

The effects of climate change on increasing the risk of drought in Tehran using CMIP6 scenarios

Niloofar Mohammadi¹ , Zahra Hejazizadeh^{2*} 

¹ Ph.D. Student, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

Global warming threatens human survival in today's scenario; and has become an environmental challenge. The climate data shows the warming trend in many parts of the world, which has led to a wide range of climate effects such as reduced precipitation, drought, and the occurrence of extreme events. The increasing vulnerability of many urban areas, especially in developing countries, has been one of the main concerns of life. Therefore, examining the risk of risks caused by global warming on a national and local scale is a fundamental step to increase the readiness of urban areas to reduce current and future risks caused by climate change. Droughts have effects on vegetation, soil and freshwater quality, and etc., and are a serious ecological problem around the world, its impact on crops and water availability for humans can jeopardize human life. Although drought has always been common, the drought risk has become increasingly prominent because of the climatic warming that has occurred during the past century. Therefore, these effects of are noticeable in all climates, and Iran, having a dry and semi-arid climate, is one of the countries that is always at risk of drought, and this causes great economic damage to the country every year. In addition to this, the review of the history and climatic texts shows that the importance of the effects of climatic elements (rainfall and temperature) on the drought situation of the region in the coming period is essential. Until now, the study of global warming in terms of increasing the risk of drought using the sixth report and new climate data has not been studied in Tehran province. So this study aims to investigate the effects of climate change on increasing the risk of drought in Tehran province.

Materials and Methods

This research, First, the parameters (temperature and precipitation) for the synoptic stations (Abali, Shemiran, Mehrabad) for the period (1988-2020) were received from the Tehran Meteorological Organization. To projection in the future, down-scaling methods (SDSM-DC model) and The Mann-Kendall test were used to investigate the changes in temperature and precipitation. Climatic parameters change in space and time scale for many reasons. that these changes should be checked based on observations and statistical methods. Rainfall is one of those climate parameters that is not normal, and methods such as Menn-Kendall should be used to deal with such conditions; For this purpose, using Macro Excel, the value of age slope and Z statistic was calculated in the period (1988-2020) for the stations (Mehrabad, Shemiran and Abali) to investigate the trend of precipitation and temperature from the past to the present at a confidence level of 95-99% computed. In the following NetCDF data together with CanESM5 predictors from the base period (1979-2014) according to the most recent SSP release scenarios of the IPCC 6th Report were obtained from the Canadian Climate Change website. Among them, only Mehrabad station had a complete basic period compared to other stations, it was chosen as the selected station in Tehran. Drought indices are used as an index to track and quantify drought, this research is SPI index with DIC software has been used to evaluate the drought. in this index Precipitation, which has been one of its main components, whose output and results are more consistent with reality.

Results and Discussion

The results using the Mann-Kendall test showed that the examination of temperature changes in the stations (Mehrabad, Shemiran, Abali) was an increasing trend. Rainfall in most months of the year is a stable trend, only

jumps are observed which can be justified by the increase in the frequency of rainfall. In the simulation with the CanESM5 model under the SSP5 scenario at Mehrabad station, the highest temperature was assigned to July and the highest rainfall will be in March. In this research, The drought survey showed that Mehrabad station experienced severe drought only during 1989-1993, while the duration of the drought period was longer in Abali and Shemiran stations and both of them faced very severe drought in 2014. In addition, this investigation of three stations with a common period of 32 years in Tehran shows that Tehran has overcome the drought situation in recent years; But most of the time, the region may be in close to normal climatic conditions. But the risk of dry to very dry conditions will be very close. On the other, the results confirmed that drought depends on both rainfall and temperature.

Conclusion

As drought depends on both precipitation and temperature, The more the drought is accompanied by the trend of increasing temperature, decreasing precipitation, and the prediction of climate models, the more likely it is that climate change will occur due to global warming. As a result, the temperature of Tehran will increase. And while the rainfall is decreasing, it will be fluctuating and torrential. so In the future, Tehran's climate will have more fluctuations in rainfall and will be warmer than the current conditions. In addition, rains will occur more randomly but with more intensity. Tehran has had a drought in recent years, but most of the time the region has been in near-normal climatic conditions, but is the risk of dry and very dry conditions. This factor will create environmental challenges in the future. In addition to this, it is necessary to have a plan for climate risk management in the future due to the new climate of Tehran, which is prone to drought.

Keywords: Climate change, Climate risks, Global warming, Modeling, Mann-Kendall, Tehran

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Kharazmi for its financial support.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest regarding the publication of the contents and results of this research.

Data availability statement

This in research all information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Niloofar Mohammadi: Writing-original draft preparation, software/statistical analysis, resources, manuscript editing; **Zahra Hejazizadeh:** Resources, supervision, manuscript editing, controlling the results.

*Corresponding Author, E-mail: hedjazizadeh@yahoo.com

Citation: Mohammadi, N., & Hejazizadeh, Z. (2024). The effects of climate change on increasing the risk of drought in Tehran using CMIP6 scenarios. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(2), 133- 148.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12563.1252

Received: 16 March 2023, Received in revised form: 08 April 2023, Accepted: 10 April 2023, Published online: 10 April 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 2, pp. 133-148

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





اثرات تغییر اقلیم بر افزایش ریسک مخاطره خشکسالی در تهران با بهره‌گیری از سناریوهای CMIP6

نیلوفر محمدی^۱، زهرا حجازی‌زاده^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
^۲ استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

بررسی رفتار متغیرهای اقلیمی در طول محدوده زمانی، نشان این واقعیت است که اقلیم با تغییراتی مواجه بوده است که با توسعه شهری و نقش انسان در این تغییرات به واسطه انتشار گازهای گلخانه‌ای بارزتر می‌شود. بنابراین، هدف پژوهش حاضر بررسی اثرات تغییر اقلیم بر افزایش ریسک مخاطره خشکسالی در تهران با بهره‌گیری از سناریوهای CMIP6 بوده است. ابتدا داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه‌های شمیران، مهرآباد و ابعلی در بازه زمانی ۲۰۲۰-۱۹۸۸ از سازمان هواشناسی استان تهران دریافت و سپس کنترل کیفی شد. در ادامه از روش‌های آماری Mann-Kendall، XLSTAT و مدل ریزمقیاس SDSM-DC در دو دوره ۲۰۱۴-۱۹۷۹ و دوره آتی ۲۰۵۹-۲۰۲۴ با مدل CanESM5 طبق بدبینانه‌ترین سناریو SSP5 بازسازی و شبیه‌سازی شد. در مرحله بعدی برای بررسی دوره سالانه خشکسالی ۳۲ ساله با استفاده از شاخص SPI از نرم‌افزار DIC بهره گرفته شد. یافته‌های روند تغییرات دما و بارش با آزمون Mann-Kendall بارش را با جهش تغییراتی نشان داد و در تمامی ایستگاه‌ها دما روند افزایشی داشت. شبیه‌سازی با مدل CanESM5 در ایستگاه مهرآباد، بیش‌ترین دما به ماه ژوئیه تعلق یافت و بیش‌ترین بارش در ماه مارس خواهد بود. سپس برای بررسی خشکسالی دوره بلندمدت ۱۲ ماهه (یک‌سال) داده‌های بارش نشان داد که در ایستگاه ابعلی و شمیران وضعیت خشکسالی در هر سال در نوسان بوده و طی سال‌های اخیر وضعیت خشکسالی نزدیک به نرمال بوده است. در این میان ایستگاه شمیران طی روند دوره ۳۲ ساله بیش‌ترین دوره خشکسالی خیلی شدید را تجربه کرده است. این در حالی است که ایستگاه مهرآباد تنها طی سال‌های ۱۹۹۳-۱۹۸۹ خشکسالی شدید را تجربه کرده است. در حالی که طول دوره خشکسالی در ایستگاه ابعلی و شمیران بیش‌تر بود و هر دو در سال ۲۰۱۴ با خشکسالی خیلی شدید مواجه بوده‌اند. تهران با تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی مواجه بوده است و انتظار می‌رود با توجه به دوره‌های خشکسالی که تجربه کرده است، مستعد خشکسالی خیلی شدید باشد. لذا داشتن برنامه‌ریزی در امر مدیریت ریسک اقلیمی در آینده، با توجه به اقلیم جدید تهران را ضروری می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات آب و هوایی، تهران، گرمایش جهانی، مخاطرات اقلیمی، مدل‌سازی، من-کندال

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hedjazizadeh@yahoo.com

استناد: محمدی، نیلوفر، و حجازی‌زاده، زهرا (۱۴۰۳). اثرات تغییر اقلیم بر افزایش ریسک مخاطره خشکسالی در تهران با بهره‌گیری از سناریوهای CMIP6. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)، ۱۳۳-۱۴۸.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12563.1252

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۱۳۳ تا ۱۴۸

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

طی سال‌های اخیر افزایش اثرات تغییرات اقلیمی به یک بحران محیط زیستی، به‌ویژه در مناطق شهری تبدیل شده است. بنابراین، شناسایی و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی آینده برای برنامه‌ریزی، سازگاری و کاهش این اثرات محیط زیستی امری جدی است (Kobuliev, 2023). طبق گزارش ششم تغییر اقلیم (A6) هیأت بین‌الدول تغییرات اقلیمی (IPCC)^۱ به وضوح نشان داده است که فعالیت‌های انسانی انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)^۲ را افزایش داده است که همین امر آب و هوای جهانی را به‌طور بی‌سابقه‌ای گرم می‌کند. امروزه شهرها مسئول بیش از ۶۰ درصد انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای هستند. طی سال‌های آینده، بیش از نیمی (۵۵ درصد) از جمعیت جهان با توسعه شهری به شهرنشینی روی آورده و انتظار می‌رود این نسبت تا سال ۲۰۵۰ به ۶۶ درصد افزایش یابد (He et al., 2022). با توجه به این‌که هم‌زمان با روند شهرنشینی، مناطق شهری گرم‌تر از مناطق روستایی و محیط‌های اطراف خود هستند، موجب رخداد پدیده جزیره گرمای شهری (UHI)^۳ که موج گرمای شهری را جدی‌تر می‌کند، می‌شوند. همچنین، اقلیم یک منطقه متأثر از بارش و دمای آن بوده که خود تحت تاثیر عواملی نظیر توپوگرافی و طول و عرض جغرافیایی منطقه می‌باشد. از طرفی آب و هوای یک منطقه در مقیاس کلان از شرایط اقیانوس‌ها هم تأثیر می‌پذیرد. بنابراین، با تغییر هر یک از عوامل ذکر شده، تغییرات آب و هوایی نیز اتفاق می‌افتد (Babaian et al., 2022). ضمن این‌که گرم شدن جهانی در برخی مناطق با افزایش بارش (عرض‌های جغرافیایی معتدله) بیش‌تر با مخاطره رخداد سیلاب همراه بوده و در برخی نقاط دیگر با کاهش بارش (عرض‌های جغرافیایی جنب حاره) مواجه بوده است که این رخداد خشکسالی را تشدید می‌نماید (Shamsipour, 2018).

از طرفی خشکسالی می‌تواند میزان دی‌اکسیدکربن در جو را افزایش دهد. بارش کم‌تر از حد میانگین و دمای هوا بالاتر از حد میانگین از عوامل مهم در وقوع و شدت خشکسالی هستند و احتمال آن را افزایش می‌دهند. این عوامل باید به‌عنوان یک پارامتر اقلیمی کلیدی هنگام محاسبه شاخص خشکسالی در نظر گرفته شوند (Bonacci et al., 2023). با گرم‌تر شدن آب و

هوای جهانی، مخاطره خشکسالی ممکن است در آینده مکرر و جدی‌تر شود که این امر بر بخش‌های مختلف به‌ویژه در بخش کشاورزی که امنیت غذایی جهانی را هم تهدید می‌کند، تأثیر می‌گذارد (Guga, 2023). به‌عبارت دیگر امروزه تغییرات اقلیمی زمین‌های کشاورزی را در بسیاری از کشورها آسیب‌پذیر کرده است. بنابراین، به طریقی می‌تواند بر کشاورزی تأثیر بگذارد. از جمله این تغییرات افزایش میانگین دما، بارندگی و امواج گرما، افزایش آفات و امراض گیاهی بوده که در حال حاضر موقعیت کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده است (Ahmadpari et al., 2018). ایران که در موقعیت جغرافیایی شمال منطقه حاره و در جنوب منطقه معتدله در جنب اقیانوس‌ها و دریاها قرار دارد کشوری است که در یکی از کمربندهای خشک زمین واقع شده است (Doustan, 2020). بیابان‌های پر فشار و غوطه‌وری نیمه‌گرمسیری، برای تقریباً ۷۵ درصد از مناطق کشور شرایط خشک و نیمه‌خشک ایجاد کرده است. به‌نظر می‌رسد خشکی طبیعی تغییرات آب و هوایی اخیر جهانی نیز از نظر میزان و مقادیر شدید بارندگی در مناطق مختلف، ایران را تحت تأثیر جدی در منابع آب و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی قرار داده است. به‌طوری‌که این موضوع به یک مسأله جهانی تبدیل شده است (Pouralkhas et al., 2022). کلان‌شهر تهران هم مانند سایر شهرها یک شهر متمرکز و با بافت فشرده و توسعه صنعت شهری همراه است که این بر افزایش گازهای گلخانه‌ای اثرگذار بوده است (Hejazizadeh et al., 2023). بنابراین، با توجه به آن‌چه که گفته شد اقدامات انسانی هنوز پتانسیل جهت‌دهی مسیر اقلیم آینده را دارد. واضح است که حتی دی اکسید کربن (CO₂) محرک اصلی تغییرات آب و هوایی است (The sixth report of the working group of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

در صورتی‌که گرمایش کره زمین به موجب تغییر در اقلیم شهرها به موضوعی چالش برانگیز تبدیل شده است در کنار توسعه شهری، رخداد تغییرات اقلیم موجب فراوانی وقوع بارش‌های سیل‌آسا و رگباری در مناطق شهری هم شده است. افزایش آسیب‌پذیری بسیاری از مناطق شهری به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه یکی از دغدغه‌های اصلی زندگی بوده است. بنابراین، بررسی ریسک مخاطرات ناشی از گرمایش جهانی در مقیاس ملی و محلی، گامی اساسی برای افزایش آمادگی مناطق شهری برای کاهش مخاطرات فعلی و آتی ناشی از

¹ Sixth assessment report

² Intergovernmental panel on climate change

³ Greenhouse gases

⁴ Urban heat island

خشکسالی دشت ورامین وجود دارد و ضمن تغییر در میزان بارش، افزایش دما را نمایان کرده است. در ایستگاه ارومیه نیز Javan (2022) بررسی شرایط خشکسالی با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که تغییرات بارش در دوره آتی تحت سناریوهای RCP8.5-RCP2.6 روند افزایشی داشته، اما طی سال‌های ۲۰۳۱-۲۰۵۰ روند کاهشی خواهد داشت. محاسبه خشکسالی با شاخص SPI در مقیاس بلندمدت شدت خشکسالی را افزایشی نشان داده است؛ که روند معنادار این شاخص در دوره پایه و دوره‌های آتی بر اساس سناریوی RCP8.5 است. در ادامه، Dai (2013) اثرات خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم با توجه به مشاهدات و مدل‌ها پرداخت. سوابق تاریخی بارش از سال ۱۹۵۰ شاخص‌های خشکسالی را افزایشی نشان داده است و طبق مدل‌ها تا قرن ۲۱ بیش‌تر مناطق با ریسک بالای خشکسالی و در دوره آتی (۹۰ تا ۳۰) سال آینده بسیاری از مناطق با کاهش بارش و افزایش تبخیر مواجه خواهند بود. در یک بررسی دیگری، Trenberth et al. (2013) به اثرات گرمایش جهانی بر تغییرات خشکسالی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد افزایش دمای ناشی از گرمایش جهانی ممکن است موجب خشکسالی نشود، اما به نظر می‌رسد روند وقوع خشکسالی را تسریع بخشد. همچنین، Jehanzaib et al. (2020) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر گسترش خشکسالی هواشناسی به هیدرولوژیکی با استفاده از مدل‌های چندگانه در کره جنوبی پرداختند. در این مطالعه شاخص‌های SRI, SPEI, SPI در مقیاس زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج از لحاظ مکانی متفاوت بوده، به طوری که خشکسالی در شاخص SPI تحت سناریوی RCP4.5 کاهش داشته اما تحت سناریوی RCP8.5 افزایش را نشان داده است. شدت خشکسالی در شاخص SPEI افزایشی نشان داده در حالی که برای شاخص SRI در تمامی دوره‌ها روند کاهشی بود. بنابراین با توجه به میانگین خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم در وضعیت شدید خشکسالی هواشناسی منجر به شرایط متوسط تا شدید خشکسالی هیدرولوژیکی خواهد شد. در نهایت، Ogunrinde et al. (2023) به اثرات تغییرات اقلیمی و ویژگی‌های خشکسالی در نیجریه بر اساس سناریوی اقلیمی پرداختند. نتایج نشان داده که با توجه به تحلیل خشکسالی طبق بدبین‌ترین سناریوی RCP 8.5، نیجریه فراوانی وقوع خشکسالی شدید در اواخر قرن ۲۱ را تجربه خواهد کرد. بررسی پیشینه و

تغییرات اقلیمی است (Hassani et al., 2022; Hejazizadeh et al., 2023; Hosseinzade Kuhi et al., 2023). از آنجایی که گرمایش زمین یک واقعیت غیرقابل انکار می‌باشد، برخلاف پیش‌بینی در مقیاس جهانی مطالعات پیش‌بینی در مورد آب و هوای آینده به‌خصوص شهرها، برای ایجاد ارزیابی‌های مختلف از جمله هشدار و مدیریت ریسک امری ضروری است. طی سال‌های اخیر پژوهش‌گران به شیوه‌های مختلف در داخل و سطح بین‌الملل به مطالعه و ارزیابی تغییر اقلیم و پدیده خشکسالی پرداخته‌اند. گروهی از این مطالعات بر اساس مدل‌های گردش عمومی جو، GISS-EH CNRM-CM3, LARS-WG و HadCM3-A2 با استفاده از شاخص SPI بهره گرفته‌اند. در پژوهشی، Dastorani et al. (2011) دمای بیشینه، کمینه و بارش روزانه ایستگاه یزد را در دوره پایه و آتی با بازه زمانی ۲۰۳۹-۲۰۱۰ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده روند منفی در دوره پایه از ۱۹۹۰-۱۹۶۱ طبق سناریوی A2 نشان داد. اما برای دوره آتی روند معنادار و نشان‌دهنده افزایش آسیب‌پذیری بر اساس خشکسالی در دوره آتی بود. در پژوهش دیگری، Golmohammadi and Masah Bowani (2012) به بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم پرداختند. نتایج نشان داده که حوضه مذکور در دوره آتی با افزایش بارش مواجه بوده و کاهش شدت خشکسالی را نسبت به دوره پایه نشان داده است. در صورتی که میزان خشکسالی ۲۴ ماهه با افزایش دوره بازگشت در این حوضه، میزان شدت خشکسالی را بیش‌تر از دوره پایه نشان داده است. در مطالعه‌ای (Roshan and Najafi (2012) به بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده کشور پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد مقادیر مدل شده میزان افزایش بارش تا سال ۲۱۰۰ نسبت به میانگین بلندمدت تخمین زده شده و نتایج خروجی مدل شده خشکسالی در دهه‌های آتی نواحی گیلان، غرب خزر، غرب کرمانشاه و ایلام با بالاترین ترسالی مواجه بوده‌اند. در حالی که نواحی شمال خراسان رضوی و شمال خراسان ریسک خشکسالی بالایی را در سال‌ها و فصول دوره‌های آتی دارند.

از سایر پژوهش‌ها، Azizi et al. (2021) به مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر روند خشکسالی دشت ورامین با استفاده از شاخص دو-مارتن پرداختند. بررسی این مطالعه نشان داده تغییر اقلیم بر منطقه، اثر معناداری داشته و در آینده احتمال افزایش روند

شهری است. با توجه به افزایش دمای تهران و دوره‌های خشکی که داشته است، ممکن است در آینده نزدیک تهران با کمبود آب مواجه شود (شکل ۱) (Mohammadi, 2021; Najafi et al., 2021; Hejazizadeh et al., 2023).

در این مطالعه به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر افزایش ریسک خشکسالی در تهران از داده‌های روزانه عناصر دما و بارش بهره گرفته شده است. بدین منظور به توصیه سازمان جهانی هواشناسی^۲ برای بررسی مطالعات رخداد تغییر اقلیم نیاز به داده‌های بالای ۳۰ سال بود. بنابراین، از ایستگاه‌های سینوپتیک مهرآباد، شمیران و ابعلی در بازه زمانی مشترک ۱۹۸۸-۲۰۲۰ طی دوره ۳۲ ساله از سازمان هواشناسی دریافت شد (Sheikh Biklo Islam, 2021; Hejazizadeh et al., 2023). در گام اول داده‌ها کنترل کیفی شد. سپس برای بررسی روند تغییرات دما و بارش از آزمون من-کندال^۳ بهره گرفته شد. پارامترهای اقلیمی در مقیاس مکان و زمان به دلایل زیادی تغییر می‌کند که باید این تغییرات بر اساس مشاهدات و روش‌های آماری بررسی شود. بارش یکی از آن عناصر اقلیمی بوده است که نرمال نیست و چنین حالت‌هایی را باید از روش‌هایی هم‌چون من-کندال استفاده کرد. بدین منظور از افزونه XLSTAT و ماکرو اکسل مقدار (شیب سن)^۴ و آماره Z در بازه زمانی ۱۹۸۸-۲۰۲۰ برای ایستگاه‌های مهرآباد، شمیران و ابعلی برای بررسی روند بارش و دما از گذشته تا حال در سطح اطمینان ۹۹-۹۵ درصد محاسبه شد (Teimuri Yeganeh and Teimuri Yeganeh, 2021; Mohammadi, 2021; Hejazizadeh et al., 2023). در ادامه، از داده‌های بارش برای محاسبه شاخص خشکسالی استفاده شد. اما داده‌های بارش نمی‌تواند به تنهایی شرایط خشکسالی را نشان دهند. اما به‌عنوان راه کار عملی در مناطقی که داده‌های ناقص یا کافی وجود ندارد عمل می‌کند.

متون اقلیمی بیان گر آن است که اهمیت اثرات عناصر اقلیمی (بارش و دما) بر وضعیت خشکسالی منطقه در دوره آتی، امر ضروری است. از آن‌جا که تاکنون بررسی گرمایش جهانی از حیطة افزایش ریسک خشکسالی با استفاده از گزارش ششم و داده‌های اقلیمی جدید در استان تهران مورد بررسی قرار نگرفته است، لذا این مطالعه با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر افزایش ریسک مخاطره خشکسالی در تهران با بهره‌گیری از سناریوهای CMIP6^۱ با استفاده از داده‌های بارش و دمای روزانه CMIP6 برای افق آینده پرداخته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

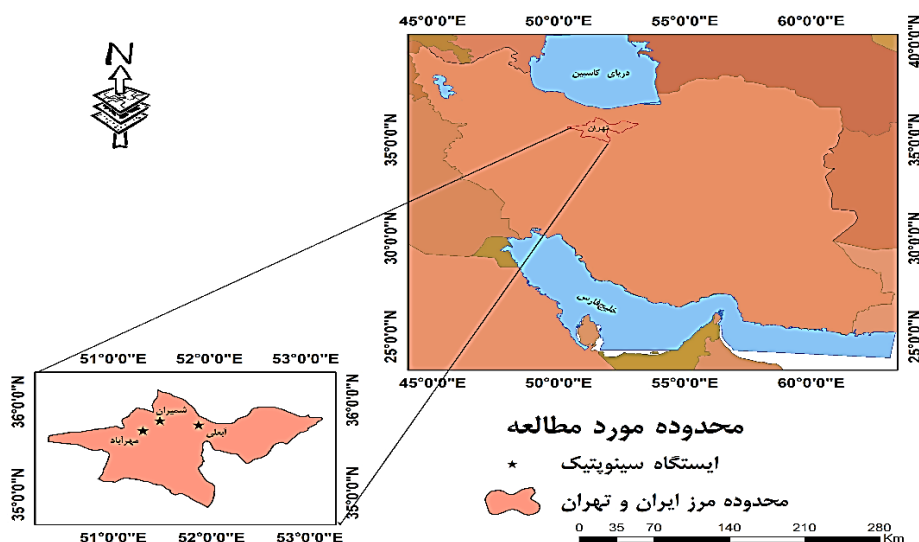
تهران به دلیل شرایط خاص جغرافیایی و برخورداری از تنوع زیاد در ارتفاع، شیب، جهت و ریزاقلیم‌ها شرایط اقلیمی متنوعی را دارد (شکل ۱). به همین جهت در مناطق مختلف این استان اقلیم متفاوتی شکل گرفته است. منطقه مذکور طبق تقسیم‌بندی اقلیمی کوپن جزء مناطق گرم و خشک (نیمه بیابانی)، در ناحیه فلات مرکزی قرار دارد و جزء ناحیه اقلیمی نیمه‌خشک محسوب می‌شود. از طرفی جریاناتی که استان تهران را تحت تاثیر قرار می‌دهد جریانات مدیترانه‌ای و سیبری است و به‌ندرت تحت پوشش دامنه تاثیرات جریانات عربستان و اقیانوس هند است (Mohammadi, 2021). طبق بررسی سازمان هواشناسی میزان بارندگی تهران و شهرستان‌های مجاور آن از سال ۱۳۳۵ به بعد، این ایستگاه‌ها نشان می‌دهند نوسان بارش از سالی به سال دیگر بالا رفته و مقدار بارش در سال‌های گوناگون متفاوت بوده است. از آن‌جایی که میزان بارندگی در تهران از جنوب به شمال بیش تر می‌شود، در سردترین ماه سال میانگین بالاترین و میانگین کم‌ترین دما به ترتیب به $\frac{۸}{۳}$ و $\frac{۱}{۲}$ درجه سانتی‌گراد در ماه ژانویه (بهمن) می‌رسد که با متوسط رطوبت نسبی ۶۴ درصد مرطوب‌ترین ماه است. تهران در طول سال به تعداد $\frac{۷۶}{۴}$ روز به میزان $\frac{۳۳۲}{۸}$ میلی‌متر بارش دارد. طبق موارد ذکر شده ناهنجاری بارش در تهران تمایل بیش‌تری به خشکسالی دارد و در طی سال‌های اخیر، سه دوره خشک فراگیر و نسبتاً شدید داشته است. با توجه به اهمیت تهران و افزایش جمعیت، استفاده از منابع آبی (ذخایر سدها، آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی) علاوه بر مشکلات محیط زیستی نیز افزایش چشم‌گیری هم داشته است. بنابراین کم بارشی و خشکسالی در تهران تهدیدی جدی بر منابع آب شیرین و سیستم‌های آبرسانی

² World meteorological organization (WMO)

³ Mann-kendall

⁴ Sen's slope estimator nonparametric method

¹ Coupled model intercomparison project



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه استان تهران
Figure 1- Location of Geographical location map of the studied area in Tehran Province, Iran

۲-۲- آزمون من-کندال

در سال ۱۹۸۸ این آزمون توسط سازمان جهانی هواشناسی پیشنهاد شد. این آزمون ابتدا توسط Mann (1945) ارائه و سپس بر اساس رتبه داده‌ها در سری زمانی توسط Kendall (1975) توسعه یافت (Farhat and Vanderford, 2012). در پژوهش حاضر از این آزمون برای بررسی روند بین داده‌های دما و بارش ایستگاه‌ها پس از محاسبه میانگین در هر ماه، تحت دو روش افزونه XLSTAT و ماکرو اکسل استفاده شد. در رابطه‌های (۱) و (۲) n تعداد مشاهدات سری و x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام و k ام سری هستند. تابع علامت sgn طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_j - x_k) &= +1 && \text{for } (x_j - x_k) > 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= 0 && \text{for } (x_j - x_k) = 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= -1 && \text{for } (x_j - x_k) < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

در ادامه، محاسبه واریانس s توسط یکی از روابط (۴) محاسبه می‌شود که در این رابطه، n و m تعداد دنباله‌هاست که در آن یک داده تکراری حداقل وجود دارد. T بیان‌کننده فراوانی داده با ارزش یکسان در یک دنباله است. در گام آخر آماره Z به صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۵).

برای بررسی افزایش ریسک خشکسالی از داده‌های بارش ایستگاه‌های منتخب (آبلی، شمیران و مهرآباد) و از شاخص راجح و کاربردی استاندارد شده بارندگی (SPI) و از نرم‌افزار (DIC)^۱ بهره گرفته شد. این شاخص می‌تواند به ارزیابی شدت و کمک هشدار اولیه جهت پیش خشکسالی باشد. به طوری که با هر نوع مقیاس زمانی مطابقت دارد (Javizadeh and Hejazizadeh, 2019; Teimuri Yeganeh and Teimuri Yeganeh, 2022). در ادامه برای بررسی دما و بارش در دوره‌های آتی از مدل SDSM-DC که ابزاری برای ارزیابی تغییر اقلیم و روشی ریزمقیاس‌نمایی آماری است، بر مبنای بدبینانه‌ترین و جدیدترین سناریوی انتشار SSP5 به کار گرفته شده است. در ادامه از داده‌های NetCDF به همراه پیش‌بینی‌کننده‌ها (CanESM5)^۲ از دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۷۹) طبق جدیدترین سناریوهای انتشار (SSP)^۳ گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم از سایت تغییر اقلیم (کانادا)^۴ دریافت شد. سپس در این میان تنها ایستگاه مهرآباد دارای دوره پایه کاملی نسبت به سایر ایستگاه‌ها بود، به عنوان ایستگاه منتخب در سطح تهران برگزیده شد. در نهایت به پیش‌بینی و ارزیابی مدل روند تغییر دما و بارش در بازه زمانی آتی (۲۰۲۴-۲۰۵۹) پرداخته شد.

¹ Drought indices calculator

² Canadian earth system model version 5

³ Shared socioeconomic pathways

⁴ <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-cmip6>

شاخص SPI نشان داده شده است. در این طبقه بندی دوره زمانی خشکسالی برای زمانی است که نمایه SPI مقدار کم تر از منفی یک را نشان دهد. در نتیجه پایان دوره خشکسالی برای زمانی بوده که مقدار مثبت نشان داده شود. بر این اساس نمایه SPI وضعیت یک محدوده مورد مطالعه را از لحاظ وقوع خشکسالی و روند آن می تواند بررسی شود (Hejazizadeh and Javizadeh, 2018).

جدول ۱- مقیاس طبقه بندی مقادیر SPI
Table 1- Classification scale of SPI values

مقادیر SPI	طبقه خشکسالی
>2	شدیدا مرطوب
1.99-1.5	خیلی مرطوب
1-1.49	مرطوب متوسط
-0.99-0.99	نزدیک به نرمال
-1- 1.49	خشکسالی ملایم
-1.5- -1.99	خشکسالی شدید
<-2	خشکسالی خیلی شدید

۴-۲- مدل SDSM-DC

این مدل یکی از پرکاربردترین روش های آماری ریزمقیاس است. این مدل در مطالعات هواشناسی، جغرافیایی، هیدرولوژیکی و محیط زیستی کاربرد دارد. این مدل ارتباطات آماری را بین رفتارهای بزرگ مقیاس (پیش بینی کننده ها) و محلی (پیش بینی شونده ها) به روش رگرسیون خطی چندگانه برقرار می کند. متغیرهای پیش بینی کننده بزرگ مقیاس NCEP در گزارش CMIP6، شامل دو پوشه ۲۶ و ۲۳ متغیر است. در این پژوهش از پوشه استاندارد شده با به کارگیری مدل CanESM5 بهره گرفته شد. در واقع ترکیبی از دو روش تولید داده های آب و هوایی غیرقطعی با رگرسیون خطی است. در سال ۲۰۰۰ میلادی این مدل توسط Wilby et al. (2002) توسعه داده شد. با داشتن داده های روزانه در مدل، مراحل به ترتیب انجام گرفت: کنترل کیفی داده های مشاهداتی، تبدیل داده ها از CSV^۱ به فرمت DAT، آماده سازی داده ها، کنترل مجدد کیفی داده ها، تبدیل داده ها، غربالگری، واسنجی، تولید داده، تحلیل داده های دیدبانی و ریزمقیاس شده، تحلیل فراوانی و تولید سناریوی اقلیمی. مبنای کار در مدل SDSM بین متغیرهای پیش بینی کننده و شونده (دما، بارش)، موجب ایجاد هم بستگی،

$$\begin{aligned} & \text{for } n > 10 \\ & \text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (4) \\ & \text{for } n < 10 \\ & \text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \\ & z = \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad \text{for } s > 0 \\ & z = 0 \quad \text{for } s = 0 \\ & z = \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad \text{for } s < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

در بررسی این آزمون سطح اعتماد ۹۹ و ۹۵ درصد محاسبه شد. بدین صورت که اگر آماره z مثبت باشد روند سری داده ها صعودی خواهد بود و اگر منفی باشد با روند نزولی در نظر گرفته می شود. مبنای پژوهش این است که اگر مقدار P-value از ۰/۰۵ کم تر باشد فرضیه H_0 که بر نبود وجود روند در سری زمانی است دلالت دارد؛ اما اگر مقدار سطح معناداری از ۰/۰۵ بیش تر بود، قبول فرضیه H_1 و دال بر وجود روند باشد (Hejazizadeh et al., 2023).

۳-۲- نرم افزار DIC

این نرم افزار که توسط Hejazizadeh and Javizadeh (2018) برای تعیین شاخص های خشکسالی طراحی شده است، با پنج سری داده (سالانه، ماهانه، فصلی، متحرک و روزانه) می توان با آن کار کرد. اطلاعات بارندگی را از اکسل در صفحه Worksheet نرم افزار کپی نموده و با اجرای Run شاخص های خشکسالی (نه روش) اجرا می شود. همچنین، می توان خروجی را اتوماتیک به اکسل برده و نمودارها رسم شده را مشاهده کرد. یکی از زیرمجموعه های این نرم افزار شاخص SPI است. در این پژوهش از شاخص نمایه SPI بهره گرفته شد. روش های گوناگونی از گذشته تاکنون برای محاسبه خشکسالی به کار گرفته شده است. اما شاخص SPI که بارش یکی از مولفه های اصلی آن می باشد، خروجی و نتایج آن با واقعیت مطابقت بیشتری دارد (Roshan and Najafi, 2012). از این شاخص در مقیاس های زمانی دو، سه، شش، نه، ۱۴، ۲۸ و ۴۸ ماهه و یک ساله بهره گرفته می شود. به منظور محاسبه این شاخص از برازش چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی در یک ایستگاه مشخص که در یک دوره زمانی از توزیع نرمال تبعیت دارد، استفاده می شود (Mousavi Khah et al., 2020). در جدول ۱ طبقه بندی شرایط ترسالی و خشکسالی بر اساس

¹ Comma separated values file

سیستم‌های اکولوژیکی و اجتماعی از طریق مهندسی زمین مدیریت می‌شوند (Babaian et al., 2022).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل روند داده‌های اقلیمی مورد استفاده در بازه زمانی (۱۹۸۸-۲۰۲۰)

عناصر اقلیمی نظیر بارش و دما در یک منطقه از عواملی هستند که در آب و هوای یک منطقه اثرگذار هستند. در صورتی که دما یکی از متغیرهای شکل‌گیری اقلیم بوده است، به موجب آن هر گونه تغییر در این عنصر می‌تواند ساختار اقلیمی یک منطقه را تغییر دهد. در جدول ۲ نتایج آزمون من-کندال برای سری زمانی ماهانه و سالانه تغییرات دما و در جدول ۳ سری زمانی ماهانه و سالانه بارش برای ایستگاه‌های ابعلی، شمیران و مهرآباد در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد ارائه شده است. در بررسی دما در کلیه ایستگاه‌ها روند افزایشی و معنادار مشاهده شد. بررسی داده‌های شمیران و ابعلی دمای ماهانه و سالانه نشان می‌دهد روند مذکور افزایشی و بالاتر از میانگین بوده است. این افزایش دما با توجه به تأثیر پدیده شهرنشینی و جزیره حرارتی شهری قابل قبول بوده است. در جدول ۳ روند افزایش بارش در سطح معناداری ۹۵ درصد در ماه اکتبر در ایستگاه ابعلی مشاهده شد. اما در ماه‌های نوامبر و مارس در سطح ۸۰ درصد و باقی روند کاهشی نشان داد. ایستگاه مهرآباد به جز ماه نوامبر که روند افزایشی را نشان داده سایر ماه‌ها به جز ماه اکتبر در صدک ۸۰ درصد است باقی روندی کاهشی بود. ایستگاه شمیران تنها در ماه نوامبر روند معنادار و افزایشی نشان داده است. اما در ماه‌های ژانویه و آوریل در سطح صدک ۸۰ مشاهده شد. بنابراین، جهش‌هایی در تغییرات روند بارش در ماه اکتبر و نوامبر در ایستگاه‌های ابعلی، شمیران و مهرآباد به چشم می‌خورد. احتمال دارد نقش افزایش توسعه پدیده شهرنشینی طی سال‌های اخیر در تهران برجسته‌تر نماید. انتظار می‌رود روند کاهش بارش در برخی ماه‌ها می‌تواند دلیلی بر وقوع تغییر اقلیم باشد. منطقه‌ای که همراه با افزایش دما باشد، روبه خشکی پیش می‌رود که این موجب ایجاد جزایر حرارتی در شهرها می‌شود و می‌تواند اثرات محیط زیستی انسانی را با مشکلاتی مواجه نماید. نتایج این پژوهش با مطالعات Malekinejad et al. (2014) و Hejazizadeh et al. (2023) هم راستا است. در هر دو مطالعه

هم‌بستگی متقابل و جزئی می‌شود که با استفاده از این آزمون‌ها می‌توان بین پیش‌بینی‌کننده و شونده‌ها ارتباط هم‌بستگی خوبی ایجاد کرد. پس از بررسی روند در بازه زمانی ۱۹۸۸-۲۰۲۰ از آنجایی که آن‌طور انتظار بود، شرایط خوب پیش نرفته است. بنابراین، در این پژوهش طبق بدبین‌ترین سناریوی SSP5، که مناسب‌ترین سناریو برای این مطالعه بوده است بهره گرفته شد.

۲-۵- مدل CanESM5

این مدل نسخه به‌روز شده (CanESM2)^۱ که شامل بهبودهای تدریجی در سطح زمین، جو و مدل‌های اکوسیستم زمینی را نشان می‌دهد. از مزیت‌های این مدل وضوح بالا ($2/8^\circ$) در جو و یک درجه در اقیانوس، عملکرد عملیاتی نسبتاً بالا نسبت به پیچیدگی مدل است که امکان دسترسی به شبیه‌سازی در دوره‌های آینده با منابع محاسباتی را فراهم می‌آورد (Babaian et al., 2022).

۲-۶- سناریوی SSP5

به‌تازگی پروژه مقایسه‌ای از فاز ششم تغییر اقلیم CMIP6 بر مبنای گزارش ششم تغییر اقلیم (A6)^۲ منتشر شده که بازسازی و شبیه‌سازی پیشرفته‌ای را در دسترس ما قرار می‌دهد. در این گزارش از سناریوهای جدیدی به‌عنوان سیر اجتماعی-اقتصادی استفاده شده است، ترکیبی از سناریوهای گزارش پنجم تحت سناریوهای واداشت تابشی طراحی شده است (Behzadi et al., 2023). در سناریوی SSP5 (توسعه سوخت‌های فسیلی)، توجه به بازارهای رقابتی، نوآوری و بازارهای مشارکتی در جهت رسیدن به پیشرفت‌های سریع فنی و سرمایه‌های انسانی در کنار توسعه پایدار افزایش می‌یابد. افزایش بازارهای جهانی و سرمایه‌گذاری‌ها در بخش سلامت، آموزش و مؤسسات مرتبط با سرمایه انسانی و اجتماعی صورت می‌پذیرد. در صورتی که فشار بر توسعه اقتصادی و اجتماعی از طریق بهره‌برداری از منابع سوخت‌های فسیلی و سبک زندگی با مصرف انرژی بیشتر، افزایش یافته است. این موارد موجب رشد اقتصادی سریع جهانی همراه با افزایش جمعیت و سپس کاهش آن در قرن ۲۱ می‌شود. موضوعات محیط زیستی در مقیاس محلی مانند آلودگی هوا به‌خوبی قابل مدیریت هستند. عقیده بر این است که

¹ Canadian earth system model version 2

² Sixth assessment report

فوق از سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد برای ایستگاه‌های مشابه این پژوهش روند معناداری را نشان داده است.

جدول ۲- مقدار آماره Z سری زمانی ماهانه و سالانه من-کندال دمای ایستگاه‌ها (مهرآباد، شمیران و آبعلی) در بازه زمانی ۱۹۸۸-۲۰۲۰

Table 2-- The value of the Z statistic value of the monthly and annual time series of Mann- Kendall temperature stations (Mehrabad, Shemiran, Abali) in the period of 1988-2020

سری زمانی	دمای مهرآباد		دمای شمیران		دمای آبعلی	
	مقدار Z	سری زمانی	مقدار Z	سری زمانی	مقدار Z	سری زمانی
ژانویه	2.4946004*	ژانویه	3.26932**	ژانویه	2.8975**	ژانویه
فوریه	2.1537234*	فوریه	3.3313***	فوریه	3.2383**	فوریه
مارس	2.0607569*	مارس	3.14537**	مارس	2.9594**	مارس
آوریل	-0.294394	آوریل	1.06911	آوریل	0.4183	آوریل
مه	2.3396563*	مه	3.54822***	مه	2.6495**	مه
ژوئن	2.2776787*	ژوئن	4.01305***	ژوئن	2.8355**	ژوئن
ژوئیه	1.502958	ژوئیه	3.57921***	ژوئیه	2.4794*	ژوئیه
اوت	-0.821204	اوت	2.54139*	اوت	-0.139	اوت
سپتامبر	0.6042821	سپتامبر	3.11438**	سپتامبر	1.6579+	سپتامبر
اکتبر	-0.108461	اکتبر	1.50296	اکتبر	0.6043	اکتبر
نوامبر	-2.308667	نوامبر	-1.0071	نوامبر	-1.534	نوامبر
دسامبر	0.8058062	دسامبر	1.75087	دسامبر	1.6269	دسامبر
سالانه	2.3706451	سالانه	5.19063	سالانه	4.0131	سالانه

جدول ۳- مقدار آماره Z سری زمانی ماهانه و سالانه من-کندال بارش ایستگاه‌ها (مهرآباد، شمیران و آبعلی) در بازه زمانی ۱۹۸۸-۲۰۲۰

Table 3- The value of the Z statistic of the monthly and annual time series of Mann-kendal rainfall stations (Mehrabad, Shemiran, Abali) in the period of 1988-2020

سری زمانی	بارش مهرآباد		بارش شمیران		بارش آبعلی	
	مقدار Z	سری زمانی	مقدار Z	سری زمانی	مقدار Z	سری زمانی
ژانویه	-0.790215	ژانویه	-1.71988+	ژانویه	-0.635271	ژانویه
فوریه	-0.66626	فوریه	-0.697249	فوریه	0.1394497	فوریه
مارس	-0.759226	مارس	-1.317025	مارس	-1.688891+	مارس
آوریل	0.1084609	آوریل	1.7818575+	آوریل	1.5649357	آوریل
مه	0.7282374	مه	0.8212039	مه	1.0381257	مه
ژوئن	-0.51325	ژوئن	-1.195464	ژوئن	0.000000	ژوئن
ژوئیه	-0.156409	ژوئیه	0.7790657	ژوئیه	0.9456891	ژوئیه
اوت	-0.404173	اوت	-0.460259	اوت	1.1527375	اوت
سپتامبر	0.2911189	سپتامبر	0.7433226	سپتامبر	1.1440751	سپتامبر
اکتبر	1.6735975+	اکتبر	1.5959245	اکتبر	2.4326228*	اکتبر
نوامبر	2.1227345*	نوامبر	2.3396563*	نوامبر	1.7818575+	نوامبر
دسامبر	-1.146724	دسامبر	-0.883182	دسامبر	0.1704385	دسامبر
سالانه	0.1704385	سالانه	0.1084609	سالانه	0.5732933	سالانه

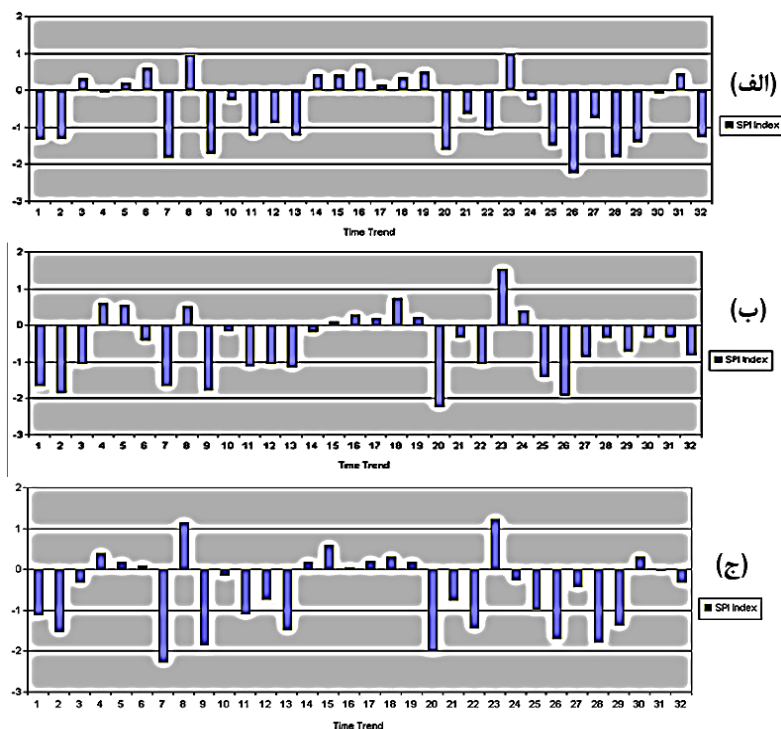
۳-۲- تحلیل بررسی خشکسالی با DIC

از آنجایی که مقیاس زمانی مختلف بر وضعیت بارش هر ماه تأثیرگذار است، در این پژوهش از دوره بلندمدت ۱۲ ماهه (یک سال) از داده‌های بارش ایستگاه‌های آبعلی، شمیران و مهرآباد استفاده شده است. شکل ۲-الف-ب-ج شدت خشکسالی طی بازه زمانی ۳۲ سال را به ترتیب برای

ایستگاه‌های مهرآباد، آبعلی و شمیران نشان می‌دهد. بررسی روند زمانی ۳۲ ساله ایستگاه مهرآباد (شکل ۲-الف) نشان می‌دهد که از سال ۱۹۸۸-۱۹۹۸ این ایستگاه در شرایط خشکسالی متوسط، شدید و خیلی شدید بوده است. اما سایر سال‌ها نزدیک به نرمال قرار داشته است. در ادامه، شکل ۲-ب-ج وضعیت روند خشکسالی در ایستگاه‌های آبعلی و شمیران

et al. (2013) مبنی بر این که ایستگاه‌های تهران از لحاظ اقلیمی شرایط نزدیک به نرمال داشتند، اما با توجه به این که خشکسالی شدید را هم تجربه کرده‌اند احتمال شرایط خشکی در تهران بسیار است، هم راستا است.

نشان می‌دهد که هر سال این ایستگاه‌ها در نوسان بوده‌اند و طی سال‌های اخیر وضعیت روند خشکسالی، نزدیک به نرمال است. در حالی که ایستگاه شمیران طی روند ۳۲ ساله بیش‌ترین دوره خشکسالی شدید را تجربه داشته است. در مطالعه Hanafi

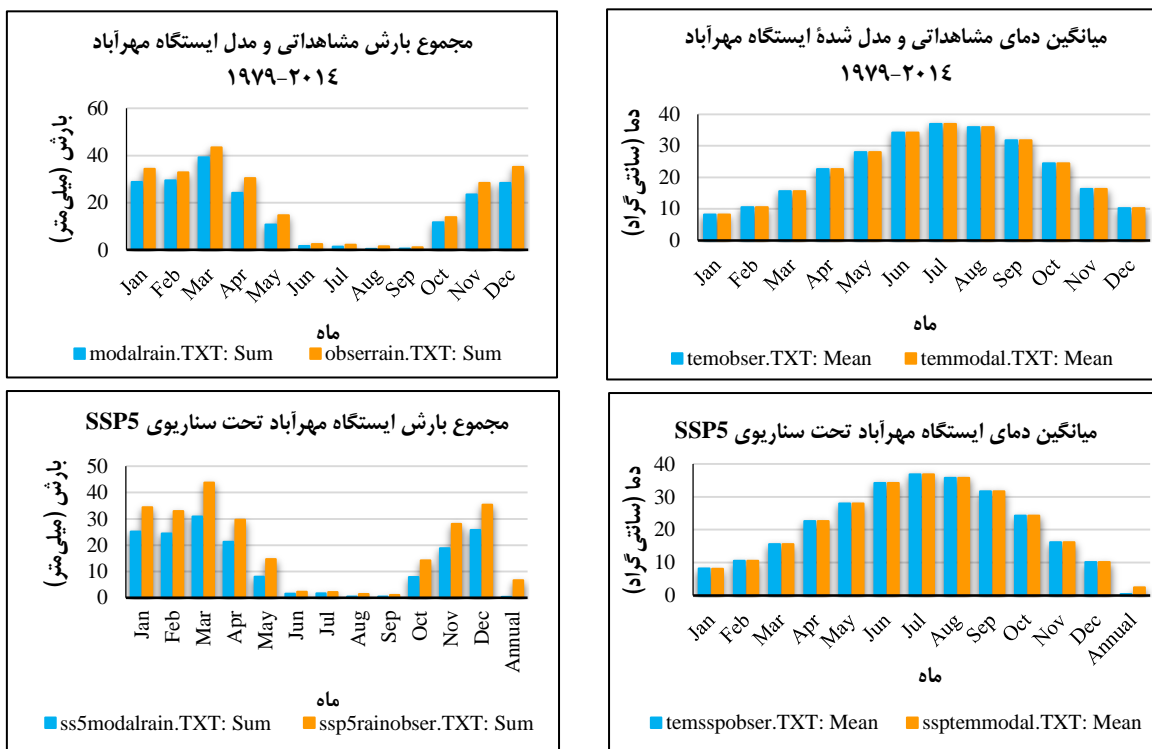


شکل ۲- روند تغییرات شاخص استاندارد بارش ایستگاه (الف) مهرآباد، (ب) آبعلی، (ج) شمیران

Figure 2- The trend of changes in the standard precipitation index of (A) Mehrabad, (B) Abali, (c) Shemiran station

مطلوبی برخوردار بود. روند بارش در دوره آتی ۲۰۲۴-۲۰۵۹ بیش‌ترین ماه‌های بارشی را به‌ترتیب در مارس از حدود ۳۱ میلی‌متر دوره مشاهداتی، به ۴۴ میلی‌متر و دسامبر از حدود ۲۶ میلی‌متر به ۳۶ میلی‌متر خواهد رسید. از طرفی نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای بیش‌برآوردی (بارش بیش‌تر) مشاهده شد و روندی افزایشی خواهد داشت. اما کم‌ترین ماه بارشی به‌ترتیب به ماه‌های ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر با روندی کاهشی دارای روزهای غیربارش یا کم‌بارش بوده است، خواهد رسید. اما کم‌ترین ماه بارشی در دوره آتی (۲۰۲۴-۲۰۵۹) به ماه سپتامبر با یک میلی‌متر بارش به‌عنوان خشک‌ترین ماه تلقی خواهد شد.

۳-۳- بررسی دما و بارش آینده طبق گزارش CMIP6 با SDSM-DC
یافته‌های بارش و دما در دوره آتی بر اساس تغییرات ماهانه و سالانه تنها در ایستگاه مهرآباد به‌عنوان ایستگاه پایه و درون شهری تهران که دارای کامل‌ترین دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۷۹) بود، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۳ مقادیر مشاهداتی در شبیه‌سازی دما بیان‌گر این بوده است که مدل در بازسازی داده‌های مشاهداتی در ایستگاه مهرآباد عملکرد قوی و مطلوبی را داده و توان پیش‌بینی برای آینده را دارد. در ادامه مقدار میانگین دما نسبت به دوره مشاهداتی طبق سناریوی SSP5 در ماه ژوئیه (جولای) به ۳۷ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی ۲۰۲۴-۲۰۵۹ خواهد رسید. اما مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی بیان‌گر این است که مدل در بارش هم، از عملکرد



شکل ۳- میانگین دما و مجموع بارش سالانه و ماهانه ایستگاه (مهرآباد)، دوره زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۴ الی ۲۰۲۴-۲۰۵۹
 Figure 3- Average temperature and total annual and monthly precipitation of the station (Mehrabad), time period 1979 to 2024-2059

۴- نتیجه گیری

تغییر اقلیم یکی از چالش برانگیزترین مخاطرات زندگی شهری بوده است. ایران به سبب قرارگیری در منطقه خاورمیانه یکی از خشک ترین و کم آب ترین مناطق جهان محسوب می شود. تهران کلان شهری است که در ردیف پر ریسک ترین مراکز کشورهای جهان قرار دارد. بنابراین بررسی نتایج روند دما در ایستگاه های آبدلی، شمیران و مهرآباد روند افزایشی را نشان داد و بررسی روند بارش در برخی ماه ها با جهش تغییرات همراه بود. همان طور برای بررسی رفتار روند تغییرات بارش و دما در ایستگاه مهرآباد به عنوان کامل ترین ایستگاه پایه، تحت بدبینانه ترین سناریوی SSP5 با مدل CanESM5 نشان داد که روند بارش افزایشی خواهد بود. به طوری که رفتار بارش در افق ۲۰۲۴-۲۰۵۹ به صورتی خواهد بود که ضمن کاهش، نوسانات آن به ویژه در ماه مارس افزایش خواهد یافت. اقلیم تهران در آینده نسبت به شرایط کنونی دارای نوسان بیشتری در بارش دارد و گرم تر خواهد شد. ضمن این که بارش ها تصادفی تر اما با شدت بیشتر رخ خواهد داد. در نهایت، بررسی شاخص خشکسالی با SPI نشان داد تهران از گذشته تاکنون خشکسالی های خیلی شدیدی را تجربه کرده است. بررسی

ایستگاه مهرآباد در دوره ۳۲ سال نشان داد که طی سال های ۱۳۷۳، ۱۳۷۰، ۱۳۶۹، ۱۳۶۸ و ۱۳۶۷ با خشکسالی خیلی شدید مواجه بوده است. در صورتی که ایستگاه آبدلی و شمیران هر دو در سال ۱۳۹۲ خشکسالی خیلی شدید را تجربه کرده اند. بررسی سه ایستگاه با دوره زمانی مشترک ۳۲ سال تهران نشان دهنده آن است که تهران وضعیت خشکسالی را طی سال های اخیر پشت سر گذاشته است. اما بیش تر مواقع منطقه از لحاظ اقلیمی شاید در شرایط نزدیک نرمال قرار دارد. اما احتمال ریسک وقوع شرایط خشک تا بسیار خشک بسیار نزدیک خواهد بود. از طرفی نتایج تأیید کرد خشکسالی هم به بارندگی و هم به دما بستگی دارد. این مطالعه به بررسی گرمایش جهانی در افزایش ریسک مخاطره خشکسالی پرداخته است. اما در امر نسبت دادن افزایش خشکسالی به گرمایش زمین می تواند اندکی دشوار باشد. زیرا خشکسالی ها متغیر هستند. به عبارت دیگر، آن ها می توانند هر سال یا هر چند سال یکبار رخ دهند و حتی سال ها یا دهه ها ادامه داشته باشند. این امر تشخیص رویدادهای تصادفی را از رویدادهایی که احتمالاً توسط گرمایش ناشی از انسان شکل گرفته اند دشوار می کند. اما با این حال هر چه خشکسالی با روند افزایش دما، کاهش بارش و پیش بینی مدل های کامپیوتری

مدل‌های CMIP6، پروژه داخلی پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد. <http://www.asmerc.ac.ir/climatology/fa/page/51/>

پورالخاص، محمد، اسمعیلی عوری، ابازر، مصطفی‌زاده، رفوف، حزباوی، زینب، و شرری، معراج (۱۴۰۱). شاخص‌ها و مؤلفه‌های ارزیابی نوسانات و تغییرات اقلیمی. *دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۱۲(۱)، ۸۵-۹۸. doi: 20.1001.1.23225955.۹۸-۸۵.1401.12.1.6.6

تیموری یگانه، مریم، و تیموری یگانه، لیلا (۱۴۰۰). ارزیابی روند تغییرات بارندگی و دما و اثرات آن‌ها بر خشکسالی هواشناسی در استان کرمانشاه، پژوهش و فناوری محیط زیست، ۱۰(۶)، ۱۲۳-۱۳۴. <https://rimag.ricest.ac.ir/fa/Article/31945>

جوی‌زاده، سعید، و حجازی‌زاده، زهرا (۱۳۹۸). تحلیل آمار فضایی خشکسالی در ایران. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۹(۵۳)، ۲۵۱-۲۷۷. doi: 10.29252/jgs.19.53.251

جوان، خدیجه (۱۴۰۰). بررسی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه ارومیه با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییر اقلیم (RCP). *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۲(۵)، ۸۱-۹۴. doi: 10.30488/ccr.2020.262302.1033

حجازی‌زاده، زهرا، اکبری، مهری، ساسانپور، فرزانه، حسینی، علیرضا، و محمدی، نیلوفر (۱۴۰۱). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا در استان تهران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۸۷-۱۰۵. doi: 10.22098/mmws.2022.9958.1075

حجازی‌زاده، زهرا، و جوی‌زاده، سعید (۱۳۹۶). مقدمه‌ای بر خشکسالی و شاخص‌های آن (جلد ۱). چاپ سوم، انتشارات سمت، ۳۷۶ صفحه. <https://www.gisoom.com/book/11325867/>

حنفی، علی، خوش‌اخلاق، فرامرزی، و سلطانی، محسن (۱۳۹۱). تحلیل خشکسالی‌های استان تهران با استفاده از شاخص SPI و پیش‌بینی آن براساس مدل زنجیره مارکوف. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۲(۲)، ۸۷-۱۰۰. https://ges.razi.ac.ir/article_168.html

حسینی، محمدرضاء، نیک‌سخن، محمدحسین، اردستانی، مجتبی، و موسوی جنبه‌سرایبی، سیدفرید (۱۴۰۱). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۲۶۹-۲۸۵. doi: 10.22098/mmws.2022.11849.1176

حسین‌زاده‌کوهی، حسین، اردستانی، مجتبی، و سارنگ، امین (۱۴۰۱). بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۸۵-۱۰۱. doi: 10.22098/mmws.2023.12222.1213

همراه باشد احتمال رخداد تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی را بیش‌تر تقویت می‌نماید. بدین‌صورت زمانی‌که یک رویداد اقلیمی رخ می‌دهد، هم در معرض قرار گرفتن و هم آسیب‌پذیری نقش مهمی در تعیین میزان و اثرات فاجعه دارد. این کار (نسبت دادن) با تخمین و مقایسه احتمال بزرگی یک رخداد آب و هوایی از جمله افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و اثرات انسانی و مقایسه با سطح ما قبل صنعتی شدن کمکی در جهت هشدار ریسک خشکسالی در محدوده‌های مطالعاتی بوده و داشتن برنامه‌ریزی در امر مدیریت ریسک اقلیمی در آینده با توجه به اقلیم جدید تهران که مستعد خشکسالی است، را ضروری می‌سازد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی دانشگاه خوارزمی صمیمانه قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نیلوفر محمدی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آمار، ویرایش، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ زهرا حجازی‌زاده: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

منابع

بهزادی، فرهاد، جواد، سامان، یوسفی، حسن، مریدی، علی، و هاشمی‌شاهدانی، مهدی (۱۴۰۱). تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از برونداد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت شهرکرد). *اکوهیدرولوژی*، ۹(۲)، ۴۱۹-۴۳۶. doi: 10.22059/ije.2022.342077.1633

بابائیان، ایمان، مدیریان، راحله، خزانه‌داری، لیلی، کریمیان، مریم، کوزه‌گران، سعیده، کوهی، منصوره، فلامرزی، یاشار، و ملبوسی، شراره (۱۴۰۰). پیش‌نگری بارش کشور با استفاده از مقیاس‌کاهی آماری برونداد

آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم. آب و خاک، ۲۵(۲). doi: 10.22098/mmws.2022.9958.1075

محمدی، نیلوفر. (۱۴۰۰). اثرات تغییر اقلیم بر بارش های سیل آسا در استان تهران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران.

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/79d8936d501ca734d3ce9a1669a693f3>

ملکی نژاد، حسین، سلیمانی مطلق، مهدی، جایدی، اعظم، و شاطر آشوری، سمیه (۱۳۹۱). تحلیل روند تغییرات بارندگی و خشکسالی با استفاده از آزمون های من کندال و سن در استان تهران. نیوار، ۳۷(۸۰-۸۱)، ۴۳-۵۴. https://nivar.irimo.ir/article_13186.html

موسوی خواه، سعیده، شایق، الهام، و احمدپری، هدیه (۱۳۹۹). ارزیابی و پایش خشکسالی هواشناسی در شهرستان سامان با استفاده از نرم افزار DIP. *نخبگان علوم و مهندسی*، ۳(۳)، ۱۹۹-۲۱۲. <https://elitesjournal.ir/fa/page.php?rid=498>

نجفی، وحید، اربابی سبزواری، آزاده، و ادیبی سعدی نژاد، فاطمه (۱۴۰۰). بررسی و تحلیل جنبه های مختلف آسیب پذیری شهری ناشی از خشکسالی (مطالعه موردی: استان تهران). *اکوهیدرولوژی*، ۴(۴)، ۱۰۴۵-۱۰۵۹. doi: 10.22059/ije.2021.333312.1574

References

- Ahmadpari., H, Mohamadi Sedigh, M., Mohamadi, E., & Hassanpour, F. (2018). Investigating the impact of climate change on agricultural sector and strategies to deal with it. Second International Conference on Applied Research in Agricultural Sciences, Natural Resources and the Environment, Jahad Daneshgahi Hamedan. <https://civilica.com/doc/784334>.
- Azizi, H., Nejatian, N., Athari, M., & Hashemi, S. (2021). The effects of climate change on the process of drought in the Varamin plain using the D-Martin index. *Nivar*, 45(112-113), 67-76. doi:10.30467/nivar.2021.266357.1177. [In Persian]
- Babaian, A., Madreyan, R., Khazanehdari, L., Karimian, M., Kozegaran, S., Kohi, M., & Flamarzi Malbusi, S. (2022). Forecasting the country's rainfall using the statistical straw scale of the output of CMIP6 models. An Internal Project of the Climatology Research Institute, Mashhad. <http://www.asmerc.ac.ir/climatology/fa/page/51>. [In Persian]
- Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Moridi, A., Hashemi, M., & Shahabi, S. (2023). Determining the impact of climate change on groundwater drought using the output of CMIP6 models (case study: Shahrekord Doustan, R. (2020). An analysis of drought research in Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6(4), 53-94. doi: 10.29252/jsaeh.6.4.53. [In Persian]
- Farhat, J.C.S., & Vanderford, M. (2012). GSI Mann-Kendall Toolkit. <https://www.gsienv.com/software/data-management-and-stats-tool/gsi-mann-kendall-toolkit/>
- Golmohammadi, M., & Masah Bowani, A. (2012). Investigating changes in intensity and return period of drought in Qarasu basin in future periods under the influence of climate change. *Ecohydrology*, 9(2), 419-436. doi: 10.22059/ije.2022.342077.1633. [In Persian]
- Bonacci, O., Bonacci, D., Roje-Bonacci, T., & Vrsalović, A. (2023). Proposal of a new method for drought analysis. *Hydrology and Hydromechanics*, 71(1), 1-11. doi: 10.2478/johh-2022-0030
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, 3(1), 52-58. doi.org/10.1038/nclimate1633
- Dastorani, M.T., Massah, B.A., Poormohammadi, S., & Rahimian, M.H. (2011). Assessment of potential climate change impacts on drought indicators (Case study: Yazd station, Central Iran). *Desert*, 16(2), 157-166 https://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/81020110209.pdf
- Doustan, R. (2020). An analysis of drought research in Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6(4), 53-94. doi: 10.29252/jsaeh.6.4.53. [In Persian]
- Farhat, J.C.S., & Vanderford, M. (2012). GSI Mann-Kendall Toolkit. <https://www.gsienv.com/software/data-management-and-stats-tool/gsi-mann-kendall-toolkit/>
- Golmohammadi, M., & Masah Bowani, A. (2012). Investigating changes in intensity and return period of drought in Qarasu basin in future periods under the influence of climate change. *Ecohydrology*, 9(2), 419-436. doi: 10.22059/ije.2022.342077.1633. [In Persian]
- Bonacci, O., Bonacci, D., Roje-Bonacci, T., & Vrsalović, A. (2023). Proposal of a new method for drought analysis. *Hydrology and Hydromechanics*, 71(1), 1-11. doi: 10.2478/johh-2022-0030
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, 3(1), 52-58. doi.org/10.1038/nclimate1633
- Dastorani, M.T., Massah, B.A., Poormohammadi, S., & Rahimian, M.H. (2011). Assessment of potential climate change impacts on drought indicators (Case study: Yazd station, Central Iran). *Desert*, 16(2), 157-166 https://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/81020110209.pdf
- Doustan, R. (2020). An analysis of drought research in Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6(4), 53-94. doi: 10.29252/jsaeh.6.4.53. [In Persian]
- Farhat, J.C.S., & Vanderford, M. (2012). GSI Mann-Kendall Toolkit. <https://www.gsienv.com/software/data-management-and-stats-tool/gsi-mann-kendall-toolkit/>
- Golmohammadi, M., & Masah Bowani, A. (2012). Investigating changes in intensity and return period of drought in Qarasu basin in future periods under the influence of climate change. *Ecohydrology*, 9(2), 419-436. doi: 10.22059/ije.2022.342077.1633. [In Persian]

- Water and Soil*, 25(2). doi: 10.22067/JSW.V0I0.9384. [In Persian]
- Guga, S., Ma, Y., Riao, D., Zhi, F., Xu, J., & Zhang, J. (2023). Drought monitoring of sugarcane and dynamic variation characteristics under global warming: A case study of Guangxi, China. *Agricultural Water Management*, 275, 108035. doi:10.1016/j.agwat.2022.108035
- Hanafi, A., Khoshakhlq, F., & Soltani, M. (2013). Analysis of droughts in Tehran province using the SPI index and its prediction based on the Markov chain model. *Geography & Environmental Sustainability*, 2(2), 87-100. https://ges.razi.ac.ir/article_168.html. [In Persian]
- Hassani, M., Niksakhen, M., Ardestani, M., & Mousavi Ghanbesarai, S. (2022). Simulating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (case study: Region 10 of Tehran Municipality). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 269-285. doi: 10.22098/mmws.2022.11849.1176. [In Persian]
- He, W., Zhang, L., & Yuan, C. (2022). Future air temperature projection in high-density tropical cities based on global climate change and urbanization—a study in Singapore. *Urban Climate*, 42, 101115. doi:10.1016/j.uclim.2022.101115
- Hejazizadeh, Z., & Javizadeh, S. (2018). An introduction to drought and its indicators (Volume 1). 3rd Edition: Samt Publications, 376 pages. <https://www.gisoom.com/book/11325867/>. [In Persian]
- Hejazizadeh, Z., Akbari, M., Sasanpour, F., Hosseini, A., & Mohammadi, N. (2023). Investigating the effects of climate change on torrential rains in Tehran province. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(2), 87-105. doi: 10.22098/mmws.2022.9958.1075. [In Persian]
- Hosseinzade Kuhl, H., Ardestani, M., & Sarang, A. (2023). Optimizing the design of urban runoff collection channels to reduce vulnerability and increase reliability against climate change. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 85-101 doi:10.22098/mmws.2023.12222.1213. [In Persian]
- Javan, Kh. (2022). Investigation of meteorological drought in Urmia station using SPI index under climate change scenarios (RCP). *Climate Change Research*, 2(5), 81-94. doi: 10.30488/ccr.2020.262302.1033. [In Persian]
- Javizadeh, S., & Hejazizadeh, Z. (2019). Analysis of spatial statistics of drought in Iran. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 19(53), 251-277. doi:10.29252/jgs.19.53.251 [In Persian]
- Jehanzaib, M., Sattar, M.N., Lee, J.H., & Kim, T.W. (2020). Investigating effect of climate change on drought propagation from meteorological to hydrological drought using multi-model ensemble projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 7-21. doi.org/10.1007/s00477-019-01760-5
- Kobuliev, M. (2023). Projections of future anthropogenic climate change in Switzerland using multi-GCM modeling. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-10. doi:10.1007/s40808-022-01675-1
- Malekinejad, H., Soleimani Motlaq, M., Jayderi, A., & Shater Abshuri, S. (2014). Analysis of changes in rainfall and drought using Mann-Kendall and age tests in Tehran province. *Nivar*, 37(81-80), 43-54. https://nivar.irimo.ir/article_13186.html [In Persian]
- Mohammadi, N. (2021). Effects of climate change on torrential rains in Tehran province. Master's Thesis, *Kharazmi University of Tehran*. [In Persian]
- Mousavikhah, S., Shaik, A., & Ahmadpari, H. (2020). Evaluation and monitoring of meteorological drought in Saman city using DIP software. *Science and Engineering Elites*, 5(3), 199-212. <https://elitesjournal.ir/fa/page.php?rid=498> [In Persian]
- Najafi, V., Arbabi Sabzevari, A., & Adibi Saadinejad, F. (2021). Investigation and analysis of different aspects of urban vulnerability caused by drought (case study: Tehran province). *Ecohydrology*, 8(4), 1045-1059. doi:10.22059/ije.2021.333312.1574. [In Persian]
- Ogunrinde, A.T., Oguntunde, P.G., Akinwumiju, A.S., Fasinmirin, J.T., Adawa, I.S., & Ajayi, T.A. (2023). Effects of climate change and drought attributes in Nigeria based on RCP 8.5 climate scenario. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103339. doi:10.1016/j.pce.2022.103339
- Pouralkhas, M., Esmaali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., Hezbawi, Z., & Sharari, Ma. (2022). Indicators and components for evaluating climate fluctuations and changes. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 12(1), 98-85. doi: 20.1001.1.23225955.1401.12.1.6.6. [In Persian]

- Roshan, G., & Najafi, M. (2012). Investigating the potential effects of climate change on the country's future droughts using the output of atmospheric general circulation models. *Arid Regions Geographic Studies*, 2(6), 107-87. <http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-133-fa.html>. [In Persian]
- Shamsipour, A. (2018). Investigating the causes of climate change and drought, Geography University of Tehran. yun.ir/ax1we4www.isna.ir/news/96101608488 [In Persian]
- Sheikh Biklo Islam, B. (2021). Evidences and consequences of flood events in Iran from prehistory until now. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(1), 24-40. doi: 10.22098/mmws.2021.1173. [In Persian]
- Teimuri Yeganeh, M., & Teimuri Yeganeh, L. (2021). Evaluation of the trend of rainfall and temperature changes and their effects on meteorological drought in Kermanshah province. *Journal of Environmental Research and Technology*, 10(6), 123-134. <https://rimag.ricest.ac.ir/fa/Article/31945>. [In Persian]
- The Sixth Report Of The Working Group Of The Intergovernmental Panel On Climate Change, (2021). <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-%20%20%20%20%20%20%20%20working-group-i/>
- Trenberth, K.E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22. doi.org/10.1038/nclimate2067.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., & Barrow, E.M. (2002). SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157. doi:10.1016/S1364-8152(01)00060-3