






Analysis of the Trend and Spatial Variation of Aridity in the Future Climate of Iran

Kobra Soltani¹, Jafar Masoompour Samakosh²✉, Firouz Mojarrad³, Sahar Hadi Pour⁴,
Abdollah Jalilian⁵

1. Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Razi University, Kermanshah, Iran
Email: kobrasoltani5@gmail.com
2. Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Razi University, Kermanshah, Iran
Email: j.masoompour@razi.ac.ir
3. Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Razi University, Kermanshah, Iran
Email: F_mojarrad@yahoo.com
4. School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Johor Bahru, Malaysia
Email: hpsahar@utm.my
5. Department of Statistics, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran
Email: jalilian@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:
31 March 2023
Received in revised form:
26 May 2023
Accepted:
27 June 2023
Available online:
1 August 2023

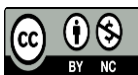
Keywords:

Aridity,
CMIP6,
Iran,
Spatial Changes,
Trend.

ABSTRACT

This research aims to investigate the spatial variability and temporal trends of Iran's aridity in the future (2020–2050) based on the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios of CMIP6 models (MRI-ESM2 and GFDL-ESM4) compared to observational data (1992–2014) using AI and IDM indices based on precipitation, evapotranspiration, and average temperature variables. The coefficient of variation and innovative trend analysis were exerted to examine the changes and trends of the average annual aridity, respectively. The results showed that during the observation period, except for the northern areas of Alborz and a part of the northwest, other areas of the country were arid and semi-arid. However, in the future, the scenarios show a decrease in humidity in the northern areas of Alborz, the northern areas of the inner plateau of Iran, and parts of the southern areas of the Zagros mountains. Aridity decreases in the northwest and parts of the central and northern regions of Zagros. The models predicted arid and semi-arid conditions in other areas, as in the past. The highest percentage of annual average spatial variation of land (71%–105%) was observed in the southeast and south coasts of the country in the period 1992–2014, and according to the models, the percentage of spatial variation of land will decrease in the future. The trend of the average annual aridity values of Iran showed that the drought has increased at significance levels of 0.05 and 0.01 in the past and will increase in the future at significance levels of 0.05 and 0.01 based on MRI-ESM2 (SSP5-8.5 scenario and IDM index). At these significant levels, aridity shows a decreasing trend in other conditions. The results of this research can be useful in planning and reducing the negative effects of climate change in Iran.

Cite this article: Soltani, K., Masoompour Samakosh, J., Mojarrad, F., Hadi Pour, S., & Jalilian, A. (2023). Analysis of the Trend and Spatial Variation of Aridity in the Future Climate of Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 55 (2), 25-50
<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.361339.1007777>



© The Author(s).

DOI: [10.22059/JPHGR.2023.361339.1007777](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.361339.1007777)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

High temperatures and low precipitation characterize arid and semi-arid regions. Aridity is a permanent feature of a region's long-term hydrological and climatic conditions. Aridity is a function of precipitation, evapotranspiration, and temperature. Due to the diversity of climate, many numerical indicators have been proposed for different types of climate in different regions of the world. Indices based on the changes in precipitation and temperature, or indices calculated based on precipitation, evapotranspiration, and studying aridity or variables affecting it, are useful in environmental planning.

Methodology

Iran has an area of about 1,698,195 square kilometers, between 25 and 40 degrees north latitude and 44 and 64 degrees east longitude. An arid and semi-arid climate covers about 90% of the country. The most important reason for the arid climate of Iran should be related to its geographical location because it is close to the tropical region (receives more solar radiation) and is under the influence of sub-tropical high pressure. On the other hand, the Zagros and Alborz mountain ranges prevent moisture from entering the interior, arid regions. Another factor affecting the aridity of Iran is that a large part of its territory is far from seas and oceans.

In this study, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios data from CMIP6 models (MRI-ESM2 and GFDL-ESM4) and observed data (1992–2014) in cloud of precipitation, average, maximum, and minimum temperature, wind speed at 2-meter height, sunshine duration, and several radiation variables (from CMIP6) were prepared. The data were converted into data with a 50 x 50 km resolution in the R software with the Resample command, and calculations were made using two aridity indices, AI and IDM. Due to the lack of sunshine hours data in CMIP6 models, this variable was calculated using the input (short and long wave) and output (short and long wave) data of the models and the radiation estimation method of Li et al. After calculating the indices, zoning maps were produced in ArcGIS 10.5.

Results and Discussion

The results showed that during the observation period, except for the northern areas of Alborz and small parts of northwestern Iran, which according to AI included semi-humid to humid areas and according to IDM included Mediterranean to very humid areas, other regions of the country were placed in dry and semi-arid classes. An increase in aridity in 6.4% and 5.4% of the country's area based on the AI index and under the conditions of SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios and 4.2% and 3.4% based on the IDM index, according to the mentioned scenarios of The MRI-ESM2 model, will occur in the northern areas of Alborz (especially the southern coasts of the Caspian Sea) and the northern areas of the inner plateau of Iran in the future. According to the GFDL-ESM4 model, the increase in aridity in 4.4% and 7.1% of the country's regions based on AI and 3.3% and 6.3% of the country's regions under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios based on the IDM index and according to the mentioned scenarios, as predicted by the MRI-ESM2 model, it will happen in the Caspian coasts and the northern areas of Alborz, and in addition, in the southern areas of Zagros, in 2020–2050. 17.2% and 22.4% of the country's area under the conditions of SSP2-4.5 and SSP5-8.5 of the MRI-ESM2 model in the central Zagros areas, parts of the northeast and northwest based on AI, and also 17.2% and 20.4% The entire area of the country located in the central Zagros regions to the northwest of Iran will experience a decrease in aridity, according to the IDM index and according to the mentioned scenarios.

The highest amount of changes in the observation period and the future, based on the indicators (and scenarios of both models), related to the southeastern regions and the southern coasts of the country, especially the coasts of the Oman Sea, by 71%–105% and related to the observational data (1992–2014), which is most likely related to changes in humidity in this area following the beginning and end of monsoon activities in this area. According to the models, the number of aridity changes in the future (2020–2050) will decrease. The most decrease in aridity changes in the future is

related to the coasts of the Oman Sea.

The trend of average aridity values in Iran showed that aridity increased at significance levels of 0.05 and 0.01 in the past (2014–1992), and in 2020–2050 only under SSP5-8.5 of the MRI-ESM2 model and the IDM index at significance levels of 0.05 and 0.01 will increase. In other conditions, aridity will decrease at significance levels of 0.05 and 0.01. Both models showed a decrease in humidity in the northern regions of Alborz and a decrease in aridity in the country's northwestern regions. The models had the same performance in depicting the country's future climate based on the average annual aridity for the period 2020–2050.

Conclusion

The results showed that during the observed period, except for the northern areas of Alborz and small parts of the northwest of Iran, other regions were classified as arid and semi-arid. However, in the future, the scenarios of the models show a decrease in humidity in the northern areas of Alborz, the northern areas of the inner plateau of Iran, and parts of the southern areas of the Zagros mountain range. Dryness decreases in the northwest and parts of the central and northern regions of Zagros. The models did not show change in other regions of Iran, and arid and semi-arid conditions will continue in these areas. The highest percentage of annual average spatial variation of aridity (71%–105%) was observed in observational data (1992–2014) in the southeast areas and south coasts of the country, and according to the models, the percentage of spatial variation of aridity will decrease in the future. The trend of average values of aridity in Iran showed that aridity increased at significance levels of 0.05 and 0.01 in the past. During 2020–2050, it will increase based on MRI-ESM2 (SSP5-8.5 scenario and the IDM index) at the significance levels of 0.05 and 0.01. In other conditions, aridity shows a decrease at these significance levels. The research results can be effective for long-term planning to reduce the negative effects of climate change in Iran, especially in its eastern and southern parts.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

تحلیل روند و تنوع فضایی خشکی در اقلیم آینده ایران

کبری سلطانی^۱، جعفر معصوم‌پور سماکوش^۲، فیروز مجرد^۳، سحر هادی‌پور^۴، عبدالله جلیلیان^۵

- ۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: kobrasoltani5@gmail.com
- ۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: j.masoompour@razi.ac.ir
- ۳- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: F_mojarrad@yahoo.com
- ۴- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تکنولوژی مالزی، جوهر بهرو، مالزی، رایانامه: hpsahar@utm.my
- ۵- گروه آمار، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: jalilian@razi.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این تحقیق با هدف بررسی تنوع فضایی و روند زمانی خشکی ایران در آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۰) بر اساس سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل‌های CMIP6 (MRI-ESM2 و GFDL-ESM4) نسبت به داده‌های دیدبانی (۲۰۱۴-۱۹۹۲) با استفاده از شاخص‌های AI و IDM بر پایه متغیرهای بارش، تبخیر و تعرق و متوسط دما انجام شد. از ضریب تغییرات و تحلیل روند نوآورانه به ترتیب برای بررسی تغییرات و روند میانگین سالانه خشکی استفاده شد. نتایج نشان داد در دوره مشاهداتی به‌جز نواحی شمالی البرز و بخشی از شمال غرب، سایر مناطق کشور خشک و نیمه‌خشک بوده‌اند. اما در آینده، سناریوها نشان‌دهنده کاهش رطوبت در مناطق شمالی البرز، نواحی شمالی فلات داخلی ایران و بخش‌هایی از مناطق جنوبی رشته‌کوه زاگرس هستند. خشکی در شمال غرب و بخش‌هایی از مناطق مرکزی و شمالی زاگرس کاهش می‌یابد. در سایر نواحی مدل‌ها همچون گذشته شرایط خشک و نیمه‌خشک را پیش‌بینی کردند. بیشترین درصد تنوع فضایی میانگین سالانه خشکی (۱۰۵٪-۷۱٪)، در دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۲ در جنوب شرق و سواحل جنوبی کشور مشاهده شد و بر اساس مدل‌ها درصد تنوع مکانی خشکی در آینده کاهش می‌یابد. روند مقادیر میانگین سالانه خشکی ایران نشان داد که خشکی در سطوح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ در گذشته افزایش یافته و در آینده بر اساس MRI-ESM2 (سناریوی SSP5-8.5 و شاخص IDM) در سطوح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ افزایش خواهد یافت. در سایر شرایط خشکی در این سطوح معناداری، کاهش نشان می‌دهند. نتایج پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی و کاهش آثار منفی تغییرات اقلیمی در ایران مفید باشد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۱/۱۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۴/۰۶

تاریخ چاپ:

۱۴۰۲/۰۵/۱۰

واژگان کلیدی:

ایران،
تغییرات فضایی،
خشکی،
روند،
CMIP6.

استناد: سلطانی، کبری؛ معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ مجرد، فیروز؛ هادی‌پور سحر و جلیلیان، عبدالله. (۱۴۰۲). تحلیل روند و تنوع فضایی خشکی در اقلیم آینده ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵ (۲)، ۵۰-۲۵.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.361339.1007777>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

DOI: 10.22059/JPHGR.2023.361339.1007777

© نویسندگان



مقدمه

مناطق خشک و نیمه‌خشک با داشتن دمای بالا و بارش کم مشخص می‌شوند. خشک‌سالی یک انحراف موقت از شرایط آب‌وهوایی طبیعی است که می‌تواند در انواع آب‌وهواها اتفاق بیفتد، درحالی‌که خشکی یک ویژگی دائمی در شرایط طولانی‌مدت هیدرولوژیکی و آب‌وهوایی یک منطقه است (Karamouz et al., 2012: 599; Radakovic et al., 2018: 888). خشکی تابع بارش سالانه، تبخیر و تعرق و دماست و به دلیل تنوع آب‌وهوایی، شاخص‌های عددی زیادی برای انواع مختلف آب‌وهوا در مناطق مختلف جهان پیشنهاد شده است (Radakovic et al., 2018: 887). از این رو شاخص‌های خشکی که اساس اندازه‌گیری بیشتر آن‌ها نیز بر پایه تغییرات بارش و دما است، مانند شاخص دمارتن^۱ (IDM) (Moral et al., 2016: 804)، شاخص ارینک^۲ (IE) (Li et al., 2017: 1019) و شاخص پینا^۳ (Ip) (Croitoru et al., 2013: 601) و یا شاخص‌هایی که بر پایه بارش و تبخیر و تعرق محاسبه می‌شوند، مانند شاخص یونسکو^۴ (AI) (Liu et al., 2019: 5260)، شاخص یونپ^۵ (AIu) (Miseckaite et al., 2018: 144)، شاخص کسری آب^۶ (WDI) (Moran et al., 1994: 249)، می‌توانند اهمیت تغییرات اقلیمی را از نظر زیست‌اقلیمی بهتر بیان کنند (Moral et al., 2017: 918).

تجزیه و تحلیل‌های به‌دست‌آمده از شاخص‌های آب‌وهوایی می‌تواند بسیار مفید باشد و به‌عنوان شاخصی برای کمبود آب استفاده شود. علاوه بر این، بسیاری از بلایای طبیعی و رویدادهای شدید، مانند طوفان‌های گردوغبار به‌شدت با خشکی مرتبطند، زیرا مناطق اصلی تولید گردوغبار در جهان در سرزمین‌های خشک و نیمه‌خشک واقع شده است (Sivakumar et al., 2005: 160).

هنگامی که صحبت از مطالعات اقلیمی به‌ویژه تغییرات اقلیمی باشد، بارش و دما از مهم‌ترین متغیرها به‌حساب می‌آیند (Moral et al., 2017: 918). توزیع زمانی و مکانی بارش و سایر متغیرهای هیدرولوژیکی می‌تواند با افزایش یا کاهش دما تغییر پذیرد (Kousari et al., 2014: 1857). با توجه به افزایش میانگین دمای جهان در قرن ۲۱ به‌ویژه برای سال‌های ۲۰۸۱-۲۱۰۰ (IPCC, 2013: 20) و تأثیر گرمایش جهانی بر روی منابع آب، کمبود و افزایش تقاضای آن، انتظار می‌رود که خشکی تبدیل به یک چالش عمده در سراسر جهان به‌ویژه در مناطق با آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک شود (Araghi et al., 2018: 2701).

کشور ایران به دلیل موقعیت خاص ویژگی‌های توپوگرافیک آن، از بارش و آب‌وهوای متفاوتی برخوردار است و میزان بارش متوسط سالانه آن حدود یک‌سوم متوسط بارش کره زمین می‌باشد، به همین دلیل قسمت اعظم ایران در قلمرو آب‌وهوایی خشک جهان قرار می‌گیرد (تیموری و همکاران، ۱۳۹۰: ۸۸۳). همچنین پژوهش‌هایی که روند بلندمدت تغییرات بارش و دما را در نقاط مختلف ایران مورد بررسی قرار داده‌اند، دلالت بر تغییرات مقدار بارش و گرم شدن فلات ایران دارند (طبری و طلایی، ۲۰۱۱: ۱؛ طبری و همکاران، ۲۱۱: ۱۲۸؛ سلطانی و همکاران، ۲۰۱۶: ۷۷۵؛ میری و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۶۹). این تغییرات می‌توانند موجب افزایش تبخیر و تعرق (نوری و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۴۱)، خشکی (Lickley & Solomon, 2018: 11) برهم زدن تعادل محیط (علیجانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۲) در مناطق مختلف شوند.

1. De-Marten Index (IDM)

2. Erinc Index (IE)

3. Pina Index (Ip)

4. UNESCO Aridity Index (AI)

5. UNEP Aridity Index (AIu)

6. Water Deficit Index (WDI)

با توجه به شواهد افزایش تغییرات اقلیمی طی سال‌های اخیر (IPCC, 2013: 161) و مدیریت و برنامه‌ریزی در زمینه‌هایی همچون منابع آب، کشاورزی، بیابان‌زایی، بررسی تغییرات خشکی، جابجایی مناطق خشک و... مطالعات فراوانی در سراسر جهان با استفاده از شاخص‌های خشکی صورت پذیرفته است. به‌عنوان مثال، در بررسی اثرات تغییر اقلیم و پیش‌بینی آینده خشکی، هوانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۶: ۱۶۶) افزایش و گسترش سرزمین‌های خشک کره زمین را به میزان ۵۶٪ و ۵۰٪، به ترتیب بر اساس RCP4.5 و RCP8.5 تا پایان قرن حاضر نسبت به دوره پایه (۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰) پژوهش خود گزارش کرده‌اند. یین و همکاران^۲ (۲۰۱۵: ۴۳۸۷) با استفاده از AI و مدل‌های گردش عمومی جو^۳ (GCMs) بر پایه سناریوهای انتشار (RCPs) دریافتند که غرب و شرق چین به ترتیب مرطوب‌ترین و خشک‌ترین نواحی در اواسط قرن ۲۱ خواهند بود. اسدی زرج و همکاران (۲۰۱۷: ۴۵۱) نتیجه گرفتند که تحت اثر گرمایش جهانی درصد مناطق بسیارخشک و مرطوب کاهش، و سهم مناطق خشک، نیمه‌خشک و نیمه مرطوب جهان افزایش خواهد یافت. بختیاری و همکاران (۱۴۰۰: ۱) در تحلیل روند AI در چند نمونه اقلیمی ایران (رشت، یاسوج، ایلام، مشهد و کرمان)، افزایش خشکی در گذشته (۲۰۱۹ - ۱۹۹۰) و آینده (۲۰۲۰ - ۲۰۵۰) را در همه ایستگاه‌ها به‌جز مشهد بیان کردند.

در بررسی نتایج مطالعات مربوط به تغییرات خشکی وانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۴: ۲۸۰) نتیجه گرفتند که چین از ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۳ روند مرطوب شدن و از سال ۱۹۹۳ (تا ۲۰۱۵) روند خشکی داشته، لیو همکاران^۵ (۲۰۱۸: ۱۱۸۷) افزایش خشکی در تبت (۱۹۶۰ تا ۲۰۱۲) را نتیجه گرفتند. درحالی‌که لیو همکاران (۲۰۱۹: ۵۰) مرطوب شدن مناطق خشک و نیمه‌خشک فلات تبت و شمال غرب چین را طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۶ بیان کرده‌اند. وو همکاران^۶ (۲۰۱۶: ۱)؛ لی و همکاران^۷ (۲۰۱۸: ۱۰۱۷) نیز در سینجیانگ^۸ (شمال غرب چین) به نتیجه‌ای مشابه مطالعه اخیر دست‌یافته‌اند.

نتایج مطالعه طاوسی (۱۳۹۷: ۸۵) با استفاده از شاخص AI_U نشان‌دهنده تغییر از شرایط آب‌وهوایی نیمه مرطوب به خشک نیمه مرطوب و خشک نیمه مرطوب به نیمه‌خشک برای غرب و شمال غرب ایران در دوره ۲۰۱۰ - ۱۹۸۱ می‌باشد. اما این مطالعه نشان داد که روند خشکی تنها برای ۶ ایستگاه از ۳۲ ایستگاه، معنی‌دار بوده است. نوری و همکاران (۱۳۹۵: ۴۳۹) نیز در بررسی دوره ۲۱۰۰-۱۹۶۶ به نتیجه تقریباً مشابهی با طاوسی (۱۳۹۷: ۸۵) رسیده و روند شاخص AI را در شمال غرب و غرب برای ۲۰۱۰-۱۹۶۶ و ۲۱۰۰-۲۰۱۱ را در ایران کاهش اعلام کردند. همچنین بررسی تغییرات در آینده نیز بیانگر تغییر طبقه اقلیم از نیمه‌خشک به خشک بوده، و بیشترین کاهش فصلی برای شاخص AI تحت دو سناریوی A2 و B2 به ترتیب در تابستان و بهار می‌باشد.

نوری و بنایان (۲۰۱۹: ۱۰۷۳) نشان دادند. که تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۲ در فصل زمستان افزایش داشته است و در فصل‌های زمستان و بهار، ۸۵٪ از ایستگاه‌های مورد مطالعه ایران (۲۲ ایستگاه)، روند کاهشی بارش سالانه و خشکی را تجربه کرده‌اند. مطالعه رنجبر و طباطبایی (۱۴۰۱: ۱۳) نشان داد که شاخص خشکی AI در ایستگاه‌های مورد مطالعه سواحل جنوبی خزر در دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۲ دارای روند کاهشی (افزایش خشکی) بوده است. ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکی با استفاده از AI، ساهین^۹ (I_q) و I_E بیان داشتند

1. Huang
2. Yin
3. General Circulation Models
4. Wang
5. Liu
6. Wu
7. Li
8. Xinjiang
9. Sahin Index

که به‌طور کلی شاخص‌های AI و Iq به ترتیب بهترین اعتبار را برای توزیع خشکی در ایران و جداسازی نواحی رطوبتی جنوب خزر دارند و خشکی در ۸۰٪ (۵۱ ایستگاه) از ایستگاه‌های مورد مطالعه ایران در سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰ افزایش داشته است. عراقی و همکاران (۲۰۱۸: ۲۷۰۱) بیان داشتند که در یک دوره ۶۰ ساله (۱۹۵۴ تا ۲۰۱۳)، ۸۰٪ مساحت ایران شامل مناطق خشک بوده است، با این تفاوت که این مطالعه روند معنی‌دار مثبت یا منفی‌ای برای بیشتر بخش‌های ایران مشاهده نکرده است. پراوالی و بنداک^۱ (۲۰۱۵: ۲۶۵) بر اساس شاخص‌های AI_U، IDM و WDI، بیان داشتند که روند افزایشی خشکی (۲۰۰۹-۱۹۶۱) در دابروگا^۲ (رومانی)، با توجه به تغییرات آب‌وهوایی می‌تواند به یک بحران ملی تبدیل شود. مورال و همکاران^۳ (۲۰۱۶: ۹۱۷)، افزایش خشکی و تغییرات مکانی آن را بر اساس شاخص دمارتن برای فصول پاییز و بهار (۲۰۱۱-۱۹۸۰) در اکسترمادورا^۴ (جنوب غرب اسپانیا) نشان دادند.

طاوسی و همکاران (۱۳۸۹: ۹۴) بر اساس شاخص یونپ، تغییر به اقلیم‌های خیلی خشک را در جنوب شرق ایران زنگ خطری برای افزایش نگرانی‌های زیست‌اقلیمی به‌خصوص گسترش بیابان تحت اثر گرمایش جهانی بیان کرده‌اند. سرلک و محمود آقا^۵ (۲۰۱۸: ۸۹) با هدف آشکارسازی بیابان‌زایی و اهمیت منابع آب در مطالعه تغییرات خشکی عراق (۲۰۱۱-۱۹۸۰) دریافتند که ۸۷٪ تا ۱۰۰٪ از این سرزمین شامل نواحی خشک و نیمه‌خشک است و علاوه بر نواحی جنوبی و مرکزی، نواحی شمالی عراق نیز خشک‌تر شده‌اند. جبرمدهین و همکاران^۶ (۲۰۱۸) با توجه به افزایش خشکی شمال اتیوپی (۲۰۱۲-۱۹۸۰) با استفاده از شاخص‌های IDM، Ip و شاخص خشکی سازمان خواربار و کشاورزی^۷ (IF)، اهمیت استفاده از سیستم‌های مناسب آبیاری و مدیریت منابع آب را یادآور شده‌اند.

هادیپور و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی جابجایی مناطق خشک ایران (۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶)، تغییر ۴/۸۴٪ از مناطق نیمه‌خشک به خشک به دلیل افزایش میزان خشکی سالانه گزارش کرده‌اند. همچنین ۴/۸۴٪ از مناطق خشک به خیلی خشک در تابستان و ۶/۴۵٪ از اراضی نیمه‌خشک به خشک در طول زمستان تبدیل شده است. اما فقط گسترش مناطق نیمه‌خشک به خشک-نیمه مرطوب از نظر آماری معنی‌دار بوده است. مراتع و مزارع در شمال و شمال غرب ایران، بیشترین تأثیر را از گسترش خشکی متحمل شده‌اند.

مطالعاتی در بررسی خشک‌سالی، ارزیابی و مدیریت منابع آب و بیابان‌زایی نیز با استفاده از شاخص‌های خشکی صورت گرفته است. به‌طور مثال، ژائو همکاران^۸ (۲۰۱۸: ۷۱۱) در بررسی خشک‌سالی‌های چین (۱۹۶۰ تا ۲۰۱۳) بیان کردند که روند افزایشی در خشکی و تبخیر و تعرق پس از سال ۲۰۰۰، افزایش خشک‌سالی‌های جنوب غرب چین را در سال‌های اخیر سبب شده است. نتایج نادری (۱۳۹۹: ۸۵) در بررسی مناطق شمالی استان فارس با استفاده از مدل‌های CMIP5 نشان داده که در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۵) تعداد سال‌های خشک‌سالی کاهش خواهد داشت. اما در آینده دورتر (۲۰۸۵-۲۰۵۶) تعداد سال‌های خشک‌سالی افزایش می‌یابد و شدت آن‌ها بیشتر خواهد شد.

منابع موجود دربرگیرنده مطالعات فراوانی در رابطه با خشکی و یا متغیرهای مؤثر بر آن در سال‌های اخیر است. اما با توجه به قرارگیری ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک، و آسیب‌پذیری آن به‌عنوان یک کشور درحال توسعه، مطالعه

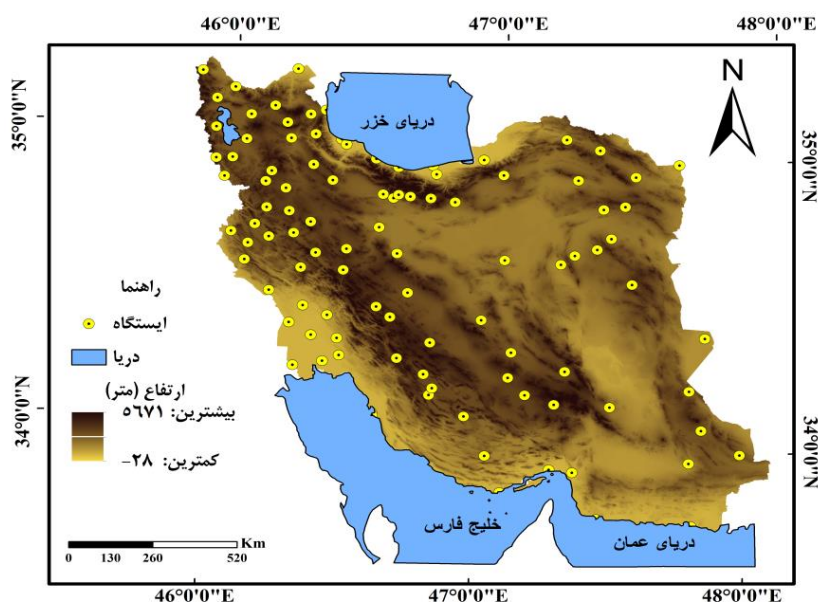
1. Pravalie & Bando
2. Dobrogea
3. Moral
4. Extremadura
5. Sarlak & Mahmood Agha
6. Gebremedhin
7. Food and Agriculture Organization (FAO) aridity index (IF)
8. Zhao

مربوط به آینده با استفاده از فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده^۱ (CMIP6) که تاکنون در بررسی خشکی برای ایران استفاده نشده‌اند، می‌تواند ضمن مقایسه نتایج خشکی حاصل از پرونداد مدل‌های گزارش ششم با داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده در مطالعات پیش از خود، نسخه‌ای بروز از تنوع فضایی و روند زمانی خشکی در آینده ارائه کند. با توجه به مباحث مطرح شده در بیان هدف این پژوهش، ضرورت پایش تغییرات خشکی با توجه به احتمال افزایش آن در آینده (طبری و آقاجانلو، ۲۰۱۳: ۳۹۶؛ نوری و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۳۹)، احتمال وقوع بحران آب به دلایلی همچون رشد سریع جمعیت، کشاورزی و مدیریت ناکارآمد منابع طبیعی (Madani, 2014: 315) بیش از پیش روشن می‌شود. لذا در این تحقیق سعی بر آن بود تا با استفاده از شاخص‌های AI و IDM که بیشترین استفاده در ادبیات پژوهش‌های مرتبط با خشکی داشته‌اند (به ویژه AI برای ایران)، تنوع فضایی و روند زمانی خشکی در آینده (۲۰۲۰ - ۲۰۵۰) بر اساس سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل‌های CMIP6 (MRI-ESM2 و GFDL-ESM4) نسبت به داده‌های دیدبانی شده (۲۰۱۴ - ۱۹۹۲) بررسی شود. از ضریب تغییرات^۲ و تحلیل روند نوآورانه^۳ به ترتیب برای برآورد تنوع خشکی و بررسی روند زمانی آن استفاده شد.

روش پژوهش

داده‌های مشاهداتی

داده‌های مشاهداتی ماهانه (جدول ۱)، شامل بارش، ساعت آفتابی، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد جهت برآورد تبخیر و تعرق برای محاسبه شاخص AI و همچنین میانگین دما برای محاسبه شاخص IDM در مقیاس میانگین سالانه، برای یک دوره ۲۳ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۱۴) از سازمان هواشناسی کشور برای ۱۰۲ ایستگاه همدید (شکل ۱)، اخذ شد. به دلیل نقص داده‌های ساعت آفتابی، مقادیر از ۱۹۹۲ استفاده شد. جهت بررسی کیفیت داده‌ها از آزمون توالی یا دنباله‌ها (Run Test) استفاده گردید.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های همدید مورد مطالعه

1. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
2. Coefficient of variation (CV)
3. Innovative Trend Analysis (ITA)

مدل‌های CMIP6

مدل‌های گردش عمومی، نمایانگر فرایندهای فیزیکی در جو، اقیانوس، کریوسفر و سطح زمین، و در حال حاضر پیشرفته‌ترین ابزارهای موجود برای شبیه‌سازی پاسخ سیستم آب‌وهوای جهانی به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای هستند (Majumder, 2015: 62). در حال حاضر CMIP6 با ارائه ۲۱ MIP آخرین نسل از پروژه مقایسه مدل‌های آب‌وهوا (CMIP) هستند. هر یک از پروژه‌های مقایسه‌ای مورد تأیید CMIP6 موضوعات منحصربه‌فرد آب‌وهوا را پوشش می‌دهد (Eyring et al., 2016: 1937). CMIP6 شامل شبیه‌سازی AOGCM و مدل سیستم زمین (ESM) از آب‌وهوای جهانی است که با هم تحت عنوان GCM تهیه شده‌اند. هر شبیه‌سازی ScenarioMIP در CMIP6 شامل ترکیبی از یک نماینده خط سیر غلظت^۱ (RCPs) گازهای گلخانه‌ای و یک مسیر مشترک اقتصادی-اجتماعی^۲ (SSP) ساخته شده است (Grose et al., 2020). المزروئی و همکاران^۳ (۲۰۲۰: ۳۱۴) در مطالعه خود گزارش کرده‌اند که مدل‌های CMIP6 در مقایسه با مدل‌های CMIP5، حساسیت آب‌وهوایی بیشتری نسبت به انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان می‌دهند. برخی دیگر مانند مهران و همکاران^۴ (۲۰۱۴: ۱۷۰۵) معتقدند که وابسته به منطقه آب‌وهوایی مورد مطالعه، ممکن است مدل‌های آب‌وهوایی در مناطق با توپوگرافی پیچیده و پرشیب، برای بعضی از متغیرهای اقلیمی بیش برآوردی و یا در مناطق خشک کم برآوردی داشته باشند.

سناریوها بخش اساسی تحقیقات تغییر اقلیم را تشکیل می‌دهند و استفاده از آن‌ها به ما کمک می‌کند تا عواقب طولانی‌مدت تصمیمات کوتاه‌مدت بشر را بیشتر درک کنیم، و با توجه به عدم قطعیت، سناریوها به محققان کمک می‌کند تا بتوانند آینده‌های احتمالی را کشف کنند (Riahi et al., 2017: 154). در سناریوهای CMIP6 فاکتورهای اجتماعی-اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری استفاده شده است (زرین و صالح‌آبادی، ۱۳۹۸). چارچوب سناریوهای جدید که توسط جامعه تحقیقاتی تغییر اقلیم طراحی شده‌اند می‌توانند تجزیه و تحلیل یکپارچه‌ای از تأثیرات آینده آب‌وهوا، آسیب‌پذیری‌ها، سازگاری و کاهش این آسیب‌ها را فراهم کنند. SSPs دارای پنج روایت از تحولات اجتماعی-اقتصادی از جمله: توسعه پایدار، توسعه میانه، رقابت منطقه‌ای، نابرابری و توسعه با سوخت فسیلی است (Riahi et al., 2017: 154). کمیت‌های اصلی شامل سن، جنسیت، تحصیلات، شهرنشینی و توسعه اقتصادی (درآمد سرانه) می‌باشد. پنج سناریوی اصلی و تعدادی سناریوی فرعی به‌عنوان سناریوهای جدید در این مدل‌ها جهت شبیه‌سازی اقلیم آینده طراحی شده است (زرین و صالح‌آبادی، ۱۳۹۸).

بسیاری از پژوهشگران معتقدند که مدل‌های گردش عمومی جو اقیانوس تخمین معتبری از تغییرات آب‌وهوا را در آینده ارائه می‌دهند (Randall et al., 2007: 591). در پژوهش حاضر تمامی داده‌های مذکور در قسمت داده‌های مشاهده شده بر اساس رده‌بندی ارائه شده توسط ابزار GCMeval از CMIP6 (مدل MRI-ESM2-0 و GFDL-ESM4) شامل داده‌های پیش‌یابی شده ۲۰۵۰-۲۰۲۰ (جدول ۱)، تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ کیلومتر اخذ گردید. سپس داده‌ها در نرم‌افزار R با دستور ریسَمپل^۵ از بسته رستر^۶ به داده‌های با قدرت تفکیک ۵۰ در ۵۰ کیلومتر تبدیل شدند و با استفاده از دو شاخص خشکی AI و IDM محاسبات انجام شد. به دلیل فقدان داده ساعت

1. Representative Concentration Pathway
2. Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)
3. Almazroui
4. Mehran
5. Resample
6. Raster Package

آفتابی در مدل‌های CMIP6، جهت برآورد تبخیر و تعرق به روش پنمن-مونیت فائو ۵۶ و محاسبه شاخص AI، این متغیر با استفاده از داده‌های ورودی (موج کوتاه و بلند) و خروجی (موج کوتاه و بلند) مدل‌ها و روش برآورد تابش لی و همکاران^۱ (۲۰۱۹: ۵۲۶۱) محاسبه شد. پس از محاسبه شاخص‌ها، نقشه‌های پهنه‌بندی خشکی و تغییرات خشکی در دوره گذشته و آینده، و همچنین نقشه‌های حاصل از تفاضل میانگین سالانه خشکی و تغییرات (ناهنجاری‌ها) برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ نسبت به دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۲ در Arc gis10.5 تولید شدند.

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش

دوره زمانی	مشخصات	داده	مرکز اخذ داده
۱۹۹۲ - ۲۰۱۴	ماهانه	بارش، حداکثر، حداقل و متوسط دما، سرعت باد در ارتفاع ۲ متر و ساعت آفتابی برای ۱۰۲ ایستگاه همدید	سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)
۲۰۲۰ - ۲۰۵۰	ماهانه GFDL-ESM4 MRI-ESM2-0 تفکیک مکانی ۱۰۰ کیلومتر	بارش، تابش موج بلند ورودی (rlds)، تابش موج کوتاه ورودی (rsds)، تابش موج بلند خروجی (rlus)، تابش موج کوتاه خروجی (rsus)، حداکثر، حداقل و متوسط دما، سرعت باد در ارتفاع ۲ متر	اتحادیه شبکه سیستم زمین (ESGF)

ابزار GCMeval

با افزایش تعداد GCM های در دسترس، مدل‌سازان منطقه‌ای مجبور به انتخاب فناوری برای انتخاب زیرمجموعه‌ای قابل مدیریت برای کاهش این حجم از مدل‌ها و انتخاب متناسب‌ترین آن‌ها هستند (Landgren et al., 2020). GCMeval ابزاری برای انتخاب و ارزیابی GCMs می‌باشد. این ابزار با استفاده از بسته "Shiny" در نرم‌افزار R ایجاد شده است (Chang et al., 2017)، و به‌عنوان یک برنامه آنلاین از طریق آدرس <https://gcmeval.met.no> نیز در دسترس کاربران قرار گرفته است. GCMeval با ارزیابی مدل‌های آب‌وهوایی از گروه‌های CMIP5 و CMIP6، مدل‌های آب‌وهوایی با بدترین عملکرد را کنار گذاشته و برای حفظ گروه کامل مدل‌ها با بهترین مشخصات آماری تلاش می‌کند. از مزیت‌های این ابزار، تعیین "وزن برای ارزیابی مهارت" مدل‌ها، شامل اهمیت منطقه مورد مطالعه، متغیرها، فصول و امتیاز مهارتی (مانند اریبی، همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطا) است. بر اساس این انتخاب‌ها، مدل‌های اقلیمی با توجه به نمایش آب‌وهوای گذشته، رتبه‌بندی می‌شوند (Parding et al., 2020). از معایب این روش این است که تنها بر اساس SSP585 از سناریوهای CMIP6 و RCP8.5 از سناریوهای CMIP5 ارزیابی مدل‌ها را انجام می‌دهد و داده‌های مورد بررسی در حال حاضر تنها به بارش و دما اختصاص می‌یابد. در این مطالعه از این ابزار جهت انتخاب مدل‌ها استفاده شد، اما به دلیل کمبود برخی از متغیرهای مورد نیاز در زمان شروع تحقیق، مدل‌های رده چهارم و پنجم اخذ شد.

شاخص‌های محاسبه خشکی

در این مطالعه جهت برآورد مقادیر خشکی در ایران از شاخص‌های AI و IDM استفاده شد.

شاخص خشکی یونسکو (AI)

AI یک شاخص عددی جهت ارزیابی میزان خشکی در آب‌وهوای طولانی‌مدت است (Cherlet et al., 2018: 72). بر اساس نسبت بارندگی بر آب از دست‌رفته از طریق تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد و به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (UNESCO, 1979: 10):

$$AI = \frac{P}{ET_0} \quad \text{رابطه ۱}$$

طبقه‌بندی مقادیر بالای AI به معنای مرطوب بودن اقلیم و مقدار کم آن به معنای اقلیم خشک است. مقادیر طبقات این شاخص به صورت جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲. شاخص خشکی یونسکو

شماره طبقه	مقادیر شاخص	نوع اقلیم
۱	$AI < 0.3$	خیلی خشک
۲	$0.3 \leq AI < 0.5$	خشک
۳	$0.5 \leq AI < 0.7$	نیمه خشک
۴	$0.7 \leq AI < 0.9$	نیمه مرطوب
۵	$AI \geq 0.9$	مرطوب

منبع: (UNESCO, 1979: 11)

پنمن مانتیث- فائو ۵۶^۱

در AI، مقادیر ET_0 با استفاده از معادله PMF56 (رابطه) محاسبه می‌شود. روش پنمن مانتیث فائو به عنوان روش استاندارد محاسبه تبخیر و تعرق مرجع پیشنهاد شده است (Allen et al., 1998: 15). در تحقیق حاضر برآورد تبخیر و تعرق برای دوره‌های مورد نظر با استفاده از روش تعریف شده در بسته شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) انجام شد (Begueria et al., 2018: 12). این روش از رابطه ۲ استفاده می‌کند (Allen et al., 1998: 15).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \left[\frac{900}{T+273} \right] u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (mm day^{-1})، Rn تابش خالص سطح پوشش گیاهی ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، G چگالی شار گرمای خاک ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، T متوسط ماهانه دمای هوا در ارتفاع ۲ متری ($^{\circ}\text{C}$)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m s^{-1})، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، e_a فشار واقعی بخار (KPa)، $e_s - e_a$ کسری فشار بخار اشباع (KPa)، Δ منحنی شیب فشار بخار ($\text{Kpa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) و γ ثابت سایکرومتریکی ($\text{Kpa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) می‌باشد.

شاخص خشکی دمارتن (IDM)

این شاخص توسط دمارتن در سال ۱۹۲۵ پیشنهاد شده است و طبق آن هفت ناحیه اقلیمی (جدول ۳) تعریف شده است (Baltas, 2007: 71). این شاخص برای مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه مورداستفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر معادله سالانه آن مدنظر است که به صورت رابطه ۳ می‌باشد (Moral et al., 2016: 804).

$$IDM = \frac{P}{T+10} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن P میانگین بارندگی سالانه (mm) و T میانگین سالانه دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$) است.

جدول ۳. طبقه‌بندی شاخص خشکی دمارتن

شماره طبقه	مقادیر شاخص	نوع اقلیم
۱	IDm < ۱۰	خشک
۲	۱۰ ≤ IDm < ۲۰	نیمه‌خشک
۳	۲۰ ≤ IDm < ۲۴	مدیترانه‌ای
۴	۲۴ ≤ IDm < ۲۸	نیمه مرطوب
۵	۲۸ ≤ IDm < ۳۸	مرطوب
۶	۳۸ ≤ IDm ≤ ۵۵	خیلی مرطوب
۷	IDm > ۵۵	بسیار مرطوب

منبع: (Baltas, 2007: 71)

ضریب تغییرات^۱ (CV)

در پژوهش حاضر جهت برآورد تنوع مکانی خشکی از CV استفاده شده است. CV (رابطه ۴)، از تقسیم انحراف معیار بر میانگین به دست می‌آید. در این رابطه، SD انحراف معیار و \bar{X} میانگین است (Li et al., 2017: 1020).

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \quad \text{رابطه ۴}$$

تحلیل روند نوآورانه^۲ (ITA)

ITA روشی است که در سال‌های اخیر توسط Sen (2012) معرفی شده است. ITA یک روش ناپارامتریک است که به توزیع داده‌ها، خودهمبستگی و طول داده‌ها بستگی ندارد (Marak et al., 2020: 1399). ITA با نادیده گرفتن چرخه فصلی و طول سری‌های زمانی، برآورد مناسبی از روند را فراهم کرده و امکان بررسی روندهای فرعی پنهان موجود در داده‌ها را فراهم می‌کند. بنابراین، از روش ITA می‌توان برای برآورد روند یکنواخت موجود در سری‌های زمانی که با گذشت زمان ادامه دارد، استفاده نمود. این روش در سال‌های اخیر در مطالعات زیادی در سراسر جهان به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Ali et al., 2019).

برای تشخیص روند در سری‌های زمانی بر اساس این روش، داده‌ها از تاریخ ابتدا تا انتها به‌طور مساوی به دو بخش تقسیم شده و هر دو زیر سری به شکل صعودی مرتب می‌شوند و بر روی یک دستگاه مختصات دکارتی قرار داده می‌شوند، به‌گونه‌ای که نیمه اول آن (Xi) بر روی محور افقی و نیمه دوم آن (Yj) بر روی محور عمودی قرار می‌گیرد، و دامنه هر دو محور باید برابر باشد و یک خط نیم‌ساز ۱:۱ (خط ۴۵ درجه) نمودار را به دو مثلث مساوی تقسیم می‌کند. اگر همه نقاط بر روی خط ۱:۱ و یا نزدیک به آن قرار بگیرند به معنای عدم وجود روند در سری زمانی می‌باشد، در صورتی که نقاط در ناحیه مثلث فوقانی خط ۱:۱ قرار بگیرند، نشان‌دهنده روند افزایشی در سری‌های زمانی است و نقاطی که در ناحیه مثلث تحتانی خط ۱:۱ قرار بگیرند، نشان‌دهنده روند کاهشی در سری‌های زمانی داده می‌باشد. پس در مورد یک روند افزایشی (کاهشی)، همه نقاط در بالای خط (زیر خط) ۱:۱ قرار می‌گیرند (Ali et al., 2019).

Sen در سال 2017 روش ITA را در سطح معنی‌داری ۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ برای درک بهتر ماهیت روند موجود در سری زمانی داده‌ها آزمایش نمود (Sen, 2017: 941). برای محاسبه ITA می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود (Choudhary et al., 2023: 941):

1. Coefficient of Variation (CV)
2. Innovative trend analysis (ITA)

رابطه ۶)
$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2(X_i - X_j)}{n}$$
 که در آن S شیب ITA است، n تعداد داده‌ها، X_i و X_j به ترتیب میانگین حسابی نیمه اول و دوم سری زمانی هستند. جهت کسب اطلاع بیشتر از جزئیات این روش می‌توان به مطالعات سن^۱ (۲۰۱۷: ۹۴۱) و ژو همکاران^۲ (۲۰۱۸: ۶۸۰) مراجعه کرد.

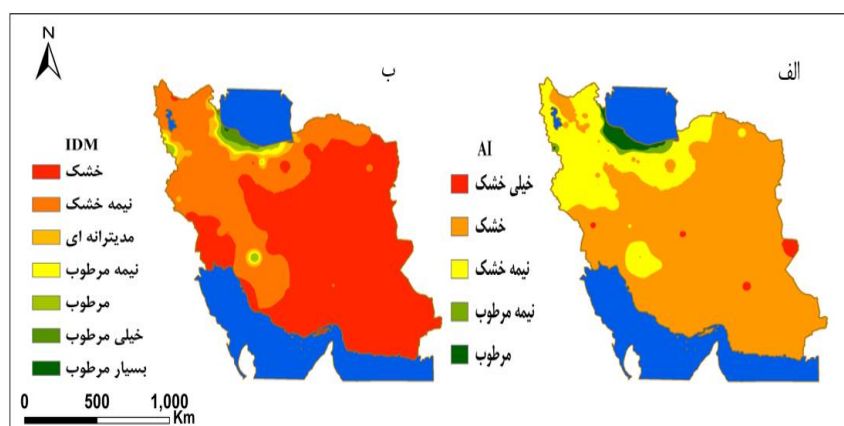
منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری با مساحت حدود ۱۶۹۸۱۹۵ کیلومتر مربع است که بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه طول شرقی واقع شده است. حدود ۹۰٪ سطح کشور را اقلیم خشک و نیمه‌خشک فراگرفته است (جعفری و آوجی، ۱۳۹۶: ۹۰). مهم‌ترین علت خشکی آب‌وهوای ایران را باید مربوط به موقعیت جغرافیایی آن دانست، چراکه هم به استوا نزدیک است (دریافت تابش خورشیدی بیشتر) و هم تحت تأثیر پرفشار جنب حاره واقع شده است. از طرفی رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز از ورود رطوبت به مناطق خشک داخلی جلوگیری می‌کنند. از عوامل دیگر تأثیرگذار بر خشکی ایران دور بودن بخش بزرگی از وسعت سرزمین ایران از دریاها و اقیانوس‌ها است (Jafari et al., 2018: 9).

یافته‌ها

توزیع مکانی خشکی در ۲۰۱۴-۱۹۹۲

توزیع مکانی میانگین سالانه خشکی ایران بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده برای شاخص‌های AI و IDM (جدول ۲ و ۳) ترسیم شده است. الگوی دوره مشاهداتی (شکل ۲) و درصد توزیع خشکی آن (جدول ۴) با استفاده از AI و IDM نشان می‌دهد که در این دوره، نیمه‌های شرقی و جنوبی ایران به سمت نواحی داخلی و جنوب غرب کشور به ترتیب با ۷۴/۶٪ و ۶۳/۵٪ مساحت ایران در طبقه خشک قرار گرفته‌اند. بر اساس AI (شکل ۲ الف) ایستگاه زابل در اقلیم خیلی خشک واقع شده است. ۲/۶٪ و ۲/۳٪ از مساحت ایران شامل سواحل جنوبی دریای خزر تا دامنه‌های شمالی البرز و بخش کوچکی از شمال غرب کشور دارای شرایط نیمه مرطوب تا مرطوب بر اساس AI و IDM (شکل ۲ ب و ب) و ۰/۸٪ آن دارای شرایط خیلی مرطوب در جنوب غرب سواحل جنوبی خزر بر اساس IDM (شکل ۲ ب) بوده است.



شکل ۲. میانگین سالانه خشکی، دوره ۱۹۹۲-۲۰۱۴، الف) شاخص AI و ب) شاخص IDM

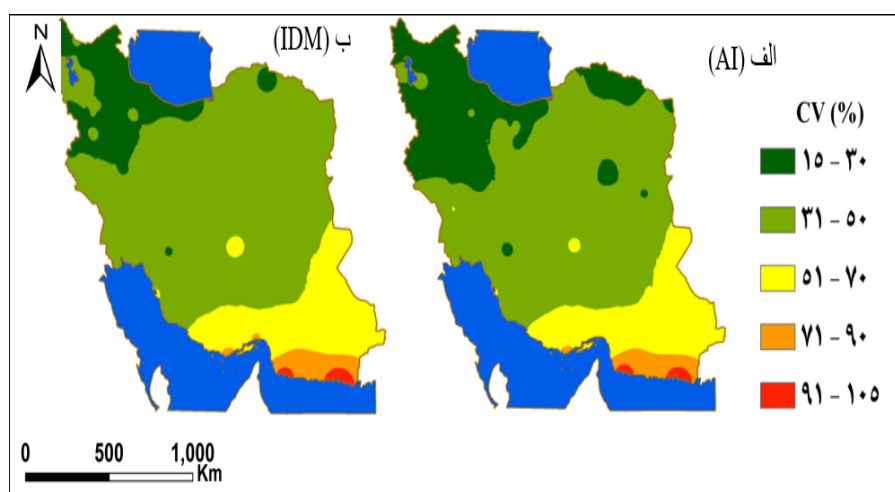
1. Sen
2. Zhou

جدول ۴. درصد مساحت میانگین سالانه خشکی دوره مورد مطالعه

				دوره آماری	شاخص
۲۰۲۰ - ۲۰۵۰		۱۹۹۲ - ۲۰۱۴		مشاهده‌ای	
GFDL-ESM4		MRI-ESM2		نوع اقلیم	
SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5		
۰	۰	۰	۰	۰/۸	خیلی خشک
۷۲/۲	۶۴/۵	۶۰/۹	۶۴/۲	۷۴/۶	خشک
۲۷/۱	۳۲/۷	۳۳/۴	۳۴	۲۲	نیمه خشک
۰/۷	۲/۸	۵/۵	۱/۷	۱	نیمه مرطوب
۰	۰	-۰/۲	-۰/۱	۱/۶	مرطوب
%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	جمع کل
۵۹	۴۹/۳	۳۶/۷	۳۸/۶	۶۳/۵	خشک
۲۵/۸	۳۰	۳۴/۲	۳۴/۶	۳۱/۲	نیمه خشک
۴/۳	۴/۷	۸/۱	۷/۲	۲/۲	مدیترانه‌ای
۳/۹	۵/۱	۵/۴	۵	۱/۱	نیمه مرطوب
۷	۱۰/۹	۱۲/۸	۱۱/۹	۱/۲	مرطوب
۰	۰	۲/۸	-۰/۹	-۰/۸	خیلی مرطوب
۰	۰	۰	۰	۰	بسیار مرطوب
%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	جمع کل

توزیع مکانی تغییرات خشکی در ۱۹۹۲-۲۰۱۴

به منظور بررسی میزان تغییرات مکانی خشکی با در نظر گرفتن کمترین و بیشترین مقادیر در طول دوره آماری مورد مطالعه، ۵ طبقه ایجاد شد که دو دسته با مقدار بالا و پایین آن به ترتیب به عنوان طبقات با تغییر زیاد و کم و دسته میانی به عنوان طبقه با تغییر متوسط، مانند جدول ۵ در نتایج ذکر می‌شود. بر این اساس در سال‌های ۱۹۹۲ - ۲۰۱۴ بیشترین تغییرات خشکی (۱۰۵٪ - ۷۱٪) در جنوب شرق کشور به ویژه در سواحل دریای عمان و بخش‌های شرقی سواحل خلیج فارس (شکل ۳ الف و ب) رخ داده، که بر اساس شاخص‌های AI و IDM، به ترتیب ۳/۵٪ و ۳/۱٪ مساحت کشور را شامل می‌شود (جدول ۵).



شکل ۳. میانگین سالانه تغییرات خشکی، دوره ۱۹۹۲-۲۰۱۴، الف) شاخص AI و ب) شاخص IDM

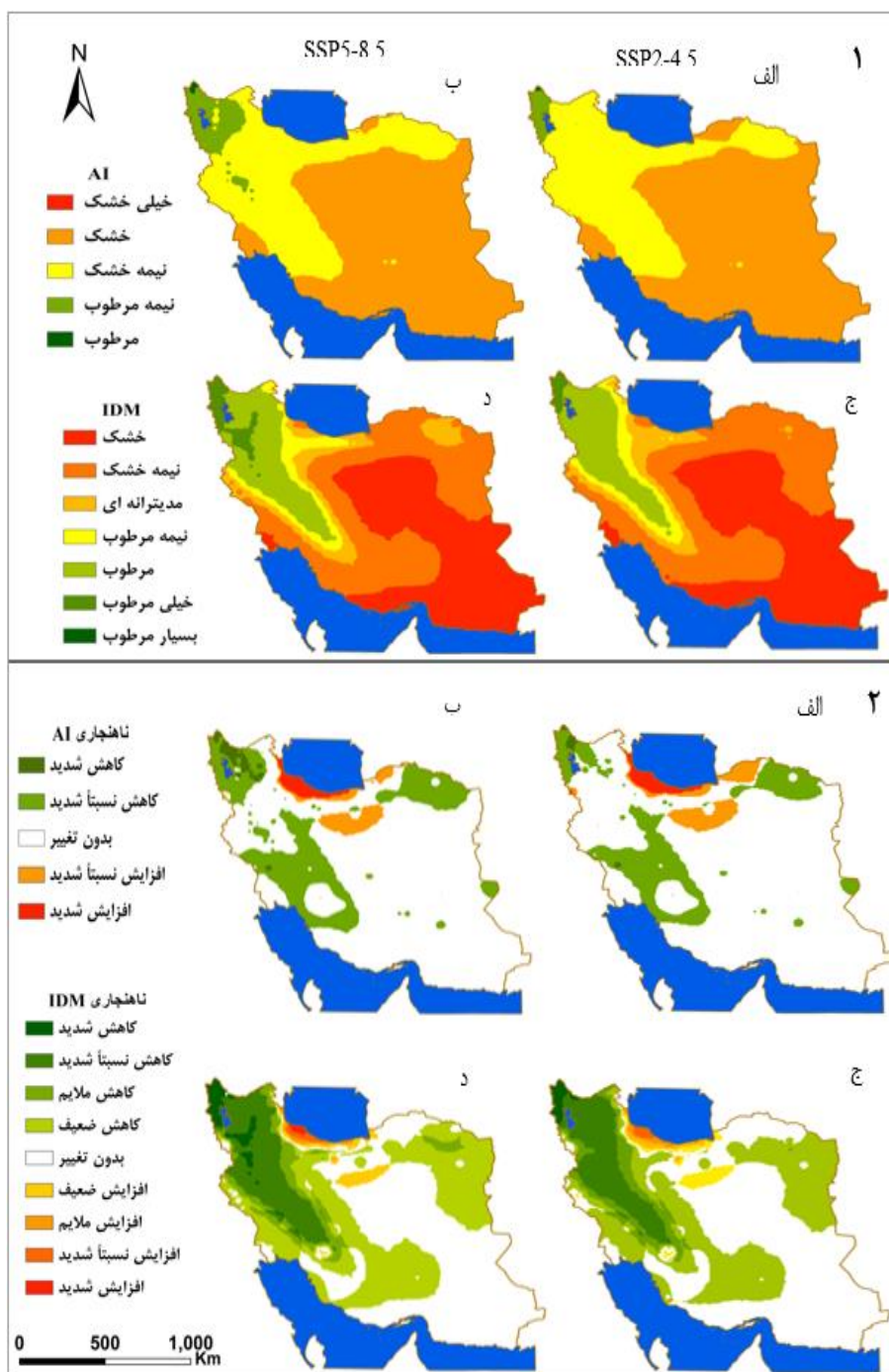
جدول ۵. درصد مساحت میانگین تغییرات سالانه تغییرات خشکی

شاخص	دوره آماری		۱۹۹۲ - ۲۰۱۴		۲۰۲۰ - ۲۰۵۰	
	نوع تغییرات	تغییرات (%)	مشاهده‌ای (%)		GFDL-ESM4 (%)	
			MRI-ESM2 (%)	MRI-ESM2 (%)	SSP5-8.5	SSP2-4.5
AI	کم	۱۵ - ۳۰	۱۲/۸	۳۴/۶	۲۰/۴	۲۵
	متوسط	۳۱ - ۵۰	۶۷	۵۴	۶۰/۸	۵۱/۸
	زیاد	۵۱ - ۷۰	۱۶/۷	۱۰/۹	۱۰/۵	۲۳
		۷۱ - ۹۰	۲/۹	۰/۵	۰/۱	۰/۲
	جمع کل	۹۱ - ۱۰۵	۰/۶	۰	۰	۰
IDM	کم	۱۵ - ۳۰	۲۲/۳	۴۰/۷	۵۶/۲	۲۷/۹
	متوسط	۳۱ - ۵۰	۵۸/۸	۵۰/۲	۳۴/۶	۵۰
	زیاد	۵۱ - ۷۰	۱۵/۸	۸/۸	۹/۲	۲۲
		۷۱ - ۹۰	۲/۵	۰/۳	۰	۰/۱
	جمع کل	۹۱ - ۱۰۵	۰/۶	۰	۰	۰

توزیع مکانی خشکی و ناهنجاری آن در ۲۰۲۰-۲۰۵۰

نقشه‌های خروجی میانگین سالانه دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ بر اساس مدل MRI-ESM2 (شکل ۱-۴ الف تا د) و درصد وسعت طبقات خشکی آن (جدول ۴) نشان‌دهنده کاهش وسعت طبقه خشک از ۷۴/۶٪ در دوره گذشته به ۶۴/۲٪ و ۶۰/۹٪ بر اساس AI و از ۶۳/۵٪ به ۳۸/۶٪ و ۳۶/۷٪ بر اساس IDM است. بخش‌هایی از شمال شرق و مناطق منطبق بر زاگرس در این دوره از شرایط خشک به نیمه‌خشک بر اساس شاخص‌ها اضافه خواهد شد. بر اساس IDM نواحی زاگرس مرکزی و شمال غرب کشور از شرایط نیمه‌خشک به مدیترانه‌ای تا مرطوب و خیلی مرطوب و بر اساس AI از خشک و نیمه‌خشک به نیمه‌خشک و نیمه مرطوب تغییر می‌یابد. الگوی مناطق دارای ناهنجاری خشکی بر اساس شاخص‌های AI و IDM (شکل ۲-۴ الف تا د) نیز گویای کاهش نسبتاً شدید خشکی در تقریباً ۱۷٪ و ۲۱٪ (جدول ۶) از مناطق منطبق بر زاگرس و شمال غرب و بخش‌هایی از شمال شرق بر اساس AI (شکل ۲-۴ الف و ب) و کاهش نسبتاً شدید آن در تقریباً ۱۱٪ و ۱۲٪ (جدول ۶) از مناطق کشور واقع در نواحی زاگرس و شمال غرب بر اساس IDM به ترتیب سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می‌باشد (شکل ۲-۴ ج و د).

کاهش رطوبت در سواحل جنوبی خزر و حذف طبقه نیمه مرطوب تا مرطوب به شرایط نیمه‌خشک بر اساس AI (شکل ۴-۱ الف و ب) و مدیترانه‌ای تا نیمه مرطوب بر اساس IDM (شکل ۴-۱ ج و د) تحت سناریوهای مورد بررسی مدل MRI-ESM2 نسبت به دوره مشاهده‌شده در گذشته رخ خواهد داد. پراکندگی مناطق دارای ناهنجاری خشکی بر اساس شاخص‌های AI و IDM و سناریوهای مدل MRI-ESM (شکل ۲-۴ الف تا د) نیز نشان‌دهنده نواحی با افزایش نسبتاً شدید تا شدید خشکی بر اساس AI (شکل ۲-۴ الف و ب) در شمال فلات مرکزی ایران، بخش‌هایی از شرق خزر و سواحل جنوبی دریای خزر با ۶/۴٪ و ۵/۴٪ مساحت کل کشور است. بر اساس الگوی IDM (شکل ۲-۴ ج و د) افزایش ملایم تا شدید خشکی در نواحی یادشده برای ناهنجاری AI، با ۴/۲٪ و ۳/۲٪ به ترتیب سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برآورد شد (جدول ۶). مناطق بر این اساس در مناطق منطبق بر زاگرس و شمال غرب کشور تا حدودی از خشکی کاسته، و نواحی شمالی به‌ویژه سواحل خزر خشک‌تر خواهد شد. در سایر مناطق کشور نیز وضعیت خشکی تغییر محسوسی نخواهد داشت.



شکل ۴. ۱- میانگین سالانه خشکی، ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰، ۲- تفاوت مناطق میانگین سالانه خشکی ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰ نسبت به ۲۰۱۴ - ۱۹۹۲ (الف و ب، شاخص AI سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، ج و د، شاخص IDM سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل MRI-ESM2)

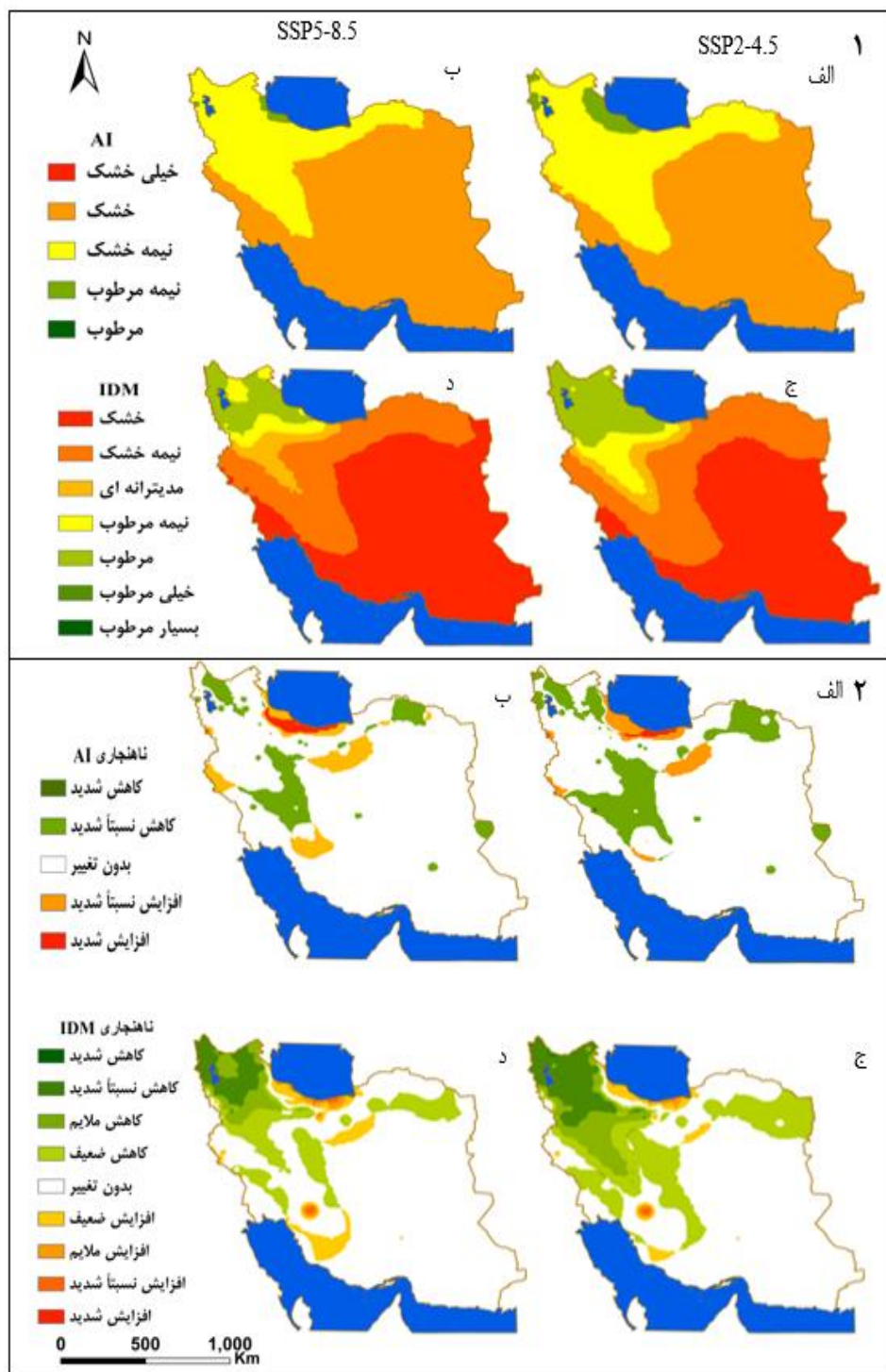
بر اساس برآورد شاخص‌ها از سناریوهای مدل GFDL-ESM4 (شکل ۱-۵ الف تا د) همانند MRI-ESM2 مناطق خشک کاهش خواهد یافت و درصد وسعت مناطق خشک از ۷۴/۶٪ در دوره گذشته (۲۰۱۴ - ۱۹۹۲) به ۶۴/۵٪ و ۷۲/۲٪ بر اساس AI و از ۶۳/۵٪ به ۴۹/۳٪ و ۵۹٪ بر اساس IDM به ترتیب سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در میانگین سال‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۵۰ خواهد رسید. در بخش‌هایی از شمال شرق بر اساس هر دو شاخص وسعت طبقه خشک کاهش می‌یابد و اقلیم نیمه‌خشک جای آن را می‌گیرد. در نواحی زاگرس مرکزی و بخش‌هایی از شمال غرب و شمال شرق کشور

بر اساس AI درصد طبقه خشک کاهش می‌یابد و شرایط نیمه‌خشک و تا حدی نیمه مرطوب (شکل ۱-۵ الف و ب) افزایش خواهد یافت. همچنین بر اساس شاخص IDM از سناریوهای این مدل (شکل ۱-۵ ج و د) در مناطق منطبق بر زاگرس تا شمال غرب کشور درصد طبقه نیمه‌خشک کاهش و بجای آن وسعت مناطق مدیترانه‌ای تا مرطوب افزایش خواهد یافت (جدول ۴).

الگوی ناهنجاری خشکی نیز بر اساس شاخص‌ها نشان‌دهنده کاهش نسبتاً شدید خشکی در تقریباً ۱۵٪ و ۹٪ (جدول ۶) از مناطق زاگرس مرکزی، بخش‌هایی از شمال شرق و شمال غرب کشور بر اساس AI (شکل ۲-۵ الف و ب) و کاهش نسبتاً شدید آن در ۸٪ و ۵٪ از نواحی شمال غرب و کاهش ملایم در ۶٪ و ۴٪ مناطق محدوده زاگرس است (جدول ۶). در سواحل شمالی کشور شرایط خشک‌تر از گذشته خواهد بود، به این صورت که از اقلیم نیمه مرطوب در بخش‌های شرقی سواحل جنوبی خزر به نیمه‌خشک و در بخش‌های غربی آن از مرطوب به نیمه مرطوب تغییر شرایط پیدا خواهد کرد. توزیع مکانی ناهنجاری افزایش خشکی سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل GFDL-ESM4 (شکل ۲-۵ الف تا د) نشان می‌دهد که در ۸٪ و ۷٪ مساحت ایران بر اساس AI و صفر و ۳٪ بر اساس IDM در سواحل جنوبی خزر و بخش‌های جنوبی دامنه‌های زاگرس افزایش نسبتاً شدید تا شدید خشکی رخ خواهد داد. تغییرات افزایشی بر اساس سناریوهای این مدل از نوع ضعیف تا ملایم برآورد می‌شود. بنابراین مدل GFDL-ESM4 نیز مانند MRI-ESM2 کاهش رطوبت در دامنه‌های شمالی البرز و کاهش خشکی در مناطق هم‌جوار زاگرس را بر اساس تمام سناریوهای موردبررسی با هر دو شاخص خشکی (شکل ۱-۵ الف تا د) با شدت ضعیف‌تری نشان می‌دهد.

جدول ۶. درصد مناطق دارای ناهنجاری سالانه خشکی دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰

شاخص	GFDL-ESM4 (%)		MRI-ESM2 (%)		نوع ناهنجاری
	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	
AI	۰	۰	۱/۴	۰/۴	کاهش شدید
	۸/۶	۱۵	۲۱	۱۶/۸	کاهش نسبتاً شدید
	۸۴/۳	۸۰/۶	۷۲/۲	۷۶/۴	بدون تغییر
	۶	۴	۳/۸	۴/۸	افزایش نسبتاً شدید
	۱/۱	۰/۴	۱/۶	۱/۶	افزایش شدید
	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	جمع کل
IDM	۰	۰	۲/۳	۱	کاهش شدید
	۴/۷	۷/۶	۱۲/۳	۱۰/۸	کاهش نسبتاً شدید
	۳/۷	۶	۵/۹	۵/۴	کاهش ملایم
	۱۲/۳	۱۹/۸	۳۱/۵	۳۰	کاهش ضعیف
	۷۳	۶۳/۳	۴۴/۶	۴۸/۶	بدون تغییر
	۵/۲	۲/۷	۲/۲	۲/۵	افزایش ضعیف
	۰/۸	۰/۶	۰/۵	۰/۹	افزایش ملایم
	۰/۳	۰	۰/۵	۰/۴	افزایش نسبتاً شدید
	۰	۰	۰/۲	۰/۴	افزایش شدید
	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	جمع کل

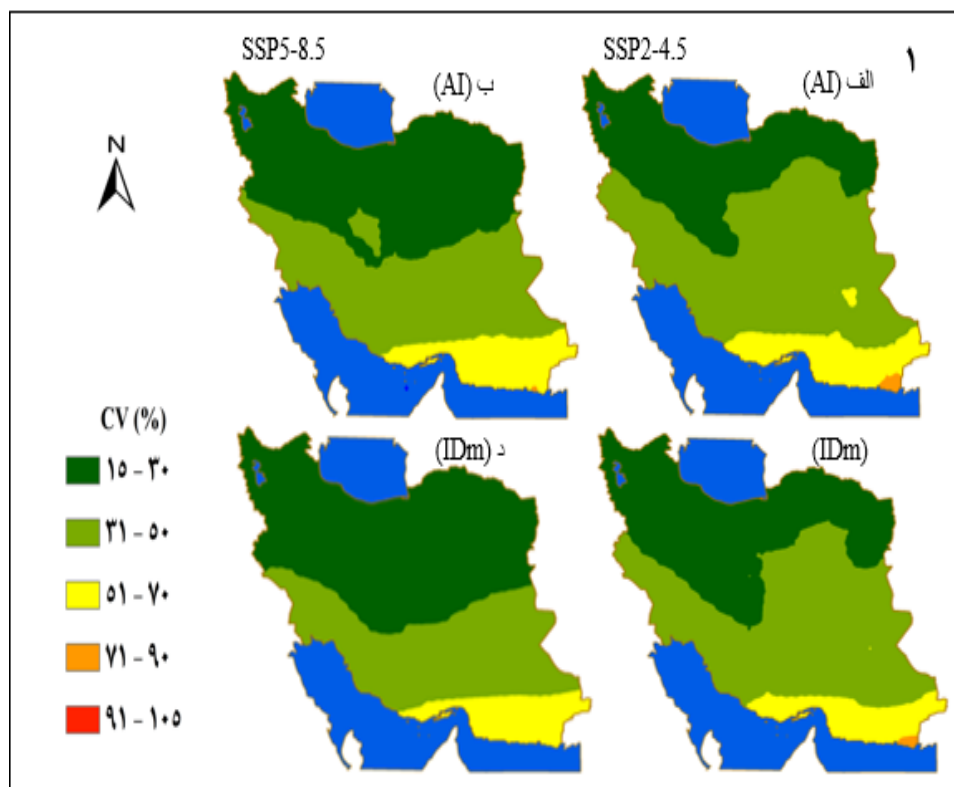


شکل ۵. ۱- میانگین سالانه خشکی، ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰ - تفاوت مناطق میانگین سالانه خشکی ۲۰۲۰ - ۲۰۵۰ نسبت به ۲۰۱۴ - ۱۹۹۲ (الف و ب، شاخص AI سناریوهای SSP2-4.5 و SSP8-8.5، ج و د، شاخص IDM سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، مدل GFDL-ESM4)

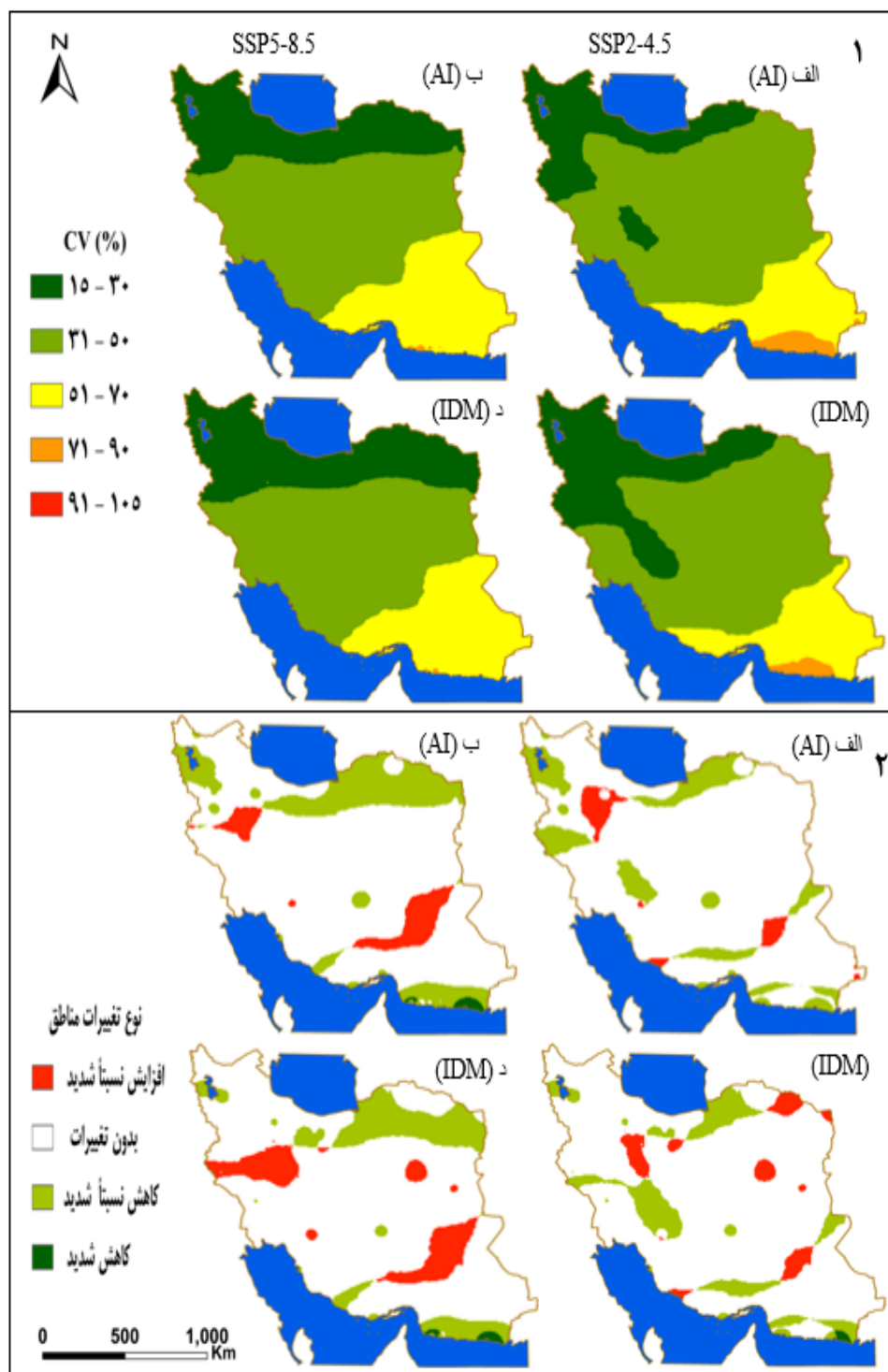
توزیع مکانی تغییرات خشکی و ناهنجاری آن در ۲۰۲۰ - ۲۰۵۰

بررسی اشکال خروجی از سناریوهای موردبررسی، نشان دهنده کاهش میزان تغییرات در بیشتر مناطق کشور به ویژه در جنوب شرق و سواحل جنوبی کشور بر اساس مدل‌های MRI-ESM2 و GFDL-ESM4 است (شکل ۶-۱ و ۷-۱ الف

تا د). در شرایط SSP5-8.5، هر دو مدل (شکل ۱-۶ د و ۷ بالا-د) وسعت مناطق با تغییرات متوسط از ۱۷٪ به ۲۳٪ و ۱۶٪ به ۲۲٪ بر اساس AI و IDM افزایش خواهد یافت. بالاترین میزان تغییرات خشکی در مناطق جنوب شرقی و جنوب ایران (۱۰۵٪-۷۱٪) از ۳/۵٪ به ۰/۵٪ و ۰/۱٪ مساحت کشور و ۲/۵٪ و ۰/۲٪ بر اساس AI به ترتیب مدل‌های MRI-ESM2 و GFDL-ESM4 تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و از ۳/۱٪ به ۰/۳٪ و صفر و ۱/۵٪ و ۰/۱٪ مساحت کل ایران به ترتیب مدل‌ها و سناریوهای ذکر شده نسبت دوره گذشته (۲۰۱۴ - ۱۹۹۲) می‌رسد (جدول ۵). توزیع مناطق با بیشترین کاهش و افزایش تغییرات بر اساس مدل‌ها نشان می‌دهد که منطقه با کاهش شدید تغییرات در جنوب شرقی به‌ویژه سواحل دریای عمان تقریباً در ۰/۶٪ (جدول ۷) مساحت کل کشور تحت SSP5-8.5 از مدل‌ها خواهد بود (شکل ۲-۶ ب و د، و ۲-۷ ب و د). منطقه با افزایش نسبتاً شدید تغییرات نیز در مناطق غربی و داخلی کشور، تحت SSP2-4.5 در ۱/۱٪ و ۲/۵٪ به ترتیب AI و IDM از مدل MRI-ESM2 (شکل ۲-۶ الف و ج) و به میزان ۳/۳٪ و ۵/۷٪ به ترتیب سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بر اساس شاخص AI و ۴/۸٪ و ۹/۱٪ (جدول ۷) به ترتیب سناریوهای ذکر شده بر اساس شاخص IDM از مدل GFDL-ESM4 می‌باشد (شکل ۲-۷ الف تا د).



شکل ۶. ۱- میانگین سالانه تغییرات خشکی، ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰، ۲- تفاوت مناطق میانگین سالانه تغییرات خشکی ۲۰۲۰ - ۲۰۵۰ نسبت به ۱۹۹۲ - ۲۰۱۴ (الف و ب، شاخص AI سناریوهای SSP2-4.5 و SSP8-8.5، ج و د، شاخص IDM سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل MRI-ESM2)



شکل ۷. ۱- میانگین سالانه تغییرات خشکی، ۲۰۵۰-۲۰۲۰، ۲- تفاوت مناطق میانگین سالانه تغییرات خشکی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ نسبت به ۱۹۹۲-۲۰۱۴ (الف و ب، شاخص AI سناریوهای SSP2-4.5 و SSP8-8.5، ج و د، شاخص IDM سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، مدل GFDL—(ESM4)

جدول ۷. درصد و نوع تغییرات سالانه خشکی مناطق، دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰

شاخص	GFDL-ESM4 (%)		MRI-ESM2 (%)		نوع تغییرات مناطق
	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	
AI	۵/۷	۳/۳	-۰/۱	۱/۱	افزایش نسبتاً شدید
	۷۵/۹	۸۲/۷	۴۹/۸	۶۳/۹	بدون تغییرات
	۱۷/۸	۱۴	۴۹/۵	۳۴/۶	کاهش نسبتاً شدید
	۰/۶	۰	-۰/۶	-۰/۴	کاهش شدید
	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	جمع کل
IDM	۹/۱	۴/۸	-۰/۲	۲/۵	افزایش نسبتاً شدید
	۷۶/۴	۸۳	۵۲/۹	۶۳/۸	بدون تغییرات
	۱۴	۱۲	۴۶/۳	۳۳/۳	کاهش نسبتاً شدید
	۰/۵	-۰/۲	-۰/۶	-۰/۴	کاهش شدید
	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	%۱۰۰	جمع کل

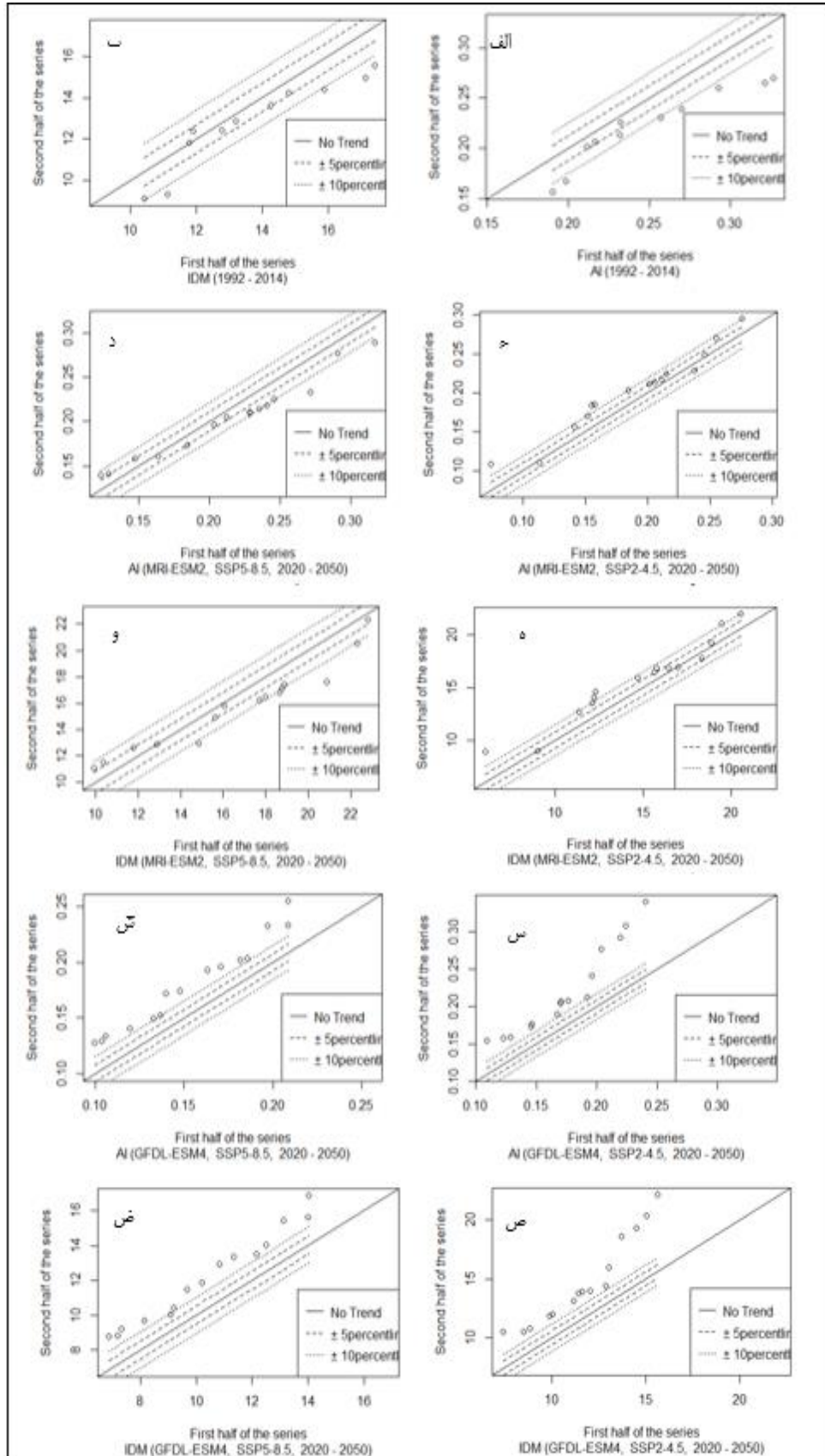
روند میانگین سالانه خشکی ایران در ۲۰۱۴-۱۹۹۲ و ۲۰۵۰-۲۰۲۰

با توجه به اینکه کاهش (افزایش) مقادیر شاخص‌ها به معنای افزایش (کاهش) شرایط خشکی است، مقادیر روند (جدول ۸) نشان‌دهنده افزایش شرایط خشکی در دو سطح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ در سطح کشور در سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۹۲ بر اساس شاخص‌های AI با شیب روند -۰/۰۰۲۵ و IDM با شیب روند -۰/۰۷۹۴ (شکل ۸ الف و ب) و کاهش آن در هر دو سطح معناداری یادشده در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ بر اساس سناریوهای هر دو مدل و هر دو شاخص می‌باشد (شکل ۸ ج تا ذ). تنها استثنای این شرایط در آینده بر اساس جدول ۸ مربوط به سناریوی SSP5-8.5 از مدل MRI-ESM2 است که بر اساس شاخص IDM (شیب روند -۰/۰۵۶۲)، در سطوح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ شرایط خشکی افزایش می‌یابد (شکل ۸ و).

جدول ۸. نتایج ارزیابی آماری روند میانگین سالانه خشکی ایران

دوره آماری / داده	شاخص	سناریو	شیب روند	سطح معناداری	
				%۹۵	%۹۹
۲۰۱۴-۱۹۹۲ / مشاهداتی	AI	-----	-۰/۰۰۲۵**	±۰/۰۰۰۵	±۰/۰۰۰۷
	IDM	-----	-۰/۰۷۹۴**	±۰/۰۲۸۵	±۰/۰۳۷۵
MRI-ESM2 / ۲۰۲۰-۲۰۵۰	AI	SSP2-4.5	۰/۰۰۰۸**	±۰/۰۰۰۲	±۰/۰۰۰۳
		SSP5-8.5	۰/۰۰۰۷**	±۰/۰۰۰۱	±۰/۰۰۰۲
	IDM	SSP2-4.5	۰/۰۶۸۷**	±۰/۰۱۹۲	±۰/۰۲۵۳
		SSP5-8.5	-۰/۰۵۶۲**	±۰/۰۲۱۰	±۰/۰۲۷۶
GFDL-ESM4 / ۲۰۲۰-۲۰۵۰	AI	SSP2-4.5	۰/۰۰۳۰**	±۰/۰۰۰۴	±۰/۰۰۰۵
		SSP5-8.5	۰/۰۰۱۷**	±۰/۰۰۰۱	±۰/۰۰۰۲
	IDM	SSP2-4.5	۰/۱۹۶۴**	±۰/۰۲۳۰	±۰/۰۳۰۱
		SSP5-8.5	۰/۱۱۳۰**	±۰/۰۰۱۰	±۰/۰۱۲۸

** معنادار در سطح ۰/۰۱ و * معنادار در سطح ۰/۰۵



شکل ۸. روند میانگین سالانه خشکی ایران ۲۰۱۴-۱۹۹۲ (الف و ب) و ۲۰۵۰-۲۰۲۰ (ج تا ح)

بحث

در این مطالعه سعی شد الگوی فضایی مشخص شده‌ای از میانگین سالانه خشکی و تغییرات آن و همچنین روند میانگین خشکی ایران با استفاده از داده‌های مشاهداتی (۲۰۱۴ - ۱۹۹۲) و سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل‌های GFDL-ESM4 و MRI-ESM2 برای آینده ارائه شود. نکته قابل ذکر این است که شاخص‌های AI و IDM از نظر تفکیک مکانی مناطق خشک و مرطوب از یکدیگر، به‌ویژه در مناطق ساحلی جنوب دریای خزر عملکرد مناسبی نشان داده‌اند (شکل ۲ الف و ب). این امر نتایج مطالعه ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۶) در مورد عملکرد مناسب شاخص AI در جداسازی نواحی رطوبتی و خشک به‌ویژه در سواحل جنوبی دریای خزر را تأیید می‌کند. علاوه بر آن شاخص IDM به دلیل دارا بودن تفکیک بیشتر در طبقات تعریف شده برای آن، توان جداسازی مناطق با درجه‌های مختلف خشکی و رطوبت را در مناطق مرطوب و خشک نشان داد (شکل ۲ ب).

به‌طور کلی نتایج تحقیقات گذشته بیانگر افزایش خشکی در ایران در سال‌های گذشته (Hadi Pour et al., 2020; Nouri & Bannayan, 2019; Zolfaghari et al., 2016) روند افزایشی خشکی شمال غرب کشور (۲۰۱۰ - ۱۹۸۱) با استفاده از شاخص AIu (طاوسی، ۱۳۹۷)، روند افزایش خشکی در ایستگاه‌های نوار شمالی ایران (۲۰۱۹ - ۱۹۸۲) با AI (رنجبر و طباطبایی، ۱۴۰۱)، روند کاهشی شاخص AI در گذشته در شمال غرب و غرب ایران در دوره ۲۰۱۰-۱۹۹۶ (نوری و همکاران، ۱۳۹۵) می‌باشد که این مطالعه نیز روند افزایشی خشکی را طی سال‌های ۱۹۹۲ - ۲۰۱۴ (شکل ۸ الف و ب) در سطح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ و بر اساس شاخص‌های AI و IDM تأیید می‌کند. اما روند میانگین خشکی در آینده در شمال غرب بر اساس مطالعه نوری و همکاران (۱۳۹۵) در مقایسه با روند میانگین ایران به‌صورت یک واحد، تنها بر اساس SSP5-8.5 از مدل MRI-ESM2 (شکل ۸ و) تأیید می‌شود. در حالی که روند داده‌های SSP2-4.5 از این مدل و سناریوهای مدل GFDL-ESM4 و همچنین اشکال ۳ و ۴، افزایش میانگین شاخص‌های خشکی (کاهش خشکی) را تا نیمه قرن حاضر نسبت به گذشته در شمال غرب ایران نشان می‌دهد. نتایج هوانگ و همکاران (۲۰۱۶) در ارتباط با افزایش و گسترش سرزمین‌های خشک سطح کره زمین در آینده در مورد ایران در سواحل جنوبی دریای خزر (به‌طور کلی دامنه‌های شمالی البرز) و نواحی جنوبی زاگرس و نواحی شمالی فلات داخلی ایران تا نیمه قرن حاضر مورد تأیید است. پروالی و بنداک (۲۰۱۵) در دابروگا (رومانی)، مورال و همکاران (۲۰۱۶) در اکسترمدورا (جنوب غرب اسپانیا)، ژائو همکاران (۲۰۱۸) در چین، سرلک و محمود آقا (۲۰۱۸) در عراق، جبرمدهین و همکاران (۲۰۱۸) در شمال اتیوپی، مانند مطالعه حاضر افزایش خشکی در سال‌های گذشته را بیان کرده‌اند.

در ارتباط با نتایج مطالعه عراقی و همکاران (۲۰۱۸) در دوره ۱۹۵۴ تا ۲۰۱۳، مطالعه حاضر نیز تأیید می‌کند که بخش اعظمی از مساحت ایران در طبقه خشک واقع می‌شود. اما برخلاف نتیجه این بررسی، مبنی بر عدم مشاهده روند معنی‌دار مثبت یا منفی، مطالعه حاضر وجود روند معنادار منفی در سال‌های ۲۰۱۴ - ۱۹۹۲ را نشان می‌دهد. نتایج مطالعه بختیار و همکاران (۱۴۰۰) مبنی بر افزایش خشکی در چهار ایستگاه رشت، یاسوج، کرمان و ایلام بر اساس سناریوهای مورد مطالعه SSP5-8.5 و SSP2-4.5 (اشکال ۲-۴ و ۲-۵) برای یاسوج و رشت و بر اساس روند مقادیر شاخص IDM تحت شرایط سناریوی SSP5-8.5 از مدل MRI-ESM2 (شکل ۸ و) که نشان‌دهنده افزایش خشکی ایران هستند، برای چهار ایستگاه ذکر شده تأیید می‌شود. کاهش شرایط خشک‌سالی در نتایج نادری (۱۳۹۹) در مناطق شمالی استان فارس (۲۰۵۵ - ۲۰۲۶) نیز بر اساس مطالعه حاضر با روند زمانی میانگین سالانه خشکی کشوری مطابق است.

نتیجه گیری

الگوی فضایی میانگین سالانه خشکی و تغییرات آن و همچنین روند میانگین خشکی ایران با استفاده از داده‌های مشاهداتی (۲۰۱۴ - ۱۹۹۲) و سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل‌های MRI-ESM2 و GFDL-ESM4 برای آینده نشان می‌دهد که در دوره مشاهداتی به جز نواحی شمالی البرز و بخش‌های کوچکی از شمال غرب ایران که بر اساس AI شامل مناطق نیمه مرطوب تا مرطوب و بر اساس IDM شامل مناطق مدیترانه‌ای تا خیلی مرطوب بوده سایر مناطق کشور در طبقات خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته‌اند.

افزایش خشکی در ۴/۶٪، ۴/۵٪ مساحت کشور بر اساس شاخص AI و تحت شرایط سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و ۲/۴٪ و ۳/۴٪ بر اساس شاخص IDM، به ترتیب سناریوهای ذکر شده از مدل MRI-ESM2 در نواحی شمالی البرز (به‌ویژه سواحل جنوبی دریای خزر) و نواحی شمالی فلات داخلی ایران در آینده رخ خواهد داد. بر اساس مدل GFDL-ESM4 نیز افزایش خشکی در ۴/۴٪ و ۷/۱٪ از مناطق کشور بر اساس AI و ۳/۳٪ و ۶/۳٪ مناطق کشور تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بر اساس شاخص IDM و به ترتیب سناریوهای ذکر شده همانند پیش‌نگری مدل MRI-ESM2 در سواحل خزر و نواحی شمالی البرز و علاوه بر آن در نواحی جنوبی زاگرس در سال‌های ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰ رخ خواهد داد. ۱۷/۲٪ و ۲۲/۴٪ از مساحت کشور تحت شرایط SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل MRI-ESM2 در نواحی زاگرس مرکزی، بخش‌هایی از شمال شرق و شمال غرب بر اساس AI و همچنین ۱۷/۲٪ و ۲۰/۴٪ از کل مساحت کشور واقع در مناطق زاگرس مرکزی تا شمال غرب ایران بر اساس شاخص IDM و به ترتیب سناریوهای ذکر شده کاهش نسبتاً شدید خشکی را تجربه خواهند کرد. بر اساس سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از مدل GFDL-ESM2 ۱۵٪ و ۸/۶٪ از مساحت کشور بر اساس AI کاهش نسبتاً شدید خشکی و ۱۳/۶٪ و ۸/۴٪ از مساحت ایران در مناطق زاگرس و شمال غرب بر اساس IDM کاهش ملایم تا نسبتاً شدید خشکی را خواهند داشت. رخ دادن تغییرات بارش و دما که اساس تغییرات خشکی است تحت اثرگذاری تغییرات اقلیمی در منطقه‌ای از آسیا که ایران در آن واقع شده است بر اساس گزارش IPCC (۲۰۲۱: ۱۰) به‌دوراز انتظار نیست. در شرق، جنوب شرق به سمت نواحی داخلی، جنوب و جنوب غرب ایران که در دوره مشاهداتی شرایط خشک را تجربه کرده‌اند، مدل‌ها تغییری را نشان نمی‌دهند. این امر گویای وضعیت بحرانی خشکی در این نواحی، استیلاي پرفشار جنب حاره به‌ویژه بر فراز این مناطق و دوری بخش اعظم ایران خصوصاً نواحی فلات داخلی ایران از منابع رطوبتی است.

بیشترین میزان تغییرات در دوره مشاهداتی و آینده بر اساس شاخص‌ها (و سناریوهای هر دو مدل) مربوط به نواحی جنوب شرقی و سواحل جنوبی کشور به‌ویژه سواحل دریای عمان به میزان ۱۰۵٪ - ۷۱٪ و مربوط به داده‌های مشاهداتی (۲۰۱۴ - ۱۹۹۲) است که به احتمال زیاد مربوط به تغییرات میزان رطوبت در این ناحیه در پی آغاز و پایان فعالیت‌های موسمی در این ناحیه است. بر اساس مدل‌ها میزان تغییرات خشکی در آینده (۲۰۵۰ - ۲۰۲۰) کاهشی خواهد بود. بیشترین کاهش تغییرات خشکی در آینده مربوط به سواحل دریای عمان است. به‌طورکلی بیشترین افزایش تغییرات خشکی بر اساس سناریوها به‌صورت پراکنده مربوط به نواحی داخلی و غرب کشور است.

روند مقادیر میانگین خشکی ایران نشان داد که خشکی در سطوح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ در گذشته (۲۰۱۴ - ۱۹۹۲) افزایش یافته و در سال‌های ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰ تنها تحت SSP5-8.5 از مدل MRI-ESM2 و شاخص IDM در سطوح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ افزایش خواهد یافت. در سایر شرایط، خشکی در سطوح معناداری ۰/۰۵ و ۰/۰۱ کاهشی خواهد بود. عملکرد دو مدل مورد استفاده بر اساس سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، از نظر تصویرسازی اقلیم آینده کشور

در میانگین سالانه خشکی دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ در مناطق مختلف تا حدود زیادی یکسان بود. هر دو مدل کاهش رطوبت در مناطق شمالی البرز و کاهش خشکی در مناطق شمال غربی کشور را نشان دادند. نتایج این پژوهش با استفاده از سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دو مدل از آخرین سری داده‌های IPCC می‌تواند جهت برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی در ایران به‌ویژه در مناطق شمالی و بخش‌های شرقی و جنوبی کشور مؤثر باشد.

تشکر و قدردانی

بر اساس اظهار نویسندگان این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) بختیاری، بهرام؛ مهدوی، نکیسا و سیاری، نسرين. (۱۴۰۰). تحلیل حساسیت و بررسی تغییرات شاخص خشکی (AI) در چند نمونه اقلیمی ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷ (۵۶)، ۱-۱۵.
- ۲) تیموری، مهدی؛ عبداللهی مایوان، محبوبه؛ نژاد حسن، بتول و گرای، پرویز. (۱۳۹۰). بررسی روند شاخص خشکی در ایران. *اولین کنفرانس ملی خشک‌سالی و تغییر اقلیم*.
- ۳) جعفری، غلامحسن و آوجی، مینا. (۱۳۹۶). بررسی خشکی هیدرولوژیکی حوضه‌های داخلی ایران. *جغرافیای طبیعی*، ۱۰ (۱)، ۸۷-۱۰۰.
- ۴) رنجبر، فیروز و طباطبایی، حسن. (۱۴۰۱). بررسی روند شاخص خشکی در ایستگاه‌های نوار شمالی ایران طی دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۲. *پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی*، ۳ (۹)، ۲۴-۱۲. <https://doi.org/10.30488/cr.2022.327870.1070>
- ۵) زرین، آذر. و صالح‌آبادی، نسرين. (۱۳۹۸). پیش‌آگاهی مخاطره خشک‌سالی در تهران بر اساس بروداد مدل‌های CMIP6. *ششمین کنفرانس بین‌المللی - منطقه‌ای تغییر اقلیم*.
- ۶) طاوسی، تقی. (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات بارندگی و شاخص خشکی یونپ در پهنه‌های آب‌وهوایی غرب و شمال غرب ایران. *اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۲۷ (۱۰۵)، ۸۵-۹۶. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.31475>
- ۷) طاوسی، تقی؛ محمودی، پیمان و سرگلزایی مقدم، فرزانه. (۱۳۸۹). مقایسه گسترش مکانی اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک در ایران طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۷ (۱)، ۱۰۵-۹۴.
- ۸) علیجانی، بهلول؛ محمودی، پیمان و کلیم، دوست‌محمد. (۱۳۹۴). تحلیل آماری زمینه‌های آب‌وهوایی بیابان‌زایی در ایران. *فضای جغرافیایی*، ۱۵ (۵۱)، ۳۲-۱۹.
- ۹) نادری، مصطفی. (۱۳۹۹). مخاطرات سیل و خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت شرایط تغییر اقلیم: شمال استان فارس. *پژوهش آب ایران*، ۱۴ (۱)، ۸۵-۹۷.
- ۱۰) نوری، میلاد؛ همایی، مهدی و بنایان، محمد. (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات شاخص خشکی طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۶۶ در شمال غرب ایران. *مهندسی و مدیریت آب‌خیز*، ۸ (۴)، ۴۵۳-۴۳۹. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107187.439-453>
- ۱۱) نوری، میلاد؛ همایی، مهدی و بنایان، محمد. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات تبخیر و تعرق مرجع طی سده بیستویک در برخی مناطق نیمه‌خشک ایران. *تحقیقات آب‌و خاک ایران*، ۴۸ (۲)، ۲۵۲-۲۴۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.62578>

References

- 1) Ali, R., Kuriqi, A., Abubaker, S., & Kisi, O. (2019). Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. *Water*, 11 (9), 18-55. <https://doi.org/10.3390/w11091855>.
- 2) Alijani, B., Mahmoudi, P., & Kalim, D. M. (2015). Statistical Analysis of Climatic Histories

- of Desertification in Iran. *Geographic space*, 15 (51), 19-32. [In Persian].
- 3) Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper. No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.
 - 4) Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M. N., & Ismail, M. (2020). Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4 (2), 297-320. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00157-7>.
 - 5) Araghi, A., Martinez, C. J., Adamowski, J., & Olesen, J.E. (2018). Spatiotemporal variations of aridity in Iran using high-resolution gridded data. *International Journal of Climatology*, 38 (6), 2701-2717. <https://doi.org/10.1002/joc.5454>
 - 6) Asadi Zarch, M. A., Sivakumar, B., Malekinezhad, H., & Sharma, A. (2017). Future aridity under conditions of global climate change. *Journal of Hydrology*, 554, 451-469, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.043>
 - 7) Bakhtiari, B., Mahdavi, N., & SAYARI, N. (2021). Variations and Sensitivity Analysis on Aridity Index (AI) in Some Climate Samples in Iran. *Iran-water resources research*, 17 (1), 1-15. [In Persian].
 - 8) Baltas, E., (2007). Spatial distribution of climatic indices in northern Greece. Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications. *training techniques and modelling*, 14 (1), 69-78. <https://doi.org/10.1002/met.7>
 - 9) Begueria, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). Package 'SPEI'. URL: <https://CRAN.R-project.org/web/packages/SPEI/> version 1.7.
 - 10) Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., & McPherson, J. (2017). shiny: Web Application Framework for R. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>. r package version 1.0.3.
 - 11) Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., & Von Maltitz, G. (Eds.). (2018). *World atlas of desertification: Rethinking land degradation and sustainable land management*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
 - 12) Choudhary, A., Mahato, S., Roy, P. S., Pandey, D. N., & Joshi, P. K. (2023). Analyzing the long-term variability and trend of aridity in India using non-parametric approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02483-4>.
 - 13) Croitoru, A. E., Piticar, A., Imbroane, A. M., & Burada, D. C. (2013). Spatiotemporal distribution of aridity indices based on temperature and precipitation in the extra-Carpathian regions of Romania. *Theoretical and applied climatology*, 112 (3-4), 597-607, <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0755-2>.
 - 14) Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9 (5), 1937-1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
 - 15) Gebremedhin, M. A., Kahsay, G. H., & Fanta, H. G. (2018). Assessment of spatial distribution of aridity indices in Raya valley, northern Ethiopia. *Applied Water Science*, 8 (8), 217, <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0868-6>.
 - 16) Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Boschat, G., & Lyu, K. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *Earth's Future*, 8, e2019EF001469, <https://doi.org/10.1029/2019EF001469>.
 - 17) HadiPour, S., Abd Wahab, A. K., & Shahid, S. (2020). Spatiotemporal changes in aridity and the shift of drylands in Iran. *Atmospheric Research*, 233, 104704, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104704>.
 - 18) Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., Guo, R. (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6(2), 166-17. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
 - 19) IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. D., Qin, G. K., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535, <https://doi.org/10.1017/CBO978110741532>.

- 20) IPCC. (2021). Summary for policymakers. in: Climate change 2021: The physical science basis. Masson-Delmotte, V. P., Zhai, P., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., ... & Scheel Monteiro, P. M. *contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- 21) Jafari, Gh., & Avaji, M. (2017). Investigating the hydrological aridity of the interior basins of Iran. *Iranian Journal of Natural Geography*, 10 (1), 87- 100. [In Persian].
- 22) Jafari, M., Tavili, A., Panahi, F., Esfahan, E. Z., & Ghorbani, M. (2018). *Reclamation of Arid lands*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54828-9>
- 23) Karamouz, M., Nazif, S., & Falahi, M. (2012). *Hydrology and hydroclimatology: principles and applications*. CRC Press.
- 24) Kousari, M., Dastorani, M. T., Niazi, Y., Soheyli, E., Hayatzadeh, M. & Chezgi, J. (2014). Trend Detection of Drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran Based on Implementation of Reconnaissance Drought Index (RDI) and Application of Non-Parametrical Statistical Method. *Water Resour Manag*, 28, 1857–1872. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0558-6>
- 25) Landgren, O. A., Parding, K., Dobler, A., McSweeney, C. F., Benestad, R., Erlandsen, H. B., ... & El Zohbi, J. (2020). Effects of GCM selection for regional climate modelling illustrated by the interactive tool GCMeval. In *EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 13441)*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13441>
- 26) Li, Y., Yao, N., Sahin, S., & Appels, W.M. (2017). Spatiotemporal variability of four precipitation-based drought indices in Xinjiang, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 129 (3-4), 1017-1034. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1827-5>
- 27) Li, Y., Yu, W., Wang, K., & Ma, X. (2019). Comparison of the aridity index and its drivers in eight climatic regions in China in recent years and in future projections. *International Journal of Climatology*, 39(14), 5256-5272. <https://doi.org/10.1002/joc.6137>
- 28) Lickley, M., & Solomon, S. (2018). Drivers, timing and some impacts of global aridity change. *Environmental Research Letters*, 13 (10), 104010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae013>
- 29) Liu, C., Huang, W., Feng, S., Chen, J., & Zhou, A. (2018). Spatiotemporal variations of aridity in China during 1961–2015: decomposition and attribution. *Science Bulletin*, 63 (18), 1187-1199. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.07.007>.
- 30) Liu, L., Wang, Y., You, N., Liang, Z., Qin, D., & Li, S. (2019). Changes in aridity and its driving factors in China during 1961–2016. *International Journal of Climatology*, 39 (1), 50-60, <https://doi.org/10.1002/joc.5781>
- 31) Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of environmental studies and sciences*, 4 (4), 315-328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- 32) Majumder, M. (2015). *Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations*. Springer.
- 33) Marak, J. D. K., Sarma, A. K., & Bhattacharjya, R. K. (2020). Innovative trend analysis of spatial and temporal rainfall variations in Umiam and Umtru watersheds in Meghalaya, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 142 (3), 1397-1412. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03383-1>
- 34) Mehran, A., AghaKouchak, A., & Phillips, T. J. (2014). Evaluation of CMIP5 continental precipitation simulations relative to satellite-based gauge-adjusted observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (4), 1695-1707. <https://doi.org/10.1002/2013JD021152>
- 35) Miri, M., Masoompour, S. J., Razinei, T., Jalilian, A., & Mahmodi, M. (2021). Spatial and temporal variability of temperature in Iran for the twenty-first century foreseen by the CMIP5 GCM models. *Pure and Applied Geophysics*, 178 (1), 169-184. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02631-9>
- 36) Miseckaite, O., Cadro, S., Tunguz, V., Lukashevich, V., Simunic, I., and Orlovic-Leko, P. (2018). Climate and aridity change. In *8TH Asian Regional Conference (8ARC): Irrigation in Support of Evergreen Revolution, Kathmandu*, 143-152.
- 37) Moral, F. J., Rebollo, F. J., Paniagua, L. L., García-Martín, A., & Honorio, F. (2016). Spatial distribution and comparison of aridity indices in Extremadura, southwestern Spain. *Theoretical and applied climatology*, 126 (3-4), 801-814. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1615-7>

- 38) Moral, F.J., Paniagua, L.L., Rebollo, F. J., & Garcia-Martín, A. (2017). Spatial analysis of the annual and seasonal aridity trends in Extremadura, southwestern Spain. *Theoretical and Applied Climatology*, 130 (3-4), 917-932. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1939-y>
- 39) Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote sensing of environment*, 49 (3), 246-263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90020-5)
- 40) Naderi, M. (2020). The flood and drought events over arid and semi-arid regions under climate change: Northern Fars province. *Iranian Water Research Journal*, 14 (1), 85- 97. [In Persian].
- 41) Nouri, M., & Bannayan, M. (2019). Spatiotemporal changes in aridity index and reference evapotranspiration over semi-arid and humid regions of Iran: trend, cause, and sensitivity analyses. *Theoretical and Applied Climatology*, 136 (3-4), 1073-1084, <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2543-0>
- 42) Nouri, M., Homaei, M., & Bannayan, M. (2017). An Assessment of reference evapotranspiration changes during the 21st century in some semi-arid regions of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48 (2), 241-252. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.62578>. [In Persian].
- 43) Nouri, M., Homaei, M., & Bannayan, M. (2017). Assessing Trends of aridity index changes over 1966-2100 period in the Northwest of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 439- 453. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107187>. [In Persian].
- 44) Parding, K. M., Dobler, A., McSweeney, C. F., Landgren, O. A., Benestad, R., Erlandsen, H. B., ... & El Zohbi, J. (2020). GCMeval—An interactive tool for evaluation and selection of climate model ensembles. *Climate Services*, 18, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100167>.
- 45) Pravalie, Remus., & Bandoc, Georgeta. (2015). Aridity Variability in the Last Five Decades in the Dobrogea Region, Romania. *Arid Land Research and Management*, 29 (3), 265-287, <https://doi.org/10.1080/15324982.2014.977459>.
- 46) Radakovic, M.G., Tomic, I., Bacevic, N., Mladjan, D., Gavrilov, M.B., & Markovic, S.B. (2018). The analysis of aridity in Central Serbia from 1949 to 2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 133 (3_4), 887–898. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2220-8>.
- 47) Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichfet, T., Fyfe, J., & Taylor, K. E. (2007). Climate models and their evaluation. In *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (FAR)* (pp. 589-662). Cambridge University Press.
- 48) Ranjbar, f., & Tabatabaai, H. (2022). Investigation of the trend of Aridity index in the northern stations of Iran during the period 1982-2019. *Climate Change Research*, 3 (9), 12-24. <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.327870.1070>. [In Persian].
- 49) Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B. C., Fujimori, S., & Lutz, W. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- 50) Sarlak, N., & Mahmood Agha, O. (2018). Spatial and temporal variations of aridity indices in Iraq. *Theoretical and applied climatology*, 133 (1-2), 89-99. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2163-0>.
- 51) sen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17 (9), 1042-1046, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556).
- 52) sen, Z. (2017). Innovative trend significance test and applications. *Theoretical and applied climatology*, 127 (3-4), 939-947. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1681-x>.
- 53) Sivakumar, M.V.k., Raymond, P.M., & Haripada, P.D. (2005). *Natural disaster and extreme events in agriculture*. Vol. 367. Berlin, Germany: Springer.
- 54) Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M. M., Molanejad, M., Sabziparvar, A. A., SaadatAbadi, A. R., Ranjbar, F., Rousta, I., Zawar-Reza, P., Khoshakhlagh, F., Soltanzadeh, I., Babu, C. A., Aziz, G., & Martin, M. V. (2016). Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 126 (3-4), 775-795. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1609-5>.

- 55) Tabari, H., & Aghajanloo, M.B. (2013), Temporal pattern of aridity index in Iran with considering precipitation and evapotranspiration trends. *International Journal of Climatology*, 33 (2), 396-409. <https://doi.org/10.1002/joc.3432>.
- 56) Tabari, H., & Talaei, P. H. (2011). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change*, 79 (1-2), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.07.008>.
- 57) Tabari, H., Marofi, S., Aeini, A., Talaei, P. H., & Mohammadi, K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and forest meteorology*, 151 (2), 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.009>.
- 58) Tavosi, T., Mahmoudi, P., & Moghadam, F. (2010). Comparison of spatial spreading of arid and semi-arid climates in Iran during 1976-2005. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 17 (1), 94- 105. [In Persian].
- 59) Tavousi, T. (2018). Investigating the trend of fluctuations in annual precipitation and UNEP aridity index of climatic zones in the west and northwest of Iran. *Geographical data*, 27 (105), 85-96. [In Persian]. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.31475>.
- 60) Teimouri, M., Abdollahi, M. M., Nejadhasan, B., & Graie, P. (2011). Investigation of Aridity Index in Iran. *The first national conference on drought and climate change*. [In Persian].
- 61) Unesco. (1979). *Map of the world distribution of arid regions: Explanatory note*. M A B Technical Notes 7, Unesco.
- 62) Wang, L., Cao, L., Deng, X., Jia, P., Zhang, W., Xu, X., Zhang, K., Zhao, Y., Yan, B., Hu, W., & Chen, Y. (2014). Changes in aridity index and reference evapotranspiration over the central and eastern Tibetan Plateau in China during 1960–2012. *Quaternary International*, 349, 280-286. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.07.030>.
- 63) Wu, Y., Zhang, G., Shen, H., Xu, Y. J., & Bake, B. (2016). Attribute analysis of aridity variability in North Xinjiang, China. *Advances in Meteorology*, 2016 (3), 1-11, <https://doi.org/10.1155/2016/9610960>.
- 64) Yin, Y., Ma, D., Wu, S., & Pan, T. (2015). Projections of aridity and its regional variability over China in the mid-21st century. *International Journal of Climatology*, 35 (14), 4387-4398. <https://doi.org/10.1002/joc.4295>.
- 65) Zarrin, A., & Salehabadi, N. (2019). Drought projection in Tehran based on CMIP6 models. *6th international-regional conference on climate change*. Iran. Tehran. [In Persian].
- 66) Zhao, Y., Zou, X., Cao, L., Yao, Y., & Fu, G. (2018). Spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and aridity index in relation to influencing factors over Southwest China during 1960–2013. *Theoretical and applied climatology*, 133 (3-4), 711-726. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2216-4>.
- 67) Zhou, Z., Wang, L., Lin, A., Zhang, M., & Niu, Z. (2018). Innovative trend analysis of solar radiation in China during 1962–2015. *Renewable energy*, 119, 675-689. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.052>.
- 68) Zolfaghari, H., Masoompour, J., Yeganefar, M., & Akbary, M. (2016). Studying spatial and temporal changes of aridity in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(5), 375-389. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2379-9>.