



University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: <https://ije.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6101

Analysis of Meteorological Fluctuations and Long-Term Drought Assessment in the Southern Coasts of Iran: An Observational and Climate Modeling Approach

Seyed Hassan Alavinia,^{1*} Mahdi Salmanpour,² Atefeh Abkar³

1. Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. E-mail: s.h.alavinia@kashanu.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Statistics, Faculty of Mathematical Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. E-mail: salmanpour@kashanu.ac.ir

3. Master's Degree Graduate, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. E-mail: atefeh.abkar@outlook.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received April 07, 2025

Received in revised form May 02, 2025

Accepted June 11, 2025

Available online June 22, 2025

Keywords: Drought, Climate Fluctuations, Standardized Precipitation Index, Climate Models, Downscaling

ABSTRACT

Research Topic: This study analyzes drought trends at five synoptic stations along the southern coast of Iran (Bandar Abbas, Bandar Lengeh, Bushehr, Chabahar, and Kish) using the Standardized Precipitation Index (SPI) at two temporal scales: 12-month (short-term) and 48-month (long-term).

Method: In this study, five synoptic stations in the southern region of Iran were selected. For the observational data spanning the period 1985–2021, the 12-month (SPI-12) and 48-month (SPI-48) Standardized Precipitation Indices were calculated, and seasonal and multi-year drought and wetness patterns were identified. Subsequently, future precipitation for the period 2023–2043 was projected under two climate change scenarios—the optimistic (SSP1-2.6) and pessimistic (SSP5-8.5) scenarios of the CMIP6 project—using the MPI-ESM1.2-HR climate model and the SDSM. The corresponding SPI indices were then computed. For drought monitoring, the SPI was calculated at 12- and 48-month scales for both observational data and the projected data using the SPEI package in R software.

Results: The overall trend of drought and wet periods indicates that severe drought events occurred at the Bandar Abbas station in the years 1994, 2000, and 2012. In contrast, severe wet periods were observed in this station in 1988, 1990, and 2007. Similar conditions were recorded at the Bandar Lengeh station, with severe droughts in 1987, 2003, and 2011 and severe wet periods in 1990, 1998, and 2006. The Bushehr and Kish stations exhibited analogous patterns, with severe wet periods in 1990, 1998, and 2006 and droughts in 1987, 2003, and 2011. Notably, the year 1994 marked extreme conditions for all stations, while 1990 was characterized by wet periods across all five stations. Regarding future projections, the results indicate that under the SSP5-8.5 scenario, the intensity of drought is more pronounced in the western stations compared to the eastern stations. The 12-month SPI reveals more rapid fluctuations in drought conditions, making it suitable for assessing seasonal or annual droughts.

Conclusions: The analysis of the SPI (Standardized Precipitation Index) with observational data demonstrated that drought patterns in this region are complex and influenced by multiple factors, including changes in atmospheric systems, oceanic circulation patterns, and human activities. The projections of this study suggest that under the SSP5-8.5 scenario, the southern coastal regions of Iran will face a significant increase in the intensity and frequency of droughts. The findings of this research have important implications for water resource management and regional planning in southern Iran. Given the predicted rise in drought intensity and frequency, adopting adaptation measures such as developing early drought warning systems, improving water resource management, enhancing water use efficiency, modifying cropping patterns, promoting drought-resistant agriculture, diversifying economic resources to reduce reliance on agriculture, and raising public awareness about droughts and adaptation strategies is essential to mitigate the adverse effects of this phenomenon.

Cite this article: Alavinia, H., Salmanpour, M., Abkar, A. (2024). Analysis of Meteorological Fluctuations and Long-Term Drought Assessment in the Southern Coasts of Iran: An Observational and Climate Modeling Approach. *ECOHYDROLOGY*, 12(2), 732-748. <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.389977.1862>



© Seyed Hassan Alavinia, Mahdi salmanpour, Atefeh Abkar.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.389977.1862>

Introduction

Drought is one of the most significant climatic hazards with far-reaching impacts on water resources, agriculture, and food security. Its severity and frequency are exacerbated by factors such as reduced precipitation, rising temperatures, and changes in atmospheric circulation patterns. In recent years, climate change has led to an increase in the intensity and frequency of droughts, particularly in arid and semi-arid regions such as Iran. Due to the country's heavy reliance on surface and groundwater resources, drought has caused considerable damage to natural resources and sustainable development. Continuous monitoring and forecasting of drought through various indices and climate models serve as effective tools for water resource management and the development of adaptation strategies. Large-scale climate models, such as MPI-ESM1.2-HR, in combination with downscaling techniques like SDSM, can play a crucial role in accurately simulating future climate and drought conditions. This study aims to analyze drought conditions using observational data and future climate projections under different scenarios, with the goal of evaluating future trends and proposing appropriate management strategies in response to anticipated climatic changes.

Martial and Method

This study examines drought variability along the southern coasts of Iran using data from five synoptic stations—Bandar Abbas, Bandar Lengeh, Bushehr, Chabahar, and Kish—located along the Persian Gulf and the Gulf of Oman. The region, characterized by a hot and arid to semi-arid climate with average annual rainfall around 200 mm, is influenced by several atmospheric systems, including dry air masses from the Arabian Peninsula, humid monsoon flows from the Indian Ocean, and Sudanese systems. These contribute to climatic variability and make the region highly sensitive to drought. Monthly precipitation data from 2000 to 2023 were obtained, quality-checked, and used to calculate the Standardized Precipitation Index (SPI) at 12- and 48-month timescales using the *SPEI* package in R. SPI, based on gamma distribution fitting, is a robust tool for detecting drought severity across temporal and spatial scales. To assess future drought risk, projections from the CMIP6 MPI-ESM1.2-HR climate model were used under two emission scenarios: SSP1-2.6 (low emissions) and SSP5-8.5 (high emissions). Model outputs were statistically downscaled using SDSM to station-level resolution. SPI values were then computed for the projected period (2023–2043) to evaluate potential drought patterns under changing climate conditions.

Results

This study analyzed the Standardized Precipitation Index (SPI) at 12- and 48-month scales for five synoptic stations in southern Iran (Bandar Abbas, Bandar Lengeh, Bushehr, Chabahar, and Kish), using observational data from 1985 to 2021 and projected precipitation under two climate change scenarios: SSP1-2.6 (optimistic) and SSP5-8.5 (pessimistic) for the period 2023–2043. Results show that droughts predominantly occur in summer, while wet periods are more frequent in winter. The SPI-12 captured short-term fluctuations and revealed an increase in the frequency of moderate to severe droughts across all stations in the past two decades. The SPI-48 reflected long-term climatic trends, with persistent droughts observed in the 1990s and early 2000s, often linked to large-scale climatic drivers like ENSO, NAO, and monsoon variability. Stations like Bandar Abbas and Chabahar showed similar drought patterns due to common atmospheric influences, while Bushehr exhibited unique behavior due to increased evaporation linked to warming. Future projections indicate more intense and frequent droughts under SSP5-8.5, especially after 2030, with long-term SPI values dropping significantly, suggesting structural water stress. Conversely, under SSP1-2.6, some recovery in SPI values is projected after 2040. The findings highlight the vulnerability of southern Iran's coastal regions to climate-induced drought intensification. Without mitigation, regions like Bandar Lengeh may approach semi-arid conditions. However, emission reductions under optimistic scenarios could stabilize precipitation patterns and reduce future drought risk, emphasizing the need for adaptive water resource management and international climate cooperation.

Conclusion

This study aimed to analyze historical and future drought trends in southern Iran using the Standardized Precipitation Index (SPI) at 12- and 48-month scales. Historical data and future

projections under two climate scenarios—SSP1-2.6 (optimistic) and SSP5-8.5 (pessimistic)—were used. Results indicate that under the pessimistic scenario, the region will likely experience a significant increase in drought frequency and severity, particularly after 2035. Historical SPI analyses showed intensified long-term droughts, especially after 2000, influenced by shifts in atmospheric systems, oceanic patterns, and human activities. The 48-month SPI was particularly effective in identifying long-term water stress, notably in Kish, where groundwater decline is evident. The findings are consistent with global and regional studies linking climate change to intensified droughts through rising temperatures and changing precipitation patterns. However, some studies suggest localized increases in extreme rainfall, highlighting the importance of spatial and methodological differences. The study also emphasizes the importance of monsoon variability and high-pressure systems in shaping drought patterns, particularly contrasting impacts in Bushehr and Chabahar. The use of advanced CMIP6 models, including MPI-ESM1.2-HR, confirmed a potential 30% SPI decline under SSP5-8.5. These results underscore the urgent need for adaptation strategies in water resource management, agriculture, and public awareness to mitigate climate-related drought risks.

Author Contributions

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection, and analysis were performed by Seyed Hassan Alavinia, Mehdi Salmanpour and Atefeh Abkar. The first draft of the manuscript was written by Seyed Hassan Alavinia and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from Iran Meteorological Organization (IMO), but restrictions apply to the availability of these data, which were used under license for the current study, and so are not publicly available. Data are however available from the authors upon reasonable request and with permission of IMO. The General Circulation Models (GCM) datasets for this research were obtained from <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-cmip6#cmip6-predictors>.

Acknowledgements

We would like to thank the IMO for providing the observational data of the study area.

Ethical considerations

All text used in this research has been written in accordance with scientific and ethical principles.

Funding

The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تحلیل نوسانات هواشناسی و ارزیابی خشکسالی بلندمدت سواحل جنوبی ایران با رویکرد مشاهداتی و مدل سازی اقلیمی

سید حسن علوی نیا،^۱ مهدی سلمان پور،^۲ عاطفه آبکار^۳

۱. استادیار گروه مهندسی طبیعت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: s.h.alavinia@kashanu.ac.ir

۲. استادیار گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: salmanpour@kashanu.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی طبیعت-آبخیزداری شهری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه:

atefeh.abkar@outlook.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: تحلیل نوسانات هواشناسی و ارزیابی خشکسالی بلندمدت سواحل جنوبی ایران با رویکرد مشاهداتی و مدل سازی اقلیمی. مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱	موضوع: تحلیل نوسانات هواشناسی و ارزیابی خشکسالی بلندمدت سواحل جنوبی ایران با رویکرد مشاهداتی و مدل سازی اقلیمی. هدف: این مطالعه روند خشکسالی را در پنج ایستگاه سینوپتیک در امتداد سواحل جنوبی ایران (بندرعباس، بندرلنگه، بوشهر، چابهار و کیش) با استفاده از شاخص استاندارد بارش (SPI) در دو مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (کوتاه مدت) و ۴۸ ماهه (بلند مدت) تحلیل می کند. روش تحقیق: در این پژوهش، پنج ایستگاه سینوپتیک در منطقه جنوبی ایران انتخاب شدند. برای داده های مشاهداتی دوره ۱۹۸۵-۲۰۲۱، شاخص استاندارد بارش ۱۲ ماهه (SPI-12) و ۴۸ ماهه (SPI-48) محاسبه شد و الگوهای خشکسالی و ترسالی فصلی و چندساله شناسایی گردید. سپس، بارش آینده برای دوره ۲۰۲۳-۲۰۴۳ تحت دو سناریوی تغییر اقلیم، سناریوی خوش بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5)، پروژه CMIP6 با استفاده از مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-HR و مدل آماری SDSM پیش بینی شد و شاخص های SPI متناظر محاسبه گردید. برای پایش خشکسالی، شاخص SPI در مقیاس های ۱۲ و ۴۸ ماهه هم برای داده های مشاهداتی و هم برای داده های پیش بینی شده با استفاده از بسته SPEI در نرم افزار R محاسبه شد. یافته ها: روند کلی دوره های خشکسالی و ترسالی نشان می دهد که در ایستگاه بندرعباس، خشکسالی های شدید در سال های ۱۹۹۴، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۲ رخ داده است. در مقابل، دوره های ترسالی شدید در این ایستگاه در سال های ۱۹۸۸، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۷ مشاهده شده است. شرایط مشابهی در ایستگاه بندرلنگه ثبت شده است، با خشکسالی های شدید در سال های ۱۹۸۷، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱ و دوره های ترسالی شدید در سال های ۱۹۹۰، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶. ایستگاه های بوشهر و کیش نیز الگوهای مشابهی را نشان دادند، با دوره های ترسالی شدید در سال های ۱۹۹۰، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶ و خشکسالی ها در سال های ۱۹۸۷، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱. قابل توجه است که سال ۱۹۹۴ برای تمام ایستگاه ها شرایط حدی را نشان می دهد، در حالی که سال ۱۹۹۰ در تمام پنج ایستگاه با ترسالی همراه بوده است. در مورد پیش بینی های آینده، نتایج نشان می دهد که تحت سناریوی SSP5-8.5، شدت خشکسالی در ایستگاه های غربی در مقایسه با ایستگاه های شرقی بارزتر است. شاخص SPI-12 نوسانات سریع تری را در شرایط خشکسالی نشان می دهد و برای ارزیابی خشکسالی های فصلی یا سالانه مناسب است. نتیجه گیری: تحلیل شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) با داده های مشاهداتی نشان داد که الگوهای خشکسالی در این منطقه پیچیده بوده و تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله تغییرات در سیستم های جوی، الگوهای گردش اقیانوسی و فعالیت های انسانی قرار دارند. پیش بینی های این مطالعه حاکی از آن است که تحت سناریوی SSP5-8.5، مناطق ساحلی جنوبی ایران با افزایش قابل توجهی در شدت و فراوانی خشکسالی ها مواجه خواهند شد. یافته های این پژوهش پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب و برنامه ریزی منطقه ای در جنوب ایران دارد. با توجه به پیش بینی افزایش شدت و فراوانی خشکسالی ها، اتخاذ اقدامات سازگاری مانند توسعه سیستم های هشدار زود هنگام خشکسالی، بهبود مدیریت منابع آب، افزایش بهره وری مصرف آب، تغییر الگوهای کشت، ترویج کشاورزی مقاوم به خشکی، تنوع بخشیدن به منابع اقتصادی برای کاهش وابستگی به کشاورزی و افزایش آگاهی عمومی درباره خشکسالی و راهکارهای سازگاری با آن، برای کاهش اثرات منفی این پدیده ضروری است.

استناد: علوی نیا، سید حسن؛ سلمان پور، مهدی؛ آبکار، عاطفه. تحلیل نوسانات هواشناسی و ارزیابی خشکسالی بلندمدت سواحل جنوبی ایران با رویکرد مشاهداتی و

مدل سازی اقلیمی. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲(۲)، ۷۴۸-۷۳۲.

<http://doi.org/10.22059/IJE.2025.389977.1862>



© سید حسن علوی نیا، مهدی سلمان پور، عاطفه آبکار.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین پدیده‌های آب‌وهوایی است که تأثیرات وسیعی بر منابع طبیعی، کشاورزی، منابع آب و اقتصاد جوامع دارد (دای،^۱ ۲۰۱۱). این پدیده در مناطق مختلف جهان بسته به شرایط اقلیمی، شدت و فراوانی متفاوتی دارد و براساس عوامل متعددی از جمله تغییرات بارش، افزایش دما، و الگوهای گردش جوی تعیین می‌شود (میشرا و سینگ،^۲ ۲۰۱۰). این پدیده به‌عنوان یک مخاطره طبیعی، زمانی رخ می‌دهد که میزان بارندگی در یک منطقه به‌طور قابل توجهی کمتر از میانگین بلندمدت آن باشد، که این کاهش می‌تواند به کمبود منابع آبی، کاهش تولیدات کشاورزی، تخریب اکوسیستم‌ها و بروز مشکلات اقتصادی و اجتماعی منجر شود. با توجه به روند افزایشی تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، فراوانی و شدت خشکسالی در بسیاری از مناطق جهان رو به افزایش است و پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان می‌دهند که این روند در آینده نیز ادامه خواهد یافت (ترنبرث،^۳ ۲۰۱۱).

شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند که هریک جنبه‌های مختلفی از خشکسالی را بررسی می‌کنند. استفاده از شاخص‌های خشکسالی می‌تواند به پایش و ارزیابی مستمر وضعیت خشکسالی منجر گردد و موجب شناسایی سریع دوره‌های خشکسالی گردد (صنیع ثالث، سلطانی و مدرس، ۱۴۰۰). همچنین این شاخص‌ها به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره‌های کم‌آبی کمک خواهد کرد و باعث کاهش خسارات اقتصادی و اجتماعی توسط شناسایی بموقع خشکسالی و اتخاذ تدابیر مناسب در بخش‌های کشاورزی، صنعتی و اجتماعی منجر می‌گردد. درنهایت، بیان کمی وضعیت خشکسالی به توسعه سیاست‌های سازگاری و تدوین سیاست‌ها و راهبردهای سازگاری با شرایط خشکسالی پیشرو را فراهم می‌کنند. درنهایت، انتخاب شاخص مناسب برای ارزیابی خشکسالی باید با توجه به اهداف مطالعه، دسترسی به داده‌ها و شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر انجام شود.

تحقیقات اخیر نیز نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی باعث افزایش خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر در مناطق مختلف جهان شده‌اند، به‌ویژه در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک (ویسته-سرانو، بگوریا، لوپز-مورنو،^۴ ۲۰۱۰) مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی می‌کنند که این روند در دهه‌های آینده ادامه خواهد داشت و منجر به کاهش منابع آب شیرین و افزایش فشار بر اکوسیستم‌های طبیعی و انسانی خواهد شد (اسپینونی^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، تغییرات در الگوهای بارش، افزایش تبخیر-تعرق و کاهش ذخایر آبی، از عوامل تشدیدکننده خشکسالی در آینده محسوب می‌شوند (موکرچی، میشر، ترنبرث،^۶ ۲۰۱۸). در مناطقی خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله خاورمیانه، خشکسالی‌ها به دلیل وابستگی شدید به منابع آب سطحی و زیرزمینی، تأثیرات مخرب‌تری دارند. در برخی مناطق، مانند خاورمیانه و شمال آفریقا، شدت خشکسالی‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته و تأثیرات جدی بر امنیت غذایی و منابع آبی گذاشته است (توما^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). بررسی‌های انجام‌شده در ایران نیز حاکی از افزایش روند خشکسالی و کاهش منابع آبی طی دو دهه اخیر است (میرگل، نظری و اعتدالی، ۲۰۲۱). ایران به‌عنوان کشوری با اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، همواره با چالش‌های مربوط به خشکسالی مواجه بوده است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که کاهش بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق بالقوه، سبب افزایش شدت خشکسالی در مناطق مختلف ایران شده است (مدرسی، سرحدی و برن، ۲۰۱۶). بررسی داده‌های اقلیمی در نیم‌قرن اخیر نشان‌دهنده تغییرات چشمگیر در فراوانی و شدت خشکسالی در ایران است که پیامدهای گسترده‌ای برای امنیت غذایی، مدیریت منابع آب، و برنامه‌ریزی توسعه‌ای دارد (آبابایی و رضانی، ۲۰۱۹). این مطالعات اهمیت پایش و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از مدل‌های اقلیمی را برجسته می‌کنند، چراکه می‌توانند در تدوین راهبردهای مدیریتی برای کاهش اثرات این پدیده نقش مؤثری داشته باشند (انصاری آملی، عقیقی و لوپز-بائزا،^۸ ۲۰۲۲).

1. Dai

2. Mishra&Singh

3. Trenberth

4. Vicente-Serrano, Beguería&López-Moreno

5. Spinoni

6. Mukherjee, Mishra&Trenberth

7. Touma

8. Lopez-Baeza

خشکسالی با استفاده از مدل‌های اقلیمی قابل پیش‌بینی است و این مدل‌ها ابزارهای مهمی برای مدیریت منابع آب و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی محسوب می‌شوند. مدل‌های بزرگ‌مقیاس مانند 'MPI-ESM1.2-HR' در کنار روش‌های کوچک‌مقیاس‌سازی مانند 'SDSM'، امکان شبیه‌سازی شرایط آینده را فراهم می‌کنند (ویلیبی^۳ و همکاران، ۱۹۹۸). در مطالعاتی که در سطح جهان انجام شده، مدل‌های اقلیمی متعددی برای ارزیابی روند خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند دقت این پیش‌بینی‌ها را افزایش داده و منجر به سیاست‌گذاری‌های بهتر در مدیریت منابع آب شود (گمبل^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). برای مثال، پژوهش‌های انجام‌شده در ایالات متحده و استرالیا تأیید کرده‌اند که مدل‌های اقلیمی قادر به تشخیص الگوهای بلندمدت خشکسالی و تغییرات اقلیمی هستند و این امر می‌تواند به بهبود استراتژی‌های تطبیقی کمک کند (کوک^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). در اروپا، تحقیقاتی مانند مطالعه اسپینونی و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که در آینده احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید افزایش خواهد یافت، که این امر تأثیرات منفی بر بخش‌های کشاورزی و محیط‌زیست خواهد داشت. همچنین، نتایج تحقیقات جدید نشان می‌دهند که مدل‌های اقلیمی پیشرفته می‌توانند تغییرات در فراوانی و شدت خشکسالی را با دقت بیشتری مدل‌سازی کنند و در اتخاذ سیاست‌های مقابله‌ای مؤثرتر باشند (میشرا، تیوری و کومار^۶، ۲۰۲۲). در این مطالعه سعی شده است تا وضعیت خشکسالی طی دوره مشاهداتی و پیش‌بینی اقلیم آینده تحت دو سناریو (خوش‌بینانه و بدبینانه) در مناطق ساحلی جنوب کشور محاسبه و ارزیابی گردد تا بتوان شرایط وقوع پدیده خشکسالی در آینده را مورد بررسی قرار داد. این امر می‌تواند به مدیریت خطر (و نه مدیریت بحران) منجر گردد و بتوان اقدامات کاهش‌ی، آمادگی و سازگاری را انجام داد.

پیشینه پژوهش

در ایران مطالعات گسترده‌ای در زمینه خشکسالی و تغییرات اقلیمی انجام شده است. برای مثال، پژوهش خلیلی، کونار و فرامرزی (۲۰۲۴) نشان داد که استفاده از شاخص‌های چندمقیاسی مانند SPI^۷ و SPEI^۸ می‌تواند در تحلیل روند خشکسالی در مناطق مختلف کشور مفید باشد. همچنین، تحقیق رضوی پاشاییگ، امینی‌نیا و ثاقبیان (۱۴۰۳) به بررسی روند خشکسالی در مناطق شمال غرب ایران پرداخته و نشان داده است که فراوانی خشکسالی در این مناطق در حال افزایش است. در مطالعه دیگری، اصفهانی، سلطانی، مدرسی (۲۰۲۲) از داده‌های ماهواره‌ای برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر شدت خشکسالی در ایران استفاده کردند و دریافتند که دوره‌های خشکسالی در آینده شدیدتر و طولانی‌تر خواهند بود. در مطالعه‌ای دیگر فخار و نظری (۱۴۰۳) ویژگی‌های زمانی و مکانی شدت و فراوانی خشکسالی در ایران بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از شاخص‌های SPI، VCI، TCI و VHI مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استان‌های جنوبی کشور بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ خشکسالی‌های طولانی‌مدتی را تجربه کرده‌اند. مطالعات متعددی در زمینه بررسی خشکسالی در ایران و به‌ویژه در سواحل جنوبی کشور انجام شده است. برای مثال، محققان با استفاده از شاخص SPI به تحلیل زمانی و مکانی خشکسالی در ایران پرداختند و نشان دادند که حداکثر فراوانی وقوع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های مختلف کشور متفاوت است (فرج‌زاده و احمدیان، ۱۳۹۳). در مطالعه‌ای دیگر، صفریان زنگیر و زینالی (۱۳۹۸) با استفاده از شاخص‌های ترکیبی به بررسی و پیش‌بینی خشکسالی در ایران پرداختند و نشان دادند که شاخص فازی M.S.S می‌تواند طبقات خشکسالی را با دقت بالایی منعکس کند. همچنین، پژوهشی توسط آل بوعلی، قضاوی، ساداتی‌نژاد (۱۳۹۵) به بررسی اثرات خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی در دشت کاشان با استفاده از شاخص SPI پرداخت و نشان داد که علاوه بر خشکسالی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی عامل افت سطح آب زیرزمینی است.

1. Max Planck Institute Earth System Model higher-resolution
2. Statistical Downscaling Model
3. Wilby
4. Gamble
5. Cook
6. Mishra, Tiwari & Kumar
7. Standardized Precipitation Index
8. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی و تحلیل وضعیت خشکسالی در پنج ایستگاه سینوپتیک سواحل جنوبی ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس‌های ۱۲ ماهه و ۴۸ ماهه، طی دوره آماری گذشته ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۳ و دوره آماری آینده از ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ است. در این مطالعه به محاسبه شاخص SPI با استفاده از داده‌های مشاهداتی، برآورد تغییرات بارش با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتشار گزارش ارزیابی ششم (SSP۱)، تحت سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) و همچنین محاسبه شاخص SPI براساس داده‌های پیش‌بینی شده برای دوره‌های آتی می‌باشد تا امکان ارائه تصویری جامع از وضعیت گذشته و آینده خشکسالی در منطقه را فراهم سازد. این مطالعه علاوه بر اینکه در دو مقیاس کوتاه‌مدت و بلندمدت (که مقیاس بلندمدت بر سطح آب زیرزمینی نیز بسیار تأثیرگذار است و می‌توان در مطالعات آتی شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی را نیز بررسی نمود) متمرکز شده است، و وضعیت خشکسالی را طی دوره آینده، براساس مدل‌های گردش عمومی جو ارزیابی می‌کند و نه براساس روش‌های آماری، تأثیر توده‌های جوی را نیز در نظر گرفته است.

روش‌شناسی پژوهش

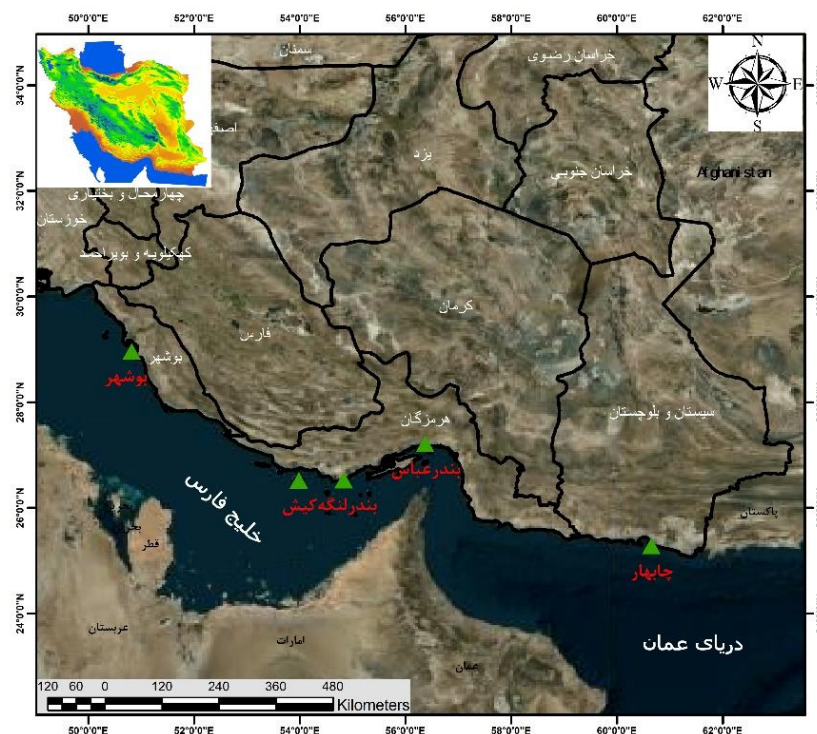
منطقه مطالعاتی

منطقه جنوبی ایران در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان واقع شده است و شامل استان‌های خوزستان، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان می‌شود. این منطقه دارای آب‌وهوای گرم و خشک با تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های معتدل است. میانگین بارش سالانه در این منطقه حدود ۲۰۰ میلی‌متر است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۹).

در این مطالعه، ۵ ایستگاه سینوپتیک بندرعباس، بندر لنگه، بوشهر، چابهار و کیش در منطقه جنوبی انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها به‌طور یکنواخت در طول ساحل خلیج فارس و دریای عمان توزیع شده‌اند و نماینده آب‌وهوای این منطقه هستند (جدول ۱ و شکل ۱).

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی (E°)	عرض جغرافیایی (N°)	ارتفاع از سطح دریا (m)	بارش میانگین سالانه (mm)	دمای میانگین سالانه (C°)
بندرعباس	۵۶° ۳۳' E	۲۷° ۱۳' N	۱۰	۱۷۶	۲۷/۵
بندر لنگه	۵۴° ۴۹' E	۲۶° ۳۳' N	۶	۱۵۴/۷	۲۶/۵
بوشهر	۵۰° ۵۰' E	۲۸° ۵۹' N	۱۸	۲۶۸	۲۵/۷
چابهار	۶۰° ۳۸' E	۲۵° ۱۷' N	۶	۱۱۰/۳	۲۶/۴
کیش	۵۳° ۵۸' E	۲۶° ۳۲' N	۳۱	۱۴۵	۲۶/۶



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران

این ایستگاه‌ها با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، بیشترین تأثیر را از تغییرات اقلیمی، به‌ویژه تغییرات بارندگی و خشکسالی می‌پذیرند. سواحل جنوبی کشور از جمله مناطقی هستند که تحت تأثیر پدیده‌های دورپیوندی نظیر ال‌نینو-نوسان جنوبی (ENSO^۱) نیز قرار می‌گیرند (علیزاده‌چوباری و نجفی، ۲۰۱۸). توده‌های هوایی مؤثر بر سواحل جنوبی ایران (خلیج فارس و دریای عمان) شامل توده‌های گرم و خشک است که این توده‌های هوا، از سمت شبه‌جزیره عربستان وارد ایران می‌شود و ماهیت آن گرم و خشک است و در فصل تابستان، باعث افزایش شدید دما و کاهش رطوبت در سواحل جنوبی می‌شود. به‌علاوه توده‌های موسمی (مانسون هند) است که این توده‌های هوا، از سمت اقیانوس هند و دریای عمان وارد ایران می‌شود و ماهیت آن مرطوب است و در فصل تابستان، باعث بارش‌های موسمی در سواحل جنوبی، به‌ویژه در جنوب شرق ایران می‌شود. توده‌های دیگر این بخش از ایران توده‌های سودانی است که در شمال شرق آفریقا تشکیل می‌شود و از جنوب غرب وارد ایران می‌شود. این توده‌های هوایی، نقش مهمی در تعیین میزان دما، رطوبت و بارش در سواحل جنوب ایران دارند. شایان ذکر است که تفاوت در توده‌های هوایی مؤثر بر این سواحل، باعث ایجاد اقلیم‌های متنوع در این مناطق شده است. البته از این نکته نباید غافل شد که عوامل دیگری نیز بر آب‌وهوای ایران تأثیر دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به موقعیت و عرض جغرافیایی، دوری و نزدیکی به دریاها، ارتفاعات این مناطق و همچنین جریان‌های جوی شامل جت استریم، ال نینو و... اشاره کرد.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مشاهداتی

برای تحلیل خشکسالی تاریخی، داده‌های بارش ماهانه از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۳ برای هر ایستگاه سینوپتیک از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. این داده‌ها ابتدا از نظر کیفیت بررسی شده و موارد مشکوک یا گمشده با استفاده از روش‌های آماری (مانند میانگین وزنی ایستگاه‌های مجاور) بازسازی شدند.

داده‌های مدل‌های اقلیمی

همچنین خروجی‌های مدل اقلیمی گردش عمومی جو (MPI-ESM1.2-HR (GCM تحت گزارش ششم ارزیابی (AR6) برای پیش‌بینی تغییرات بارش در دوره ۲۰۲۳-۲۰۴۳ استفاده گردید. پروژه CMIP^۶، به‌عنوان جدیدترین فاز از پروژه‌های مقایسه مدل‌های اقلیمی، مجموعه‌ای از مدل‌های پیشرفته اقلیمی را ارائه می‌دهد که توانایی بالایی در شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده اقلیمی دارند (آیرینگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۶). مدل MPI-ESM1.2-HR، یکی از مدل‌های پیشرفته شرکت‌کننده در پروژه CMIP6 است که توسط مؤسسه ماکس پلانک آلمان توسعه یافته است. این مدل، با دقت بالا، الگوهای بارش و دما را در مقیاس جهانی شبیه‌سازی می‌کند (موریستن^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). در این مطالعه از دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استفاده شد. سناریوهای SSP^۵، به‌عنوان سناریوهای جدید پروژه CMIP6، مسیرهای توسعه اجتماعی-اقتصادی آینده را توصیف می‌کنند و تأثیر آن‌ها بر تغییرات اقلیمی را بررسی می‌کنند (اونیل^۶ و همکاران، ۲۰۱۶).

سناریو SSP1-2.6، یک سناریوی خوش‌بینانه است که در آن، جامعه جهانی به‌سمت توسعه پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای حرکت می‌کند. در این سناریو، افزایش دمای جهانی به حدود ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد محدود می‌شود (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). سناریو SSP5-8.5، یک سناریوی بدبینانه است که در آن، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌شدت افزایش می‌یابد و افزایش دمای جهانی به بیش از ۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5، امکان بررسی طیف وسیعی از تغییرات اقلیمی آینده را فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا برنامه‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی را تدوین کنند. استفاده از خروجی‌های مدل‌های CMIP6، به‌دلیل دقت بالا و قابلیت اطمینان آن‌ها، در مطالعات تغییرات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای، امری ضروری است. مدل‌های CMIP6، با شبیه‌سازی دقیق فرایندهای اقلیمی، اطلاعات ارزشمندی را در مورد تغییرات بارش، دما و سایر متغیرهای اقلیمی ارائه می‌دهند.

خروجی مدل‌های CMIP6 از پورتال‌های داده‌ای بین‌المللی <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-cmip6> استخراج شد. سه مدل از میان مدل‌های CMIP6 با دقت بالا و عملکرد مناسب در منطقه ایران وجود دارد که شامل ACCESS-ESM1.5، CNRM-CM6.1 و MPI-ESM1.2 هستند (المزروعی و همکاران، ۲۰۲۰) که در این پژوهش از مدل توسعه یافته توسط مؤسسه ماکس پلانک آلمان (MPI-ESM1.2-HR) استفاده گردید. برای کوچک‌مقیاس‌سازی خروجی‌های مدل MPI-ESM1.2-HR، از روش آماری SDSM استفاده شد. این روش براساس روابط آماری بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و متغیرهای محلی، خروجی‌های مدل را به مقیاس ایستگاه‌های سینوپتیک تبدیل می‌کند.

در ادامه برای پایش خشکسالی، شاخص SPI در دو مقیاس ۱۲ و ۴۸ ماهه برای داده‌های مشاهداتی و همچنین داده‌های پیش‌بینی شده توسط بسته SPI در نرم‌افزار R محاسبه شدند. برای تحلیل وضعیت خشکسالی، از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) که توسط مک‌کی^۷ و همکاران (۱۹۹۳) معرفی شده است، استفاده شد. SPI یک شاخص غیرمستقیم و آماری است که امکان مقایسه بین مناطق مختلف را فراهم می‌کند. شاخص SPI، یک شاخص هواشناسی است که برای تعیین کمبود یا مازاد بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده می‌شود. این شاخص، انحراف بارش از میانگین بلندمدت را به‌صورت استاندارد نشان می‌دهد. SPI به‌دلیل انعطاف‌پذیری در مقیاس‌های زمانی، برای پایش انواع خشکسالی (هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی) کاربرد دارد (لوید-هیوز و ساندرز، ۲۰۰۲). این شاخص از طریق برازش توزیع گاما^۸ بر داده‌های بارش محاسبه شده و سپس به توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌شود. این شاخص تنها بر پایه داده‌های بارش بنا شده و با استانداردسازی بارش، امکان مقایسه شرایط خشکسالی

1. Assessment Report
2. Coupled Model Intercomparison Project
3. Eyring
4. Mauritsen
5. Shared Socioeconomic Pathways
6. O'Neill
7. McKee
8. Lloyd-Hughes & Saunders
9. Gamma distribution

در مناطق و دوره‌های مختلف را فراهم می‌سازد (مک‌کی، دوسکن و کلایس، ۱۹۹۳؛ سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۱۲). برای استانداردسازی داده‌های بارش، ابتدا لازم است داده‌های تجمعی بارش در هر مقیاس زمانی به یک توزیع احتمال مناسب برازش داده شوند. طبق توصیه سازمان جهانی هواشناسی، توزیع گاما به دلیل داشتن مقادیر غیرمنفی و انعطاف‌پذیری بالا برای مدل‌سازی بارش انتخاب می‌شود. تابع چگالی احتمال توزیع گاما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad \text{for } x > 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس^۲ و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است. برای برآورد این پارامترها از روش حداکثر درست‌نمایی^۳ استفاده می‌شود. پس از برازش تابع گاما، تابع توزیع تجمعی (CDF^۴) آن برای هر مقدار بارش محاسبه می‌شود. اگر داده‌های بارش شامل مقادیر صفر نیز باشند (که در برخی مناطق خشک رایج است)، احتمال وقوع صفر با استفاده از فراوانی نسبی مقادیر صفر لحاظ می‌شود:

$$H(x) = q + (1 - G(x)) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن q نسبت دفعات وقوع بارش صفر و $G(x)$ تابع توزیع تجمعی گاما است. در مرحله آخر، مقادیر حاصل از تابع تجمعی به مقادیر توزیع نرمال استاندارد (میانگین صفر و انحراف معیار یک) تبدیل می‌شوند. این تبدیل به وسیله تابع معکوس نرمال استاندارد (Z) انجام می‌شود:

$$SPI = (H(x))\Phi^{-1} \quad (۳)$$

که در آن Φ^{-1} تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد است و SPI مقدار نهایی شاخص بارش استاندارد شده می‌باشد. مقادیر نهایی SPI در محدوده‌های خاصی تفسیر می‌شوند که نشان‌دهنده شدت و نوع شرایط خشکسالی یا ترسالی هستند. این طبقه‌بندی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و وضعیت خشکسالی متناظر آن‌ها

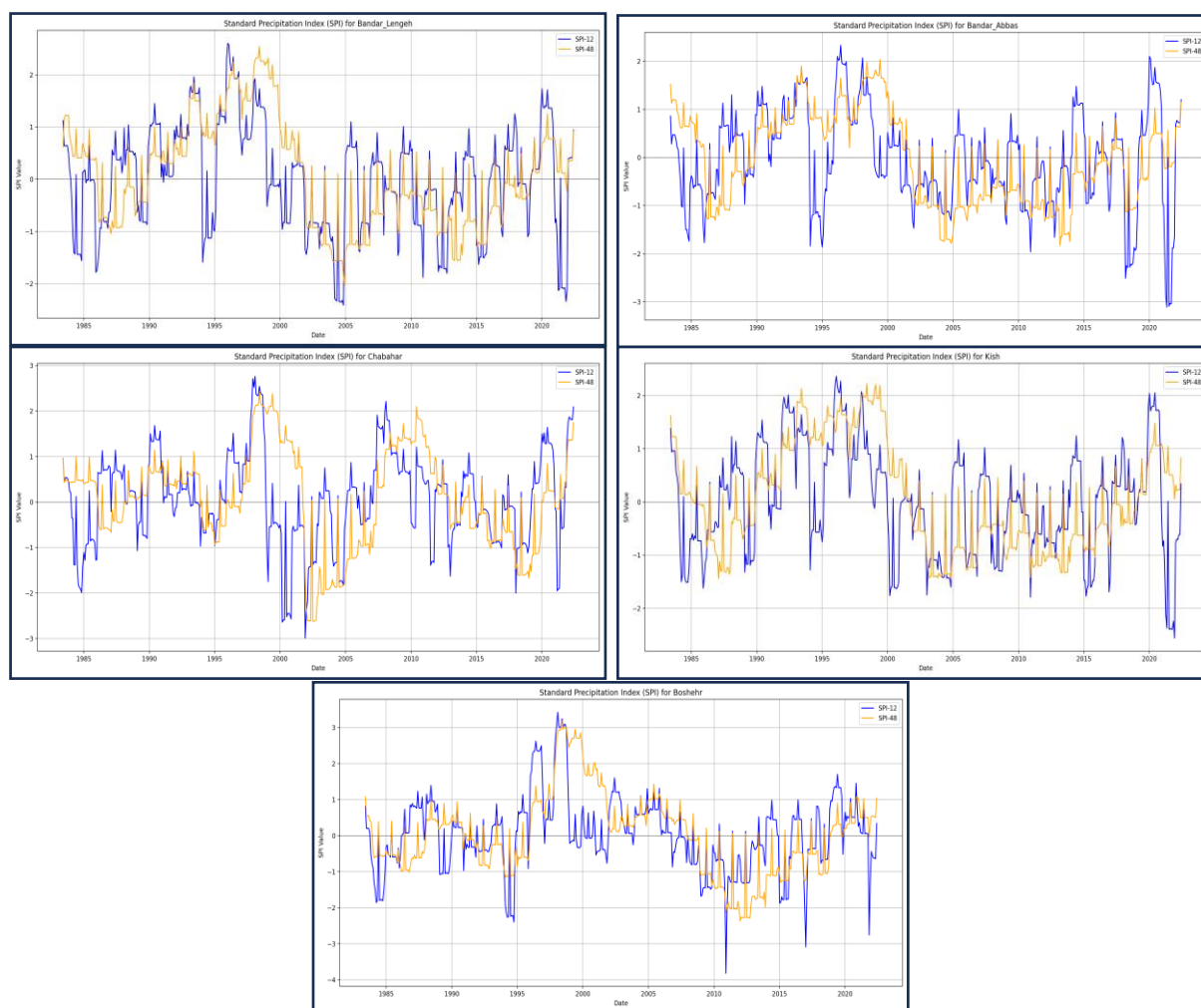
وضعیت اقلیمی	مقدار SPI
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱/۰ تا ۱/۴۹
شرایط نرمال	-۰/۹۹ تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱/۰ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از -۲

در این مطالعه از نرم‌افزار R برای محاسبه شاخص SPI استفاده شد و برای بررسی دقت مدل برازش و محاسبه SPI ، از آزمون‌های آماری مانند آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۵ و آزمون شاپیرو-ویلک^۶ برای ارزیابی نرمال بودن توزیع استفاده گردید. همچنین، روندهای زمانی نتایج SPI با وقایع تاریخی خشکسالی مقایسه گردید تا اعتبار نتایج تقویت گردد.

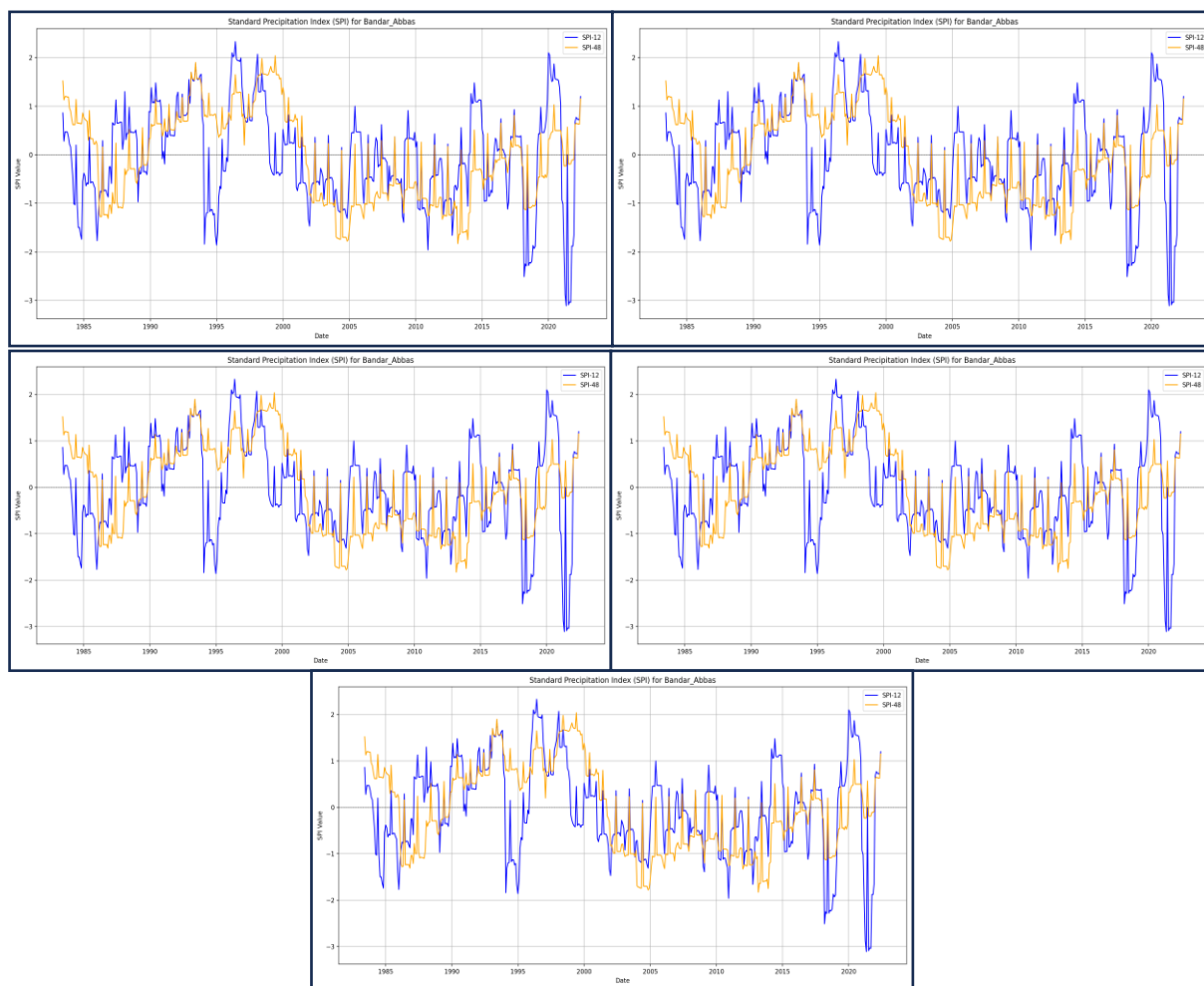
1. Shape parameter
2. Scale parameter
3. Maximum Likelihood Estimation
4. Cumulative distribution function
5. Kolmogorov-Smirnov test
6. Shapiro-Wilk test

نتایج

در این مطالعه، داده‌های شاخص خشکسالی استاندارد شده بارش (SPI) برای پنج ایستگاه سینوپتیک در سواحل جنوبی ایران (بندرعباس، بندرلنگه، بوشهر، چابهار و کیش) در دو مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (کوتاه مدت) و ۴۸ ماهه (بلند مدت) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرحله ابتدایی مقادیر برای داده‌های مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۲۱) محاسبه (شکل ۲) و در مراحل بعدی شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده برای بارش آینده تحت دو سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) برای دوره آینده (۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳) محاسبه شد (شکل ۳). هدف از این تحلیل، شناسایی روندهای خشکسالی و ترسالی و مقایسه نتایج در دو مقیاس زمانی است. این منطقه به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه، تحت تأثیر توده‌های هوایی متنوعی از جمله توده‌های هوای مرطوب اقیانوس هند، جریان‌های خشک عربستان و نوسانات اقلیمی بزرگ مقیاس مانند النینو-نوسان جنوبی (ENSO) قرار دارد. نتایج به دست آمده نه تنها درک بهتری از الگوهای خشکسالی در این منطقه حساس ارائه می‌دهد، بلکه بینش‌هایی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی فراهم می‌کند.



شکل ۲. شاخص بارش استاندارد شده در دو مقیاس ۱۲ و ۴۸ ماهه برای داده‌های تاریخی



شکل ۳. شاخص بارش استاندارد شده در دو مقیاس ۱۲ و ۴۸ ماهه برای داده‌های پیش‌بینی شده

روند کلی دوره‌های خشکسالی و ترسالی نشان می‌دهد که در ایستگاه بندرعباس طی سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰ و ۲۰۱۲ وقایع خشکسالی شدیدی رخ داده است. در مقابل، در سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۷ در این ایستگاه ترسالی شدید رخ داده است. این شرایط در ایستگاه بندرلنگه در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱ (خشکسالی شدید) و سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶ (ترسالی شدید) رخ داده است. دو ایستگاه بوشهر و کیش شرایط مشابهی دارند و ترسالی‌های شدید در سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶ و خشکسالی‌ها در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱ اتفاق افتاده است. ایستگاه چابهار نیز که در شرقی‌ترین بخش منطقه مطالعاتی واقع شده، دارای خشکسالی شدید طی سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰ و ۲۰۱۲ و ترسالی شدید در سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۷ است. شایان ذکر است که سال ۱۹۹۴ برای تمامی ایستگاه‌ها شرایط وخیمی رخ داد و البته در مقابل در سال ۱۹۹۰ هر پنج ایستگاه دچار ترسالی شده بودند. همچنین باید به این نکته توجه کرد که قریب به اتفاق خشکسالی‌ها در فصل تابستان و ترسالی‌ها در فصل زمستان رخ داده است. دو ایستگاه بندرعباس و چابهار از الگوی مشابهی پیروی می‌کنند که دلیل اصلی آن تأثیر پذیرفتن از توده هوای یکسان است. مشاهدات نشان می‌دهد که بندر لنگه و کیش نیز از الگوی یکسانی پیروی می‌کنند که می‌تواند دلیل اصلی آن واقع شدن در یک عرض جغرافیایی باشد.

تحلیل روندهای خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف داده‌های تاریخی

مقیاس ۱۲ ماهه (SPI-12)

شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده در مقیاس کوتاه مدت (SPI ۱۲ ماهه) نوسانات فصلی و سالانه خشکسالی را نشان می‌دهد. در تمامی ایستگاه‌ها، دوره‌های خشکسالی شدید با فراوانی قابل توجهی مشاهده می‌گردد. برای مثال، در بندرعباس، خشکسالی شدید

در سالهای ۱۹۸۴، ۱۹۹۴، و ۲۰۱۶ ثبت شده که همزمان با تشدید فعالیت توده‌های هوای خشک عربستان و کاهش نفوذ رطوبت از دریای عمان بوده است. در مقابل، سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۰ با ترسالی‌های چشمگیر همراه بودند که احتمالاً تحت تأثیر تقویت جریان‌های مرطوب مونسون تابستانه قرار داشتند. نکته قابل توجه، افزایش فراوانی خشکسالی‌های متوسط تا شدید در دو دهه اخیر (۲۰۰۰-۲۰۲۲) در تمامی ایستگاه‌هاست. این روند با مطالعات پیشین در منطقه خلیج فارس که نشان‌دهنده کاهش بارش سالانه و افزایش دماست، همسو است. برای مثال، در بوشهر SPI ۱۲ ماهه در سال ۲۰۲۱ به مقدار $-2/76$ رسید که بیانگر خشکسالی استثنایی در این منطقه است. این پدیده می‌تواند با گسترش پرفشار جنب حاره‌ای عربستان و کاهش انتقال رطوبت به سواحل ایران مرتبط باشد.

مقیاس ۴۸ ماهه (SPI-48)

این شاخص خشکسالی در مقیاس بلندمدت (SPI ۴۸ ماهه) نشان‌دهنده روندهای اقلیمی پایدارتر و تأثیرپذیر از نوسانات چندساله است. در این مقیاس، خشکسالی‌های طولانی‌مدت در دهه ۱۹۹۰ و اوایل ۲۰۰۰ در تمامی ایستگاه‌ها مشهود است. برای نمونه، در چابهار SPI ۴۸ ماهه بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ به‌طور مداوم کمتر از -1 باقی ماند، که احتمالاً تحت تأثیر فاز منفی نوسان اطلس شمالی (NAO) و تضعیف مونسون هندوستان رخ داده است.

تفاوت کلیدی بین مقیاس‌های ۱۲ و ۴۸ ماهه در ایستگاه کیش مشاهده شد. در حالی که SPI ۱۲ ماهه نوسانات شدید فصلی را نشان می‌دهد، SPI ۴۸ ماهه روند کاهشی ملایم، اما پیوسته‌ای را از سال ۲۰۰۰ تاکنون آشکار می‌کند. این امر حاکی از آن است که تغییرات بارش در این جزیره تحت تأثیر عوامل بزرگ مقیاس اقلیمی (مانند گرمایش جهانی و تغییر الگوهای اقیانوسی) قرار دارد که اثرات تجمعی آن‌ها در مقیاس‌های بلندمدت آشکار می‌شود. در رابطه با تفاوت‌های منطقه‌ای و تأثیر توده‌های هوایی باید بیان کرد که دو ایستگاه بندرعباس و بندر لنگه که در مجاورت تنگه هرمز واقع شده‌اند، بیشترین حساسیت را به نوسانات مونسون هندوستان نشان می‌دهند. خشکسالی‌های شدید در این مناطق اغلب با فازهای مثبت النینو (El Niño) همزمان است که باعث کاهش انتقال رطوبت از اقیانوس هند به سواحل ایران می‌گردد. از سوی دیگر، ترسالی‌های قابل توجه (مانند SPI با مقدار $2/32$ در بندرلنگه در سال ۱۹۹۶) با فازهای منفی النینو (La Niña) و تقویت جریان‌های مرطوب مرتبط است. ایستگاه چابهار که در نزدیکی مرز پاکستان قرار دارد، تحت تأثیر مستقیم مونسون تابستانه هندوستان است. داده‌های SPI ۴۸ ماهه نشان می‌دهد که خشکسالی‌های طولانی‌مدت در چابهار (مانند دوره ۱۹۹۸-۲۰۰۲) با ضعف سامانه مونسون و افزایش فراوانی پدیده «مونسون شکست‌خورده» مرتبط است. این یافته با پژوهش‌های اخیر در مورد کاهش بارش مونسونی در جنوب آسیا همخوانی دارد. الگوی خشکسالی در بوشهر تفاوت قابل توجهی با سایر ایستگاه‌ها نشان داد. خشکسالی‌های شدید در این منطقه (مانند SPI با مقدار $-3/82$ در سال ۲۰۱۰) نه تنها با کاهش بارش، بلکه با افزایش تبخیر و تفرق ناشی از گرمایش شدید هوا (با منشأ توده‌های هوای گرم عربستان) مرتبط است. این مسئله نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی تغییرات بارش و دما بر تشدید خشکسالی در مناطق نیمه‌خشک است. با این حال جزیره کیش به دلیل موقعیت دور از ساحل، نوسانات بارشی کمتری را تجربه می‌کند، اما داده‌های SPI ۴۸ ماهه بر روی کاهش پیوسته ذخیره آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. این امر احتمالاً ناشی از برداشت بیش از حد منابع آب و کاهش تغذیه سفره‌ها در دوره‌های خشکسالی تشدید می‌گردد. نتایج این مطالعه همسو با شواهد جهانی در مورد تشدید خشکسالی‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی منجر به تقویت پرفشار جنب حاره‌ای عربستان شده است که مانع نفوذ سامانه‌های بارشی به سواحل جنوبی ایران می‌شود. همچنین، تغییر الگوهای ENSO و نوسان مادان-جولیان (MJO) ممکن است بر تناوب و شدت خشکسالی‌ها در این منطقه تأثیر گذاشته باشد. بررسی همبستگی بین SPI و شاخص‌های اقلیمی بزرگ مقیاس (مانند شاخص نوسان جنوبی (SOI) و شاخص فشار سطح دریای عربستان) می‌تواند در پژوهش‌های آینده برای پیش‌بینی خشکسالی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

نتایج شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده برای دوره آبی تحت سناریوهای انتشار

در ادامه، شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده در دو مقیاس ۱۲ و ۴۸ ماهه برای بارش‌های پیش‌بینی شده تحت دو سناریوهای تغییر اقلیم SSP1-2.6 (خوش‌بینانه) و SSP5-8.5 (بدبینانه) محاسبه گردید، تا هم نوسانات کوتاه‌مدت و هم روندهای بلندمدت خشکسالی در دوره آینده (۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳) تحلیل شود. نتایج نشان‌دهنده تغییرات معنادار در الگوهای خشکسالی تحت تأثیر گرمایش جهانی است که در ادامه به تفصیل بررسی می‌شوند.

در رابطه با پارامتر اختلاف مکانی بین ایستگاه‌های مورد مطالعه به دلیل موقعیت جغرافیایی متفاوت (از خلیج فارس تا دریای عمان)، آن‌ها تحت تأثیر توده‌های هوایی متنوعی قرار دارند. برای مثال، بندرعباس و بندرلنگه تحت تأثیر جریان‌های مرطوب اقیانوس هند و چرخندهای حاره‌ای قرار می‌گیرند، درحالی‌که چابهار به دلیل مجاورت با دریای عمان، نوسانات بارشی متفاوتی را تجربه می‌کند. نتایج نشان داد که شدت خشکسالی در ایستگاه‌های غربی (بوشهر و بندرلنگه) تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به ایستگاه‌های شرقی (چابهار و کیش) بیشتر است. این امر احتمالاً به دلیل کاهش فعالیت سامانه‌های بارشی غرب آسیا و تقویت پرفشار جنب حاره‌ای در منطقه خلیج فارس است که در مطالعات پیشین نیز به آن اشاره شده است (علیزاده چوباری و نجفی، ۲۰۱۸). مقیاس ۱۲ ماهه SPI نوسانات سریع‌تر خشکسالی را نشان می‌دهد و برای ارزیابی خشکسالی‌های فصلی یا سالانه مناسب است. در سناریوی SSP5-8.5، فراوانی خشکسالی‌های شدید در بازه ۲۰۳۰-۲۰۴۰ به طور چشمگیری افزایش یافت. برای مثال، در بندرعباس، سال‌های ۲۰۳۲، ۲۰۳۵، و ۲۰۴۰ مقادیر شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده با مقادیر کمتر از ۲- ثبت شدند که نشان‌دهنده خشکسالی‌های بسیار شدید است. در مقیاس ۴۸ ماهه که به عنوان شاخص بلندمدت در نظر گرفته می‌شود، در هر دو سناریو، روند کاهشی از سال ۲۰۳۵ به بعد مشهود است، اما در SSP5-8.5، کاهشی تا ۳۰ درصد شدیدتر را نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که حتی در صورت بهبود موقت بارش‌ها (مثلاً در SPI ۱۲ ماهه)، کمبود بارش تجمعی در بلندمدت می‌تواند منابع آب زیرزمینی و اکوسیستم‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

مکانیزم‌های اقلیمی مؤثر بر خشکسالی

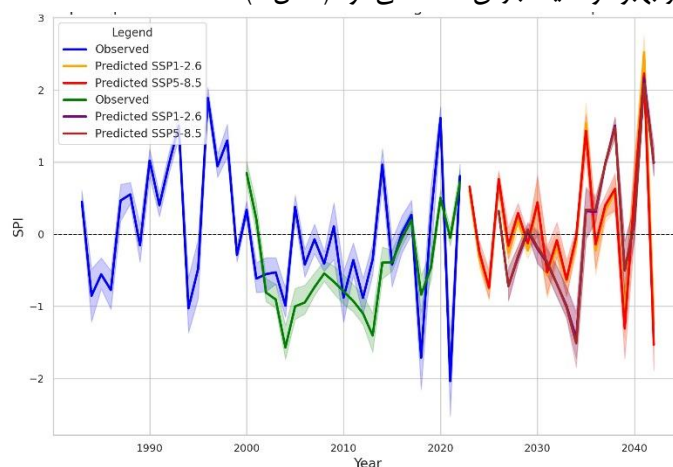
تأثیر تغییر الگوهای گردش جوی

مدل MPI-ESM1.2-HR نشان می‌دهد که تحت سناریوی SSP5-8.5، تقویت پدیده ENSO و تغییر در مسیر جت‌استریم‌های عرض میانی، منجر به کاهش بارش در منطقه می‌شود. این تغییرات با مطالعات جهانی (بوتائو و جین، ۲۰۲۱) همسو است که پیش‌بینی می‌کنند مناطق نیمه‌خشک مانند جنوب ایران، کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی بارش را تا پایان قرن تجربه خواهند کرد. با توجه به این مهم که تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش دما را نیز خواهیم داشت، تبخیر از سطح خاک و آب‌های سطحی نیز تشدید می‌شود. این پدیده حتی در صورت ثابت ماندن بارش‌ها، منجر به کاهش دسترسی به آب می‌گردد. داده‌های SPI ۴۸ ماهه نشان می‌دهد که به عنوان نمونه در بوشهر، SPI از ۱.۲ در ۲۰۲۵ به ۱/۸- در ۲۰۴۰ کاهش یافته است که نشان‌دهنده ترکیب کاهش بارش و افزایش تبخیر است. اگرچه این مطالعه مستقیماً به تأثیرات انسانی نپرداخته است، نتایج به دست آمده هشداردهنده هستند. برای نمونه، در چابهار که توسعه کشاورزی و صنعتی سریع‌تری دارد، کاهش SPI در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به SSP1-2.6 بسیار محسوس‌تر است. این امر احتمالاً به دلیل افزایش تقاضای آب و کاهش ذخایر زیرزمینی تشدید می‌شود.

مقایسه سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه

این مطالعه نشان می‌دهد تحت سناریوی خوش‌بینانه، خشکسالی‌های شدید عمدتاً در بازه‌های کوتاه مدت رخ می‌دهند و پس از سال ۲۰۴۰، روند بهبود نسبی مشاهده می‌گردد. در مقیاس ۴۸ ماهه، SPI در چابهار و کیش پس از ۲۰۳۵ به مقادیر نزدیک به نرمال (۰ تا ۰/۵-) باز می‌گردد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاهش انتشار گازها بر ثبات بارش است. از سوی دیگر تحت سناریوی بدبینانه، خشکسالی‌های بسیار شدید از سال ۲۰۳۰ به بعد به طور مکرر رخ می‌دهند. برای مثال، در بندرلنگه، ۷ سال بین دوره ۲۰۳۵ تا ۲۰۴۵ دارای SPI ۱۲ ماهه کمتر از ۲- هستند. در مقیاس ۴۸ ماهه، SPI در تمام ایستگاه‌ها تا سال ۲۰۵۰ به مقادیر کمتر از ۱/۵- می‌رسد

که نشان‌دهنده خشکسالی ساختاری (علاوه بر عوامل طبیعی، تحت تأثیر مدیریت و سیاست‌های نادرست انسان‌ها نیز می‌باشد) و غیرقابل بازگشت است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که سال ۲۰۳۵ ممکن است نقطه عطفی بحرانی^۱ باشد که پس از آن، حتی تحت سناریوی SSP1-2.6 نیز بهبود وضعیت بارش‌ها کند می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه SPI داده‌های تاریخی با پیش‌بینی‌شده در منطقه تحت دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه

این موضوع احتمالاً به دلیل ذوب یخچال‌های هیمالیا و تغییر الگوهای موسمی است که بر بارش‌های منطقه تأثیر می‌گذارد. این مطالعه نشان می‌دهد که سواحل جنوبی ایران در دهه‌های آینده با تشدید خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت مواجه خواهند شد، به‌طوری‌که تحت سناریوی SSP5-8.5، برخی مناطق مانند بندرلنگه ممکن است به شرایط نیمه‌بیابانی دائمی نزدیک شوند. با این حال، سناریوی SSP1-2.6 امیدهایی برای تعدیل اثرات از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. اجرای راهکارهای مدیریتی پیشنهادی، همراه با همکاری بین‌المللی برای کاهش انتشار کربن، می‌تواند از تبدیل این منطقه به یک کانون بحران آب جلوگیری کند.

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی حاضر با هدف تحلیل روند خشکسالی در سواحل جنوبی ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده در مقیاس‌های ۱۲ و ۴۸ ماهه برای داده‌های تاریخی و همچنین تحت سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6 (خوش‌بینانه) و SSP5-8.5 (بدبینانه) برای دوره آینده انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم، به‌ویژه تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، می‌تواند منجر به افزایش فراوانی و شدت خشکسالی در این منطقه شود. بررسی خشکسالی‌های تاریخی سواحل جنوبی ایران نشان داد که این منطقه در دهه‌های اخیر تحت تأثیر دوره‌های متناوب خشکسالی و ترسالی قرار داشته است. نتایج تحلیل شاخص SPI با داده‌های مشاهداتی نشان داد که الگوهای خشکسالی در این منطقه پیچیده بوده و تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله تغییرات در سیستم‌های جوی، الگوهای گردش اقیانوسی و فعالیت‌های انسانی قرار دارند. یافته‌ها نشان داد که خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت در دهه‌های اخیر به‌ویژه پس از سال ۲۰۰۰ در این منطقه شدت یافته است. نتایج این پژوهش همسو با یافته‌های مطالعات پیشین در خصوص افزایش وقوع خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. برای مثال، مطالعه‌ای که توسط ملکیان و محمدی (۱۴۰۱) در کرمانشاه انجام شد، نشان داد که تغییرات اقلیمی منجر به افزایش شدت و مدت خشکسالی‌ها شده است. این یافته‌ها تأثیرات گسترده‌تر گرمایش جهانی بر الگوهای بارش و افزایش تبخیر را تأیید می‌کنند. با این حال، برخی از مطالعات دیگر نتایج متفاوتی را نشان داده‌اند. برای مثال، گودرزی و فاتحی‌فر (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای بر روی حوضه آبخیز آذرشهر چای، نشان دادند که تغییر اقلیم ممکن است منجر به افزایش بارش‌های حداکثر در برخی فصول شود. این تفاوت در نتایج می‌تواند ناشی از تفاوت در مقیاس مطالعات، مناطق مورد بررسی و روش‌های مورد استفاده باشد. زارعی، مقیمی و بهرامی (۱۳۹۶) نیز در بررسی روند خشکسالی در جنوب شرقی ایران،

افزایش معنادار خشکسالی‌های شدید را گزارش کردند، مشابه آنچه در ایستگاه‌های بوشهر و بندرلنگه مشاهده شد. پیش‌بینی‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، سواحل جنوبی ایران با افزایش قابل توجه در شدت و فراوانی خشکسالی‌ها مواجه خواهند شد. این یافته‌ها با نتایج بسیاری از مطالعات جهانی و منطقه‌ای همخوانی دارد که نشان می‌دهند تغییر اقلیم می‌تواند منجر به تشدید خشکسالی در بسیاری از مناطق جهان شود. مطالعات جهانی متعددی نشان داده‌اند که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو می‌تواند منجر به تغییر در الگوهای گردش جوی و افزایش دما شود که این تغییرات می‌توانند به نوبه خود منجر به کاهش بارش و افزایش تبخیر و در نتیجه تشدید خشکسالی شوند (میشرا، تیوری و کومار، ۲۰۲۲). در مطالعه عزیزی و عباسی (۱۴۰۴) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، پیش‌بینی شدت و تداوم خشکسالی‌ها در آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی تأیید گردید. این نتایج با پیش‌بینی‌های مدل MPI-ESM1.2-HR در این پژوهش که کاهش SPI تا ۳۰ درصد تحت سناریوی SSP5-8.5 را نشان می‌دهد، همسوست. همچنین، اصفهانی، سلطانی و مدرسی (۲۰۱۶) در تحلیل داده‌های اقلیمی نیم قرن اخیر ایران، کاهش بارش و افزایش دما را به عنوان عوامل کلیدی تشدید خشکسالی معرفی کردند که در تحلیل مکانیزم‌های اقلیمی این پژوهش (مانند تقویت پرفشار جنب حاره‌ای عربستان) بازتاب یافته است.

مطالعه خلیلی، کونار و فرامری (۲۰۲۴) بر کاربرد شاخص‌های چندمقیاسی مانند SPI و SPEI در ایران تأکید دارد. یافته‌های حاضر نیز نشان داد که SPI در مقیاس ۴۸ ماهه، روندهای بلندمدت خشکسالی را با دقت بیشتری آشکار می‌کند؛ به‌ویژه در جزیره کیش که کاهش پیوسته ذخایر آب زیرزمینی ناشی از خشکسالی‌های تجمعی مشاهده می‌گردد. این مسئله با پژوهش فرج‌زاده و احمدیان (۱۳۹۳) که کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی در دشت‌های ایران را گزارش می‌کند، هماهنگ است. در سطح جهانی نیز، افزایش خشکسالی‌ها در مناطق خشک تحت تأثیر تغییرات اقلیمی بارها گزارش شده است. ویسنه-سرانو، پنیا‌آنگولو (۲۰۲۲) در تحلیل خشکسالی‌های اروپا و مدیترانه، کاهش بارش و افزایش دما را عامل اصلی تشدید خشکسالی‌ها دانستند که با نتایج این پژوهش در ایستگاه بوشهر (ترکیب کاهش بارش و افزایش تبخیر) همخوانی دارد. اسپینونی، باربوسا و بوکینیانی (۲۰۲۱) نیز پیش‌بینی کردند که خشکسالی‌های شدید در جنوب اروپا و خاورمیانه تا سال ۲۰۴۰ افزایش خواهد یافت، که با پیش‌بینی‌های مدل MPI-ESM1.2-HR تحت سناریوی SSP5-8.5 در این مطالعه سازگاری دارد. میشرا، تیوری و کومار (۲۰۲۲) در هند نیز کاهش فعالیت مونسون و افزایش خشکسالی‌های طولانی‌مدت را گزارش کردند که مشابه الگوهای مشاهده‌شده در ایستگاه چابهار (تحت تأثیر مونسون هند) است.

لازم به یادآوری است که استفاده از مدل‌های CMIP6 در این پژوهش با مطالعاتی مانند المزروعی، و همکاران (۲۰۲۰b) که دقت بالای این مدل‌ها را در شبیه‌سازی اقلیم خاورمیانه تأیید کرده‌اند، همسوست. همچنین، گمبل و همکاران (۲۰۲۱) در ایالات متحده نشان دادند که مدل‌های اقلیمی پیشرفته می‌توانند الگوهای خشکسالی بلندمدت را با دقت شناسایی کنند، همان‌طور که در این مطالعه، مدل MPI-ESM1.2-HR کاهش SPI را تا سال ۲۰۴۳ پیش‌بینی کرد. اگرچه بسیاری از مطالعات پیشین بر روند کلی خشکسالی در ایران متمرکز بودند، این پژوهش با تحلیل تفاوت‌های مکانی در سواحل جنوبی (از خلیج فارس تا دریای عمان) و تأثیر توده‌های هوایی خاص (مانند مونسون هند و پرفشار عربستان)، دیدگاه دقیق‌تری ارائه داد. برای مثال، تفاوت شدت خشکسالی در ایستگاه‌های غربی (بوشهر) و شرقی (چابهار) تحت سناریوی SSP5-8.5، ناشی از مکانیزم‌های اقلیمی متفاوت است که در مطالعات پیشین کمتر بررسی شده بود. همچنین، شناسایی نقطه عطف بحرانی در سال ۲۰۳۵ تحت هر دو سناریو، یافته‌ای مهم است که لزوم اقدامات فوری برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را برجسته می‌کند. نتایج این پژوهش پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی منطقه‌ای در سواحل جنوبی ایران به ارمغان آورد. با توجه به پیش‌بینی افزایش شدت و فراوانی خشکسالی‌ها، اتخاذ اقدامات سازگاری از قبیل توسعه سیستم‌های هشدار زود هنگام خشکسالی، بهبود مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب، تغییر الگوهای کشت و توسعه کشاورزی مقاوم به خشکی، تنوع بخشیدن به منابع اقتصادی و کاهش وابستگی به کشاورزی و همچنین افزایش آگاهی عمومی در خصوص خشکسالی و روش‌های سازگاری با آن، برای کاهش اثرات منفی این پدیده ضروری است.

References

- Ababaei, B., & Ramezani Etedali, H. (2019). Investigating climate change over 1957–2016 in an arid environment with three drought indexes. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 2977-2992.
- Aleboali, A., Ghazavi, R., & Satatinejad, S. J. (2022). Study the effects Of Drought on Groundwater Resources using SPI Index (A Case Study: Kashan Plain). *Desert Ecosystem Engineering*, 5(10), 13-22. (in Persian).
- Alizadeh-Choobari, O., & Najafi, M. S. (2018). Climate variability in Iran in response to the diversity of the El Niño-Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 38(11), 4239-4250.
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, S., Saeed, F., & Ismail, M. (2020a). Future changes in climate over the Arabian Peninsula based on CMIP6 multimodel simulations. *Earth Systems and Environment*, 4, 611-630.
- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M.N., & Ismail, M., (2020b). Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4, 297-320.
- Ansari Amoli, A., Aghighi, H., & Lopez-Baeza, E. (2022). Drought risk evaluation in Iran by using geospatial technologies. *Remote Sensing*, 14(13), 3096.
- Azizi, M. & Abbasi, A. (2025). Developing a Robust Data-Driven Model Based on Ground and Satellite Measured Data for Agricultural Drought Prediction in Iran. *Ferdowsi Civil Engineering*, 38(1), 1-28. doi: 10.22067/jfcej.2024.88855.1311. (in Persian).
- Bo-Tao, Z. H. O. U., & Jin, Q. I. A. N. (2021). Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6. *Advances in Climate Change Research*, 17(6), 713.
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65.
- 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.
- Fakhar, M. S., & Nazari, B. (2024). Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran Using Remote Sensing. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 39-58. doi: 10.22077/jdcr.2024.7011.1050. (in Persian).
- Farajzadeh, M., & Ahmadian, K. (2014). Temporal and Spatial Analysis of Drought with use of SPI Index in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 3(4), 1-16. doi: 10.22111/jneh.2014.2464. (in Persian).
- Gamble, J. D., Feyereisen, G. W., Griffis, T. J., Wentz, C. D., & Baker, J. M. (2021). Long-term ecosystem carbon losses from silage maize-based forage cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 306, 108438.
- Goodarzi, M., & Fatehifar, A. (2022). Assessment of Climate Change Effects on Meteorological Variables and Maximum Precipitation under New RCP Emission in Watershed. *Human & Environment*, 20(2), 111-127. (in Persian).
- Iran Meteorological Organization. (2019). *Climatic Atlas of Iran*. Tehran: Iran Meteorological Organization. (in Persian).
- Isfahani, P. M., Soltani, S., & Modarres, R. (2022). Assessing agrometeorological drought trends in Iran during 1985–2018. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(1), 251-262.
- Khalili, P., Konar, M., & Faramarzi, M. (2024). Modelling the impacts of future droughts and post-droughts on hydrology, crop yields, and their linkages through assessing virtual water trade in agricultural watersheds of high-latitude regions. *Journal of Hydrology*, 639, 131530.
- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International journal of climatology*, 22(13), 1571-1592.
- Malekian, A., & Mohammadi, P. (2022). Investigating Changes in Some Climate Variables under the Future Climate Scenarios for a Semi-Arid Region. *Desert Ecosystem Engineering*, 10(30), 65-80. doi: 10.22052/deej.2021.10.30.41. (in Persian).

- Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brokopf, R., ... & Fast, I. (2019). Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1. 2) and its response to increasing CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4), 998-1038.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
- Mirgol, B., Nazari, M., Etedali, H. R., & Zamanian, K. (2021). Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological applications*, 28(4), e2009.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Mishra, V., Tiwari, A. D., & Kumar, R. (2022). A framework to incorporate spatiotemporal variability of rainfall extremes in summer monsoon declaration in India. *Environmental Research Letters*, 17(9), 094039.
- Modarres, R., Sarhadi, A., & Burn, D. H. (2016). Changes of extreme drought and flood events in Iran. *Global and Planetary Change*, 144, 67-81.
- Mukherjee, S., Mishra, A., & Trenberth, K. E. (2018). Climate change and drought: a perspective on drought indices. *Current climate change reports*, 4, 145-163.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Meehl, G. A. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Razavi Pashabeigh, M., Amininia, K., SAGHEBIAN, S., & Ghasempour, R. (2025). Assessment of Drought Severity Based on Remote Sensing Using a Multi-scale Intelligent Method (Case Study: Northwest Iran). *Water Management in Agriculture*, 11(2), 145-164. (in Persian).
- 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.
- Saniesales, F., Soltani, S., & Modarres, R. (2021). Evaluation of new drought index of SPDI (Standardized Palmer Drought Index) in Chaharmahal-Va-Bakhtiari province. *Journal of Water and Soil Science*, 25(2), 1-12. (in Persian).
- Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Cescatti, A., ... & Forzieri, G. (2021). Global exposure of population and land-use to meteorological droughts under different warming levels and SSPs: A CORDEX-based study. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6825-6853.
- Touma, D., Stevenson, S., Lehner, F., & Coats, S. (2021). Human-driven greenhouse gas and aerosol emissions cause distinct regional impacts on extreme fire weather. *Nature Communications*, 12(1), 212.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate research*, 47(1-2), 123-138.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., Tomás-Burguera, M., Noguera, I., ... & El Kenawy, A. (2022). Global drought trends and future projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 380(2238), 20210285.
- Wilby, R. L., Wigley, T. M. L., Conway, D., Jones, P. D., Hewitson, B. C., Main, J., & Wilks, D. S. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water resources research*, 34(11), 2995-3008.
- World Meteorological Organization. (2012). *Standardized precipitation index user guide*. World Meteorological Organization, 1090.
- Zarei, A. R., Moghimi, M. M., & Bahrami, M. (2017). Monitoring and Prediction of Monthly Drought using Standardized Precipitation Index and Markov Chain (Case study: southeast of Iran). *Geography and Environmental Sustainability*, 7(2), 39-51. (in Persian).
- Zenali, B. (2019). Investigation and prediction of Iranian drought using composite indices. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 7(3), 21-36. (in Persian).