحت کشور (۲۱/۴ درصد) را پوشش می‌دهد در حالی که در هر دو سناریوی بررسی شده، در دهه ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰، اقلیم بسیار خشک-معتدل (A1.1m3) و بسیار خشک-گرم (A1.1m4) اقلیم غالب خواهند بود و بیش‌ترین مساحت کشور را به‌ترتیب با حدود ۲۱ و ۳۸ درصد تحت پوشش قرار خواهند داد. در پژوهش Kazemi and Sharifi (2018) نیز برای بررسی و تحلیل عوامل مؤثر بر جریان پایه در اقلیم‌های مختلف ایران از روش دمارتن برای طبقه‌بندی اقلیمی استفاده شد. نتایج نشان داد ایران به شش منطقه اقلیمی مطابق با ضرایب خشکی دمارتن تقسیم می‌شود، به‌طوری که منطقه خشک ۵۸/۳۱ درصد، نیمه‌خشک ۲۳/۷۵ درصد، مدیترانه‌ای ۴/۹۳

<sup>۴</sup> Downscaling

<sup>۵</sup> De Martonne aridity index

<sup>۱</sup> General circulation model

<sup>۲</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

<sup>۳</sup> Representative concentration pathway

ورامین از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ با استفاده از داده‌های CMIP5<sup>۴</sup> بررسی و ریزمقیاس‌سازی داده‌ها با مدل LARS-WG انجام شد. سپس داده‌های دما و بارش تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره آتی شبیه‌سازی و با دوره پایه مقایسه شد. به‌طور میانگین دمای متوسط در منطقه مطالعاتی، تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب افزایش یک و ۱/۵ درجه سانتی‌گراد را در دوره آتی نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کردند. هر دو سناریوی تغییر اقلیم وضعیت خشک را برای منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی کردند. همچنین، نتایج پژوهش Khalili et al. (2022) نشان داد که ۸۵ درصد خشکی‌های جهان در قلمرو اقلیم‌های طبقه‌بندی دمارتن قرار دارند. در نهایت، Abbasi et al. (2022) به مقایسه رویکرد تجربی طبقه‌بندی اقلیم شامل روش‌های دمارتن، دمارتن گسترش داده شده<sup>۵</sup>، تورنت و ایت-ماتر<sup>۶</sup> و روش سازمان هواشناسی ایران<sup>۷</sup> (IRIMO) در ایران با استفاده از داده‌های بیشینه و کمینه دما و نیز بارش ۳۵ ایستگاه هواشناسی در دوره ۵۰ ساله ۲۰۱۵-۱۹۹۶ پرداختند. نتایج نشان داد که طبق روش دمارتن بخش اعظم کشور (۶۹ درصد) خشک و ۲۲ درصد نیمه‌خشک است. کوچک‌ترین پهنا اقلیمی (۰/۰۲ درصد) متعلق به طبقه بسیار مرطوب نوع "ب" است. سایر انواع اقلیم نیز بین یک تا سه درصد از مساحت را تشکیل می‌دهند.

با توجه به مطالب فوق، با وجود این که پژوهش‌های متعددی در زمینه طبقه‌بندی اقلیمی با روش‌های مختلف در ایران و سراسر دنیا انجام شده است، اما بررسی تأثیرات تغییر اقلیم آینده بر تغییرات طبقه‌های اقلیمی موضوع تازه‌ای است که نیازمند پژوهش زیادی است. بنابراین، در پژوهش حاضر از خروجی مدل‌های مربوط به گزارش پنجم IPCC برای سال‌های آینده استفاده می‌شود و پژوهش‌های قبلی در زمینه طبقه‌بندی اقلیمی را با استفاده از روش دمارتن برای دوره‌های قبلی (اقلیم گذشته) و دوره‌های آتی (اقلیم‌های آینده) بر روزرسانی کرده و توسعه می‌دهد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

کشور ایران از نظر جغرافیایی بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۵ تا ۶۳ درجه طول شرقی قرار دارد. مساحت ایران در حدود ۱/۶۴۸ میلیون کیلومتر مربع بوده و به این علت که اختلاف زیادی در عرض جغرافیایی بین شمالی‌ترین و جنوبی‌ترین نقطه آن وجود دارد و وجود پستی و بلندی‌ها و رشته‌کوه‌ها و دشت‌های

درصد، نیمه‌مرطوب ۳/۳۴ درصد، مرطوب ۳/۸۷ درصد و بسیار مرطوب ۵/۸۰ درصد از مساحت حوزه‌های آبخیز کشور را تشکیل می‌دهند. در پژوهش دیگری، (Radaković et al. (2018) به تحلیل خشکی در منطقه مرکزی کشور صربستان با استفاده از شاخص‌های دمارتن و شاخص ترکیبی پینا<sup>۱</sup> در طول دوره ۱۹۴۹ تا ۲۰۱۵ پرداختند. ایشان برای محاسبه شاخص‌های خشکی در دوره ۶۶ ساله از داده‌های ۲۶ ایستگاه هواشناسی استفاده کردند. طبق طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن، منطقه صربستان مرکزی به پنج، سه و چهار طبقه اقلیمی، به ترتیب در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه طبقه‌بندی شد. در مطالعه‌ای، (Pellicone et al. (2019) تغییرات فضایی خشکی در کالابریای جنوبی در کشور ایتالیا را با استفاده از شاخص خشکی دمارتن ارزیابی کردند. توزیع فضایی این شاخص نشان داد که اکثریت منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم مرطوب است و مناطق نیمه‌خشک عمدتاً در مناطق ساحلی شناسایی شدند.

از سایر پژوهش‌ها (Gavrilov et al. (2020) برای بررسی توزیع جغرافیایی خشکی و روند سالانه آن در حوضه پانونی<sup>۲</sup> مرکزی و جنوبی که شامل قسمت‌هایی از کشور مجارستان و وویودینا در شمال کشور صربستان است، از ضریب خشکی دمارتن استفاده کردند. آن‌ها از داده‌های اقلیمی ۷۸ ایستگاه هواشناسی در سه دوره شامل ۲۰۱۷-۱۹۳۱ در مجارستان، ۲۰۱۷-۱۹۴۹ در منطقه وویودینا و دوره آماری مشترک ۲۰۱۷-۱۹۴۹ در مجارستان و وویودینا بهره گرفتند. مطابق نتایج این پژوهش سه طبقه خشکی در سطح سالانه، پنج طبقه خشکی در سطح فصلی و چهار طبقه خشکی در سطح ماهانه مشخص شدند و خشکی سالانه در هر سه دوره، هیچ روندی نشان نداد. در زاگرس جنوبی نیز (Mohammadi et al. (2021) به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل LARS-WG<sup>۳</sup> و سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 پرداخته و به‌منظور طبقه‌بندی اقلیمی این مناطق از روش دمارتن بهره گرفتند. نتایج نشان داد اقلیم نیمه‌خشک بیش‌ترین درصد سطح پوشش در منطقه مورد مطالعه را دارد. طبق این پژوهش و در مجموع، پنج مورد از ایستگاه‌ها دارای اقلیم خشک، ۲۰ ایستگاه اقلیم نیمه‌خشک، هشت ایستگاه اقلیم مدیترانه‌ای و یک ایستگاه دارای اقلیم بسیار مرطوب هستند. در دشت ورامین (Azizi et al. (2021) اثرات تغییر اقلیم بر روند خشکسالی را با استفاده از شاخص دمارتن بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها روند تغییرات بارش و دمای ایستگاه سینوپتیک

<sup>۵</sup> Extended de martonne

<sup>۶</sup> Thornthwaite and mather

<sup>۷</sup> I.R. of Iran meteorological organization

<sup>۱</sup> Pinna combinative index

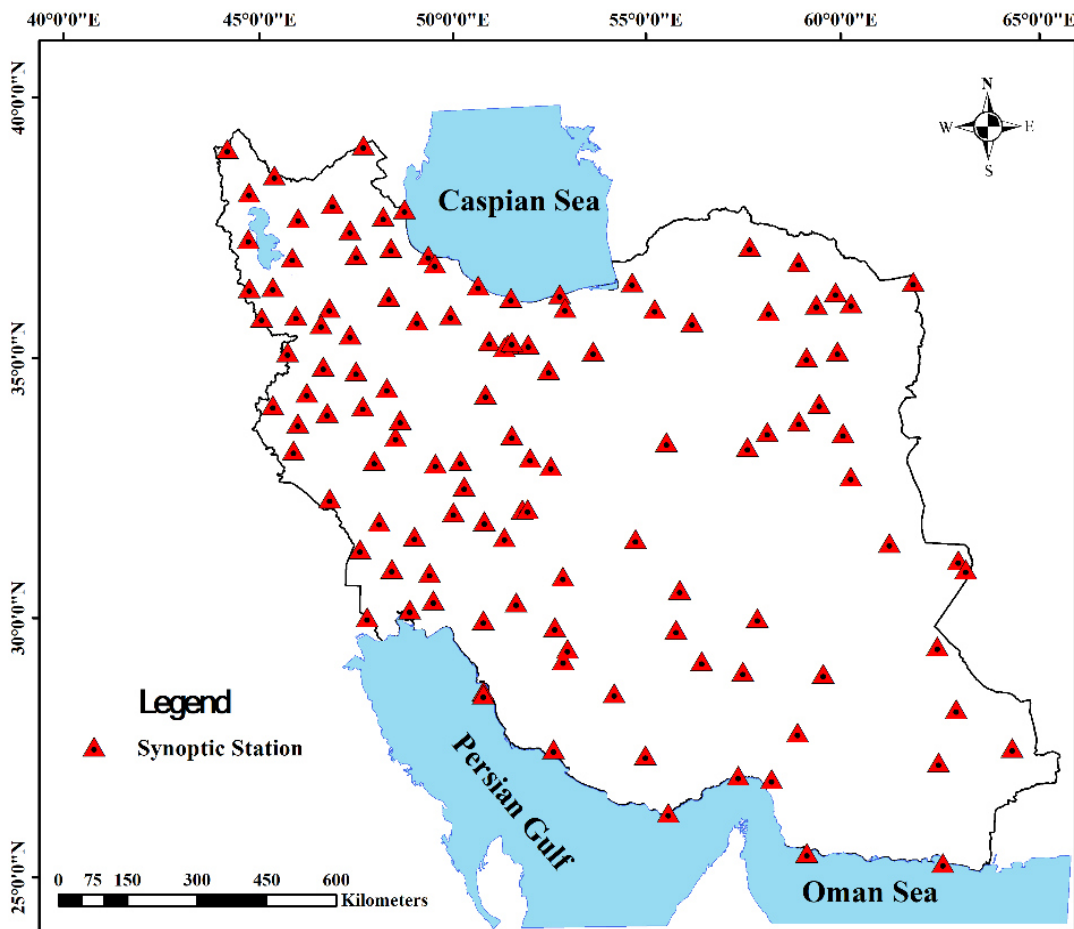
<sup>۲</sup> Pannonian basin

<sup>۳</sup> Long ashton research station-weather generator

<sup>۴</sup> Coupled model intercomparison phase 5

در این مطالعه از آمار هواشناسی ۱۲۰ ایستگاه سینوپتیک در مناطق مختلف ایران در دوره زمانی ۳۰ ساله از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۲ استفاده شده که این آمار از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. انتخاب ۱۲۰ ایستگاه مورد مطالعه به‌نحوی بوده است که حداقل آمار ۳۰ سال اخیر را داشته باشند تا پژوهش مورد نظر با استفاده از بروزترین آمار انجام شود. شکل ۱ موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

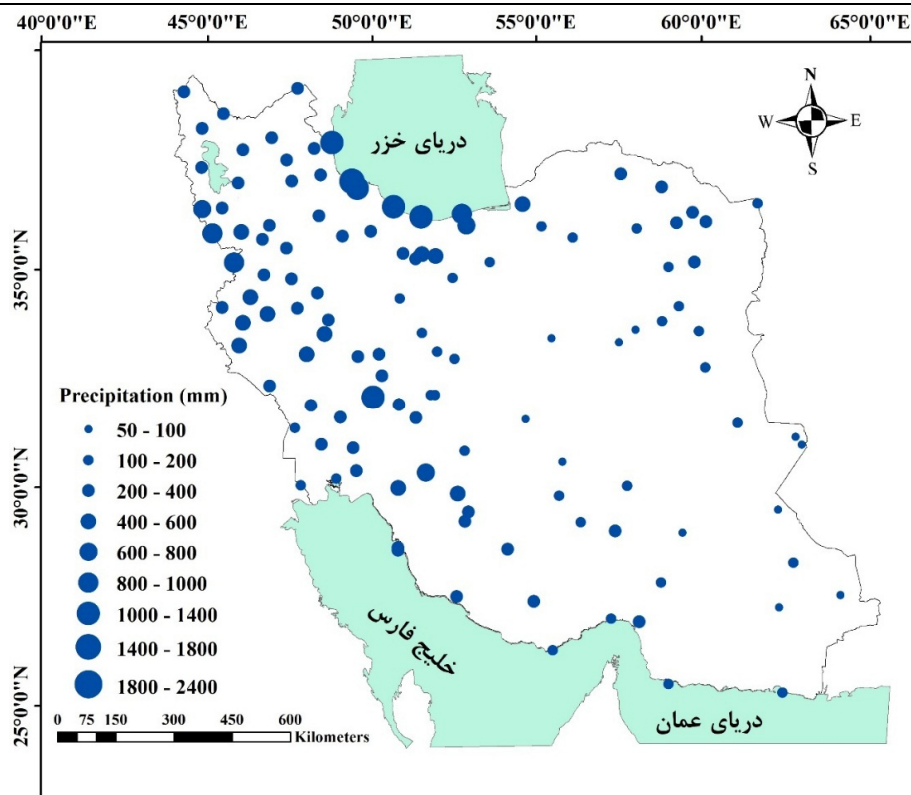
زیاد در گستره جغرافیایی آن، سبب وجود اختلاف زیاد در میزان دما و بارش در نقاط مختلف و پراکندگی نامتوازن این متغیرها در مناطق مختلف آن شده است. متوسط دمای میانگین سالانه ایستگاهی ایران ۱۷/۵۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه ایستگاهی (و نه پهنه‌بندی شده) ایران ۳۲۹ میلی‌متر است (یافته‌های پژوهش).



شکل ۱- موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک در ایران  
Figure 1- Location and distribution of the meteorological stations in Iran

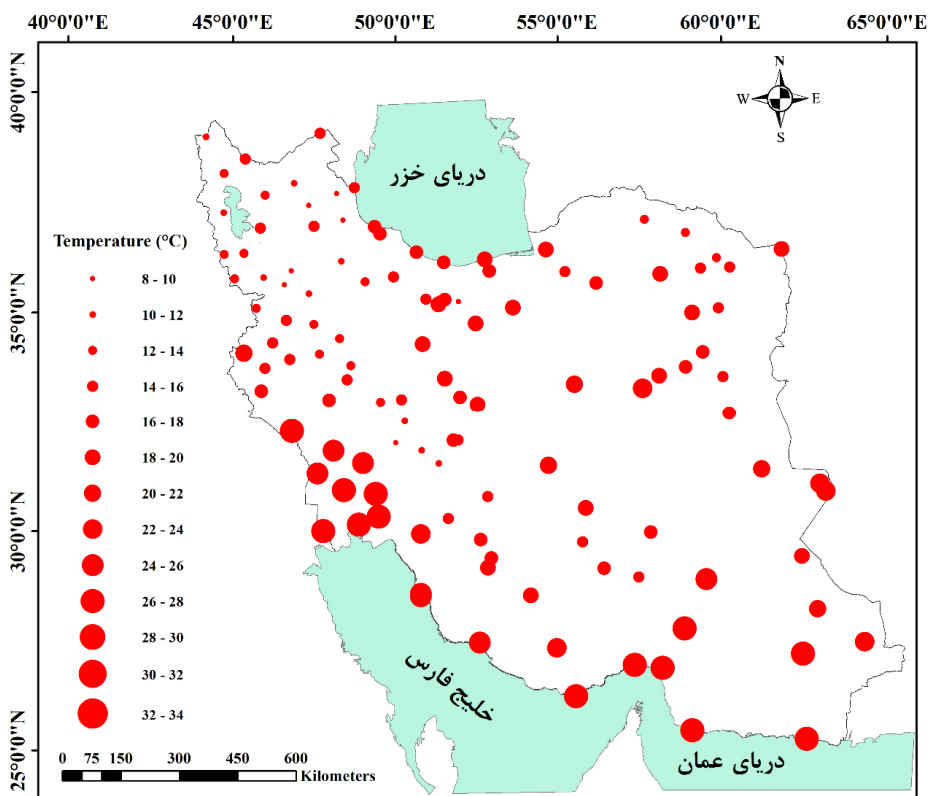
اما در مورد پراکنش بارش مشاهده می‌شود که ایستگاه‌های شمالی و شمال‌غربی و اطراف رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب کشور، بیش‌ترین میانگین بارش سالانه را دارند و کم‌ترین بارش سالانه نیز مربوط به ایستگاه‌های واقع در مرکز، جنوب و شرق کشور است.

در شکل‌های ۲ و ۳ که به ترتیب میانگین دما و بارش سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در این پژوهش نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که ایستگاه‌های مناطق جنوبی کشور بیش‌ترین دما را دارند و کم‌ترین دما نیز مربوط به مناطق شمال‌غربی و اطراف رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب کشور است.



شکل ۲- میانگین بارش سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک ایران در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲)

Figure 2- Average annual precipitation of meteorological stations in Iran in the base period (1993-2022)



شکل ۳- میانگین دمای سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک ایران در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲)

Figure 3- Average annual temperature of meteorological stations in Iran in the base period (1993-2022)

بیش‌تری نسبت به داده‌های دما هستند، به طوری که میانگین بارش سالانه ایستگاهی بین حداقل ۴۹/۰۶ میلی‌متر (ایستگاه زابل) و حداکثر ۱۷۴۰/۲۰ میلی‌متر (ایستگاه بندر انزلی) متغیر بوده و میانگین ۳۰ ساله بارش ایستگاهی ایران برابر ۳۳۹ میلی‌متر است.

جدول ۱ ویژگی‌های آماری بارش (میلی‌متر) و دمای میانگین سالانه (سانتی‌گراد) ایران را در دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. مقدار میانگین دمای سالانه ایران بین ۸/۵۷ (ایستگاه زربینه) تا ۲۷/۸۳ درجه سانتی‌گراد (ایستگاه میناب) متغیر بوده و متوسط ۳۰ ساله دمای میانگین سالانه ایران نیز برابر ۱۷/۵۸ درجه سانتی‌گراد است. داده‌های میانگین بارش سالانه دارای پراکندگی

جدول ۱- آمار توصیفی داده‌های بارش و دمای میانگین سالانه

Table 1- Descriptive statistics of precipitation data and annual average temperature

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس	انحراف معیار
دما (درجه سانتی‌گراد)	8.57	27.83	17.58	25.61	5.06
بارش (میلی‌متر)	49.06	1740.20	329.00	87832.45	296.37

تغییر اقلیم هستند. مدل‌های GCM ابزارهایی پیشرفته و کارآمدی هستند که شرایط اقلیمی را در مقیاس جهانی و قاره‌ای ارائه و با هدف بررسی و ارزیابی تغییر اقلیم در دوره‌های گذشته، حال و آینده طبق سناریوهای مختلفی که برای تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده تدوین شده‌اند، استفاده می‌شوند. از سال ۱۹۹۰ پروژه استانداردسازی استفاده از خروجی‌های مدل‌های موجود GCM توسط IPCC شروع شده و این هیأت گزارش‌های ارزیابی مربوط به تغییر اقلیم را ارائه می‌دهد. این هیأت در تهیه گزارش پنجم خود یعنی CMIP5، سناریوهای انتشار را به‌عنوان نماینده‌های خطوط تغییر غلظت‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای تحت عنوان سناریوهای RCP ارائه کرد که این سناریوها را بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری کرده است (Chong-Hai and Ying, 2012).

پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی به‌ویژه بارش اهمیت زیادی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آبی داشته و روش‌هایی که بتوانند برآوردی دقیق از آن داشته باشند، همواره مورد توجه پژوهش‌گران بوده است (Allahverdipour and Sattari, 2022). در پژوهش حاضر برای پیش‌نگری دما و بارش آینده ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم، مدل CanESM2 از دسته مدل‌های CMIP5، تحت دو سناریوی RCP2.6 (خوش‌بینانه) و RCP8.5 (بدبینانه) استفاده شد. مدل CanESM2 یک مدل ترکیبی از دو مدل CanCM4<sup>۱</sup> و CTEM<sup>۲</sup> است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیم کانادا<sup>۳</sup> (CCCMA) طراحی شده است. این مدل شبکه‌بندی سطحی با ابعاد حدود ۹/۶۹ درجه طول و عرض جغرافیایی را داراست (Chylek et al., 2011). در جدول ۳ سناریوهای RCP به‌صورت خلاصه آمده است.

## ۲-۲- روش دمارتن

به‌منظور تعیین اقلیم یک منطقه، (De Martonne, 1941) شاخصی به نام شاخص خشکی دمارتن ارائه نمود. با وجود این که تبخیر یکی از عوامل مهم اقلیمی به حساب می‌آید، اما در فرمول دمارتن به‌صورت مستقیم نیامده است. اما تبخیر خود در ارتباط با دمای هوا بوده و افزایش دما باعث افزایش تبخیر می‌شود. بنابراین، زیاد بودن a ممکن است یا به دلیل پایین بودن میزان دما یا بالا بودن میزان بارندگی باشد (Bagherabadi, 2022). مقدار شاخص خشکی دمارتن به‌صورت رابطه (۱) است:

$$a = \frac{P}{T + 10} \quad (1)$$

در رابطه فوق متغیر P میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)، T میانگین سالانه دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد) و a شاخص خشکی دمارتن (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد) است. نوع، نماد و بازه طبقه‌های اقلیمی روش دمارتن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن (De Martonne, 1941)

Table 2- The De Martonne climate classification (De Martonne, 1941)

ردیف	نوع اقلیم	نماد	بازه ضریب خشکی دمارتن
1	خشک	A1	$a < 10$
2	نیمه‌خشک	A2	$10 \leq a < 20$
3	مدیترانه‌ای	A3	$20 \leq a < 24$
4	نیمه‌مرطوب	A4	$24 \leq a < 28$
5	مرطوب	A5	$28 \leq a < 35$
6	بسیار مرطوب نوع "الف"	A6	$35 \leq a < 55$
7	بسیار مرطوب نوع "ب"	A7	$a \geq 55$

## ۳-۲- مدل گردش عمومی CanESM2

امروزه خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) و سناریوهای منتشر شده توسط IPCC اصلی‌ترین محور پژوهش‌ها در زمینه

<sup>3</sup> Canadian centre for climate modelling and analysis

<sup>1</sup> Canadian coupled global climate model

<sup>2</sup> Canadian terrestrial ecosystem model



جدول ۳- سناریوهای واداشت تابشی (RCP) (Stocker et al., 2013)

Table 3- Representative concentration scenario (RCP) (Stocker et al., 2013)

سناریو	واداشت تابشی (وات بر مترمربع)	غلظت CO <sub>2</sub> (در یک میلیون واحد از حجم هوا)	میانگین گرمایش جهانی تا سال 2100
RCP2.6	حداکثر سه وات بر مترمربع است و بعد از سال 2100 کاهش می‌یابد.	490	یک درجه سانتی‌گراد (0.3-1.7)
RCP8.5	بیش‌تر از 8.5 وات بر مترمربع در سال 2100	1370	7.3 درجه سانتی‌گراد (2.6-4.8)

## ۲-۴- مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG

مدل LARS-WG به‌عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک کشاورزی در مجارستان توسط Racsco et al. (1991) ارائه و سپس توسط Semenov et al. (1998) بازنگری شد. این مدل از مشهورترین و پرکاربردترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضعیت هواست که برای تولید مقادیر بارش، دمای کمینه، بیشینه و تابش روزانه تحت شرایط اقلیم پایه و آینده کاربرد دارد. این مدل در سه مرحله واسنجی، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی، داده‌های اقلیمی را تولید و با دریافت فایل رفتار آب و هوای گذشته ایستگاه و سناریوی تغییر اقلیم، مقادیر روزانه دمای کمینه، بیشینه و بارش آینده را تولید می‌کند (Khalili et al., 2016).

## ۲-۵- معیارهای ارزیابی

در این پژوهش جهت این‌که اطلاعات شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG ارزیابی شود، سه شاخص آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) محاسبه شده‌اند که مشخصات این معیارها در جدول ۴ آمده است. طبق جدول ۴، متغیر  $o(i)$  مقادیر مشاهداتی (واقعی)،  $p(i)$  مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{o}$  میانگین مقادیر مشاهداتی،  $\bar{p}$  میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و  $N$  تعداد مشاهدات است. مقادیر  $R^2$  بیش‌تر و RMSE و MAE کم‌تر، نشان‌دهنده دقت بیش‌تر و عملکرد بهتر مدل است.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی

Table 4- The evaluation metrics

محدوده	رابطه	تعریف	معیار
$0 \leq R^2 \leq 1$	$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (o(i) - \bar{o})(p(i) - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (o(i) - \bar{o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (p(i) - \bar{p})^2}} \right)^2$	Coefficient of Determination	$R^2$
$0 \leq RMSE < \infty$	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o(i) - p(i))^2}$	Root Mean Square Error	RMSE
$0 \leq MAE < \infty$	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  p(i) - o(i) $	Mean Absolute Error	MAE

## ۳- نتایج و بحث

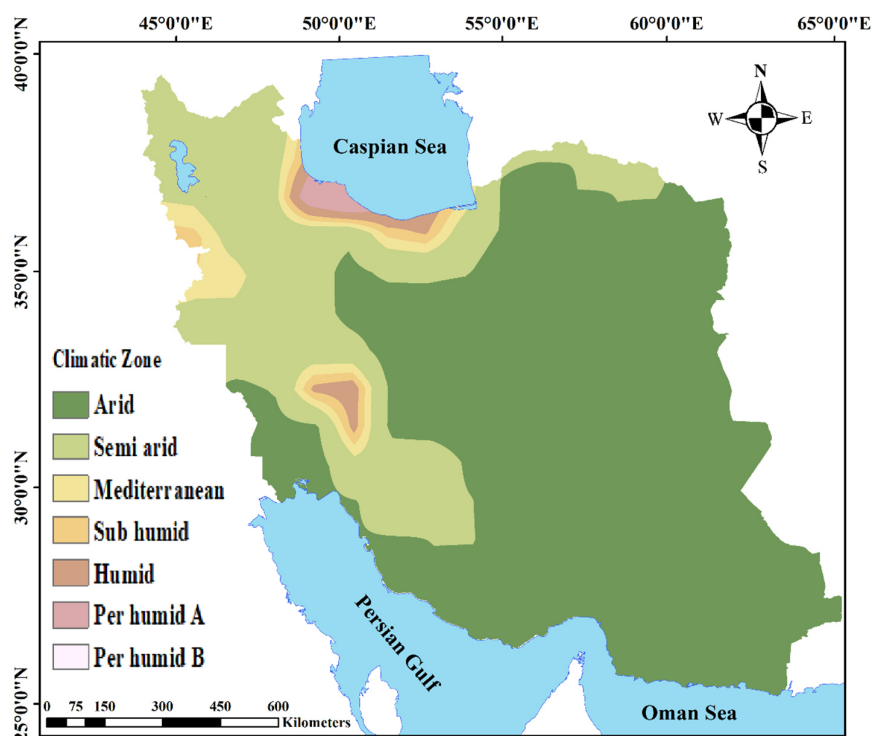
شکل ۴ پهنه‌بندی اقلیمی ایران طبق طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن در دوره پایه مطالعاتی (۲۰۲۲-۱۹۹۳) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیش‌تر پهنه ایران در طبقه خشک (arid) قرار دارد و بعد از آن بیش‌تر مناطق کشور را طبقه نیمه‌خشک (semi-arid) تشکیل می‌دهد. بنابراین، می‌توان ایران را کشوری خشک و نیمه‌خشک نامید. پژوهش‌های پیشین نظیر Abbasi et al. (2022) و Tabari et al. (2014) نیز چنین نتایجی را نشان داده بودند. مناطق جنوب، شرق و مرکز کشور دارای اقلیم خشک هستند و هر چه به سمت مناطق شمالی پیش می‌رویم از مساحت اقلیم خشک کاسته و به مساحت اقلیم‌های مرطوب‌تر افزوده می‌شود. هم‌چنین، مشاهده می‌شود که مناطق حاشیه دریای خزر در شمال و اطراف رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب، مرطوب‌ترین اقلیم را دارند. این موضوع می‌تواند به دلیل

قرارگرفتن رشته‌کوه‌های البرز در شمال و زاگرس در ناحیه غربی باشد که مانع ورود سامانه‌های مرطوب به مناطق مرکزی ایران می‌شوند. از طرفی قرارگرفتن در عرض جغرافیایی بالاتر و نزدیکی به دریای خزر برای مناطق شمالی کشور و ارتفاع بالای مناطق اطراف رشته‌کوه‌های زاگرس می‌تواند از علل دمای پایین و بارش زیاد این مناطق و در نتیجه قرار داشتن در طبقه‌های اقلیمی مرطوب‌تر باشد؛ زیرا طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن بر اساس این دو متغیر است.

در جدول ۵ و شکل ۵ مشاهده می‌شود که در دوره مطالعاتی پایه ۱۱۲۹۲۸۵/۲۴ کیلومتر مربع (۶۸/۵۲ درصد) از مساحت ایران دارای اقلیم خشک (A1)، ۳۶۲۰۱۹/۶۷ کیلومتر مربع (۲۱/۹۷ درصد) اقلیم نیمه‌خشک (A2)، ۱۰۸۰۶/۵۶ کیلومتر مربع (۰/۶۶ درصد) اقلیم مدیترانه‌ای (A3)، ۴۸۲۹/۵۱ کیلومتر مربع (۲/۹۵ درصد) اقلیم نیمه‌مرطوب (A4)، ۳۲۴۱۹/۶۷ کیلومتر مربع (۱/۹۷ درصد)

(۲۰۰۵-۱۹۶۶) انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که بیش‌تر مناطق ایران اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد، به‌طوری‌که ۶۰ درصد دارای اقلیم خشک و ۲۸ درصد نیمه‌خشک هستند. پژوهش Rahimi et al. (2013) نیز که با روش دمارتن گسترش داده شده انجام یافته بود، حاکی از این بود که انواع اقلیم بسیار خشک (A1.1 و A1.2) با حدود ۷۱ درصد و اقلیم نیمه‌خشک (A2) با حدود ۲۳ درصد بیش‌ترین مساحت ایران را تشکیل می‌دهند. تفاوت روش این پژوهش در تقسیم‌بندی انواع طبقه‌های اقلیمی دمارتن به زیرگروه‌هایی با توجه به شرایط دمایی سردترین ماه سال است. تفاوت اندک در مساحت طبقه‌های اقلیمی حاصل از نتایج پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های قبلی می‌تواند به‌دلیل تفاوت در دوره آماری مورد مطالعه و تعداد و پراکنش ایستگاه‌های مورد استفاده باشد.

درصد) اقلیم مرطوب (A5)، ۵۹۴۳۶/۰۶ کیلومتر مربع (۳/۶۱ درصد) اقلیم بسیار مرطوب نوع "الف" (A6) و ۵۴۰۳/۲۸ کیلومتر مربع (۰/۳۳ درصد) از کل مساحت ایران دارای اقلیم بسیار مرطوب نوع "ب" (A7) می‌باشند. این نتایج تقریباً مشابه نتایج پژوهش Abbasi et al. (2022) است که با استفاده از آمار ۳۵ ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۵۰ ساله انجام یافته بود و مطابق آن، ۶۹ درصد از مساحت ایران اقلیم خشک و ۲۲ درصد نیز اقلیم نیمه‌خشک داشتند و کم‌ترین میزان مربوط به اقلیم بسیار مرطوب نوع ب با ۰/۰۲ درصد بود و سایر طبقه‌های اقلیمی بین یک تا سه درصد از مساحت ایران را تشکیل می‌دادند. همچنین، Tabari et al. (2014) در پژوهشی که با استفاده از روش دمارتن و با بهره‌گیری از داده‌های ۴۱ ایستگاه هواشناسی در دوره ۴۰ ساله



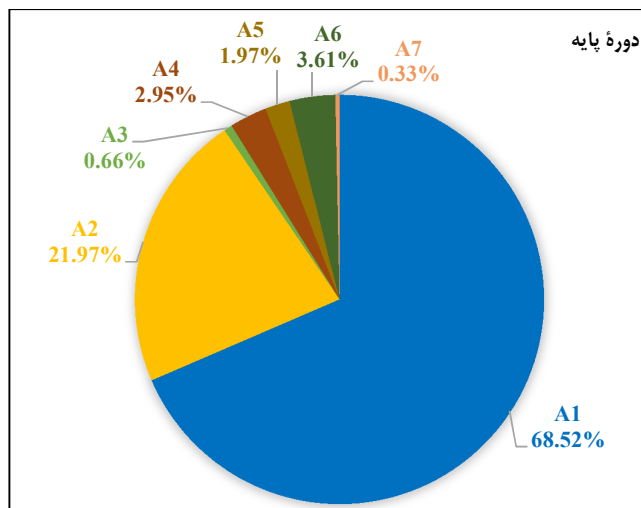
شکل ۴- نقشه طبقه‌بندی اقلیمی ایران بر اساس شاخص دمارتن در دوره پایه (1993-2022)

Figure 4- Iran's climate classification map based on the De Martonne aridity index in the base period (1993-2022)

جدول ۵- مساحت (کیلومتر مربع) پهنه‌های مختلف اقلیمی ایران در روش طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳)

Table 5- The area (km<sup>2</sup>) of different climatic zones of Iran in the De Martonne classification method in the base period (1993-2022)

طبقه اقلیمی	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)
A1	1129285.24	68.52
A2	362019.67	21.97
A3	10806.56	0.66
A4	48629.51	2.95
A5	32419.67	1.97
A6	59436.06	3.61
A7	5403.28	0.33
مجموع	1648000	100



شکل ۵- درصد مساحت طبقه‌های اقلیمی ایران بر اساس شاخص دمارتن در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲)

Figure 5- The percentage of the area of Iran's climatic classes based on the De Martonne aridity index in the base period (1993-2022)

سالانه در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه، طبق دو سناریوی RCP8.5 (بدبینانه) و RCP2.6 (خوشبینانه) مقایسه شده است. مطابق شکل ۶ تحت هر دو سناریوی بررسی شده، بارش سالانه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت اما این افزایش در سناریوی RCP8.5 بیش‌تر از سناریوی RCP2.6 خواهد بود. بارش سالانه ایستگاهی از ۳۲۹ میلی‌متر در دوره پایه به ترتیب طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۴۱-۲۰۲۱ به ۴۵۱/۷۲ و ۳۵۴/۶۴ میلی‌متر، در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ به ۴۹۳/۱۴ و ۴۱۹/۳۰ میلی‌متر، در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ به ۴۰۷/۱۹ و ۴۹۳/۱۴ میلی‌متر و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به ۴۱۴/۴۵ و ۴۹۸/۹۲ میلی‌متر خواهد رسید. طبق سناریوی RCP2.6 شاهد افزایش بارش طی دوره ۲۰ ساله اول و دوم خواهیم بود و در دوره ۲۰ ساله سوم و چهارم شدت این افزایش کمتر خواهد شد. اما طبق سناریوی RCP8.5 همواره در دوره‌های آتی افزایش بارش شدت خواهد گرفت، به طوری که تا سال ۲۱۰۰ بارش سالانه ایستگاهی ایران به ۴۹۸/۹۲ میلی‌متر خواهد رسید. افزایش در میزان بارش ایران در دوره‌های آتی در پژوهش‌های مختلف از جمله مطالعه‌ای که توسط Mousavi et al. (2016) به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش در ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم تا سال ۲۱۰۰ انجام شد، نیز مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که این مسأله، نیاز به برنامه‌ریزی مدون جهت استفاده بهینه از بارش مؤثر با توجه به تفاوت آن در دوره‌های مختلف را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- نتایج ارزیابی مدل LARS-WG

مطابق جدول ۶ شبیه‌سازی بارش و دمای میانگین سالانه ایران در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲) توسط مدل LARS-WG با توجه به مقادیر معیارهای آماری  $R^2=0.99$ ،  $RMSE=19.79$  و  $MAE=13.36$  برای بارش و  $R^2=0.99$ ،  $RMSE=0.091$  و  $MAE=0.0828$  برای دما با دقت بالایی انجام شده است. بنابراین، این مدل در برآورد پرامتر بارش و دما قابل اتکا بوده و می‌توان از نتایج آن برای تولید داده‌های اقلیمی آینده استفاده کرد.

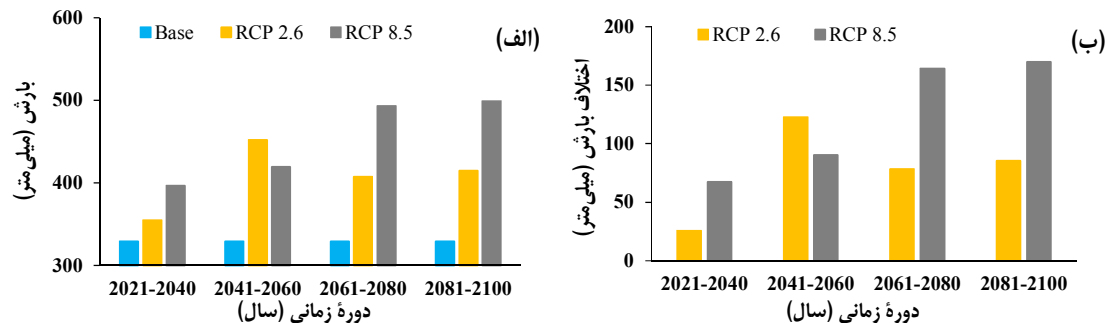
جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی بارش و دمای میانگین سالانه ایران

Table 6- Evaluation results of the LARS-WG model in the simulation of precipitation and annual average temperature of Iran

دوره زمانی	متغیر	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
1993-2022	بارش سالانه (درجه سانتی‌گراد)	19.79	13.36	0.99
1993-2022	دمای میانگین سالانه (میلی‌متر)	0.091	0.0828	0.99

### ۳-۲- پردازش داده‌های اقلیمی در دوره‌های آتی

شکل ۶-الف نمودار بارش سالانه ایران در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲) و چهار دوره زمانی ۲۰ ساله آینده تا ۲۱۰۰ را در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد. در شکل ۶-ب نیز میزان اختلاف بارش



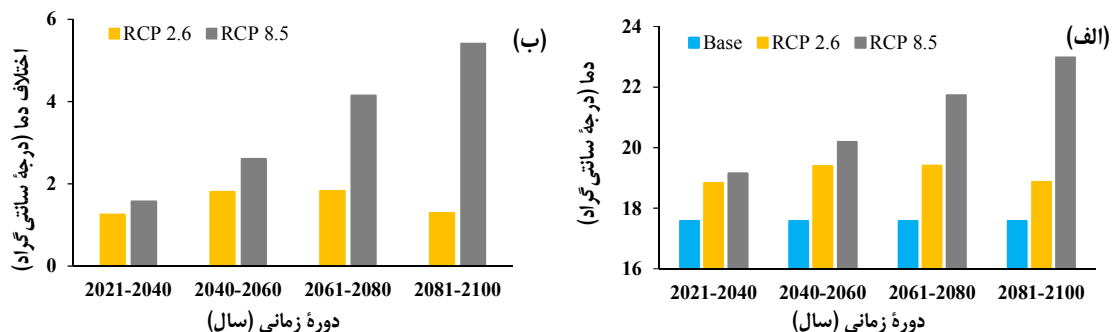
شکل ۶- (الف) مقایسه بارش سالانه ایران در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲) و دوره‌های آتی طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و (ب)

اختلاف بارش سالانه در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5

Figure 6- (a) Comparison of the annual precipitation of Iran in the base period (1993-2022) and future periods according to the RCP8.5 and RCP2.6 scenarios and (b) the difference in annual precipitation in future periods compared to the base period, according to the RCP8.5 and RCP2.6 scenarios

به ۱۹/۴۲ و ۲۱/۷۳ و در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ به ۱۸/۸۸ و ۲۲/۹۹ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. طبق سناریوی RCP2.6 شاهد افزایش دما طی دوره ۲۰ ساله اول و دوم خواهیم بود و در دوره ۲۰ ساله سوم و چهارم این افزایش کمتر خواهد شد. اما طبق سناریوی RCP8.5 همواره در دوره‌های آتی افزایش دما شدیدتر خواهد شد، به طوری که تا سال ۲۱۰۰ دمای میانگین سالانه ایستگاهی ایران به ۲۲/۹۹ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. این نتایج، مشابه با نتایج پژوهش Jahangir and Mohammadi (2018)، (2021)، Mohammadi et al. (2021)، Azizi et al. (2021) و Zarrin et al. (2022) که افزایش دما را در دوره‌های آتی پیش‌نگری کرده‌اند، است.

شکل ۷- الف نمودار دمای میانگین سالانه ایران در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲) و چهار دوره زمانی ۲۰ ساله آینده تا ۲۱۰۰ را در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد. در شکل ۷- ب میزان اختلاف دمای میانگین سالانه در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه، طبق دو سناریوی RCP8.5 (بدبینانه) و RCP2.6 (خوشبینانه) مقایسه شده است. طبق شکل ۷، در هر دو سناریوی بررسی شده، دمای میانگین سالانه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت، اما این افزایش در سناریوی RCP8.5 شدیدتر از سناریوی RCP2.6 خواهد بود. طبق این شکل، دمای میانگین سالانه ایستگاهی ایران از ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد در دوره پایه، به ترتیب طبق سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۱ به ۱۸/۸۴ و ۱۹/۶، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ به ۱۹/۴۰ و ۲۰/۱۹، در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰



شکل ۷- الف) مقایسه دمای میانگین سالانه ایران در دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۲۲) و دوره‌های آتی طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و (ب)

اختلاف دمای میانگین سالانه در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5

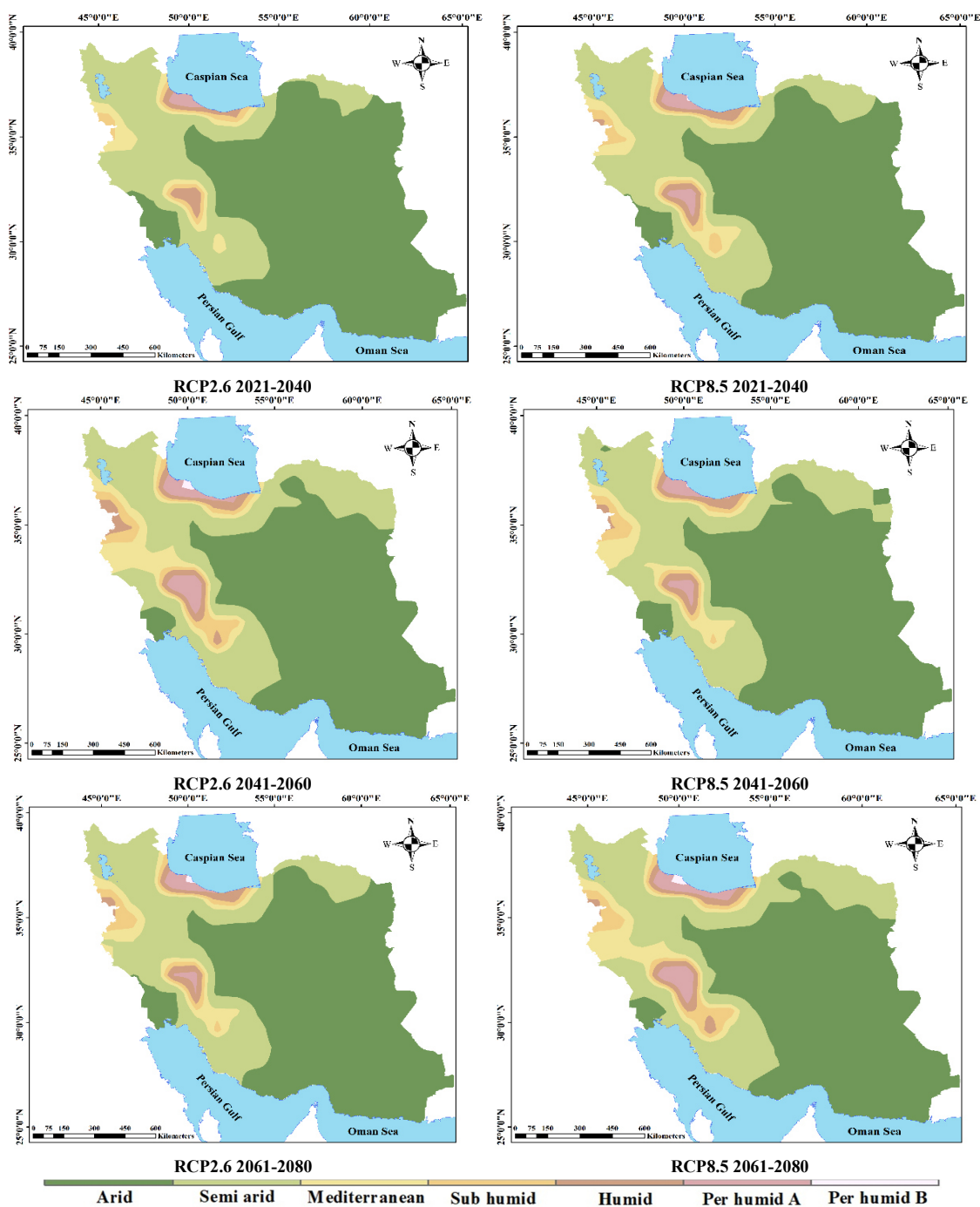
Figure 7- a) Comparison of the annual average temperature of Iran in the base period (1993-2022) and future periods according to the RCP8.5 and RCP2.6 scenarios and (b) the difference in annual average temperature in future periods compared to the base period, according to the RCP8.5 and RCP2.6 scenarios

بیشتر پهنا ایران دارای اقلیم خشک (arid) و نیمه‌خشک (semi-arid) خواهد بود. مطابق این شکل در دوره‌های آتی و طبق هر دو سناریو، از مساحت اقلیم خشک کاسته و به مساحت

شکل ۸ پهنا بندی اقلیمی ایران با روش طبقه‌بندی دمارتن در دوره‌های آتی را نشان می‌دهد. طبق شکل ۸، خروجی‌های هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، در دوره‌های زمانی آینده نیز

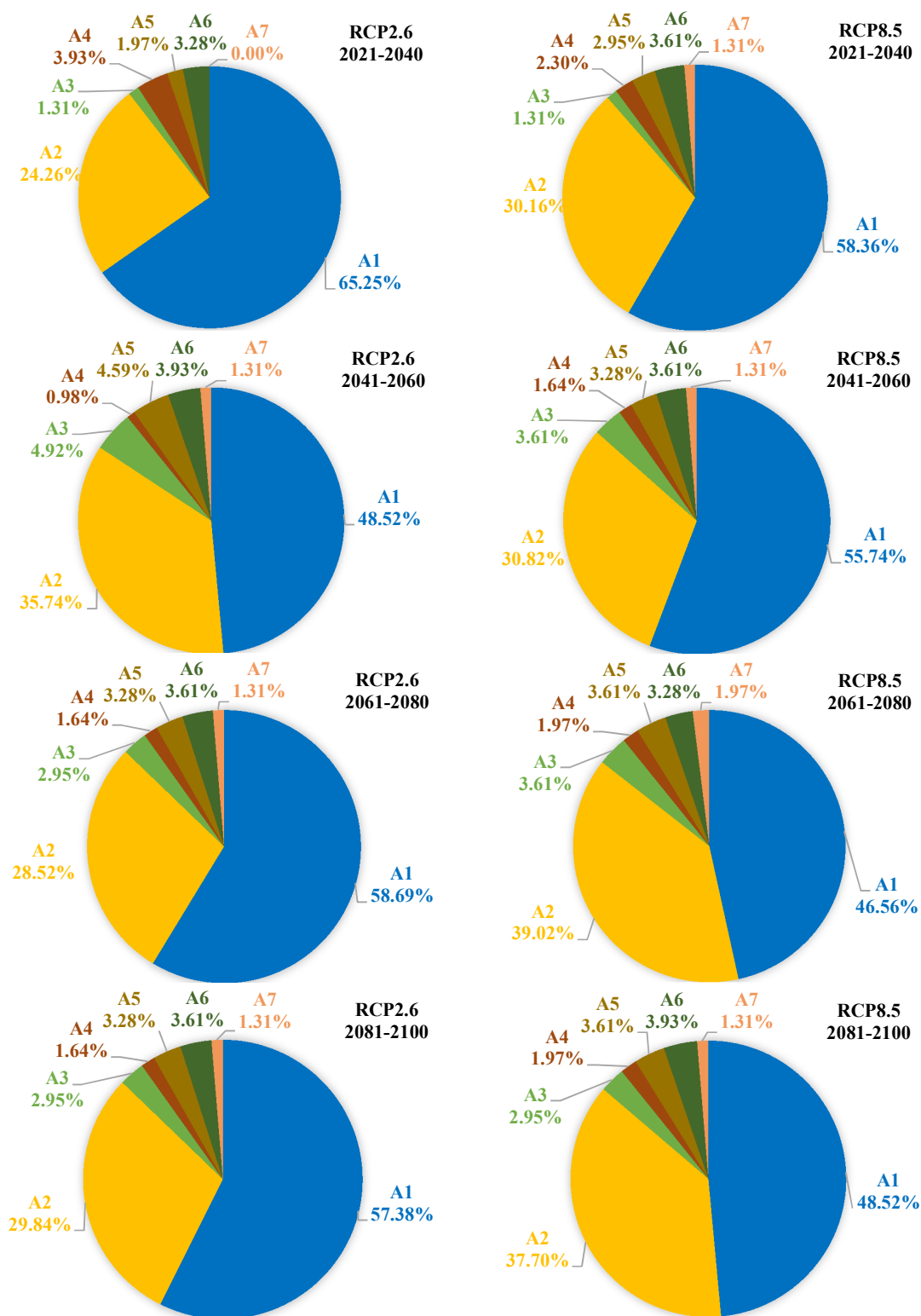
منجر شود. همچنین، طبق شکل ۸ مشاهده می‌شود که در انتهای قرن و طبق سناریوی RCP8.5 در مناطقی از شمال غرب کشور اقلیم خشک مشاهده می‌شود، درحالی‌که در دوره مطالعاتی پایه این ناحیه در طبقه نیمه‌خشک قرار داشت.

اقلیم‌های دیگر افزوده می‌شود. این کاهش مساحت اقلیم خشک که در آینده اتفاق خواهد افتاد، می‌تواند به این علت باشد که با وجود افزایش دما در آینده، میزان بارش‌ها نیز افزایش خواهد یافت و این افزایش بارش‌ها می‌تواند به مرطوب‌تر شدن این مناطق



شکل ۸- نقشه طبقه‌بندی اقلیمی ایران بر اساس روش طبقه‌بندی دمارتن در دوره‌های آتی طبق سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6  
 Figure 8- Climate classification map of Iran based on the De Martonne classification method in future periods according to RCP8.5 and RCP2.6 scenarios





شکل ۹- درصد مساحت طبقه‌های اقلیمی ایران بر اساس طبقه‌بندی دمارتن در دوره‌های آتی طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5  
 Figure 9- The percentage of the area of Iran's climate classes based on De Martonne classification in the future periods according to RCP8.5 and RCP2.6 scenarios

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تصویری جدید و بروز با استفاده از آخرین آمار موجود از اقلیم ایران ارائه شده است که با این هدف، اقلیم فعلی ایران به روش دمارتن طبقه‌بندی شده و در ادامه نیز تغییرات طبقه‌های اقلیمی ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی، طبق برون‌داد مدل CanESM2 از سری مدل‌های CMIP5 که با مدل LARS-WG ریزمقیاس‌سازی شده و برحسب دو سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 بررسی شده است. نتایج نشان داد که اقلیم خشک با ۶۸/۸۲ درصد و اقلیم نیمه‌خشک با ۲۱/۹۷ درصد، بیش‌ترین مساحت ایران را تشکیل می‌دهند و میزان بقیه طبقه‌ها مجموعاً کم‌تر از ۱۰ درصد از مساحت ایران است. بنابراین با توجه به سهم ۹۰/۴۹ درصدی طبقه‌های خشک و نیمه‌خشک، باید ایران را از نظر اقلیمی کشوری خشک و نیمه‌خشک نامید. بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر بارش و دما نشان داد که در دوره‌های آتی هم میزان بارش و هم میزان دمای میانگین سالانه ایران افزایش خواهد یافت، گرچه افزایش در هر دو متغیر، طبق سناریوی RCP8.5 شدیدتر خواهد بود. بررسی طبقه‌بندی اقلیمی ایران در دوره‌های آتی نیز حاکی از آن است که هم‌چنان بیش‌تر مساحت ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک خواهد بود. در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۱ و تحت سناریوی RCP2.6 مجموع اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با ۸۴/۲۶ درصد به کم‌ترین میزان خود خواهد رسید و پس از این دوره، دوباره شاهد افزایش این اقلیم‌ها خواهیم بود، به‌طوری‌که در انتهای قرن ۸۷/۲۱ درصد از مساحت ایران را اقلیم خشک و نیمه‌خشک تشکیل خواهد داد. طبق سناریوی RCP8.5 در هر سه دوره ابتدایی متوالی، مجموع مساحت اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک کاهش خواهد یافت، اما در دوره ۲۰ ساله آخر (۲۰۸۱-۲۱۰۰) این روند برعکس شده و افزایش این اقلیم‌ها را شاهد خواهیم بود. نتایج این پژوهش لزوم توجه به پدیده تغییر اقلیم و ضرورت توجه صاحب‌نظران و برنامه‌ریزان کلان کشوری به تأثیرات تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی با توجه به عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی، خروجی سایر مدل‌های GCM نیز به کار گرفته شود. هم‌چنین، کاربرد روش‌های مختلف طبقه‌بندی اقلیمی که متغیرهای دیگر علاوه بر بارش و دما را نیز مد نظر قرار می‌دهد، جهت شناسایی بهتر ویژگی‌های اقلیمی پیشنهاد می‌شود.

## سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری سازمان هواشناسی ایران در ارائه داده‌های لازم، صمیمانه تشکر می‌کنند.

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

## دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

## مشارکت نویسندگان

پویا الهیوردی پور: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آمار، نگارش مقاله؛ محمدعلی قربانی: راهنمایی، مفهوم‌سازی، کنترل نتایج؛ اسماعیل اسدی: راهنمایی، مفهوم‌سازی، کنترل نتایج.

## منابع

- الهیوردی پور، پویا، و ستاری، محمدتقی (۱۴۰۲). مقایسه عملکرد روش کلاسیک رگرسیون خطی چندگانه و روش‌های داده‌کاوی نوین در مدل‌سازی بارش سالانه (مطالعه موردی: شهر اهواز). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۱۲۵-۱۴۲. doi:10.22098/mmws.2022.11337.1120
- باقرآبادی، رسول (۱۴۰۱). بررسی تغییرات اقلیمی شهر کرمانشاه با استفاده از روش‌های ضریب خشکی دمارتن، منحنی آمبروترمیک و اقلیم‌نمای آمبروزه در بازه‌ی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۴(۴)، ۱۷۴-۱۸۵. doi:20.1001.1.26453851.1401.4.4.12.4
- جعفری‌گنده، میثم، سلاجقه، علی، و حقیقی، پارسا (۱۳۹۹). پیش‌بینی مقایسه‌ای بارش و دمای شهرستان کرمان با استفاده از مدل‌های LARS-WG6. *اکوهیدرولوژی*، ۲(۷)، ۵۲۹-۵۳۸. doi:10.22059/ije.2020.298577.1294
- جهانگیر، محمدحسین، و محمدی، علی (۱۳۹۷). پهنه‌بندی دما و بارش استان آذربایجان شرقی با استفاده از مدل ریزمقیاس LARS-WG برای سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۶۵. *جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)*، ۲(۸)، ۱۱۹-۱۳۰. doi:20.1001.1.22286462.1397.8.2.8.7
- حجام، سهراب، خوشخو، یونس، و شمس‌الدین‌وندی، رضا (۱۳۸۷). تحلیل روند تغییرات بارندگی‌های فصلی و سالانه چند ایستگاه منتخب در حوزه مرکزی ایران با استفاده از روش‌های ناپارامتری. *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۴۰(۶۴)، ۱۵۷-۱۶۸. [https://jphgr.ut.ac.ir/article\\_26912.html](https://jphgr.ut.ac.ir/article_26912.html)
- خلیلی، علی، بذرافشان، جواد، و چراغعلی‌زاده، مجید (۱۴۰۱). بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده و کاربست روش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. *هواشناسی کشاورزی*، ۱۱(۱)، ۱-۱۶. doi:10.22125/agmj.2022.156309
- خلیلی، نجمه، داوری، کامران، علیزاده، امین، انصاری، حسین، رضایی پزند، حجت، کافی، محمد، و قهرمان، بیژن (۱۳۹۵). ارزیابی عملکرد دو مدل LARS-WG و ClimGen در تولید سری‌های زمانی بارش و



- سناریوهای مختلف در ایستگاه هواشناسی یزد. *علوم آب و خاک*، ۳۴(۴)، ۱-۱۹. doi:10.47176/jwss.24.4.42131
- کاظمی، رحیم، و شریفی، فرود (۱۳۹۷). بررسی و تحلیل عوامل مؤثر بر جریان پایه در اقلیم مختلف ایران. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۰(۴)، ۶۴۵-۶۵۸. doi:10.22092/ijwmse.2018.117877
- محمدی، حسن، خلیلی، رضا، و محمدی، سجاد (۱۴۰۰). پیشنهاد تغییرات دما و بارش با استفاده از سناریوهای واداشت تابشی مولد آب و هوایی LARS-WG در زاگرس جنوبی. *نیوار*، ۴۵(۱۱۴)، ۱۳۷-۱۵۳. doi:10.30467/nivar.2022.319565
- موسوی، سیدسعید، کاراندیش، فاطمه، و طبری، حسین (۱۳۹۵). تغییرات زمانی و مکانی بارش در ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم تا سال ۲۱۰۰. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۲۵(۶)، ۱۵۲-۱۶۵.
- هدایتی دزفولی، اکرم، و کاکوند، رضا (۱۳۹۱). پهنه‌بندی اقلیمی استان قزوین. *نیوار*، ۳۶(۷۶)، ۵۹-۶۶.
- درجه حرارت در ایستگاه تحقیقات دیم سیساب، خراسان شمالی. *آب و خاک*، ۳۰(۱)، ۳۲۲-۳۳۳. doi:10.22067/jsw.v30i1.45058
- رضیئی، طیب (۱۳۹۶). چشم‌اندازی از مناطق اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر در سده بیست و یکم. *ژئوفیزیک ایران*، ۱۱(۱)، ۸۴-۱۰۰. [https://www.ijgeophysics.ir/article\\_46717.html](https://www.ijgeophysics.ir/article_46717.html)
- زرین، آذر، یزدانی، دینا، و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۱). پیش‌نگری دمای کمینه و بیشینه مناطق سردسیر ایران با استفاده از مدل مقیاس‌کاهی آماری SDSM. *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۳(۱۰)، ۱۹-۳۲. doi:10.30488/ccr.2022.340823
- عزیزی، حمیدرضا، نجاتیان، نیلوفر، اطهری، محمدعلی، و هاشمی، سید شهاب (۱۴۰۰). اثرات تغییر اقلیم بر روند خشکسالی دشت ورامین با استفاده از شاخص دی-مارتن. *نیوار*، ۴۵(۱۱۲)، ۶۷-۷۶. doi:10.30467/nivar.2021.266357
- فتحی‌زاد، حسن، توکلی، محسن، حکیم‌زاده اردکانی، محمدعلی، تقی‌زاده مهرجردی، روح‌اله، و سودایی‌زاده، حمید (۱۳۹۹). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی تحت model ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5(6), 527-533. doi:10.1080/16742834.2012.11447042
- Chylek, P., Li, J., Dubey, M.K., Wang, M., & Lesins, G.J.A.C. (2011). Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian earth system model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11(8), 22893-22907. doi:10.5194/acpd-11-22893-2011
- De Martonne, E. (1941). *Traite de Geographie Physique*: 3 tomes, Paris. Flocas AA. 1994. *Courses of 28 Meteorology and Climatology*. Ziti Publications: Thessaloniki.
- Fathizad, H., Tavakoli, M., Hakimzadeh Ardakani, M.A., Taghizadeh Mehrjardi, R., & Sodaiezadeh, H. (2021). Evaluation of the effects of climate change on meteorological parameters under different scenarios in Yazd meteorological station. *Journal of Water and Soil Science*, 24(4), 1-19. doi:10.47176/jwss.24.4.42131. [In Persian]
- Feddema, J.J. (2005). A revised Thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography*, 26(6), 442-466. doi:10.2747/0272-3646.26.6.442
- Gavrilov, M.B., Radaković, M.G., Sipos, G., Mezösi, G., Gavrilov, G., Lukić, T., Basarin, B., Benyhe, B., Fiala, K., Kozák, P., & Perić, Z.M. (2020). Aridity in the central and southern Pannonian basin. *Atmosphere*, 11(12), 1269. doi:10.3390/atmos11121269
- Hajam, S., Khoush Khou, Y., & Shams Aldin Vandi, R. (2008). Annual and seasonal precipitation trend analysis of some selective meteorological stations in central region of Iran Using non-parametric methods. *Geographical Research Quarterly*, 40(64), 157-168.

## References

- Abbasi, F., Bazgeer, S., Kalehbasti, P.R., Oskoue, E.A., Haghghat, M., & Kalehbasti, P.R. (2022). New climatic zones in Iran: A comparative study of different empirical methods and clustering technique. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1), 47-61. doi:10.1007/s00704-021-03847-y
- Allahverdipour, P., & Sattari, M.T. (2023). Comparing the performance of the multiple linear regression classic method and modern data mining methods in annual rainfall modeling (Case study: Ahvaz city). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 125-142. doi:10.22098/mmws.2022.11337.1120. [In Persian]
- Azizi, H.R., Nejatian, N., Athari, M.A., & Hashemi, S.S. (2021). The effects of climate change on the drought trend of Varamin plain using De-Martonne index. *Nivar*, 45(112-113), 67-76. doi:10.30467/nivar.2021.266357.1177 [In Persian]
- Bagherabadi, R. (2022). Investigation of climate change on the Kermanshah City using the de martoune, ambrothermic and embereger in 1991-2021. *Geography and Human Relationships*, 4(4), 173-185. doi:10.1001.1.26453851.1401.4.4.12.4. [In Persian]
- Casanueva, A., Herrera, S., Fernández, J., & Gutiérrez, J.M. (2016). Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the EURO-CORDEX initiative. *Climatic Change*, 137, 411-426. doi:10.1007/s10584-016-1683-4
- Chong-Hai, X.U., & Ying, X. (2012). The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-

- [https://jphgr.ut.ac.ir/article\\_26912.html?lang=en](https://jphgr.ut.ac.ir/article_26912.html?lang=en)  
n [In Persian]
- Hedayati Dezfuli, A., & Kakavand, R. (2012). Climatic zoning of Qazvin Province. *Nivar*, 36(77-76), 59-66. [In Persian]
- Jafary Godeneh, M., Salajeghe, A., & Haghighi, P. (2020). Forecast comparative of rainfall and temperature in Kerman County using LARS-WG6 models. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 7(2), 529-538. doi:10.22059/ije.2020.298577.1294. [In Persian]
- Jahangir, M.H. & Mohammadi, A. (2018). Climatic zoning of East Azerbaijan by LARS-WG down scaling model for 2011-2065. *Geography (Regional Planning)*, 8(2), 119-130. doi:10.1001.1.22286462.1397.8.2.8.7. [In Persian]
- Kazemi, R., & Sharifi, F. (2018). Investigation and analysis of factors affecting base flow in different climates of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 10(4), 645-658. doi:10.22092/ijwmse.2018.117877. [In Persian]
- Khalili, A., Bazrafshan, J., & Cheraghizadeh, M. (2022). A Comparative study on climate maps of Iran in extended de Martonne classification and application of the method for world climate zoning. *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(1), 3-16. doi:10.22125/agmj.2022.156309. [In Persian]
- Khalili, N., Davary, K., Alizadeh, A., Ansari, H., Rezaee Pazhand, H., Kafi, M., & Ghahraman, B. (2016). Evaluation of the Performance of ClimGen and LARS-WG models in generating rainfall and temperature time series in rainfed research station of Sisab, Northern Khorasan. *Journal of Water and Soil*, 30(1), 322-333. doi:10.22067/jsw.v30i1.45058. [In Persian]
- Mohammadi, H., Khalili, R., & Mohammadi, S. (2021). Forecasting future temperature and precipitation under the effects of climate change using the LARS-WG climate generator (Case Study: South Zagros Region of Iran). *Nivar*, 45(114-115), 137-153. doi:10.30467/nivar.2022.319565.1209. [In Persian]
- Mousavi, S. S., Karandish, F., & Tabari, H. (2016). Temporal and spatial variation of rainfall in Iran under climate change until 2100. *Irrigation and Water Engineering*, 7(1), 152-165. [In Persian]
- Navarro, A., Merino, A., Sánchez, J.L., García-Ortega, E., Martín, R., & Tapiador, F.J. (2022). Towards better characterization of global warming impacts in the environment through climate classifications with improved global models. *International Journal of Climatology*, 42(10), 5197-5217. doi:10.1002/joc.7527
- Pellicone, G., Caloiero, T., & Guagliardi, I. (2019). The De Martonne aridity index in Calabria (Southern Italy). *Journal of Maps*, 15(2), 788-796. doi:10.1080/17445647.2019.1673840
- Racsko, P., Szeidl, L., & Semenov, M. (1991). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*, 57(1-2), 27-41. doi:10.1016/0304-3800(91)90053-4
- Radaković, M.G., Tošić, I., Bačević, N., Mladjan, D., Gavrilov, M.B., & Marković, S.B. (2018). The analysis of aridity in Central Serbia from 1949 to 2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 887-898. doi:10.1007/s00704-017-2220-8
- Rahimi, J., Ebrahimpour, M., & Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 112, 409-418. doi:10.1007/s00704-012-0741-8
- Raziei, T. (2017). An Outlook on the Iranian Kö Ppen-Geiger climate zones in the 21st Century. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(1), 84-100. [https://www.ijgeophysics.ir/article\\_46717.html?lang=en](https://www.ijgeophysics.ir/article_46717.html?lang=en) [In Persian]
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M., & Richardson, C.W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10(2), 95-107. doi:10.3354/cr010095
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M.M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (2014). Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change, 1535 pp.
- Su, B., Huang, J., Mondal, S.K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., Gao, M., Lv, Y., Jiang, S., Jiang, T., & Li, A. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250, 105375. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105375
- Tabari, H., Talaee, P.H., Nadoushani, S.M., Willems, P., & Marchetto, A. (2014). A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran. *Quaternary International*, 345, 158-166. doi:10.1016/j.quaint.2014.03.061
- Zarrin, A., Yazdany, D., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2022). Projection of minimum and maximum temperatures in cold regions of Iran using SDSM statistical downscaling model. *Climate Change Research*, 3(10), 19-32. doi:10.30488/ccr.2022.340823.1078. [In Persian]