

Climate Change Impacts on Hydrological Droughts under RCP Scenarios Using SDI and Time Series Modeling (Case Study: Lake Urmia)

Zabihollah Khani Temelieyeh^{1*}, Rasoul Mirabbasi Najafabadi², Shahab Shadmehr³, Zahra Shamsi⁴, Ali Mansour Bahmani⁵

¹Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

²Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

³ Science in Remote Sensing and Geographic Information System, Mohaghegh Ardabili University, Faculty of Social Sciences, Ardabil, Iran.

⁴Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran.

⁵Water Engineering Expert, Kerman Regional Water Organization, Kerman, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 18 March 2026

Revised 09 April 2026

Accepted 15 April 2026

Published online 22 June 2026

Keywords:

Climate change

Time series

Drought

Lake Urmia

SDI

ABSTRACT

Objective: Climate change poses significant challenges to water resources in semi-arid regions. This study investigates the impact of climate change on hydrological drought in the Lake Urmia basin, Iran, using the Streamflow Drought Index (SDI) and time-series modeling.

Methods: The NORESM1-M general circulation model was evaluated using 30 years of baseline data (1980–2010) and future projections under the RCP4.5, RCP6, and RCP8.5 scenarios for near-future (2011–2040), mid-future (2040–2070), and far-future (2070–2100) periods. A calibrated rainfall–runoff model generated future discharge data for two periods (2020–2059 and 2060–2100). Synthetic data were generated 1,000 times using an AR(p) time-series model and disaggregated into monthly values using the Valencia–Schake model to calculate the SDI and evaluate drought characteristics.

Results: The results indicate that more severe droughts are likely to occur in the future compared with historical periods. Drought severity is projected to be greater at stations located east of Lake Urmia, and the number of dry periods is expected to increase by 17–20%.

The RCP6 scenario provided the best prediction for precipitation (correlation coefficient: 0.763), while the RCP4.5 scenario showed the best performance for temperature prediction (correlation coefficient: 0.994). The NORESM1-M model demonstrated the highest correlation for climatic variables.

Conclusion: Projected temperature increases (16% in the near future and 20% by the end of the century) are expected to reduce precipitation and consequently decrease river discharge in the Lake Urmia basin. This reduction will intensify hydrological droughts, and the maximum severity and duration of future drought events are expected to be significantly greater than under current conditions.

*Corresponding author: Email: z.khani1060@yahoo.com

Cite this article: Khani Temelieyeh, Z., Mirabbasi Najafabadi, R., Shadmehr, Sh., Shamsi, Z., & Bahmani, A.M. (2026). Climate Change Impacts on Hydrological Droughts under RCP Scenarios Using SDI and Time Series Modeling (Case Study: Lake Urmia). *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(2), 22-46. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.553994.1172>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.553994.1172>

Publisher: Gonbad Kavous University.

Introduction

Climate change is a central topic in environmental and atmospheric sciences, with historical records indicating that temperature and precipitation are primary determinants of regional climate. The Lake Urmia basin in northwestern Iran has experienced a severe decline in water level, making it a critical case study for understanding future water scarcity.

The primary objective of this research is to assess the impact of climate change on hydrological drought in this basin. Specifically, this study aims to: (1) evaluate changes in climatic variables (temperature and precipitation) under different Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios; (2) generate synthetic streamflow data incorporating climate change projections; and (3) analyze future hydrological drought characteristics, including severity, duration, and frequency, using the Streamflow Drought Index (SDI) and stochastic time-series modeling.

Methods

This study employed the NORESM1-M global climate model, which was selected after evaluating its performance against historical temperature and precipitation data (1980–2010) from stations across the Lake Urmia basin. Future climate projections were generated for three time horizons: near future (2011–2040), mid-future (2040–2070), and far future (2070–2100), under three greenhouse gas emission scenarios: RCP4.5, RCP6, and RCP8.5.

A conceptual rainfall–runoff model was calibrated using historical precipitation and discharge data and then used to project future river discharge for two periods (2020–2059 and 2060–2100) based on the climate scenarios. To ensure robust statistical analysis, an autoregressive (AR(p)) time-series model was applied to generate 1,000 synthetic annual discharge series for each scenario while preserving key statistical properties of the observed data, including mean, standard deviation, skewness, and lag-1 correlation.

The Valencia–Schake model was subsequently used to disaggregate the synthetic annual data into monthly values. Hydrological drought was quantified using the SDI, which standardizes cumulative streamflow volumes over various time scales (e.g., 3, 6, and 12 months). Drought characteristics, including probability of occurrence, return periods, and transition probabilities between drought states (normal, mild, moderate, and severe), were derived using Markov chain analysis. Reliability and resilience indices were also calculated to assess system behavior under future drought conditions.

Results

The findings revealed significant projected changes in climatic variables. Under the RCP scenarios, the average temperature in the basin is projected to increase by 16% in the near future and by 20% in the mid- and late-century periods. This warming is expected to reduce precipitation, particularly in the eastern part of the basin.

Based on correlation coefficients between simulated and observed data, the RCP6 scenario was identified as the most suitable for precipitation studies ($R = 0.763$), while RCP4.5 performed best for temperature prediction ($R = 0.994$). The NORESM1-M model consistently outperformed other global climate models (GCMs) across the study stations.

Hydrological drought analysis based on the SDI indicated a strong likelihood of more severe and prolonged drought events in the future compared with the historical baseline period. The number of dry periods is projected to increase by 17–20% across all future horizons. Spatial

analysis demonstrated that stations located east of Lake Urmia will experience greater drought severity than those in the west.

The synthetic data generation models successfully preserved the key statistical properties of the historical data, with performance improving for longer record lengths. Transition probability matrices derived from Markov chain analysis showed a higher probability of remaining in severe drought states in future simulations compared with historical conditions. The maximum expected drought duration and severity for the 2060–2100 period were substantially greater than those observed historically.

Furthermore, monthly analysis showed that May (the peak-flow month) is the most sensitive to drought conditions, while October (the low-flow month) is the least affected.

Conclusions

This study confirms that climate change will profoundly alter the hydrological regime of the Lake Urmia basin, leading to intensified hydrological droughts. The projected temperature increase of 16–20% is expected to reduce precipitation, which in turn will decrease river discharge across the basin.

The application of AR(p) and Valencia–Schake models proved effective in preserving the statistical characteristics of streamflow data, even for datasets with record lengths shorter than 30 years, making them suitable for drought studies in data-scarce regions.

The increased probability of transitioning into and remaining in severe drought states, coupled with higher recurrence rates, signals a significant future risk to water supply, agriculture, and the lake's ecosystem. The spatial heterogeneity of drought impacts, with more severe effects in the eastern region, highlights the need for location-specific adaptation strategies.

The methodologies and findings presented in this study provide a robust framework for water resource managers and policymakers to develop proactive drought mitigation plans. Without effective intervention, the projected increase in the frequency, severity, and duration of hydrological droughts will likely exacerbate the environmental crisis in the Lake Urmia region and may lead to irreversible ecological damage.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to thank the regional water authorities of West and East Azerbaijan provinces for providing the hydrological and meteorological data used in this study. The authors also thank the anonymous reviewers for their constructive comments and valuable suggestions, which significantly improved the quality of this manuscript.

Ethical Considerations

The authors confirm that this research was conducted with full adherence to ethical principles. The authors have avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and any other form of scientific misconduct. No human or animal subjects were involved in this study; therefore, ethics committee approval was not required.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



اثرات تغییر اقلیم بر خشک سالی هیدرولوژیکی تحت سناریوهای RCP با استفاده از شاخص SDI و مدلسازی سری های زمانی (مطالعه موردی: دریاچه ارومیه)

ذبیح الله خانی تملیه^{۱*}، رسول میرعباسی نجف آبادی^۲، شهاب شادمهر^۳، زهرا شمسی^۴، علی منصور بهمنی^۵

^۱گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

^۲گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

^۳گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۴گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

^۵کارشناس مهندسی آب، شرکت آب منطقه ای کرمان، کرمان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	هدف: تغییرات اقلیمی چالش های قابل توجهی را برای منابع آب در مناطق نیمه خشک ایجاد می کند. این مطالعه با استفاده از شاخص خشکسالی جریان رودخانه (SDI) و مدلسازی سری زمانی، تاثیر تغییرات اقلیمی بر خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه دریاچه ارومیه در ایران را بررسی می کند.
مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶	مواد و روش ها: مدل گردش عمومی NORESM1-M با استفاده از داده های پایه ۳۰ ساله (۱۹۸۰-۲۰۱۰) و پیش بینی های آینده تحت سناریوهای RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 برای افق های نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، میانی (۲۰۴۰-۲۰۷۰) و دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) ارزیابی شد. یک مدل واسنجی شده بارش-رواناب، داده های دبی آینده را برای دو دوره (۲۰۲۰-۲۰۵۹ و ۲۰۶۰-۲۱۰۰) تولید کرد. داده های مصنوعی ۱۰۰۰ بار با استفاده از مدل سری زمانی AR(p) تولید شده و به صورت ماهانه با استفاده از مدل والنسیا - شاک توزیع شدند تا SDI محاسبه و مشخصه های خشکسالی ارزیابی شود.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۰	نتایج: نتایج نشان می دهد که احتمال وقوع خشکسالی های شدیدتری نسبت به دوره های تاریخی در آینده وجود دارد. شدت خشکسالی در ایستگاه های شرق دریاچه ارومیه بیشتر پیش بینی می شود و انتظار می رود تعداد دوره های خشک ۱۷ تا ۲۰ درصد افزایش یابد. سناریوی RCP6 بهترین پیش بینی را برای بارش (ضریب همبستگی: ۰/۷۶۳) و سناریوی RCP4.5 بهترین پیش بینی را برای دما (ضریب همبستگی: ۰/۹۹۴) داشت. مدل NORESM1-M بالاترین همبستگی را برای متغیرهای اقلیمی نشان داد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶	نتیجه گیری: افزایش دمای پیش بینی شده (۱۶ درصد در آینده نزدیک و ۲۰ درصد تا اواخر قرن) باعث کاهش بارش و در نتیجه کاهش دبی رودخانه در حوضه دریاچه ارومیه خواهد شد. این کاهش خشکسالی های هیدرولوژیکی را تشدید می کند و حداکثر شدت و مدت رویدادهای خشکسالی آینده به طور قابل توجهی بیشتر از شرایط فعلی خواهد بود.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	
کلیدواژه ها:	
تغییر اقلیم	
سری زمانی	
خشکسالی	
دریاچه ارومیه	
SDI	

*نویسنده مسئول: E-mail: z.khani1060@yahoo.com

استناد: خانی تملیه، ذ، میرعباسی نجف آبادی، ر، شادمهر، ش، شمسی، ز، بهمنی، ع.م (۱۴۰۵). اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی هیدرولوژیکی تحت سناریوهای RCP با استفاده از شاخص SDI و مدلسازی سری های زمانی (مطالعه موردی: دریاچه ارومیه). رویکردهای نوین در

مهندسی آب و محیط زیست ۵ (۲)، ۲۲-۴۶. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.553994.1172>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

بلایای طبیعی یکی از شناخته شده ترین و مهم ترین چالش های جهان هستند. این پدیده ها سالانه خسارت های جبران ناپذیر اقتصادی و زیست محیطی به همراه دارند و جان بسیاری از انسان ها را می گیرند. در این میان، خشک سالی به عنوان یکی از مهم ترین انواع بلایای طبیعی مطرح است. خشک سالی پدیده ای آب و هوایی است که در همه شرایط اقلیمی و تمام مناطق کره زمین رخ می دهد (فاتحی مرجع و همکاران، ۱۳۸۵). این پدیده، مشابه سیل، قحطی، بیماری ها و آفات، توسعه اقتصادی جوامع را در تمام سطوح به مخاطره می اندازد. خشک سالی به طور مستقیم از طریق تغییر در فراوانی یا قابلیت دسترسی به منابع آب، مواد غذایی، پوشاک و ذخایر انرژی، جامعه را تحت تأثیر قرار می دهد و بر همه جنبه های زندگی به ویژه محیط زیست، تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم می گذارد.

خشک سالی را به چهار دسته هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی طبقه بندی کرده اند (Wilhite and Glantz, 1985). خشک سالی هیدرولوژیک یکی از انواع رایج است که در پی طولانی شدن خشک سالی هواشناسی رخ می دهد. در اثر این نوع خشک سالی، سطح آب رودخانه ها، دریاچه ها، مخازن و آب های زیرزمینی به پایین تر از میانگین درازمدت کاهش می یابد. کمبود بارش و نوسانات شدید آن، سبب عدم اطمینان از تأمین حداقل بارش مورد نیاز محصولات کشاورزی، جریان های سطحی، تغذیه آب های زیرزمینی و مصارف انسانی می شود. از سوی دیگر، انتظار می رود افزایش دمای جهان، الگوی بارش، رطوبت خاک و سایر عوامل اقلیمی را تغییر داده و باعث افت کمی و کیفی محصولات کشاورزی گردد (کاویانی، ۱۳۸۰).

در چند دهه اخیر، مطالعات متعددی از دیدگاه های گوناگون به تحلیل خشک سالی هیدرولوژیک پرداخته اند. Hisdal و همکاران، (۲۰۰۳) به بررسی منطقه ای خشک سالی های هیدرولوژیک و هواشناسی پرداختند. یافته های آن ها نشان داد که خشک سالی هواشناسی در مقایسه با نوع هیدرولوژیک، تداوم و فراوانی بیشتری دارد که می توان آن را به کمبود بارش و تلفات ناشی از تبخیر نسبت داد. Arena و همکاران، (۲۰۰۶) با تحلیل فراوانی خشک سالی در منطقه سائسلی پالرموی ایتالیا بر روی سیستم مخازن چندگانه، نتیجه گرفتند که تکنیک تولید داده های مصنوعی برای جریان های سالانه، امکان تحلیل دوره های تداوم خشک سالی در مخازن چندگانه را فراهم می کند. همچنین آن ها نشان دادند که مدل های ترکیبی مارکوف می توانند در شرایط خشک و نرمال جایگزین مدل های $ARMA(p,q)$ شوند.

در داخل کشور نیز پژوهش های قابل توجهی در زمینه تحلیل و پیش بینی خشک سالی انجام شده است. یاراحمدی و رستمی زاد، (۱۳۹۸) خشک سالی هیدرولوژیک در شمال دریاچه ارومیه را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که در مجموع ۳۸ دوره خشکی در رودخانه های منطقه رخ داده که بیش از ۶۰ درصد آن ها تداومی بیش از ۲۰۰ روز دارند. رزمخواه و همکاران، (۱۴۰۱) در ارزیابی خشک سالی هواشناسی و هیدرولوژیک در رودخانه زهره دریافتند که هرگاه شاخص SPI منفی باشد، سطح آب زیرزمینی افت بیشتری نشان می دهد، این کاهش با تأخیر زمانی همراه است و با افزایش مقیاس زمانی خشک سالی، تأخیر بیشتر می شود. شاهی نژاد و همکاران، (۱۴۰۱) با استفاده از تکنیک تولید داده مصنوعی و توابع مفصل به تحلیل چندمتغیره خشک سالی هیدرولوژیک در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. یافته های آن ها نشان داد که تعداد دوره های خشک سالی در مقیاس های کوتاه مدت بیش از مقیاس های بلندمدت است و متوسط شدت و مدت خشک سالی در داده های تولیدی نسبت به داده های تاریخی افزایش یافته است. مرادی و همکاران، (۱۴۰۴) تغییرات زمانی و مکانی خشک سالی هواشناسی را با شاخص SPI مطالعه کردند. نتایج آن ها حاکی از آن بود که در سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۷، بیشترین تعداد ایستگاه درگیر خشک سالی بسیار شدید و در سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۹، کمترین تعداد ایستگاه درگیر خشک سالی شدید بودند. حاجی آبادی و همکاران، (۱۴۰۴) نیز اثر تغییر اقلیم بر خشک سالی کشاورزی را با شاخص $SMDI$ در رژیم های مختلف آبیاری ارزیابی کردند و نشان دادند که به طور میانگین در دوره آبی، سناریوی $RCP8.5$ نسبت به $RCP4.5$ از درجه خشک سالی کمتری برخوردار خواهد بود.

در سطح بین المللی نیز مطالعات گسترده ای در این زمینه صورت گرفته است. Rahimi Kakehju و همکاران، (۲۰۲۳) خشک سالی هیدرولوژیک و تحلیل سری های زمانی را در حوضه آبریز زرينه رود مطالعه کرده و با استفاده از شاخص SDI در دوره های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه پیش بینی کردند که خشک سالی هیدرولوژیک در این حوضه در سال های آینده تشدید خواهد شد.

در پژوهشی دیگر، Alipour Modab, (۲۰۲۵) شرایط خشک‌سالی آینده در استان کهگیلویه و بویراحمد را برای سال‌های ۲۰۲۴ تا ۲۰۴۷ بررسی کرد. برخلاف بسیاری از مطالعات که کاهش بارش را پیش‌بینی می‌کنند، یافته‌های این تحقیق نشان داد که بارش افزایش و دما کاهش جزئی خواهد داشت و شاخص‌های خشک‌سالی حاکی از پایداری شرایط آینده بدون تشدید یا کاهش قابل توجه در خشک‌سالی هستند. از دیگر پژوهش‌های بین‌المللی در این زمینه می‌توان به مطالعات EskandariPour and Ma., Soltaninia, (2022) و همکاران، Wang., (۲۰۲۲) و همکاران، (۲۰۲۳)، Li, Anghel and Ilinca, (2023) و همکاران، (۲۰۲۴) و Habibi., (۲۰۲۴) و همکاران، (۲۰۲۴) و Deger., (۲۰۲۴) و همکاران، (۲۰۲۵) و Monforte., (۲۰۲۴) و همکاران، (۲۰۲۴) و Sabzevari و همکاران، (۲۰۲۵) اشاره کرد.

با وجود پژوهش‌های گسترده، توجه به این نکته ضروری است که تحلیل خشک‌سالی صرفاً مبتنی بر داده‌های تاریخی نمی‌تواند تصویر کامل و قابل اتکایی از وضعیت خشک‌سالی در دوره‌های آتی ارائه دهد. بنابراین، هدف و ضرورت تحقیق حاضر، تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیک با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم در حوضه دریاچه ارومیه است. در این تحقیق، با استفاده از مقیاس‌های مختلف شاخص SDI و به کارگیری تکنیک تولید داده‌های مصنوعی (پس از ۱۰۰۰ بار تکرار با مدل سری زمانی (AR(p)، ابتدا داده‌های مصنوعی تولید شده‌اند. سپس اثرات تغییر اقلیم با در نظر گرفتن سه سناریوی RCP6, RCP4.5 و RCP8.5 و با استفاده از داده‌های ۳۰ ساله دما و بارش مدل NORESM1-M مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

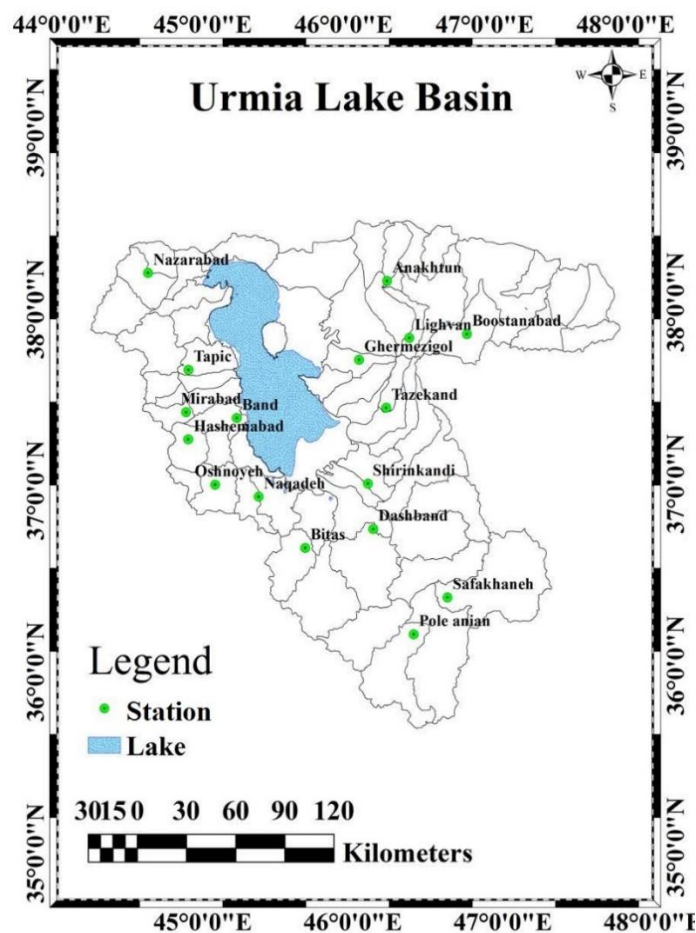
منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه، در شمال غربی ایران و ما بین دو استان آذربایجان غربی و شرقی قرار گرفته است. این دریاچه بعد از بحرالْمیت در فلسطین اشغالی شورترین دریاچه جهان می‌باشد. طول دریاچه ۱۳۰ تا ۱۴۰ کیلومتر و عرض آن ۱۵ تا ۸۵ کیلومتر و عمق متوسط آن ۶ متر و ارتفاع متوسط آن ۱۲۷۴ متر از سطح آزاد دریاهاست. مساحت دریاچه از ۵۰۰ تا ۵۵۰۰ کیلومتر مربع گزارش شده است. حوضه آبریز دریاچه ارومیه در تقسیم بندی شش گانه حوضه‌های آبریز در ایران و در شمال غرب کشور واقع شده است. وسعت این حوضه ۵۲۷۰۰ کیلومتر مربع است که معادل ۳/۲۱ درصد مساحت کل کشور می‌باشد. این حوضه، بین ۲۹° ۳۸' تا ۴۰° ۳۵' عرض شمالی ۵۳' ۴۷° تا ۱۳' ۴۴° طول شرقی قرار گرفته است. برای انجام این تحقیق، داده‌های جریان رودخانه طی بازه زمانی ۲۰۱۳-۱۹۷۱ و داده‌های دما، بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و تبخیر طی بازه زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۱ تهیه گردید و یک دوره مشترک برای تحلیل و ارزیابی انتخاب شد. موقعیت ایستگاه‌های (هیدرومتری) مورد مطالعه در شکل ۱ و مراحل مختلف انجام این تحقیق بصورت فلوچارت در شکل ۲ ارائه شده است.

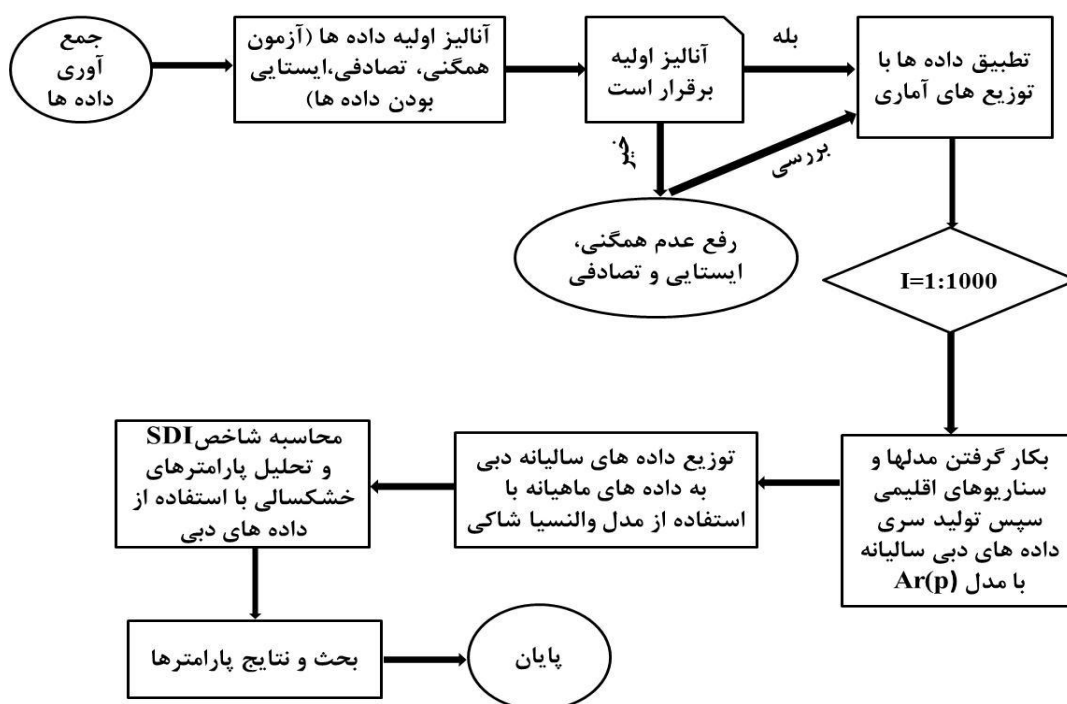
داده‌های هیدرولوژیکی معمولاً از یک فرایند تصادفی تبعیت می‌کنند و کاملاً قطعی نیستند. تصادفی بودن داده‌ها این امکان را فراهم می‌کند که بتوان آن‌ها را با روش‌های آماری تحلیل کرد. پیش از به کارگیری روش‌های احتمالی، باید از تصادفی بودن داده‌ها اطمینان حاصل شود. عدم همگنی داده‌ها معمولاً ناشی از نحوه جمع‌آوری اطلاعات است و آزمون همگنی مشخص می‌کند که داده‌ها در چه بازه‌هایی ممکن است دستکاری شده باشند (Mutreja, 1976). نتایج این تحقیق نشان داد که داده‌ها تصادفی هستند. محدوده داده‌های ارزیابی شده برای آزمون ایستایی با استفاده از آزمون دنباله‌ها^۱ در بازه مجاز ۱/۹۶- تا ۱/۹۶+ قرار داشت. همچنین نتایج آزمون تصادفی بودن داده‌ها برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد که روند^۲ داده‌ها در محدوده مجاز ۲/۱- تا ۲/۱+ قرار گرفته است. این امر حاکی از آن است که داده‌های دبی جریان حاصل یک فرایند تصادفی بوده و در محدوده مجاز قرار دارند. از این‌رو، همبستگی سریالی معنی‌داری بین داده‌ها وجود ندارد که خود مؤید تصادفی و ایستا بودن داده‌های جریان است.

^۱. Run test

^۲. Trend



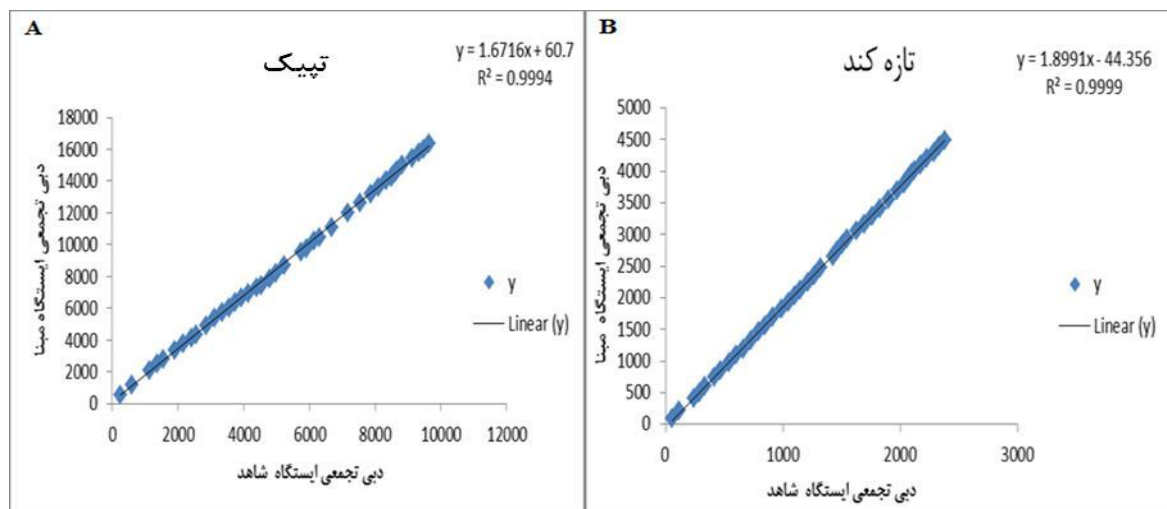
شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه



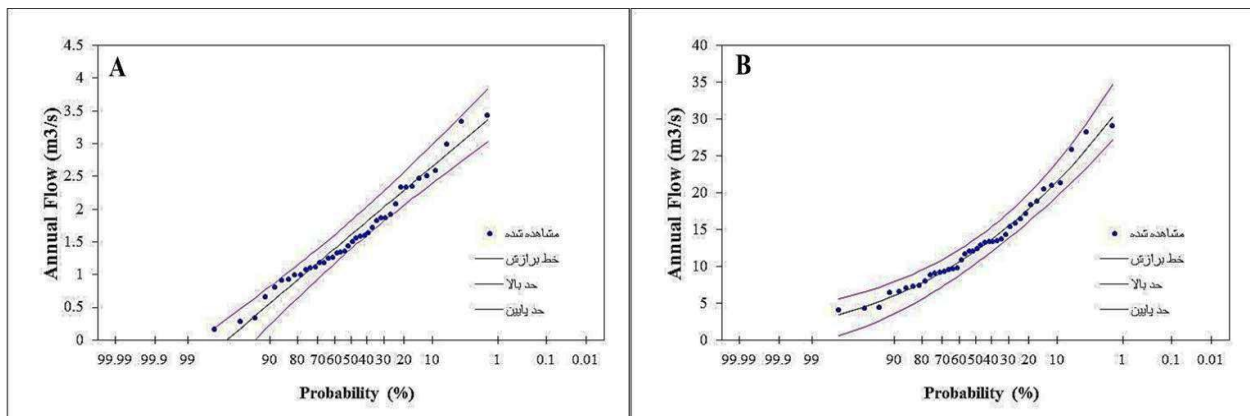
شکل ۲- الگوریتم (فلوچارت) مراحل مختلف انجام تحقیق

نتایج آزمون همگنی داده‌های جریان نشان داد که داده‌ها بر روی یک خط مستقیم با ضریب تبیین (R^2) بالاتر از ۹۵ درصد قرار دارند که نشان‌دهنده همگنی داده‌ها است (شکل ۳). یافته‌های این بخش از تحقیق با نتایج مطالعات شاهی‌نژاد و همکاران، (۱۴۰۱) و امیرعطایی و همکاران، (۱۳۹۲) مطابقت دارد.

پس از بررسی آزمون‌های همگنی، تصادفی و ایستایی، با استفاده از آزمون ضریب همبستگی نمودار احتمال^۱ (PPCC)، بهترین توزیع احتمالی برای داده‌های تاریخی دبی ثبت‌شده در هر ایستگاه تعیین شد. برازش توزیع‌های مختلف بر داده‌های دبی نشان داد که توزیع پیرسون تیپ سه^۲ با ضریب تبیین بالاتر از ۹۵ درصد به‌عنوان توزیع برتر شناخته شد (شکل ۴). نتایج این بخش نیز با یافته‌های مطالعات شاهی‌نژاد و همکاران، (۱۴۰۱) و امیرعطایی و همکاران، (۱۳۹۲) همخوانی دارد.



شکل ۳- آزمون همگنی ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دو ایستگاه منتخب تپیک (A) و تازه کند (B)



شکل ۴- برازش توزیع پیرسون تیپ سوم بر داده‌های سالیانه دبی تاریخی در دو ایستگاه منتخب تپیک (A) و تازه کند (B)

شاخص دبی استاندارد شده (SDI)

شاخص SDI به لحاظ محاسباتی مانند SPI می‌باشد، ولی از نظر مقیاس زمانی به‌طور ماهانه و فصلی توصیه شده است. این شاخص براساس جریان ماهانه استاندارد می‌باشد و اولین بار توسط نبالانتیس پیشنهاد شده است (Nalbantis, 2008). شاخص SDI بصورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

^۱. Probability Plot Coefficient Correlation

^۲. Pearson Type III

$$SDI_{ik} = \frac{V_{ik} - V_k}{S_k} \quad i = 1, 2, 3, \dots, k = 1, 2, 3, \dots \quad (۱)$$

در این روش، فرض بر این است که سری‌های زمانی، حجم جریان‌های رودخانه ماهانه بصورت Q_{ij} موجود است که اندیس i سال هیدرولوژیکی و اندیس j مربوط به ماه مربوط به سال هیدرولوژیکی است. S_k و V_k به ترتیب میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریانات تجمعی برای دوره مبنا k است. V_{ik} حجم تجمعی جریانات رودخانه‌ای برای دوره مبنا k و SDI شاخص دبی استاندارد شده می باشد. کلاس طبقات خشک‌سالی بر اساس شاخص SDI در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص SDI

مفهوم اقلیمی	حدود شاخص SDI
تر سالی بسیار شدید	$SDI > 2$
تر سالی شدید	$1.99 < SDI < 1.5$
تر سالی متوسط	$1.49 < SDI < 1$
نرمال	$1 < SDI < -1$
خشک‌سالی متوسط	$-1.49 < SDI < -1$
خشک‌سالی شدید	$-1.99 < SDI < -1.5$
خشک‌سالی بسیار شدید	$SDI < -2$

مدل زنجیره مارکوف و روش ماتریس احتمال

مدل زنجیره مارکوف از جمله فرآیندهای تصادفی هستند که در شبیه‌سازی سری‌های زمانی گسسته کاربردهای گسترده ای دارند. زنجیره مارکوف مرتبه اول عبارت است از یک سری زمانی گسسته که در آن، رفتار سری در گام زمانی آینده تنها به زمان حال بستگی دارد (رابطه ۲).

$$P_r(X_{n+1} = x | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = P_r(X_{n+1} = x | X_n = x_n) \quad (۲)$$

که در آن، P احتمال وقوع متغیر حالت مورد انتظار X_{n+1} بشرط وقوع متغیر مورد نظر X_n بترتیب در گام‌های زمانی n و $n+1$ است و x متغیر حالت می‌باشد. تعداد حالت‌ها در زنجیره مارکوف می‌تواند از دو تا N حالت تغییر یابد. در اقلیم شناسی و هیدرولوژی زنجیره‌های مارکوف دو یا سه حالت به بیشترین کاربرد را دارند. اگر حالت‌های ممکن به سه صورت خشک (D)، نرمال (N) و مرطوب (W) در نظر گرفته شود، وضعیت محیط در گام بعدی می‌تواند درصدی از احتمال هر یک از حالت‌های N ، D و W باشد. درجه همبستگی میان حالت‌ها را می‌توان به کمک ماتریس احتمال انتقال نشان داد که مجموع درایه‌های هر ستون آن باید برابر یک گردد. در صورتیکه بتوان این ماتریس را به حالت تعادل رسانید، یعنی احتمال انتقال از همه حالت‌ها به یک حالت خاص را به عددی ثابت میل داد، به کمک این احتمالات تعادلی می‌توان وضعیت آتی را در درازمدت پیش بینی نمود. اگر تعداد حالات، m در نظر گرفته شود، ماتریس احتمال انتقال آن بصورت $m \times m$ تعریف می‌گردد و می‌توان ماتریس احتمال انتقال را بصورت رابطه ۳ نوشت (Thompson, 1990; Wilks, 1995):

$$P = [P_{ij}] = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} \dots & p_{2n} \\ p_{m1} & p_{m2} \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (۳)$$

که در آن، p یک ماتریس تصادفی می‌باشد، به عبارت دیگر ماتریس مربعی بدون مقایر منفی که مجموع ستون‌های آن واحد می‌باشد.

مدل هیدرولوژیکی برای محاسبه ضرایب اقلیمی دبی

پس از بکار گرفتن سناریوهای اقلیمی (RCP4.5، RCP6 و RCP8.5) و مدل اقلیمی NORESM1-M (TGICIA, 1999) جهت تحلیل اثرات اقلیمی، مدل هیدرولوژیکی جهت محاسبه ضرایب دبی بکار گرفته شد. در زمینه تأثیر تغییر اقلیم مطالعات زیادی صورت گرفته است که در آنها تغییرات پایه هیدرولوژیک با استفاده از ضریب پایه بدست می‌آید (Wigley and Jonnes, 1985, Glantz and Wigley, 1987, Xu and Singh, 1998, Arnell and Reynard, 1996). تاکنون مدل‌های بارش- رواناب مختلفی برای شبیه سازی بارش- رواناب و سایر متغیرهای آب و هوایی توسعه داده شده‌اند که هر کدام از درجه پیچیدگی‌های متفاوتی برخوردارند. از آنجائیکه همیشه ممکن است اطلاعات کافی در دسترس نباشد، برای واسنجی مدل‌های پیچیده بارش- رواناب استفاده از یک مدل که سادگی و انعطاف پذیری داشته باشد، امری ضروری بنظر می‌رسد. در ادامه به پارامترهای مدل ساده بارش- رواناب که در این تحقیق استفاده گردید، اشاره می‌شود. در ابتدا از معادلات بیلان آب بدون در نظر گرفتن تلفات غیر تبخیری نظیر، نفوذ عمقی و غیره استفاده گردید. در روابط معرفی شده اندیس b بیانگر مقدار پارامتر هیدرولوژیکی برای داده‌های تاریخی می‌باشد و اندیس f بیانگر مقدار پارامتر هیدرولوژیکی برای دوره‌های آتی می‌باشد. برای محاسبه این مدل پس از ساده سازی‌های صورت پذیرفته، محاسبه ضرایب مطابق روابط ۴ تا ۹ ضروری است (Nawaz et al, 1999).

$$R_b = P - E_b \quad (4)$$

$$R_f = P_f - E'_b \quad (5)$$

$$P_f = \alpha P_b \quad (6)$$

$$E'_f = \beta E_b \quad (7)$$

$$\varepsilon_b = 1 - \gamma_b - \frac{E'_b}{P_b} \quad (8)$$

$$\gamma_{bi} = \frac{Q_{bi}}{P_{bi}} \quad (9)$$

پس از اینکه ضریب جریان ماهانه با توجه به داده‌های تاریخی بارندگی و دبی محاسبه شد، با توجه به روابط بالا میزان رواناب در دوره‌های آتی بدست می‌آید که ضرایب رواناب بدست آمده، همان ضرایب اقلیمی با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم می‌باشند. در روابط ۶ و ۷ ضرایب α و β با توجه به خروجی‌های حاصل از نرم افزار LARS-WG و داده‌های تاریخی برای دو دوره ۴۲ ساله (۱۴۳۲-۱۳۹۱ شمسی) (۲۰۵۲-۲۰۱۱ میلادی) شبیه سازی اول و یک دوره ۴۲ ساله برای شبیه سازی دوم (۱۴۶۹-۱۴۲۶ شمسی) (۲۰۴۷-۲۰۸۸ میلادی) بدست می‌آیند.

$$\frac{R_f}{R_b} = \frac{1}{\gamma_b} \{ (\alpha - 1) - (\beta - 1) * (1 - E_b - \gamma_b) \} + 1 \quad (10)$$

رابطه (۱۰) برای محاسبه پیش‌بینی رواناب در دوره‌های آتی هم برای جریان ماهانه و هم برای جریان سالانه بکار می‌رود، اما از آنجائیکه ضرایب رواناب در ماه‌های مختلف متفاوت می‌باشد و در حالت سالانه این ضریب برای ۴۲ سال یا تعداد دوره آماری مورد نظر برای مثلاً ۴۲ ماه مهر در حالت متوسط ثابت می‌باشد، در اینجا بجای اینکه از متوسط ۳۰ ساله برای هر ماه استفاده شود، ترجیحاً از روش محاسبه ضرایب برای هر ماه استفاده شد، گرچه نتایج حاصل از آنها با هم تفاوت چندانی ندارد. لازم بذکر است برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی، داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل در ضرایب گیاهی K_c با فرض اینکه منطقه مورد مطالعه مرتع متوسط باشد، ضرب شدند (Kuzniar et al, 2011).

مدل سری زمانی اتورگرسیو AR(p)

روش‌های تحلیل سری زمانی از ابزارهای مدل‌سازی در هیدرولوژی محسوب می‌شوند. این روش‌ها در مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی وقایع آینده، بازسازی داده‌های گمشده، بسط اطلاعات و غیره به کار گرفته می‌شوند (نیرومند و بزرگنیا، ۱۳۹۰). مدل‌های اتورگرسیو (AR) به طور گسترده در هیدرولوژی و منابع آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌های اتورگرسیو به دلیل اینکه هم وابستگی ذاتی زمانی (یعنی وابستگی مقدار متغیر در هر زمان به مقادیر قبلی آن) را حفظ می‌کنند و هم از نظر کاربردی ساده‌ترین مدل‌های پارامتریک محسوب می‌شوند، به طور گسترده در مدل‌سازی سری‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های اتورگرسیو علاوه بر حفظ مشخصه‌های آماری، همبستگی داخلی (همبستگی بین داده‌های متوالی) را نیز حفظ می‌کنند. اگر در مدل تنها حفظ همبستگی بین داده‌های متوالی با فاصله یک سال مد نظر باشد، این همبستگی با عنوان همبستگی یک‌ساله نامیده می‌شود. شکل کلی مدل اتورگرسیو AR(p) به صورت رابطه ۱۱ می‌باشد:

$$X_{i+1} = B_0 + B_1 X_i + B_2 X_{i+1} + \dots + B_n \varepsilon_i \quad (11)$$

این مدل در حالت ساده، برای حفظ همبستگی داخلی یک‌ساله (Lag-1) به صورت رابطه ۱۲ خلاصه می‌گردد:

$$X_{i+1} = B_0 + B_1 X_i + B_n \varepsilon_i \quad (12)$$

که در آن، B_0 ، B_1 و B_2 ضرایب ثابت، X_i داده‌های تولید شده در پریود زمانی i ، X_{i+1} داده‌های تولید شده در پریود زمانی $i+1$ و ε_i متغیر تصادفی با توزیع نرمال استاندارد که میانگین و انحراف آنها به ترتیب برابر صفر و یک است. این مدل مانند اغلب مدل‌های تولید داده‌های مصنوعی برای داده‌های با توزیع نرمال قابل استفاده بوده و در صورتیکه داده‌ها دارای توزیع نرمال نباشند، لازم است ابتدا داده‌ها به توزیع نرمال تبدیل شوند و سپس مدل بندی شوند. پارامترهای این مدل با استفاده از امید ریاضی برآورد می‌شود و رابطه مدل به صورت رابطه ۱۳ می‌باشد (McMahon and Mein, 1986):

$$X_{i+1} = \bar{x} + \rho(x_i - \bar{x}) + \varepsilon_i s \sqrt{1 - \rho^2} \quad (13)$$

که در آن، ρ همبستگی داخلی یک‌ساله (Lag-1) داده‌های تاریخی، s انحراف معیار داده‌های تاریخی، $\bar{x}$ میانگین داده‌های تاریخی، X_i داده‌های تولید شده در پریود زمانی (i) ، X_{i+1} داده‌های تولید شده در پریود زمانی $(i+1)$ و ε متغیر تصادفی با توزیع نرمال استاندارد که میانگین و انحراف معیار آن‌ها به ترتیب برابر صفر و یک باشد.

ضرایب برگشت‌پذیری و اعتمادپذیری

ضریب برگشت‌پذیری احتمال برگشت به حالت عادی پس از دوره خشک‌سالی را بیان می‌کند و هر چقدر ضریب برگشت‌پذیری بیشتر باشد، نشان‌دهنده بالا بودن سرعت برگشت‌پذیری از حالت خشک به حالت نرمال است. ضریب برگشت‌پذیری برای هر دوره آماری با رابطه ۱۴ بدست می‌آید و بصورت درصد بیان می‌شود.

$$\eta = \frac{F_s}{F} \times 100 \quad (14)$$

که در آن، η ضریب برگشت‌پذیری، F تعداد کل دوره‌های خشک‌سالی در دوره آماری و F_s تعداد کل دوره‌های پیوسته خشک‌سالی در طول دوره آماری مورد مطالعه است.

ضریب اعتمادپذیری زمانی، بیان می‌کند که در یک بازه زمانی مشخص چند بار سیستم با خشک‌سالی مواجه می‌شود و آن را بصورت احتمال یا نسبت نشان می‌دهد. فرمول ضریب اعتمادپذیری زمانی بصورت رابطه ۱۵ می‌باشد و بالا بودن این ضریب نشان‌دهنده کم بودن دوره‌های خشک‌سالی است (Hashimoto et al, 1982).

$$\lambda = \left(1 - \left(F / T \right) \right) \times 100 \quad (15)$$

که در آن، λ ضریب اعتمادپذیری زمانی، F تعداد کل دوره‌های خشک‌سالی در دوره آماری، T طول کل دوره آماری هستند. در این مطالعه، برای داده‌های تولیدی هر ایستگاه از میانگین این ضرایب در ۱۰۰۰ نمونه آماری استفاده شد.

نتایج و بحث

تغییرات بارش و دما در دوره‌های آتی

برای تجزیه و تحلیل تغییر اقلیم و تأثیر آن بر خشک‌سالی‌های حوضه دریاچه ارومیه در دوره‌های آتی، لازم است عامل بارش و دما در ایستگاه‌های منتخب مورد بررسی قرار گیرد. شاخص‌های تغییر اقلیم باتوجه به موارد ذکر شده در بالا بررسی شدند و داده‌های مصنوعی در تعداد نمونه زیاد برای هر کدام از ایستگاه‌های منتخب، تولید گردید. پس از بررسی کیفیت مدل در شبیه‌سازی دوره پایه، داده‌های شبیه‌سازی شده، برای دوره‌های آتی در سه افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱)، افق میانی (۲۰۶۵-۲۰۴۶) و افق دور (۲۰۹۹-۲۰۸۰) تولید شد. داده‌های شبیه‌سازی شده بارش با استفاده از سه سناریوی RCP4.5، RCP6.5 و RCP8.5 در دوره‌های زمانی آتی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۱) ایستگاه‌های منتخب در جداول ۲ تا ۴ ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب اصلاح‌شده فایل سناریوی RCP8.5 در دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱

پارامتر ماه	[1]	[2]	[3]	[4]
Jan	0.23	0.26	1.17	0.66
Feb	0.12	0.02	0.69	0.67
Mar	0.22	0.31	0.69	0.68
Apr	0.11	0.03	0.73	0.59
May	0.07	0.19	1.57	0.69
Jun	0.13	0.01	1.20	0.72
Jul	0.71	0.11	2.15	0.64
Aug	0.51	0.12	1.61	0.76
Sep	0.39	0.25	1.81	0.59
Oct	0.45	0.58	1.29	0.71
Nov	0.25	0.35	1.57	0.52
Dec	0.21	0.22	1.14	0.66

جدول ۳- ضرایب اصلاح‌شده فایل سناریوی RCP8.5 در دوره زمانی ۲۰۶۵-۲۰۴۶

پارامتر ماه	[1]	[2]	[3]	[4]
Jan	0.15	3.05	1.17	0.66
Feb	0.19	2.28	0.69	0.69
Mar	0.31	2.03	0.69	0.68
Apr	0.08	2.26	0.73	0.61
May	0.12	4.17	1.57	0.69
Jun	0.03	6.21	1.20	0.70
Jul	0.28	8.05	2.15	0.66
Aug	0.62	7.51	1.61	0.77
Sep	0.30	5.23	1.81	0.60
Oct	0.51	2.77	1.29	0.71
Nov	0.18	0.19	1.57	0.53
Dec	0.25	2.11	1.14	0.66

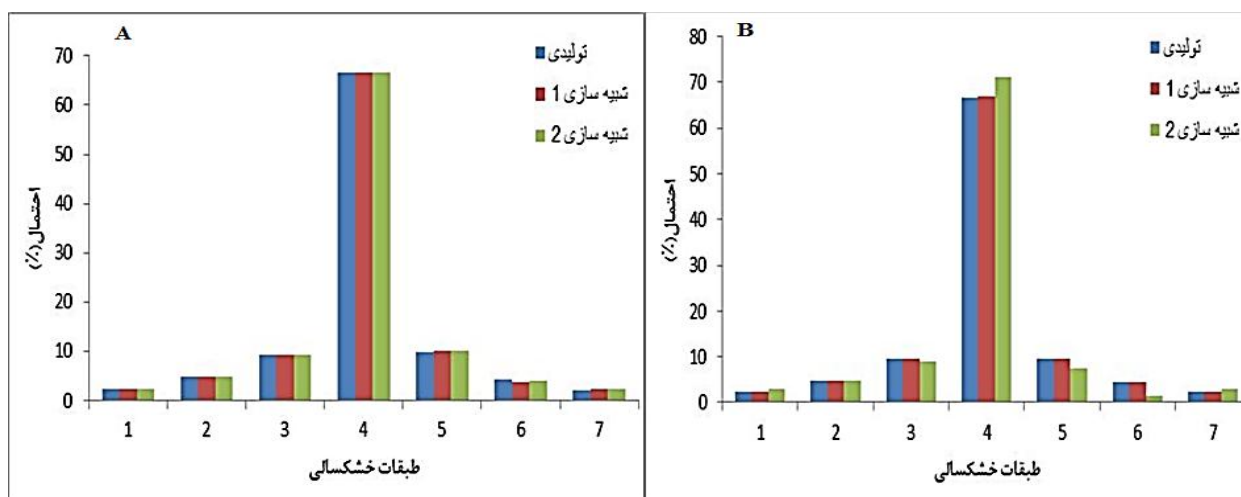
جدول ۴- ضرایب اصلاح شده فایل سناریوی RCP8.5 در دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۹۹

پارامتر ماه	[1]	[2]	[3]	[4]
Jan	0.12	2.26	2.00	0.65
Feb	0.18	2.02	1.42	0.67
Mar	0.17	2.05	1.32	0.68
Apr	0.18	1.82	1.43	0.60
May	0.20	2.27	2.40	0.69
Jun	0.16	2.58	2.27	0.71
Jul	0.02	3.49	3.79	0.64
Aug	0.70	3.49	3.27	0.76
Sep	0.19	3.28	3.19	0.59
Oct	0.45	2.95	2.50	0.71
Nov	0.18	2.35	2.70	0.52
Dec	0.39	2.05	2.05	0.66

برای سناریوهای تغییر اقلیم و برای متغیرهای آب و هوایی در ستون‌های ۱- تغییرات نسبی میانگین بارش ماهانه، ۲- تغییرات مطلق میانگین دمای حداقل ماهانه نسبت به دوره پایه، ۳- تغییرات مطلق میانگین دمای حداکثر ماهانه نسبت به دوره پایه و ۴- تغییرات نسبی انحراف معیار میانگین دمای روزانه دوره پایه آمده است. در ادامه جهت تحلیل خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک با استفاده از مدل بکار گرفته شده در این تحقیق، داده‌های دبی جریان رودخانه‌ها برای دوره‌های آتی تولید شدند.

مقایسه شاخص SDI براساس طبقه‌بندی مقادیر ترسالی و خشک‌سالی

جهت برآورد احتمالات مربوط به دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی، ابتدا مقادیر مختلف شاخص‌های خشک‌سالی از داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی محاسبه شدند و سپس مقادیر شاخص SDI به هفت کلاس بصورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند: (۳+) ترسالی بسیار شدید، (۲+) ترسالی متوسط (۱+) ترسالی ضعیف، (۰) نرمال، (۱-) خشک‌سالی ضعیف، (۲-) خشک‌سالی متوسط، (۳-) خشک‌سالی شدید. شکل ۵ احتمالات دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی را در ایستگاه‌های نمونه نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی حاصل از پدیده‌ها و فرایندهای طبیعی می‌باشند، انتظار می‌رود که از توزیع نرمال تبعیت کنند، لذا مقایسه حالت نرمال (۱- تا ۱+) با حالت میانگین توزیع نرمال برابر ۶۸/۲۶٪ و حالت بین (۲- تا ۲+) که برابر ۹۵/۴۴٪ و حالت (۳- تا ۳+) برابر ۹۹٪ است، در اینجا می‌تواند مبنای مقایسه قرار گیرد. با توجه به این که در اینجا شاخص مورد مطالعه، شاخص دبی استاندارد شده (SDI) می‌باشد، بر اساس این شاخص توزیع خشک‌سالی بیشتر به صورت نرمال می‌باشد (منظور از توزیع خشک‌سالی فراوانی دوره‌ها و کلاس‌های خشک‌سالی می‌باشد که با تبعیت پارامترها از توزیع‌های برازش یافته تفاوت دارد). شکل ۵ کلاس بندی دوره‌های خشک‌سالی برای ایستگاه‌های نمونه برای هر سه حالت را نشان می‌دهد.



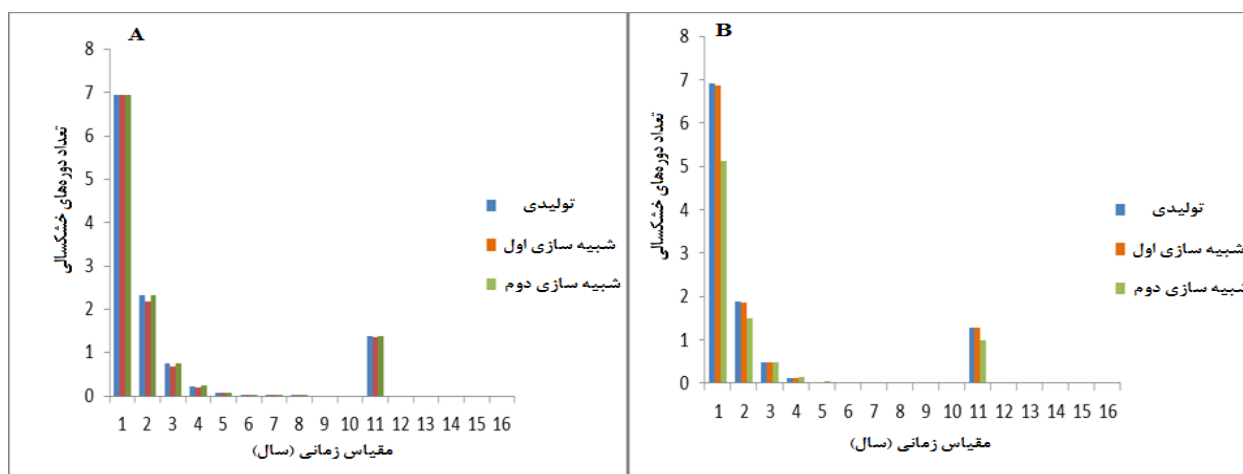
شکل ۵- طبقات خشک‌سالی و ترسالی بر اساس شاخص SDI دوازده ماهه در دو ایستگاه نمونه تپیک (A) و تازه کند (B)، برای سه دوره داده‌های تولیدی بدون تغییر اقلیم و داده‌های شبیه‌سازی شده با اعمال تغییر اقلیم

تعداد دوره‌های خشک‌سالی

برای تعیین تعداد دوره‌های خشک‌سالی، از نتایج مدل اقلیمی و مدل شبیه‌سازی استوکاستیک خشک‌سالی استفاده شد. این شناسایی دوره‌های خشک، بر اساس مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص SDI و با تکیه بر داده‌های تاریخی (بدون اعمال تغییر اقلیم)، داده‌های شبیه‌سازی اول و دوم (با اعمال تغییرات اقلیمی) انجام گردید. سپس، میانگین ۱۰۰۰ نمونه از دوره‌های خشک‌سالی برای طول‌های ۱، ۲، ۳، ...، ۱۴ ساله محاسبه شد (شکل ۶). همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تعداد دوره‌های خشک‌سالی در داده‌های تولیدی نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده، برای ایستگاه‌های نمونه، روند افزایشی دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در بیشتر ایستگاه‌های واقع در شرق دریاچه ارومیه (استان آذربایجان شرقی)، در دوره‌های آبی نوساناتی در تعداد دوره‌های خشک‌سالی رخ خواهد داد. همچنین در برخی ایستگاه‌های واقع در استان آذربایجان غربی نیز چنین نوساناتی پیش‌بینی می‌شود. این موضوع خود گواهی بر وقوع تغییرات اقلیمی در دوره‌های آینده است.

از میان ایستگاه‌های مورد مطالعه، در بخش داده‌های تولیدی، بیشترین تعداد دوره‌های خشک‌سالی مربوط به ایستگاه تپیک با ۶۰۹۵ دوره خشک‌سالی یک‌ساله و کمترین آن مربوط به ایستگاه لیقوان با ۲۰۲۷ دوره است. در شبیه‌سازی دوم، بیشترین دوره خشک مربوط به ایستگاه تپیک با ۶۰۹۴ دوره و کمترین آن مربوط به ایستگاه ونیار با ۳۰۳۸ دوره می‌باشد. همچنین در همین شبیه‌سازی، بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه لیقوان با ۶۰۹۵ دوره و کمترین آن مربوط به ایستگاه صفاخانه با ۳۰۳۸ دوره است. این تغییرات در اعداد، به وضوح نشان‌دهنده تأثیر تغییر اقلیم بر حوضه دریاچه ارومیه در دوره‌های آبی است.

به طور کلی، نتایج محاسبات نشان می‌دهد که بر اساس شاخص SDI و پارامتر تعداد دوره‌های خشک‌سالی، در آینده با دوره‌های خشک‌سالی متنوعی مواجه خواهیم بود. این موضوع حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی‌های استوکاستیک خشک‌سالی و همچنین سناریوها و مدل‌های اقلیمی در تحلیل منابع آب و خشک‌سالی است. بر این اساس، این تحلیل‌ها هشدار می‌دهند که در دوره‌های آینده رویدادهای خشک‌سالی بیشتری رخ خواهد داد، بنابراین، اتخاذ تمهیدات لازم برای کنترل و مقابله با خشک‌سالی‌های آبی امری ضروری است.

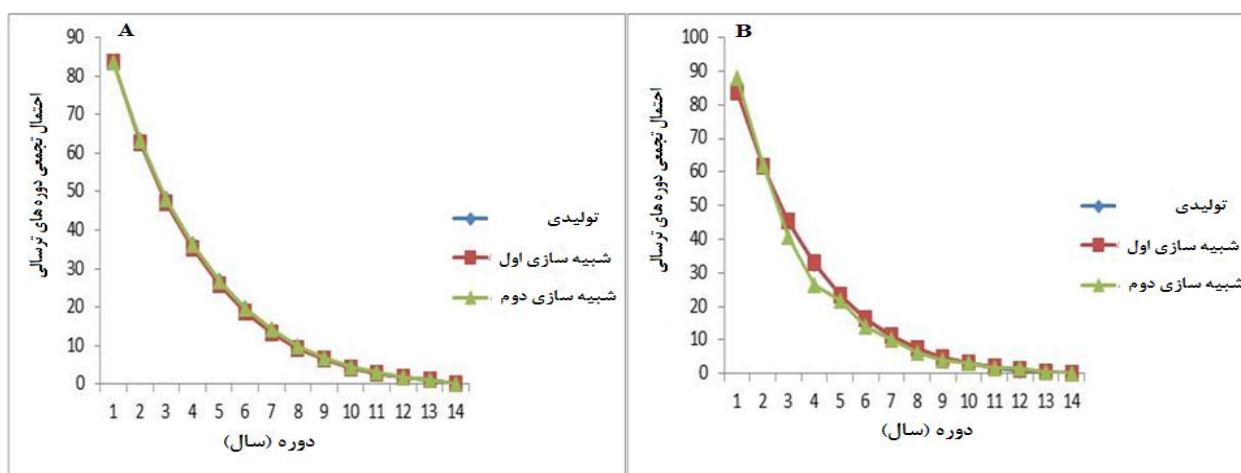


شکل ۶- تعداد دوره‌های خشک‌سالی بر اساس شاخص SDI دوازده ماهه در دو ایستگاه نمونه تپیک (A) و تازه کند (B)، برای سه دوره داده‌های تولیدی بدون تغییر اقلیم و داده‌های شبیه‌سازی شده با اعمال تغییر اقلیم

احتمال دوره‌های ترسالی

به منظور برآورد احتمال تجمعی دوره‌های ترسالی، از شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف (۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ماهه) استفاده شد. این برآورد بر اساس سه دسته داده انجام گردید: داده‌های تاریخی (بدون اعمال تغییر اقلیم)، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی اول و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی دوم (هر دو با اعمال تغییرات اقلیمی). مراحل کار به شرح زیر است:

۱. ابتدا با استفاده از داده‌های تاریخی و مدل‌های سری زمانی، داده‌های مصنوعی در ۱۰۰۰ تکرار تولید شد.
۲. برای داده‌های شبیه‌سازی، با همان مدل‌های مرحله قبل و همچنین با به کارگیری مدل‌های هیدرولوژیکی (مدل‌های ریاضی) و سناریوهای اقلیمی، داده‌های مربوط به دوره‌های آبی تعیین گردید. سپس، میانگین ۱۰۰۰ نمونه از دوره‌های خشک‌سالی بر اساس طول دوره‌های یک‌ساله، دو ساله، سه ساله، ... تا ده ساله محاسبه شد.
- در نهایت، با استفاده از این داده‌ها، احتمال تجمعی دوره‌های ترسالی (برای دوره‌های یک‌ساله، دو ساله، سه ساله، ... و ده ساله) بر روی محور افقی (X) تعیین شد (شکل ۷).



شکل ۷- احتمال تجمعی دوره‌های ترسالی بر اساس شاخص SDI دوازده ماهه، برای داده‌های تولیدی دبی بدون تغییر اقلیم و داده‌های شبیه‌سازی شده با اعمال تغییر اقلیم

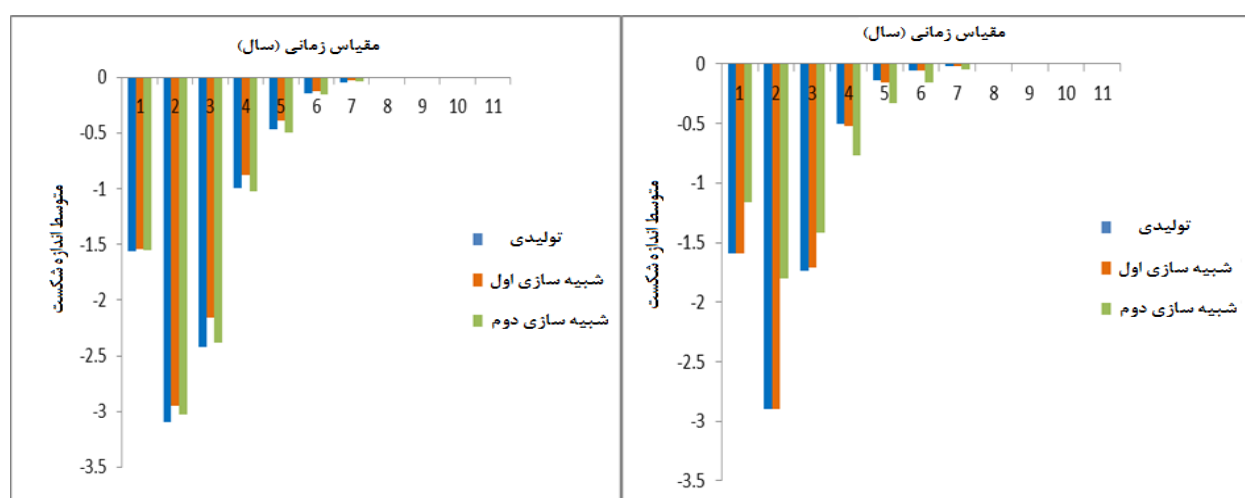
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، احتمال تجمعی دوره‌های ترسالی یک‌ساله نسبت به سایر دوره‌ها بیشتر است. این موضوع از منظر تحلیل‌های هیدرولوژیکی و خشک‌سالی کاملاً قابل قبول می‌باشد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در بیشتر ایستگاه‌های واقع در شرق دریاچه (استان آذربایجان شرقی)، در دوره‌های آتی، احتمال تجمعی دوره‌های ترسالی کاهش خواهد یافت. این امر حاکی از وقوع تغییرات اقلیمی در دوره‌های آینده است.

از میان ایستگاه‌های مورد مطالعه (شش ایستگاه نمونه که در اینجا ذکر شده است)، در بخش داده‌های تولیدی، بیشترین احتمال تجمعی دوره‌های ترسالی مربوط به ایستگاه لیقوان با ۸۷/۵۳ درصد و کمترین آن مربوط به ایستگاه تپیک با ۸۳/۴۴ درصد است. در شبیه‌سازی دوم، بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه ونیار با ۸۶/۹۹ درصد و کمترین آن مربوط به ایستگاه صفاخانه با ۸۳/۴۹ درصد می‌باشد. همچنین در همین شبیه‌سازی، بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه صفاخانه با ۹۱/۹۳ درصد و کمترین آن مربوط به ایستگاه لیقوان با ۸۳/۴۴ درصد است. این تغییرات در اعداد به وضوح نشان‌دهنده تأثیر تغییر اقلیم بر حوضه دریاچه ارومیه در دوره‌های آتی است.

نتایج این محاسبات نشان می‌دهد که بر اساس شاخص SDI و احتمال تجمعی دوره‌های ترسالی، در دوره‌های آتی با دوره‌های ترسالی یک‌ساله مواجه خواهیم بود. به عنوان مثال، احتمال عدم وقوع دوره ترسالی یک‌ساله برای ایستگاه تپیک در داده‌های تولیدی حدود ۱۷ درصد، در شبیه‌سازی اول تقریباً ۱۷ درصد و در شبیه‌سازی دوم نیز ۱۷ درصد برآورد شده است. این موضوع حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی‌های استوکاستیک خشک‌سالی در تحلیل منابع آب و خشک‌سالی است.

احتمال فواصل بین دو خشک‌سالی متوالی

در این تحقیق، برای برآورد شدت خشک‌سالی از شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده شد. این برآورد برای سه دسته داده انجام گردید: داده‌های تولیدی حاصل از داده‌های تاریخی (بدون اعمال تغییر اقلیم) و داده‌های شبیه‌سازی اول و دوم (با اعمال تغییرات اقلیمی). بدین منظور، مجموع مقادیر خشک‌سالی محاسبه‌شده توسط شاخص SDI در هر دوره، بر تعداد دوره‌های مربوطه تقسیم شد. به عنوان مثال، شدت خشک‌سالی یک‌ساله از تقسیم مجموع مقادیر خشک‌سالی یک‌ساله بر تعداد دوره‌های یک‌ساله به دست آمد. لازم به ذکر است که مجموع مقادیر خشک‌سالی به صورت اعداد منفی هستند؛ بنابراین، برای درک بهتر، شدت خشک‌سالی در این بخش به صورت مقادیر مثبت در نظر گرفته شده است. شکل ۸ نمونه‌ای از شدت خشک‌سالی محاسبه‌شده توسط شاخص SDI را برای ایستگاه‌های نمونه نشان می‌دهد.

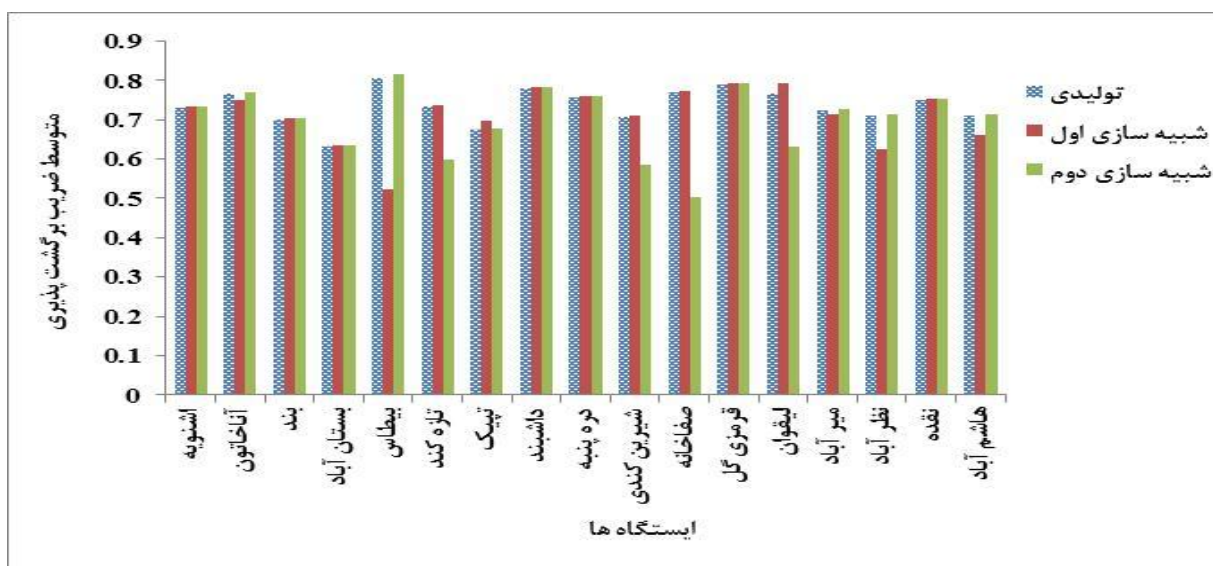


شکل ۸- شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص SDI دوازده ماهه در دو ایستگاه نمونه تپیک (A) و تازه کند (B)، برای سه دوره داده‌های تولیدی بدون تغییر اقلیم و داده‌های شبیه‌سازی شده با اعمال تغییر اقلیم

ضریب برگشت پذیری

ضریب برگشت پذیری (Resilience) بیانگر احتمال بازگشت سیستم به حالت عادی پس از پایان یک دوره خشک سالی است. هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشد، نشان دهنده سرعت بالاتر بازگشت از حالت خشک به حالت نرمال است. بر اساس این شاخص و برای سه دسته داده (داده‌های تولیدی، شبیه سازی اول و شبیه سازی دوم)، بیشترین ضریب برگشت پذیری در داده‌های تولیدی، در میان ۱۶ ایستگاه مورد مطالعه، مربوط به ایستگاه بیطاس با احتمال ۸۰/۹٪ بود. برای شبیه سازی اول و دوم، بیشترین ضریب به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های لیقوان (۸۱/۴٪)، میرآباد قرمزی گل و بیطاس (۷۹/۲٪) می‌باشد. این اعداد بیانگر آن است که در ایستگاه‌های یادشده، به ترتیب با این احتمالات، بازگشت از حالت خشک به نرمال رخ می‌دهد.

کمترین ضریب برگشت پذیری نیز به ترتیب مربوط به ایستگاه ونیاد در داده‌های تولیدی و شبیه سازی اول (۴۱/۴٪ و ۵۵/۸٪) و ایستگاه صفاخانه در شبیه سازی دوم (۵۰/۳٪) است. بر اساس این شاخص، در ایستگاه‌های مذکور با این احتمالات، امکان بازگشت از خشک سالی به حالت نرمال وجود دارد. به طور کلی، هرچه ضریب برگشت پذیری کوچک تر باشد، بازگشت از خشک سالی به نرمال دشوارتر و کندتر خواهد بود. در اکثر ایستگاه‌ها، بر اساس این شاخص، تغییرات محسوسی در ضرایب برگشت پذیری مربوط به شبیه سازی دوم مشاهده شد. این موضوع حاکی از آن است که در دوره سی ساله دوم (افق دورتر)، بیشتر با پیامدهای تغییر اقلیم مواجه خواهیم بود. شکل (۹) ضریب برگشت پذیری را برای ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۹- ضریب برگشت پذیری بر اساس شاخص SDI برای داده‌های تولیدی دبی بدون تغییر اقلیم و داده‌های شبیه سازی شده با اعمال تغییر اقلیم

ماتریس احتمال انتقال

ماتریس احتمال انتقال، ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت و بلندمدت در تحلیل خشک سالی است. در این بخش، مقادیر شاخص SDI ثابت ۱۲ ماهه به هفت کلاس تقسیم بندی شدند: ترسالی شدید (۳+)، ترسالی متوسط (۲+)، ترسالی ضعیف (۱+)، نرمال (۰)، خشک سالی ضعیف (۱-)، خشک سالی متوسط (۲-) و خشک سالی شدید (۳-). با استفاده از ماتریس احتمال انتقال، می‌توان احتمال گذر از هر حالت به حالت دیگر را تعیین کرد. پایدارترین حالت سیستم نیز با استفاده از ماتریس احتمال ایستا (Stationary Matrix) محاسبه می‌شود که از ضرب بی نهایت ماتریس انتقال در خود به دست می‌آید. در این مطالعه، پس از هشت بار ضرب متوالی، برای هر سه دسته داده (داده‌های تولیدی بدون اعمال تغییر اقلیم، شبیه سازی اول و دوم با اعمال تغییر اقلیم)، به ماتریس حالت پایدار (ایستا) دست یافتیم. جدول ۵ ماتریس احتمال انتقال و ماتریس ایستا را بر اساس شاخص SDI ثابت ۱۲ ماهه برای چند ایستگاه نمونه نشان می‌دهد.

به عنوان مثال، در ایستگاه تازه‌کند، احتمال گذر از حالت خشک‌سالی شدید به خشک‌سالی متوسط برای سه دسته داده به ترتیب برابر است با: (۰/۰۹، ۰/۰۹) برای داده‌های تولیدی، (۰/۰۶، ۰/۱۰) برای شبیه‌سازی اول و (۰/۲۹، ۰/۰۴) برای شبیه‌سازی دوم. تغییر در این اعداد در شبیه‌سازی‌های اول و دوم، بیانگر تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آبی است. در حالت داده‌های تولیدی، احتمال گذر از خشک‌سالی شدید به هر دو حالت خشک‌سالی شدید و متوسط تقریباً برابر است. بر اساس این شاخص، در اکثر ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه، در دوره‌های آبی تأثیر تغییرات اقلیمی قابل مشاهده خواهد بود. در میان ایستگاه‌های بررسی‌شده، بیشترین احتمال گذر از خشک‌سالی شدید به خشک‌سالی بسیار شدید مربوط به ایستگاه ونیار در شبیه‌سازی اول با ۴۱٪ است. همچنین بیشترین احتمال گذر از خشک‌سالی شدید به حالت نرمال، مربوط به ایستگاه ليقوان در داده‌های تولیدی با ۸۳٪ می‌باشد. بر اساس ماتریس احتمال انتقال، بیشترین مقدار احتمال گذر مربوط به انتقال از حالت خشک‌سالی بسیار شدید به حالت نرمال برای هر سه دسته داده است. این یافته با مبانی نظری تحلیل‌های هیدرولوژیکی همخوانی دارد، زیرا در یک دوره آماری طولانی، حتی در بدترین شرایط اقلیمی، تعداد سال‌های نرمال در مناطقی با اقلیم مشابه آذربایجان غربی بیشترین فراوانی را دارد. با این حال، آنچه اهمیت دارد، تغییر در الگوهای گذر بین حالات مختلف خشک‌سالی است که به عنوان مهم‌ترین شاخص تأثیر تغییر اقلیم در نظر گرفته می‌شود.

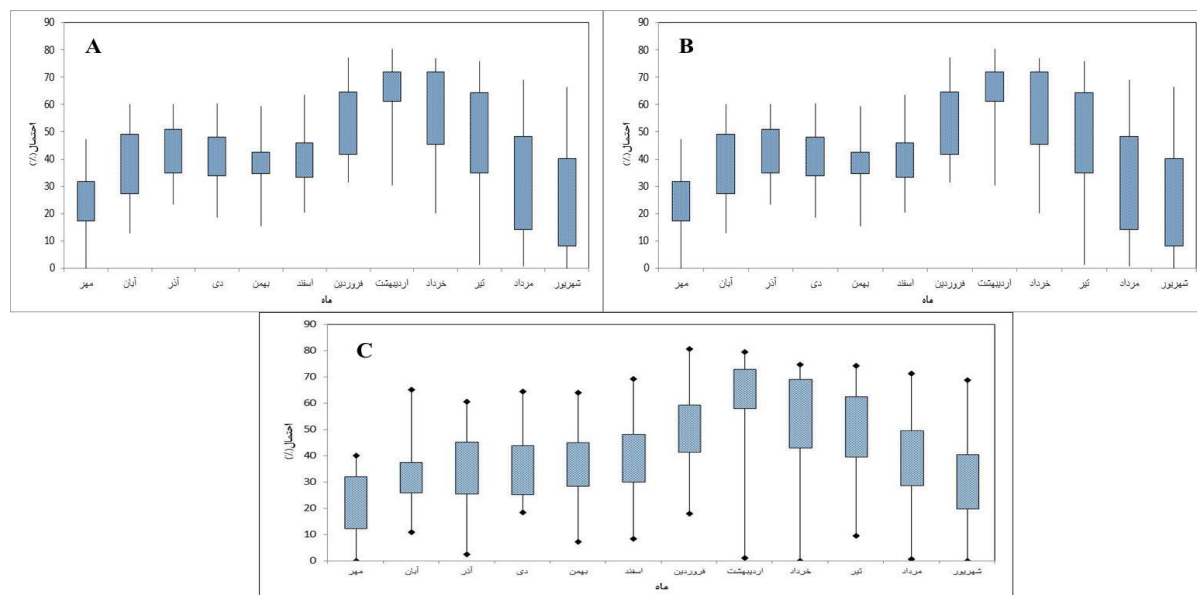
جدول ۵- ماتریس احتمال انتقال برای ۶ ایستگاه نمونه از بین ۲۸ ایستگاه مورد مطالعه برای داده‌های تولیدی دبی با استفاده از شاخص SDI ثابت ۱۲ ماهه

ایستگاه		تپیک (تولیدی)							تازه کند (تولیدی)						
طبقات	ایستگاه	-3	-2	-1	0	1	2	3	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	0.22	0.04	0.03	0.02	0.01	0	0	0.06	0.04	0.05	0.02	0.01	0.01	0
-2	-2	0.06	0.11	0.08	0.03	0.01	0.01	0.01	0.1	0.09	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01
-1	-1	0.11	0.2	0.19	0.1	0.05	0.03	0.03	0.15	0.17	0.13	0.09	0.05	0.04	0.03
0	0	0.57	0.61	0.65	0.69	0.64	0.61	0.56	0.64	0.65	0.66	0.68	0.66	0.62	0.62
1	1	0.03	0.03	0.04	0.09	0.15	0.16	0.22	0.03	0.04	0.06	0.09	0.13	0.15	0.19
2	2	0.01	0.01	0.02	0.04	0.09	0.12	0.14	0.01	0.02	0.02	0.05	0.08	0.11	0.11
3	3	0	0	0	0.02	0.06	0.07	0.04	0.01	0	0.01	0.02	0.05	0.05	0.03
ایستگاه		تپیک (شبیه سازی ۱)							تازه کند (شبیه سازی ۱)						
طبقات	ایستگاه	-3	-2	-1	0	1	2	3	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	0.15	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.12	0.04	0.04	0.02	0	0.01	0
-2	-2	0.05	0.07	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.08	0.1	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01
-1	-1	0.08	0.16	0.13	0.1	0.07	0.06	0.05	0.15	0.18	0.15	0.1	0.05	0.03	0.03
0	0	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.65	0.61	0.62	0.65	0.68	0.65	0.61	0.58
1	1	0.04	0.05	0.06	0.09	0.12	0.12	0.16	0.03	0.04	0.05	0.09	0.14	0.16	0.21
2	2	0.02	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.09	0.01	0.01	0.02	0.04	0.09	0.12	0.13
3	3	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.05	0.03	0	0	0.01	0.02	0.06	0.06	0.04
ایستگاه		تپیک (شبیه سازی ۲)							تازه کند (شبیه سازی ۲)						
طبقات	ایستگاه	-3	-2	-1	0	1	2	3	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	0.21	0.04	0.03	0.02	0	0	0	0.29	0.07	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
-2	-2	0.07	0.12	0.09	0.04	0.01	0.01	0	0.04	0.2	0.02	0.01	0.01	0	0.01
-1	-1	0.13	0.22	0.19	0.1	0.04	0.03	0.02	0.04	0.07	0.23	0.07	0.05	0.03	0.03
0	0	0.55	0.58	0.64	0.69	0.64	0.58	0.55	0.56	0.57	0.66	0.74	0.67	0.66	0.63
1	1	0.03	0.03	0.03	0.09	0.15	0.18	0.22	0.04	0.07	0.05	0.08	0.13	0.13	0.17
2	2	0	0.01	0.02	0.04	0.09	0.12	0.15	0.02	0.01	0.02	0.04	0.07	0.1	0.11
3	3	0	0	0	0.02	0.06	0.08	0.05	0	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.05

از دیدگاه اقلیم‌های محلی (میکرواقلیم)، بنظر می‌رسد دریاچه ارومیه به عنوان یک عامل مؤثر بر اقلیم منطقه عمل کرده است، به گونه‌ای که می‌توان تغییرات اقلیمی را تا حدی متأثر از وضعیت دریاچه دانست. این مسئله منجر به ایجاد یک سلسله‌تأثیرات متقابل بین دریاچه و اقلیم منطقه شده است. شواهد نشان می‌دهد که در فاصله زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵، تغییرات قابل توجهی در تراز آب دریاچه رخ داده است که نیازمند بررسی دقیق‌تر علل ناگهانی این تغییرات است. جزئیات مربوط به احتمالات گذر بین حالات مختلف خشکسالی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه و برای سه دسته داده‌های تولیدی، شبیه‌سازی اول و دوم در جدول ۵ ارائه شده است.

فراوانی وقوع خشکسالی در ماه‌های مختلف سال

یکی از موارد بررسی‌شده در این مطالعه، فراوانی وقوع خشکسالی در ماه‌های مختلف سال بود. نتایج نشان داد که کمترین تأثیر خشکسالی بر میزان دبی مربوط به ماه مهر (مهرماه) است. میانگین بلندمدت احتمال وقوع خشکسالی در این ماه برای سه دسته داده (تولیدی، شبیه‌سازی اول و شبیه‌سازی دوم) به ترتیب ۲۵٪، ۲۲٪ و ۲۳٪ است. در مقابل، بیشترین تأثیر مربوط به ماه اردیبهشت است که مقادیر متناظر برای سه دسته داده مذکور به ترتیب ۶۴٪، ۶۰٪ و ۵۶٪ می‌باشد. تغییرات مشاهده‌شده در این مقادیر میانگین بلندمدت در ماه‌های مختلف، بیانگر تأثیرپذیری الگوی خشکسالی از تغییرات اقلیمی است. بر اساس این یافته‌ها، بیشترین تأثیر خشکسالی بر میزان دبی رودخانه‌ها مربوط به ماه اردیبهشت و کمترین آن مربوط به ماه مهر است. این موضوع با اصول و تحلیل‌های هیدرولوژیکی همخوانی کامل دارد، زیرا بیشترین میزان دبی رودخانه‌ها معمولاً در ماه اردیبهشت مشاهده می‌شود و به همین دلیل، کاهش دبی ناشی از خشکسالی در این ماه بیشتر نمایان می‌شود. در مقابل، در ماه مهر که دبی رودخانه‌ها به کمترین مقدار خود در طول سال می‌رسد، اثر کاهش خشکسالی بر دبی محسوس نیست. بنابراین، در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین تأثیر خشکسالی بر دبی مربوط به ماه اردیبهشت است.



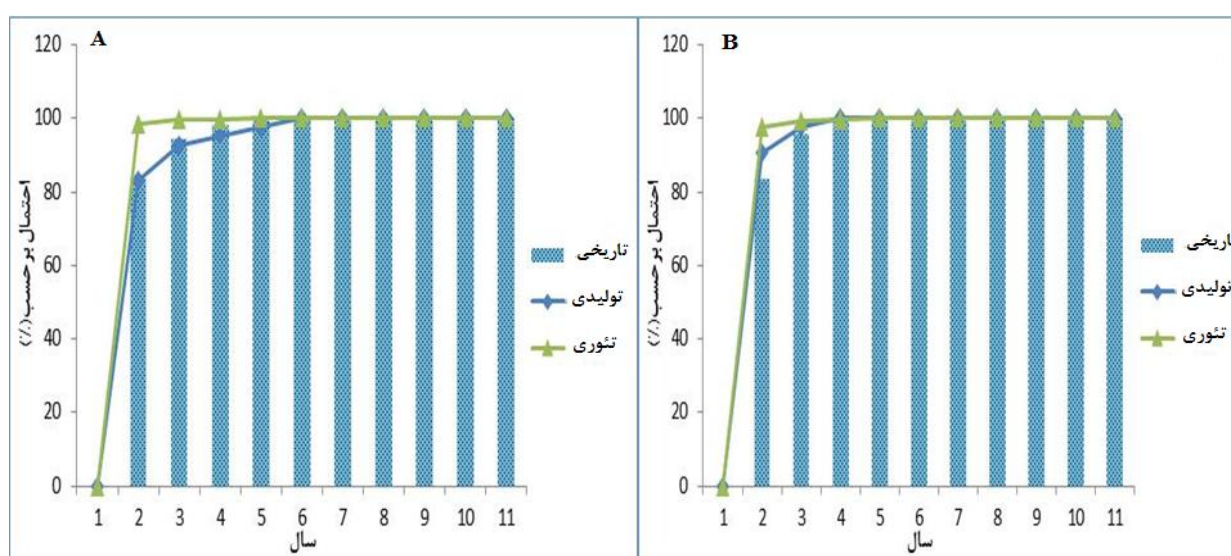
شکل ۱۰- فراوانی وقوع خشکسالی در ماه‌های مختلف بر اساس شاخص SDI دوازده ماهه برای داده‌های تولیدی دبی A: شبیه‌سازی اول، B: شبیه‌سازی دوم و C: با اعمال تغییرات اقلیم

ارزیابی تحلیل خشکسالی بر اساس داده‌های تاریخی، تولیدی و توزیع تئوری آن

در این مرحله، مشابه بخش قبلی، پس از تعیین مقادیر شاخص SDI برای داده‌های تاریخی و تولیدی (که از میانگین ۱۰۰۰ نمونه تکراری به دست آمده بودند)، تعداد دوره‌های خشکسالی با طول‌های یک‌ساله، دو ساله، ... تا یازده ساله مشخص گردید. سپس، با استفاده از داده‌های مشاهداتی، احتمال تجمعی عدم وقوع خشکسالی برای داده‌های تاریخی، داده‌های تولیدی و توزیع

تئوری استخراج‌شده از ماتریس انتقال محاسبه شد. بدین منظور، ابتدا شاخص SDI بر اساس داده‌های مشاهداتی محاسبه گردید. همچنین در این بخش، برای ارزیابی مدل از توابع توزیع تئوری استفاده شد.

شکل ۱۱ احتمالات تجمعی عدم وقوع خشک‌سالی را در دوره‌های مختلف، برای همه ایستگاه‌ها و بر اساس داده‌های تاریخی و توابع توزیع تئوری نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، احتمال تجمعی عدم وقوع خشک‌سالی برای داده‌های تاریخی و تولیدی در ایستگاه‌های مورد مطالعه تقریباً مشابه یکدیگر است. با این حال، این احتمال برای توزیع تئوری کمتر بوده، به گونه‌ای که از دوره‌های سه ساله به بعد به مقدار ثابتی می‌رسد. بر اساس این شاخص، کمترین احتمال تجمعی برای دوره‌های یک‌ساله در اکثر ایستگاه‌ها مربوط به داده‌های تاریخی است، در حالی که بیشترین مقدار آن مربوط به توزیع تئوری می‌باشد. همچنین، مشابه تحلیل‌های پیشین، بیشترین تغییرات بین سه حالت (تاریخی، تولیدی و تئوری) در ایستگاه‌های واقع در حوضه آذربایجان شرقی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱- احتمال تجمعی عدم وقوع خشک‌سالی بر اساس شاخص SDI دوازده ماهه برای دو دوره تاریخی و تولیدی و توزیع تئوری آن

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی، منابع آب و خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک در حوضه دریاچه ارومیه انجام شد. در این مطالعه، تغییرات احتمالی دما، بارش، رطوبت نسبی، تبخیر و دبی (به عنوان مهم‌ترین پارامترهای متأثر از تغییر اقلیم) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، با استفاده از مدل سری زمانی $AR(p)$ ، داده‌های مصنوعی در ۱۰۰۰ تکرار تولید شد. سپس، تغییرات احتمالی داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از سناریوهای اقلیمی RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 و مدل‌های گردش عمومی جو (MPSI-ESM-LR)، BCC-CSM1-1 و NORESM1-M برای سه افق زمانی نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، میانی (۲۰۴۰-۲۰۷۰) و دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) شبیه‌سازی شد. در نهایت، پارامترهای خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص SDI استخراج گردید. به طور خلاصه، نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

۱. مقایسه میانگین ماهانه و فصلی دما و بارش مدل‌های مختلف با داده‌های مشاهداتی شش ایستگاه منتخب در حوضه دریاچه ارومیه نشان داد که مدل NORESM1-M از عملکرد بهتری برخوردار است و بالاترین ضریب همبستگی را دارد.
۲. بر اساس ضرایب همبستگی به دست آمده برای سناریوهای مختلف، بهترین سناریو برای مطالعات بارش، سناریوی RCP6 با ضریب همبستگی ۰/۷۶۳ و برای مطالعات دما، سناریوی RCP4.5 با ضریب همبستگی ۰/۹۹۴ تعیین شد. مقایسه سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش با محدوده نوسانات درونی این دو متغیر نشان‌دهنده معنی‌دار بودن سناریوهای ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای است. تغییرات دما در اواخر قرن بیست و یکم بیشتر از اوایل آن خواهد بود. همچنین تغییرات بارش

در افق میانی بیشتر از افق دور و در افق دور بیشتر از افق نزدیک مشاهده شد. بررسی توزیع بارش در ایستگاه‌های مختلف در دوره‌های آتی حاکی از تغییرات اندک در الگوی توزیع بارش نسبت به دوره پایه است.

۳. مدل‌های تولید داده مصنوعی برای داده‌های سالانه و ماهانه با طول دوره آماری کمتر از ۳۰ سال، قادر به حفظ مشخصات آماری شامل میانگین، انحراف معیار، چولگی و همبستگی بین دو ماه متوالی در سطح قابل قبولی هستند؛ هرچند با افزایش طول دوره آماری، عملکرد مدل مطلوب‌تر می‌شود.

۴. مقایسه دوره‌های مختلف شاخص SDI در دو حالت متحرک و ثابت برای داده‌های تاریخی، تولیدی، شبیه‌سازی اول و دوم نشان داد که دوره‌های ۱۲ ماهه ثابت و همچنین ۱۲ ماهه متحرک، رفتار طبیعی‌تری از پدیده خشکسالی را نمایش می‌دهند؛ به همین دلیل این دوره‌ها به عنوان مبنای پژوهش حاضر انتخاب شدند.

۵. شاخص SDI ماهانه نشان می‌دهد که در دوره آماری تولیدی، میانگین شدت خشکسالی در دوره‌های پیوسته تقریباً در حد متوسط است. این وضعیت در داده‌های تولیدی، شبیه‌سازی اول و دوم نیز مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه در اکثر ایستگاه‌ها، حداکثر تداوم دوره‌های خشکسالی در آینده افزایش خواهد یافت، وقوع خشکسالی‌های شدید از نظر هیدرولوژیکی و کشاورزی در آینده محتمل به نظر می‌رسد. این پدیده در داده‌های شبیه‌سازی‌شده با اعمال تغییرات اقلیمی نیز تأیید شده است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش کد اخلاق را به شماره از کمیته اخلاق دانشکده/دانشگاه دریافت کرده است. نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: ذبیح الله خانی تملیه؛ زهرا شمسی؛ شهاب شادمهر؛ تهیه پیش‌نویس مقاله: ذبیح الله خانی تملیه، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، تحلیل و کنترل نتایج، بازبینی متن مقاله: رسول میرعباسی نجف آبادی؛ تحلیل داده‌ها: ذبیح الله خانی تملیه و زهرا شمسی.

مشارکت نویسندگان در مقاله تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس، اصلاح و نهایی سازی مقاله.

نویسنده دوم: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، ارزیابی، بازبینی و نهایی سازی مقاله.

نویسنده سوم: مشارکت در طراحی پژوهش، تهیه پیش‌نویس، مطالعه و بازبینی مقاله.

نویسنده چهارم: مشارکت در تجزیه و تحلیل داده‌ها، تهیه پیش‌نویس، مطالعه و بازبینی مقاله.

نویسنده پنجم: مشارکت در تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، بازبینی و ویرایش مقاله، ارزیابی مقاله.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت آب منطقه ای و سازمان هواشناسی استان آذربایجان غربی جهت فراهم نمودن داده‌ها سپاسگزاری نمایند. همچنین از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- احمدزاده، ح.، فاکری فرد، ا.، قربانی، م.ع.، تجریشی، م. (۱۴۰۰). تحلیل منطقه‌ای خشک‌سالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از شاخص RDI. *علوم آب و خاک*، ۲۵ (۳): ۱۳-۳۰.
- امیرعطایی، ب.، منتصری، م.، یاسی، م. (۱۳۹۲). مقایسه عملکرد ذاتی هفت شاخص خشک‌سالی رایج در پایش خشک‌سالی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو. *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، ۴۳ (۷۰): ۲۵-۳۹.
- آوند، م.ت.، مرادی، ح.ر.، حزباوی، ز. (۱۴۰۳). ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی زمان حال و پیش‌نگری آن در آینده در حوزه آبخیز تجن. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴ (۴): ۷۸-۵۷.
- بزرگ نیا، آب (۱۳۹۰). تجزیه و تحلیل سری زمانی و پیش بینی. انتشارات آستان قدس رضوی.
- جوان، خ. (۱۳۹۹). بررسی روند خشک‌سالی هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *هیدروژئومورفولوژی*، ۷ (۲۵): ۱۱۹-۱۳۸.
- حاجی آبادی، ف.، حسن پور، ف.، یعقوب زاده، م.، حمای، ح. (۱۴۰۴). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI در رژیم‌های مختلف آبیاری. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۴ (۱): ۸۴-۷۲.
- رمزخواه، ه.ف.، قهرمانی، ع.، فرارویی، ع.، رستمی راوری، ا. (۱۴۰۱). ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: رودخانه زهره. *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۲ (۳): ۸۱-۵۸.
- شاهی نژاد، ب.، شمس، ز.، خانی تملیه، ذ.، ارشیا، آ. (۱۴۰۱). تحلیل چند متغیره خشک‌سالی های هیدرولوژیکی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از تکنیک تولید داده مصنوعی و توابع مفصل. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۱ (۱۲): ۱۹-۱.
- فاتحی مرجع، ا.، برهانی داریان، ع.، مهدیان، م.ح. (۱۳۸۵). پیش بینی بارش فصلی با استفاده از پیوند از دور: مطالعه موردی حوزه آبریز دریاچه ارومیه. *نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۱۰ (۳): ۴۵-۵۷.
- فرد مرادی نیا، س.، باقری، ا.، جانی، ر.، فلسفیان، آ. (۱۴۰۳). تحلیل و بررسی شاخص‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: روستای ماهنشان از توابع استان زنجان). *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۴۰۳؛ ۱۸ (۶۵): ۸۴-۷۴.
- کاوایانی، م.ر. (۱۳۸۰). بررسی اقلیمی شاخص‌های خشکی و خشک‌سالی. *تحقیقات جغرافیایی*، ۱۶ (۱): ۷۱-۸۹.
- مرادی، م.، مرادی، ح.ر.، وفاخواه، م. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشک‌سالی هواشناسی (SPI) در حوزه آبخیز کارون. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۲ (۱): ۱۲۸-۱۱۳.
- نوروزی، ا.، محمدی، ز. (۱۳۹۵). بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی و آثار آن بر کشاورزی منطقه لنجان. *برنامه ریزی فضایی*، ۶ (۲): ۹۷-۱۱۶.
- یاراحمدی، ج.، رستمی زاد، ق. (۱۳۹۸). تحلیل خشک‌سالی های هیدرولوژیکی در شمال دریاچه ارومیه. *هیدروژئومورفولوژی*، ۵ (۱۹): ۷۹-۱۰۰.
- Ahmadzadeh, H., Fakheri Fard., A., ghorbani, M., tajrishy, M., 2021. Regional Analysis of Hydrological Drought in Ajichai Basin Using RDI Index. *JWSS*, 25 (3): 13-30. (In Persian).
- Alipour Modab, G., 2025. The effect of climate change on meteorological drought and hydrological drought assessment in Kohgilouye and Boyer Ahmad Province of Iran. *Water Practice & Technology*, 20(3), 746-764.
- Amirataee, B., Montaseri, M., Yasi, M., 2013. Comparison of Inherent Performance of Seven Drought Indices in Drought Mitigation Using a Monte Carlo Simulation Approach. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 43(70), 25-39. (In Persian).
- Anghel, C. G., Ilinca, C., 2023. Hydrological drought frequency analysis in water management using univariate distributions. *Applied Sciences*, 13(5), 3055.
- Arena, C., Cannarozzo, M., Mazzola, M. R., 2006. Multi-year drought frequency analysis at multiple sites by operational hydrology—A comparison of methods. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(18), 1146-1163.
- Arnell, N., W, N., S, Reynard., 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 183.3 (1996), 397-424.

- Avand, M., Moradi, H. R., Hazbavi, Z., 2024. Evaluation of present meteorological and hydrological drought and its future forecast in the Tajan Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(4), 57-78. (In Persian).
- Bozzorgnia, A., 2011. Time Series Analysis and forecasting, Publications Astan Quds Razvi. (In Persian).
- Deger, I. H., Yuce, M. I., Esit, M., 2025. Spatio-Temporal Variability of Hydrological Drought and Trends: Implementation of Classical and Innovative Approaches. *Water Resources Management*, 1-32.
- EskandariPour, M., Soltaninia, S., 2022. Analyzing the duration frequency and severity of drought using copula function in the Yazd city. *Journal of Water and Climate Change*, 13(1), 67-82.
- Fard Moradinia, S., Bagheri, E., Jani, R., Falsafian, A., 2024. Analysis and Investigation of Hydrological Drought Indicators in Mahenshan of Zanzan Province. *JWMSEIR*; 18 (65), 74-83, (In Persian).
- Fatehi Marj, A., Borhani Darian, M. H., Mahdian, Forecasting Seasonal Rainfall Using Teleconnection Pattern Case Study: Orumiyeh Lake Basin. *jwss* 2006; 10 (3) ,45-58. (In Persian).
- Glantz, M.H., Wigley, T.M.L., 1987. Climatic variations and their effects on water resources. (eds. McLaren, D.J. and skinner, B.J.) Resources and world development, Wiley, pp 625-641.
- Habibi, B., Meddi, M., Abdelkader, M., 2024. The frequency distribution and stochastic analysis of the hydrological drought in Northern Algeria. *Italian Journal of Agrometeorology*, (1), 73-94.
- Hajiabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., Hammami, H., 2025. Assessing the effect of climate change on agricultural drought by using of SMDI index in different Irrigation levels. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 4(1), 72-84. (In Persian)
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., Loucks, D.P., 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.*, 18, 14-20.
- Hisdal, Hege., Lena, M., Tallaksen., 2003. Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark. *Journal of Hydrology*, 281(3), 230-247.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC)., 2013. Climate Change 2013 The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Javan, K., 2021. Identification of hydrological drought trends in the Lake Urmia Basin. (In Persian). *Journal of Hydrogeomorphology*, 7(25), 138-119
- Kaviani, M.R., 2001. Climatic Investigation on aridity and drought indices. *Geograohical Research*, 16(1), 71-89.
- Kuzniar, A., Twardy, S., Kowalczyk, A., Kostuch, M., 2011. An assessment of the water requirements of a mountain pasture sward in the Polish Western Carpathians. *Journal of Water and Land Development*, 15, 193.
- Li, C., Qu, Y., Jiang, T., Jiang, F., Wang, Q., Zhang, X., Xu, X., 2024. Attribution analysis of hydrological drought after the impoundment of the Danjiangkou reservoir in the Hanjiang River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 102038.
- Ma, J., Cui, B., Hao, X., He, P., Liu, L., Song, Z., 2022. Analysis of hydrologic drought frequency using multivariate copulas in Shaying River Basin. *Water*, 14(8), 1306.
- McMahon, T.A., Mein, R.G. 1986. River and reservoir yield" Water Resource Publications, Littleton, Colorado.
- Monforte, P., Ragusa, M. A., Imposa, S., 2024. Drought Estimation in a Mediterranean Region: Case Study of Sicily from 1921 to 2023. *Available at SSRN* 4770437.
- Moradi, M., Moradi, H.R., Vafakhah, M., 2023. Investigating temporal and spatial changes of meteorological drought (SPI) in Karun watershed. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1), 113-128. (In Persian).
- Mutreja, K. N., 1976. Reservoir capacity for periodic-stochastic input and periodic output (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
- Nalbantis, I., 2008. Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water* 23/24, 67-77.
- Nawaz, N. R., Adeloye, A. J., Montaseri, M., 1999. The Impact of Climate Change on Storage-Yield Curves for Multi-Reservoir Systems. *Nordic Hydrology*, 30.2 (1999), 129-146.
- Norouzi, A., Mohammadi, Z., 2016. Survey of Hydrological Drought and its Effects on Lenjan Agricultural Region. *Spatial Planning*, 6(2), 97-116. (In Persian)
- Rahimi Kakehjub, S., Rezaie, H., Khalili, K., Nazeri Tahroudi, M., 2023. Hydrological Drought and Time Series Analysis: A Case Study of the Zarrinehrood Basin. *Water Harvesting Research*, 6(2), 183-194. (In Persian).
- Razmkhah, H., Ghahremani, E., Fararouie, A., Rostami Ravari, A., 2022. Assessment of meteorological and hydrological drought (Case study: Zohreh river). *Integrated Watershed Management*, 2(3), 58-81. (In Persian).
- Sabzevari, Y., Eslamian, S., Okhravi, S., 2025. Application and Evaluation of SPI and SPEI Indices in Drought Analysis. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 4(2), 79-90. (In Persian).

- Shahinejad, B., Shams, Z., Khani Temeliyeh, Z., Arshia, A., 2022. Multivariate Analysis of Hydrological Droughts in Urmia Lake basin Using Artificial Data Generation Technique and Copula Functions, 1(12), 1-19. (In Persian).
- Thompson, S. A., 1990. A Markov and Runs Analysis of Drought in the Central United States. *Physical Geography*, 11 (3), 191-205.
- Wang, Y., Peng, T., He, Y., Singh, V. P., Lin, Q., Dong, X., Wang, G., 2023. Attribution analysis of non-stationary hydrological drought using the GAMLSS framework and an improved SWAT model. *Journal of Hydrology*, 627, 130420.
- Wigley, T.M.L., Jonnes, P.D., 1985. Influences of precipitation changes and direct Co2 effect on stream flow, *Nature*, 314(6007), 31-50.
- Wilhite, D., A. M., H. Glantz., 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10, 11-112.
- Wilks, D. S., 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, San Diego, California, USA.
- Xu, C-Y., Singh, V.P., 1998. A review on water monthly balance model for water resources investigations, *Wat. Resour. Managt*, 12, 31-50.
- Yarahmadi, J., Rostamizad, G., 2019. The Analysis of the Hydrological Droughts in the Northern Part of Lake Urmia. *Journal of Hydrogeomorphology*, 6(19), 79-100. (In Persian).