

# Evaluation of present meteorological and hydrological drought and its future forecast in the Tajan Watershed

Mohammadtaghi Avand<sup>1\*</sup> , Hamidreza Moradi<sup>2</sup> , Zeinab Hazbavi<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Postdoctoral Researcher, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

## Abstract

### Introduction

In recent years, our country has experienced an increase in the frequency and severity of natural hazards such as floods, droughts, and pests. These changes can be attributed to shifts in climate variables. Due to its influential role in other natural hazards such as drought, climate can significantly impact the economy and people's lives. This is particularly evident in the agricultural, animal husbandry, and industrial sectors, where it can cause damage and destruction in various regions. Drought is one of the biggest climatic challenges that our country has been facing in recent years. When a drought occurs, it initially manifests as a meteorological drought. If the drought persists, it can lead to other types of droughts, including hydrogeological, agricultural, and economic droughts. Each of these droughts, as well as their cumulative impact, affects various aspects of the ecosystem within a watershed. Climatic changes cause many problems due to their impact on the temporal and spatial distribution of precipitation in various regions. Due to its gradual process and slow speed, this phenomenon has been operating for a relatively longer period. Its effects may be revealed after a few years and with a longer delay than other risks. This phenomenon has more tangible effects in rural areas because rural communities are more vulnerable. Therefore, understanding this phenomenon and analyzing and evaluating its impact on ecosystems within a watershed is crucial for effective planning and decision-making. This knowledge is necessary for the implementation of appropriate adaptation strategies.

### Material and Methods

To carry out this research, the required climatic data were first collected from the Meteorology and Regional Water Department of Mazandaran Province. The SPI (Standardized Precipitation Index) index was also used to evaluate meteorological drought. Additionally, to examine the trend of changes in flow rate, the data from existing hydrometric stations in the region, which have more comprehensive data, were utilized. Lars-WG software was used to project future climate (2023-2050) conditions under two climate scenarios: an optimistic scenario (RCP2.6) and a pessimistic scenario (RCP8.5). After preparing the current and future data, the DrinC software was used to determine drought thresholds based on the standard table for the SPI. In this research, the IHACRES hydrological model was also utilized to forecast future discharge. To achieve this objective, the future precipitation and temperature data obtained from the previous stage were utilized, along with the observed discharge data (1990-2020), to project the trend of discharge in the future (2022-2040). Subsequently, the hydrological drought of the Tajan Watershed was calculated at the outlet station (Kordkheil) using the SDI (Streamflow Drought Index) in the DrinC software. After analyzing the stream flow data and using the standard table associated with the SDI, the thresholds for hydrological drought were determined.

### Results and Discussion

The results of this study showed that, based on the SPI standard table, the degree of drought in the area under investigation has fluctuated between -3.3 (indicating very severe drought) and 2.4 (indicating extremely humid conditions) in recent years. Also, the future climate was projected for a period of approximately 27 years (2023-2050) under the influence of two optimistic scenarios (RCP2.6) and one pessimistic scenario (RCP8.5) at three selected stations (Kordkheil, Soleiman Tange, Rig Cheshme). The results of the climate drought conditions and the index values for the projected period (2023-2050) at Soleiman Tange station, in 12-month steps showed that there is a possibility of a severe climate drought occurring in this region during the water year 2049-2050. Also, the results show that there is no significant difference in the future drought index between the two scenarios. The results of the climate drought situation at Rig Cheshme station indicate a high likelihood of a severe climate drought in the region during the water year 2029-2030. Additionally, the results of the climate drought condition at Kordkheil station show that the condition at Kordkheil station differs somewhat from the other two stations, which are located at higher altitudes. This difference is likely due to the proximity of this station to the Caspian Sea, as the climate in that region is influenced by the coastal humidity. It can also be expected that there will be a severe drought in the water year 2032-2033 in this region. The results of the IHACRES model showed that the comparison chart of the simulated discharge and the observed discharge is in good agreement. Additionally, the error coefficient values obtained during the two stages of evaluation and recalibration were 0.48 and 0.53, respectively. These values indicate the model's acceptable ability to simulate future discharge. The results indicate that the discharge rate of the Watershed is unlikely to undergo significant changes in the future as a result of climate change. The probable cause for this is the occurrence of intense rainfall events, which lead to flooding and subsequent

increases in river discharge. Considering that these results only show the effect of climate change on discharge, there is a possibility that other factors, such as land use changes, may also contribute to changes in the amount of discharge.

### Conclusion

The results of this analysis indicate that in both climate scenarios, there is a possibility of experiencing severe droughts in some years in the future. However, it is also possible for the climate to be very wet in certain years. These changes in the state of drought over approximately 30 years indicate climate fluctuations, which are one of the signs of climate change in a region. Therefore, based on the obtained results, it cannot be concluded that we will experience either a completely dry or completely wet state in the next 30 years. Thus, it is necessary to employ adaptation strategies to mitigate the impacts of drought during certain years. The hydrological drought situation of the Tajan River in the next 20 years (2020-2040) was evaluated using both optimistic and pessimistic scenarios. The drought situation in this river has also exhibited fluctuations, with a decreasing trend of flow in some years and an increasing trend in others. These fluctuations also indicate another effect of climate change in a region, which causes heavy rains and floods, leading to increased river flow during certain times of the year. However, relying solely on the study of the flow rate of a region cannot accurately indicate the drought situation. This is because certain measures implemented in watersheds can significantly impact the flow rate of a river. Therefore, considering all the conditions and climatic factors that govern our country, it is not surprising to see such changes occurring in different periods.

**Keywords:** Climate fluctuations, Drought, Northern Iran, Scenario development, Water management

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgment

This work was done with the financial support of the Iran National Science Foundation (INSF), taken from project number 4014817.

### Conflict of interest

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

### Data availability statement

The data and results used in this research will be available through correspondence with the responsible author.

### Authors' contribution

**Mohammadtaghi Avand:** Conceptualization, performing software/statistical analysis, writing the initial version of the article; **Hamidreza Moradi:** guidance, control of results, editing and revising the text of the article; **Zeinab Hazbavi:** Consulting, editing and revising the text of the article.

\*Corresponding Author, E-mail: mt.avand70@gmail.com

**Citation:** Avand, M., Moradi, H.R., & Hazbavi, Z. (2024). Evaluation of current meteorological and hydrological drought and its future forecast in the Tajan Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(4), 57-78.

DOI: 10.22098/mmws.2023.13352.1330

Received: 20 July 2023, Received in revised form: 14 August 2023, Accepted: 14 August 2023, Published online: 14 August 2023  
*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 57-78

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی زمان حال و پیش‌نگری آن در آینده در حوزه آبخیز تجن

محمدتقی آوند<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا مرادی<sup>۲</sup>، زینب حزباوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشگر پسادکتری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

در این پژوهش اثر تغییر اقلیم بر دو نماینده اصلی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به ترتیب شامل بارش و رواناب در حوزه آبخیز بزرگ تجن مازندران مورد تحلیل قرار گرفت. بدین منظور پس از جمع‌آوری داده‌های بارش، دما و دبی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم در قالب دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) نسبت به پیش‌بینی داده‌های اقلیم آینده در یک دوره ۲۷ ساله (۲۰۵۰-۲۰۲۳) در سه ایستگاه کردخیل، سلیمان تنگه و ریگ چشمه اقدام شد. از داده‌های مربوط به دبی جریان ایستگاه کردخیل واقع در خروجی رودخانه تجن نیز برای بررسی تغییرات رواناب در زمان حال و آینده استفاده شد. در ادامه، وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوزه آبخیز مورد نظر بر اساس دو شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و خشکسالی جریان رودخانه (SDI) در گام‌های زمانی مختلف سه، شش و ۱۲ ماهه در محیط نرم‌افزار DrinC مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، رواناب آینده رودخانه تجن با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES پیش‌بینی شد. نتایج روند بارش آینده با آزمون من-کندال نشان‌دهنده کاهش روند بارش در دو ایستگاه کردخیل و ریگ چشمه و افزایش روند در ایستگاه سلیمان تنگه است. هم‌چنین، شدت خشکسالی هواشناسی آینده در ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز تجن با یک‌دیگر متفاوت بوده، اما در حالت کلی دارای یک روند مشابه هستند. نتایج خشکسالی آینده نشان داد وضعیت خشکسالی در برخی از سال‌های خشکسالی خیلی شدید و در برخی از سال‌ها فرامرطوب خواهد بود که نشان‌دهنده وجود تغییرات اقلیمی در یک منطقه است. ضریب نش-ساتکلیف (NSE) با ۰/۴۸ و ضریب تعیین ( $R^2$ ) با ۰/۵۸ نشان‌دهنده صحت مطلوب مدل IHACRES در شبیه‌سازی رواناب آینده است. بررسی روند دبی ایستگاه کردخیل نیز نشان‌دهنده روند کاهشی دبی جریان در آینده بدون تغییرات معنادار است. هم‌چنین، نتایج بررسی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی نشان‌دهنده غالب بودن وضعیت بدون خشکسالی ( $SDI \geq 0$ ) و یا خشکسالی ملایم ( $-1 \leq SDI < 0$ ) در آینده است. در مجموع می‌توان جمع‌بندی نمود که خشکسالی هیدرولوژی و اقلیمی دارای هم‌زمانی نبوده و می‌توان با مدیریت مناسب شرایط خشکسالی هواشناسی و سایر عوامل محرکه دیگر از جمله تغییر کاربری از تشدید خشکسالی هیدرولوژیکی جلوگیری نمود.

**کلید واژه:** خشکسالی، سناریونویسی، شمال ایران، مدیریت آب، نوسانات اقلیمی

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: محمدتقی آوند، mt.avand70@gmail.com

**استناد:** آوند، محمدتقی، مرادی، حمیدرضا، و حزباوی، زینب (۱۴۰۳). ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی زمان حال و پیش‌نگری آن در آینده در حوزه آبخیز تجن. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۵۷-۷۸.  
DOI: 10.22098/mmws.2023.13352.1330

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

*مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۵۷ تا ۷۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

واضح است که تغییرات آب و هوایی ساخته دست بشر تهدیدی برای سلامت سیاره زمین و رفاه همه گونه‌های ساکن در آن است. شواهد علمی نشان می‌دهد تغییرات آب و هوایی باعث خسارت‌های اساسی و جبران‌ناپذیر فزاینده‌ای در بوم‌سازگان‌های مختلف شده است. گستره و بزرگی تأثیرات تغییر اقلیم بزرگ‌تر از برآوردهای قبلی است. بدتر شدن گستره ساختار و عملکرد بوم‌سازگان، تاب‌آوری و ظرفیت سازگاری طبیعی و تغییر در زمان‌بندی فصلی به دلیل تغییرات آب و هوایی با پیامدهای اجتماعی-اقتصادی نامطلوب رخ داده است. تداوم و تسریع افزایش سطح دریا به سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌های ساحلی تجاوز کرده و بوم‌سازگان‌های ساحلی کم ارتفاع را به زیر آب می‌برد و از بین می‌رود. اگر روند شهرنشینی در مناطق در معرض تداوم داشته باشد، این تأثیرات را تشدید خواهد کرد، با چالش‌های بیشتری که در آن انرژی، آب و سایر خدمات محدود می‌شوند. تعداد افرادی که در معرض خطر تغییرات آب و هوایی و از دست دادن تنوع زیستی مرتبط با آن هستند به تدریج افزایش خواهد یافت. صدها تلفات محلی گونه‌ها به دلیل افزایش شدت گرما و مرگ و میر انبوه در خشکی و اقیانوس بوده است (Portner et al., 2022).

کشور ما نیز از این‌گونه تغییرات مستثنی نبوده است. به‌نحوی که در سال‌های گذشته بر اثر تغییر در متغیرهای اقلیمی تعداد زیادی از مخاطرات طبیعی و انسانی از جمله سیل، خشکسالی، شیوع آفات و بیماری‌ها و آتش‌سوزی در شدت‌های مختلف رخ داده‌اند (Wilhite et al., 2005). اقلیم به دلیل نقش تأثیرگذار خود در وقوع مخاطرات طبیعی از قبیل خشکسالی می‌تواند اقتصاد و زندگی مردم در بخش‌های مختلف تولید کشاورزی، دامپروری و صنعت را تحت تأثیر قرار داده و زمینه‌ساز خسارت و نابودی در مناطق مختلف باشد. خشکسالی از بزرگ‌ترین چالش‌های اقلیمی کشور به‌شمار می‌رود (Mofidipour, 2012; Kiani Salmi and Amini Faskhoodi, 2018). در هنگام وقوع خشکسالی ابتدا خشکسالی هواشناسی و در صورت تداوم آن انواع دیگر خشکسالی‌ها از قبیل هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی رخ می‌دهد که هر کدام از آن‌ها و نیز مجموع آن‌ها بخش‌های مختلف بوم‌سازگان یک حوزه آبخیز را متأثر می‌کند. تغییرات اقلیمی به دلیل تأثیری که بر تغییرات زمانی و مکانی بارش در مناطق مختلف دارد باعث ایجاد مشکلات متعددی می‌شود. این پدیده به دلیل روند تدریجی و سرعت کندی که دارد در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی‌تر عمل کرده و اثرات آن ممکن است پس از چند سال و

با تأخیر زیاد آشکار شود (Saedi et al., 2020; Mozafari et al., 2022).

Babolhakami et al. (2020) اقدام به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر شاخص SPI و رواناب حوضه رودخانه نکا در استان مازندران کردند. آن‌ها از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مختلف موجود در منطقه استفاده کردند. داده‌های مشاهداتی دبی رودخانه نکا نیز در محل سد گلورد از ایستگاه هیدرومتری گلورد به‌دست آمد. سپس، متغیرهای اقلیمی دما و بارش طی دوره آتی ۲۰۱۹ تا ۲۰۸۱، تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای حوضه رودخانه نکا شبیه‌سازی شد. از روش خطوط هم‌باران جهت تعیین مقادیر میانگین متغیرهای اقلیمی بارش و دما و از مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شد. نتایج نشان دهنده افزایش وقایع خشکسالی طی دوره‌های آتی در هر سه سناریوی انتشار نسبت به دوره پایه بود و دوره‌های مرطوب و نرمال نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. همچنین، نتایج نشان داد که طی دوره‌های آینده میانگین آورد سالانه رودخانه نکا تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 بین ۱۵ تا ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، میانگین آورد سالانه رودخانه نکا در محل سد گلورد از ۹۵ میلیون مترمکعب طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۴، به ۵۴ تا ۸۱ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت.

خشکسالی اثرات زیان‌باری در فرآیند توسعه برجای می‌گذارد. اثرات خشکسالی به دو نوع مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. کاهش سطح زیرکشت و تولید محصولات زراعی، کاهش حاصل خیزی مراتع و جنگل‌ها، کاهش کیفیت آب، افزایش آتش‌سوزی‌ها و کاهش سطح آب از اثرات مستقیم این پدیده هستند. همچنین، کاهش درآمد کشاورزان و شاغلین این بخش، افزایش قیمت غذا، رشد بیکاری، کاهش درآمدهای مالیاتی ناشی از کاهش مخارج مصرفی، افزایش جرائم و اعلام دعوی و مشکلات حقوقی در زمینه تأخیر در بازپرداخت وام‌های بانکی، نمونه‌هایی از اثرات غیرمستقیم خشکسالی بوده که به‌نحوی پیامدهای اقتصادی و اجتماعی خشکسالی محسوب می‌شوند (Ghanbari et al., 2021). این پدیده در مناطق روستایی به دلیل آسیب‌پذیری بیش‌تر جوامع روستایی تأثیرات ملموس‌تری را ایجاد می‌کند. از این‌رو، شناخت این پدیده و تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از آن بر بوم‌سازگان موجود در یک حوزه آبخیز به‌عنوان یک واحد برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری، جهت اتخاذ راهبردهای مناسب سازگاری لازم و ضروری است (Ding et al., 2021; Mozafari et al., 2022).

روش‌ها، مدل‌ها و رویکردهای متفاوتی در دهه‌های اخیر با هدف جلب توجه بیش‌تر مسئولان، مدیران و متولیان حفاظت از منابع حیاتی کشور به مسئله تغییر اقلیم و خشکسالی توسط محققان مختلف ارائه شد. برای نمونه، پژوهشی با هدف بررسی اثرات

(SPEI) و شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) برای ارزیابی چارچوب پیشنهادی در حوضه زاینده‌رود از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۷ استفاده شد. نتایج نشان داد که SPEI آسیب‌پذیری خشکسالی بیش‌تری را نسبت به SPI برآورد کرده است. هم‌چنین، بر اساس هر دو روش ثابت و فازی، سلامت حوضه زاینده‌رود تحت تأثیر خشکسالی به‌ویژه در مقیاس زمانی بالاتر (۱۲ ماهه) قرار دارد. روش فازی دسته‌بندی انواع شکست خشکسالی در حوضه نسبت به مقدار آستانه را بهتر انجام داده است. در ادامه، Wu et al. (2021) به ارزیابی چند مقیاسی آستانه انتشار از خشکسالی هواشناسی تا هیدرولوژیکی پرداختند. شاخص‌های خشکسالی چند مقیاس، یعنی شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص جریان استاندارد (SSI)، برای نشان دادن خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده شد. تخمین آستانه انتشار (PT) در مقیاس‌های زمانی متعدد (به‌عنوان مثال، یک ماهه، سه ماهه و ۱۲ ماهه) به‌دست آمده از تئوری اجرا، تحلیل همبستگی و روش‌های پاسخ غیرخطی مقایسه شد و دلایل احتمالی تفاوت در برآورد PT مورد بحث قرار گرفت. این پژوهش در سه زیرحوضه با سطوح پایین فعالیت انسانی در حوضه رودخانه Dongjiang، که در منطقه مرطوب در جنوب چین قرار دارد، انجام شد. نتایج نشان داد که برآورد PT در مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص‌های خشکسالی و با روش‌های مختلف در مقیاس‌های زمانی مشابه متفاوت است. بازه‌های زمانی طولانی‌تر خشکسالی هیدرولوژیکی با PT بزرگ‌تر مطابقت دارد و بالعکس. علت اصلی این الگو این واقعیت بود که مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص‌های خشکسالی حساسیت‌های پاسخ متفاوتی به رویدادهای خشکسالی نشان دادند. PT به‌دست آمده از تئوری اجرا کوتاه‌ترین بود. بنابراین، نظریه اجرا می‌تواند هشدارهای محافظه کارانه‌ای را برای کمک به پیشگیری و کاهش خشکسالی ارائه دهد.

از سایر پژوهش‌ها، Zhao et al. (2020) اثر تغییرات بسامد پیش‌بینی شده را در خشکسالی‌های شدید هواشناسی و هیدرولوژیکی تابستان در حوضه‌های آبریز آمریکای شمالی بررسی کردند. از دو مدل بزرگ آب و هوایی (CanESM2 ۵۰ عضوی و CESM1 ۴۰ عضوی) تحت سناریوی RCP 8.5 برای ارزیابی قوی تغییرات فرکانس تا خشکسالی ۱۰۰ ساله، نسبت به دوره مرجع ۲۰۰۹-۱۹۸۰ استفاده کردند. نتایج، الگوهای بسیار متفاوتی را برای تغییرات آبی در خشکسالی شدید هواشناسی در مقابل خشکسالی هیدرولوژیکی نشان داد. خشکسالی‌های هواشناسی آینده، الگوهای افزایش و کاهش فراوانی را نشان می‌دهد که تقریباً با تغییرات مورد انتظار آینده میانگین بارندگی تابستان مطابقت دارد. اگرچه با این وجود پیش‌بینی می‌شود که برخی از مناطق با وجود افزایش میانگین بارش تابستان شاهد خشکسالی‌های شدید هواشناسی مکرر

خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی حوزه آبخیز کشکان توسط Soleimani Motlagh et al. (2016) انجام شد. در این پژوهش بر اساس داده‌های ۲۰ ساله (۱۳۸۸-۱۳۶۶)، برای بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی از SPI، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و SDI و برای بررسی کیفیت آب از دو نمودار شولر و ویلکاکس و متغیرهای EC، TDS، Na، Cl و SO<sub>4</sub> استفاده شد. نتایج نشان داد که خشکسالی تغییرات قابل ملاحظه‌ای بر متغیرهای کیفی منابع آب سطحی داشته است. هم‌چنین، کیفیت آب در اثر خشکسالی تغییر کرده است. به‌نحوی که کیفیت آب شرب رودخانه‌های آفرینه و چمانجیر از کلاس خوب به قابل قبول و برای مصارف کشاورزی از کلاس C2S1 به کلاس C3S1 تغییر یافته است. در نهایت، تحلیل کلی نمودارهای روند خطی نشان می‌دهد که روند افزایشی خشکسالی بر کیفیت آب‌های سطحی حوزه آبخیز کشک آن تأثیر منفی گذاشته است. Boroghani et al. (2019) در پژوهشی از نسبت محاسبه خشکسالی با استفاده از داده‌های مربوط به بارش (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و گرد و غبار (۲۰۱۰-۲۰۰۴) اقدام نمودند. پهنه‌بندی گرد و غبار و خشکسالی در دوره آماری مشترک (۲۰۱۰-۲۰۰۴) با استفاده از روش کریجینگ در نرم‌افزار ArcGIS صورت گرفت. نتایج پهنه‌بندی تعداد وقوع گرد و غبار و خشکسالی حاکی از آن بوده که سال ۲۰۰۸ دارای بیش‌ترین تعداد وقوع گرد و غبار (۲۲۶ واقعه گرد و غبار) و خشکسالی شدید در سطح استان بوده است. هم‌چنین، در سال ۲۰۰۵ کم‌ترین تعداد وقوع گرد و غبار (۸۵ واقعه گرد و غبار) و شرایط ترسالی در سطح استان حاکم بوده است. نتایج نشان داد که بین وقوع گرد و غبار با خشکسالی ارتباطی مستقیم وجود دارد و در سال‌هایی که شدت خشکسالی زیاد یا کم شده، بر تعداد وقوع گرد و غبار نیز افزوده یا از آن کاسته شده است.

در پژوهشی، Mohit Esfahani et al. (2020) با استفاده از متغیرهای بارش و رطوبت خاک و محاسبه شاخص چندمتغیره استاندارد (MSDI)، وضعیت خشکسالی هواشناسی-کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که MSDI بیش از دو برابر قابلیت شناسایی پدیده خشکسالی را نسبت به شاخص‌های جریان سطحی استاندارد شده (SSI) و SPI دارد. هم‌چنین، پایش خشکسالی بر اساس MSDI نشان‌دهنده خشکسالی‌های شدید هواشناسی-کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ بوده است. در پژوهش دیگری، Fooladi et al. (2021) یک مدل مفهومی فازی (DRRV-Fuzzy) را در مقایسه با روش سنتی (DRRV-Fixed) مبتنی بر پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای ارزیابی سلامت و ریسک حوزه آبخیز تحت خشکسالی به‌کار بردند. برای این منظور از شاخص استاندارد شد بارش-تبخیر-تعرق

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که پدیده خشکسالی به دلیل روند خزشی و طولانی مدتی که دارد بر موارد مختلفی در یک حوزه آبخیز تأثیرگذار بوده و باعث ایجاد اختلالاتی در روند طبیعی آن‌ها می‌شود. مهم‌ترین اثرات خشکسالی بر اساس میزان شدت آن متفاوت بوده، ولی تا حد زیادی بر پوشش گیاهی، نوع و شدت بارش، رواناب، دما، ایجاد پهنه‌های گرد و غبار، تغییرات کمی و کیفی آب‌های سطحی، مسائل اجتماعی و اقتصادی و غیره تأثیرگذار بوده است. از این‌رو، در این پژوهش سعی شده است تأثیر این پدیده بر متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی در زمان حال و آینده در حوزه آبخیز تجن واقع در شمال کشور ایران ارزیابی شود.

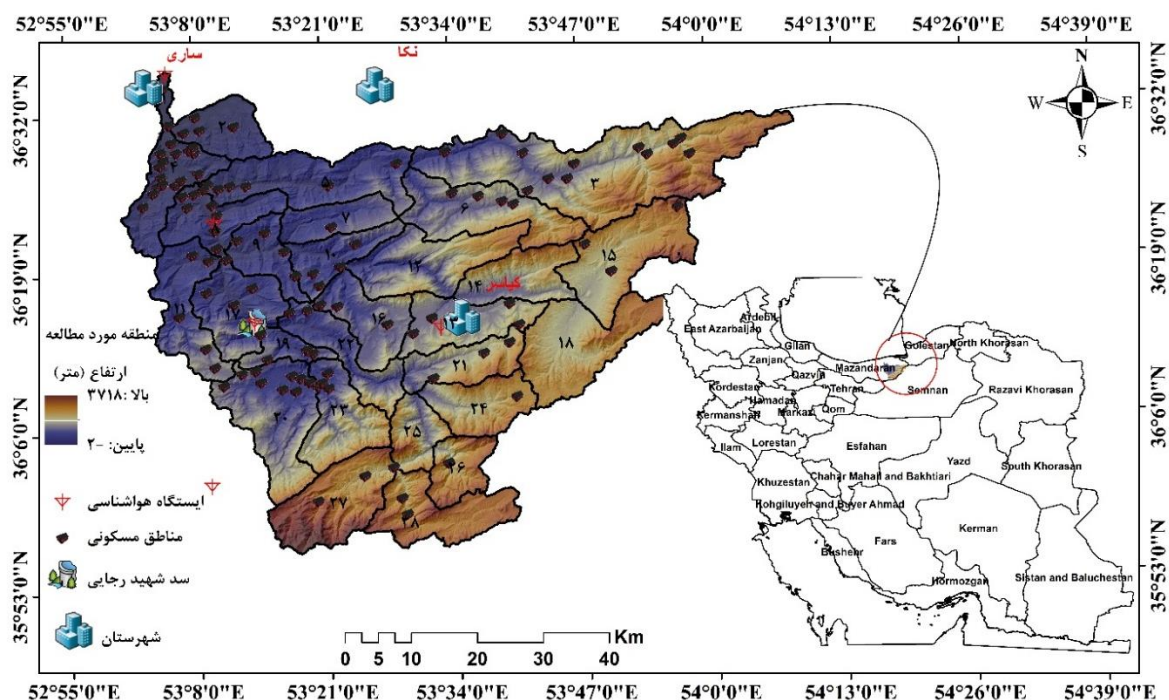
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تجن با وسعت ۳۹۸۰ کیلومتر مربع یکی از بزرگ حوزه‌های آبخیز شمال کشور در بالادست شهرستان ساری و نکا، استان مازندران قرار گرفته است و با کوه‌های البرز در جنوب و دریای خزر در شمال محدود می‌شود (شکل ۱). قسمت جنوبی و ارتفاعات بالای حوزه آبخیز تجن تا حدودی بخشی از استان سمنان را نیز شامل می‌شود، ولی مساحت اصلی آن در استان مازندران قرار دارد. به دلیل وسعت زیاد حوزه آبخیز قسمت‌هایی از شش شهرستان نکا، قائم‌شهر، ساری، بهشهر، دامغان و سوادکوه را در بر گرفته است. میانگین سالانه دما حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد با آب و هوای گرم و مرطوب و میانگین بارش سالانه ۸۳۲ میلی‌متر است (Rajaei et al., 2020). با توجه به این که خروجی حوزه آبخیز مورد مطالعه بالاتر از مصب ورودی دریای خزر بسته شده است، توپوگرافی آن از ارتفاع ۳ تا ۳۶۷۰ متر متغیر است (دریای خزر در ارتفاع ۲۵ متر از سطح دریای آزاد قرار دارد). این منطقه از پنج دهستان و ۷۷ آبادی تشکیل شده است که این مناطق اکثراً تیپ کوهستانی دارند. قسمت اعظم منطقه اراضی جنگلی بوده و بخش مستثنیات محدود به کناره‌های رودخانه و یا اراضی شیب‌دار دیم در برخی مناطق است. شغل اصلی جوامع محلی به‌خصوص در روستاهای بالادست اغلب کشاورزی و دامداری است. به دلیل شرایط مطلوب آب و هوایی صنعت گردش‌گری هم تا حدودی فعال است و به همین دلیل در سال‌های اخیر تغییر کاربری اراضی زیادی در جهت ویلاسازی و یا احداث باغ در مناطق مختلف آن انجام شده است. در این منطقه علاوه بر رودخانه معروف و پرآب تجن شاخه‌های اصلی دیگری از قبیل شاخه‌های چهاردانگه، دودانگه، لاجیم و زارمرود وجود دارد که با عبور از روستاهای مختلف در نهایت به دریای خزر می‌ریزند. این حوزه آبخیز به دلیل وجود بوم‌سازگان‌های فراوان و نیز وجود منابع آب و رودخانه‌های قابل توجه که تأمین‌کننده آب شرب و کشاورزی جوامع محلی و شهری پایین دست بوده برای ارزیابی خشکسالی انتخاب شد.

بیش‌تری باشند. تغییرات فراوانی برای خشکسالی‌های هواشناسی ۱۰۰ ساله، با افزایش ۲۰ برابری در برخی از حوزه‌های آبخیز، می‌تواند بسیار شدید باشد. از سوی دیگر، خشکسالی‌های هیدرولوژیکی که اثر بارندگی و تغییرات دما را با هم ترکیب می‌کنند، الگوی یکنواختی از افزایش زیاد تا بسیار زیاد در فراوانی خشکسالی را نشان می‌دهند. این نشان می‌دهد که افزایش دمای پیش‌بینی شده عامل اصلی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی شدید آینده است که برای غلبه بر افزایش پیش‌بینی شده در میانگین بارش تابستانی برای بسیاری از حوضه‌های آبریز آمریکای شمالی کافی است. در حوزه آبخیز کرخه نیز (Rahimiani Iranshahi et al. (2022) روند تغییرات بارش و دما در مقیاس‌های زمانی مختلف را در یک دوره آماری از ۱۳۸۹-۱۳۵۹ بررسی نمودند. نتایج نشان‌دهنده تغییرات کاهشی و بدون روند معنادار بارش در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی بود و در تعداد محدودی از ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی معنادار بود که اغلب مربوط به ماه‌های سرد سال (۰/۰۹- و ۰/۰۷- در ایستگاه‌های خرم‌آباد و سنندج در بهمن) می‌شود. بیش‌ترین تغییر روند بارش در سری‌های زمانی سالانه (۰/۰۲- در ایستگاه سنندج) مشاهده شد. در تمام سری‌های زمانی مورد بررسی، دماهای کمینه و بیشینه دارای روند افزایشی بود. میزان این روند افزایشی در دمای کمینه بیش‌تر (شیب تغییرات ۲/۷۷ و ۲/۷۵ به ترتیب در ایستگاه‌های سنندج و اهواز) ارزیابی شد. هم‌چنین، (Rahvareh et al. (2023) جهت ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز زرینه‌رود، از خروجی مدل گردش عمومی HADGEM2-ES و مدل ریزمقیاس‌نمایی CCT تحت سناریوهای انتشار RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره آینده ۲۰۲۵-۲۰۴۹ استفاده شد. از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) به ترتیب برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده شد. برای این کار از دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۹۰) و آینده در مقیاس زمانی سالانه استفاده شد. شاخص SRI بر اساس رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT برای دوره پایه محاسبه شد. نتایج ریزمقیاس‌شده مدل گردش عمومی به مدل SWAT وارد شد و شاخص SRI برای دوره آینده شبیه‌سازی شد. میانگین نتایج مدل CCT نشان داد که حداکثر و حداقل دما در دوره آینده ۱/۵ تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و بارش سالانه ۶/۳ درصد افزایش تحت RCP2.6 و ۹/۲ درصد کاهش تحت RCP 8.5 را نشان داد. بر اساس مقادیر مربوط به شاخص SPI و SRI سالانه، میانگین شدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوزه آبخیز در آینده به ترتیب ۱۷ و ۳۸ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. از طرفی نتایج RCP8.5 نسبت به RCP2.6 شدت خشکسالی بیش‌تری را نشان داد.





شکل ۱- مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شهرستان ساری، استان مازندران  
Figure 1- Geographic coordinates of the studied area in Sari City, Mazandaran Province

جریان، با استفاده از جدول استاندارد مربوط به روش SDI، آستانه‌های خشکسالی هیدرولوژیکی مشخص شد.

#### ۲-۲-۱- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

SPI یک ابزار قوی در تحلیل داده‌های بارندگی است. این شاخص با اختصاص ارزش عددی به بارندگی می‌تواند نواحی با آب و هوای کاملاً متفاوت را مقایسه کند. ویژگی اصلی این شاخص انعطاف پذیری در اندازه‌گیری خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف است. محاسبه SPI برای هر منطقه معین بر پایه آمار بلندمدت بارندگی برای دوره‌های مختلف است. این آمار بلندمدت به تابع احتمال گاما برازش یافته و از تابع حاصل برای پیدا کردن احتمال تجمعی بارندگی برای یک ایستگاه و برای ماه معین و مقیاس زمانی مشخص استفاده می‌شود. هنگام محاسبه SPI، ابتدا یک تابع توزیع احتمال مناسب که با یک سری طولانی از داده‌های بارندگی مشاهده شده مطابقت داشته، انتخاب شد. معمولاً توزیع گاما در پژوهش‌های مختلف توصیف خوبی از داده‌های بارندگی را نشان داده است (Chen et al., 2020). ثانیاً، احتمال تجمعی داده‌های بارندگی مشاهده شده، محاسبه شد. در نهایت، تابع گوسی نرمال معکوس با مقدار میانگین صفر و واریانس یک به احتمال تجمعی برای به دست آوردن SPI اعمال می‌شود (Vidyarthi and Jain, 2020). تابع چگالی احتمال در رابطه (۱) ارائه شده است:

$$f(x, a, \beta) = \frac{1}{\beta^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/\beta}, \text{ for } x, a, \beta > 0 \quad (1)$$

#### ۲-۲-۲- روش پژوهش

برای انجام این پژوهش ابتدا داده‌های اقلیمی (۲۰۱۹-۱۹۹۲) مورد نیاز از اداره هواشناسی و آب منطقه‌ای استان مازندران جمع‌آوری شد. مهم‌ترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز شامل بارش، دمای حداکثر و حداقل، ساعت آفتابی یا تابش است که جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی اقلیمی و نیز بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از SPI در سه ایستگاه کردخیل، سلیمان تنگه و ریگ چشمه به کار رفت. همچنین، جهت بررسی روند تغییرات دبی جریان (۲۰۲۰-۱۹۹۰) از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه که دارای داده‌های کامل‌تری بودند استفاده شد. داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری نیز از اداره آب منطقه‌ای ساری دریافت شد. با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG تحت دو سناریوی انتشار خوشبینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) اقدام به پیش‌بینی اقلیم آینده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) شد. پس از تهیه داده‌های حال و آینده، با استفاده از نرم‌افزار DrinC اقدام به تعیین آستانه‌های خشکسالی داده‌ها بر اساس جدول استاندارد SPI شد. در این پژوهش به منظور پیش‌بینی دبی در دوره آبی نیز از مدل هیدرولوژیکی IHACRES استفاده شد. برای به دست آوردن میزان دبی در آینده از داده‌های بلندمدت بارش و دمای آینده که در بخش مدل‌سازی اقلیمی به دست آمد و نیز دبی مشاهداتی در مدل IHACRES استفاده شد. سپس با استفاده از SDI در نرم‌افزار DrinC اقدام به محاسبه خشکسالی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز تجن در ایستگاه خروجی (کردخیل) شد. بعد از تحلیل داده‌های دبی

رواناب و پیش‌بینی دبی آینده شامل بارش آینده، دمای آینده و دبی پایه ایستگاه مورد نظر بود که بارش و دما در مراحل قبلی برای زمان آینده مدل‌سازی شده بود. بنابراین، این داده‌ها وارد مدل شد و دبی زمان آینده مدل‌سازی شد. در این پژوهش مدل برای دوره ۲۰۱۲-۱۹۹۷ واسنجی شد. این دوره با روش آزمون و خطا با بهترین شبیه‌سازی انتخاب شد. مدل در دوره باقی‌مانده نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۲-۲-۳- شاخص جریان رودخانه (SDI)

به‌منظور بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی از SDI استفاده شد (رابطه ۲). این شاخص از نظر محاسباتی شبیه SPI است، ولی توصیه شده که در مقیاس زمانی ماهانه و فصلی به‌کار رود. طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس این شاخص در جدول ۲ ارائه شده است (Nalbantis, 2008). در این روش فرض شده است که سری‌های زمانی، حجم جریان‌های رودخانه‌ای ماهانه به‌صورت Q<sub>ij</sub> موجود است که در آن i سال هیدرولوژیکی و j ماه مربوط به سال هیدرولوژیکی است. S<sub>k</sub> و V<sub>k</sub> به‌ترتیب میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریان‌ات تجمعی برای دوره مینا k است. در نهایت، حجم تجمعی جریان‌ات رودخانه‌ای با V<sub>ik</sub> برای دوره پایه k نشان داده شده است. وضعیت خشکسالی داده‌های مشاهده‌ای دبی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل هیدرولوژیکی IHACRES با استفاده از شاخص SDI و بر اساس جدول مربوط به این شاخص تعیین شد (جدول ۲).

$$SDI_{ik} = \frac{V_{ik} - V_k}{S_k} \quad i = 1, 2, \dots \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

### جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس

SDI		
Table 2- Classification of hydrological drought severity based on SDI		
ردیف	وضعیت	SDI
0	فاقد خشکسالی	SDI ≥ 0
1	خشکسالی ملایم	-1 ≤ SDI < 0
2	خشکسالی متوسط	-1.5 ≤ SDI < -1
3	خشکسالی شدید	-2 ≤ SDI < -1.5
7	خشکسالی بسیار شدید	SDI < -2

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج ارزیابی خشکسالی هواشناسی

شکل ۲ نشان‌دهنده روند خشکسالی هواشناسی در داده‌های پایه مشاهداتی (۱۹۹۲-۲۰۲۰) ایستگاه‌های مختلف است. نتایج نشان داد که بر اساس جدول استاندارد SPI درجه خشکسالی منطقه در سال‌های اخیر بین ۳/۳- (خشکسالی خیلی شدید) تا ۲/۴ (فرامرطوب) در نوسان بوده است.

در رابطه بالا، α شکل و β متغیرهای مقیاس را نشان می‌دهند که می‌توان آن‌ها را با تخمین حداکثر احتمال به‌دست آورد. در این پژوهش برای تعیین وضعیت خشکسالی زمان حال و آینده از این شاخص استفاده شد. برای تعیین وضعیت خشکسالی آینده از داده‌های استخراجی نرم‌افزار Lars-WG در دو سناریوی مختلف استفاده شده که نتایج آن در بخش بعدی بیان شده است.

### جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی هواشناسی بر اساس

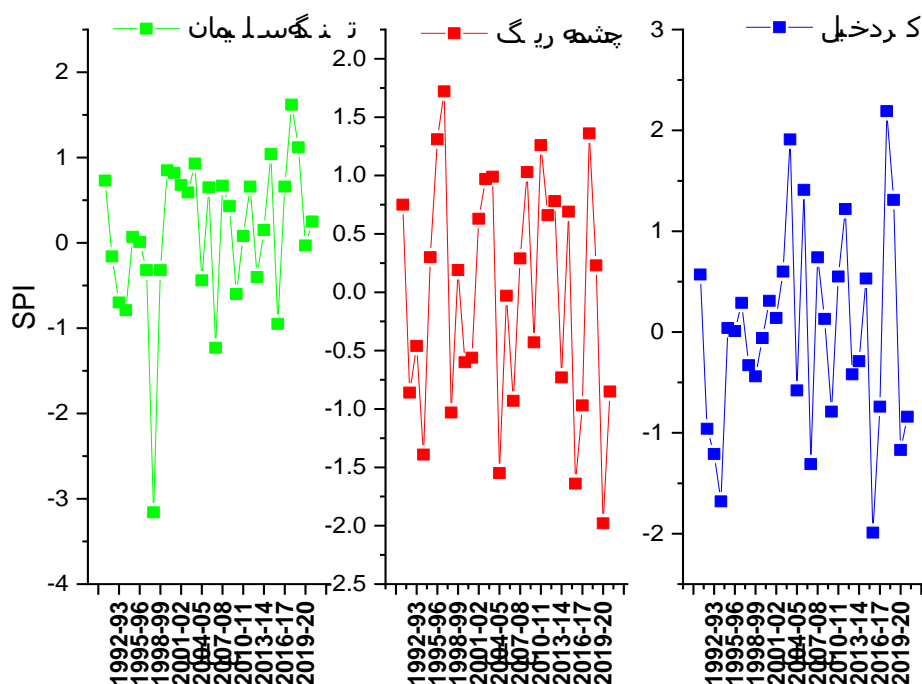
SPI		
Table 1- Classification of meteorological drought severity based on SPI		
ردیف	وضعیت	SPI
1	فرامرطوب	2 ≤
2	بسیار مرطوب	1.5-1.99
3	نسبتاً مرطوب	1-1.49
4	نزدیک نرمال	0.99- -0.99
5	خشکسالی متوسط	-1.00- -1.49
6	خشکسالی شدید	-1.50- -1.99
7	خشکسالی خیلی شدید	-2.00 ≤

### ۲-۲-۲- مدل هیدرولوژیکی IHACRES

IHACRES یک مدل مفهومی بارش-رواناب است که نسخه اصلی آن توسط Jakeman et al. (1990) توسعه یافت. این مدل در حوضه‌هایی با اندازه‌های مختلف از ۴۹۰ متر مربع در چین تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع در انگلستان با پایه‌های زمانی شش دقیقه تا یک ماه با موفقیت استفاده شده است. جهت اجرای این مدل نیاز به ورودی‌هایی از قبیل داده‌های بارش، دما و دبی است که دما و بارش برای شبیه‌سازی جریان و دبی برای واسنجی و ارزیابی صحت مدل استفاده می‌شود (Zarei et al., 2011). IHACRES از دو مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی هیدروگراف تشکیل می‌شود. برای اجرای این مدل ابتدا بارندگی و دما در هر گام زمانی توسط مدول غیرخطی، به بارندگی مؤثر تبدیل شده و سپس به‌وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (Zandi Daregharibi et al., 2017). این مدل دارای شش متغیر است که سه متغیر c (ظرفیت ذخیره رطوبت حوزه آبخیز)، tw (مدت زمانی که طول می‌کشد حوزه آبخیز خشک شود) و f (عامل تعدیل دمای حوزه آبخیز) مربوط به بخش تلفات غیرخطی مدل و سه متغیر ts، tq، (به‌ترتیب مدت زمانی که طول می‌کشد جریان سریع و آهسته کاهش یابد) و Vs (حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد) مربوط به بخش تابع خطی مدل هستند (Dodangeh et al., 2018). در این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی دبی روزانه در حوزه آبخیز تجن برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۴۰ از داده‌های بارش، دما و دبی ایستگاه کردخیل به‌عنوان ایستگاه اصلی و خروجی این حوزه آبخیز که دارای داده مناسب بود استفاده شد. داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل بارش-



## مشاهداتی هکداده اقلیمی چندکسالی روند



شکل ۲- روند خشکسالی هواشناسی در داده‌های پایه مشاهداتی ایستگاه‌های مختلف

Figure 2- Meteorological drought trends in the basic observational data of different stations

سناریوی انتشار نزولی خواهد بود، ولی در ایستگاه سلیمان تنگه این روند افزایشی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است میزان این کاهش بارش در ایستگاه ریگ چشمه نسبت به دو ایستگاه دیگر نیز شدیدتر است. یکی از دلایل روند صعودی بارش در ایستگاه سلیمان تنگه احتمالاً به دلیل شرایط ارتفاعی بالاتر و نزدیکی به سد شهید رجایی در آن منطقه است.

در جدول ۳ روند داده‌های بارش ایستگاه‌های حوزه آبخیز تجن در دوره آینده متناظر با داده‌های دبی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) با استفاده از آزمون من-کندال و شیب رگرسیون حداقل مربعات معمولی<sup>۱</sup> (OLS) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دو ایستگاه کردخیل و ریگ چشمه روند بارش در آینده تحت هر دو

جدول ۳- روند بارش آینده ایستگاه‌های حوزه آبخیز تجن در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰

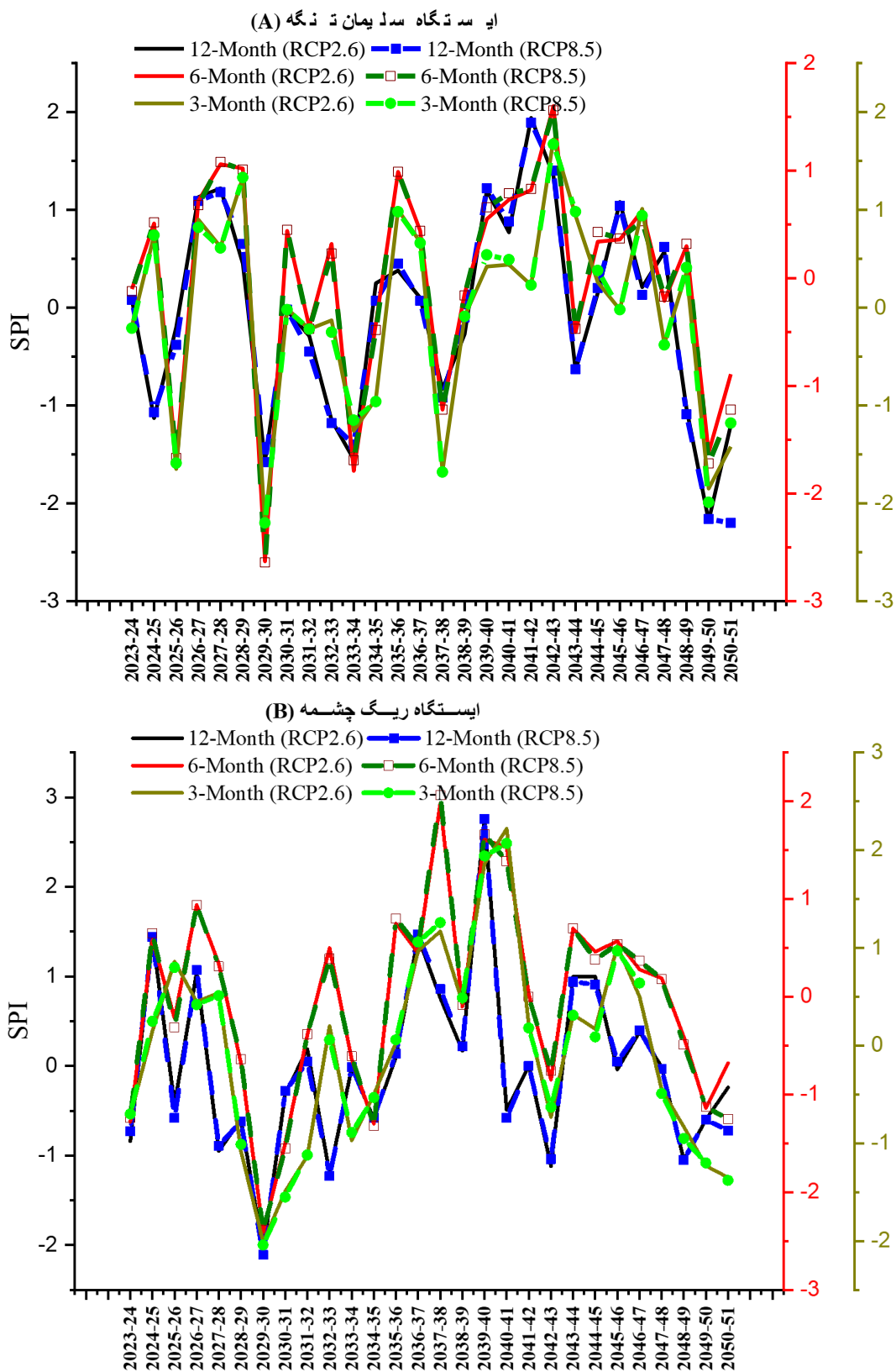
Table 3- The trend of future precipitation of Tajan Watershed stations in the period of 2020-2040

OLS	M-K test value	P-value	Sig.	ضریب اطمینان	سناریو	ایستگاه
-0.012	-20	0.26			RCP2.6	کردخیل
-0.038	-13	0.19			RCP8.5	
0.16	3	0.47	0.05	0.95	RCP2.6	سلیمان تنگه
0.28	3	0.48			RCP8.5	
-0.05	-5	0.44			RCP2.6	ریگ چشمه
0.07	-9	0.29			RCP8.5	

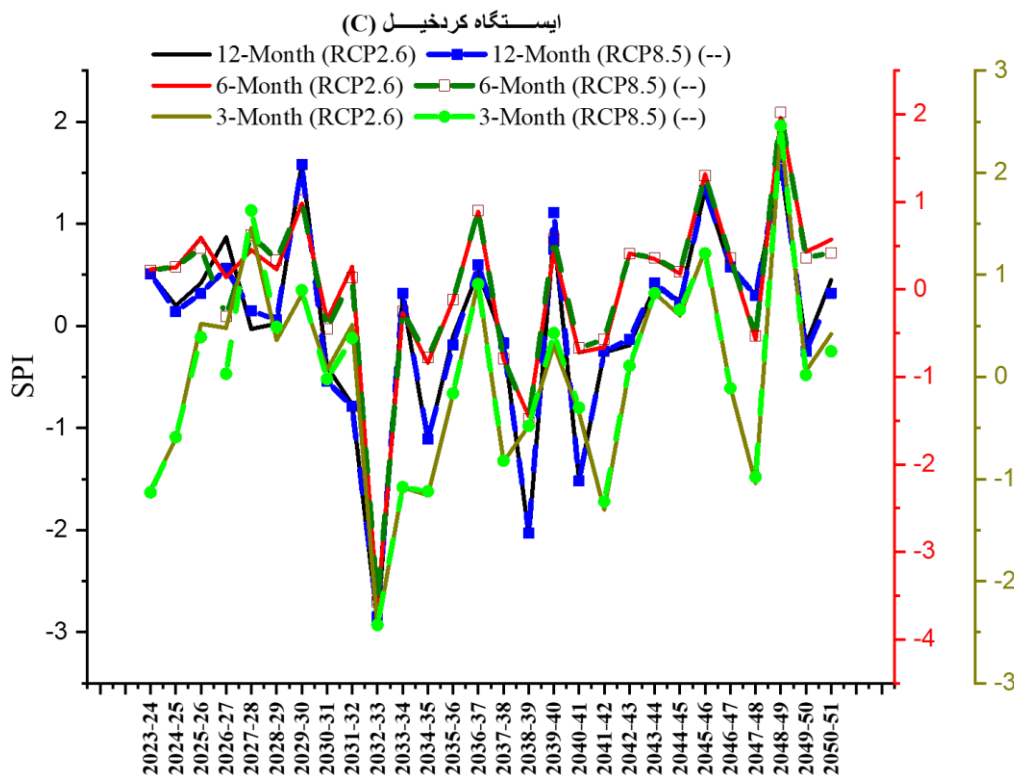
میانگین ماهانه بارش پیش‌بینی شده در مرحله قبل محاسبه و وارد مدل DrinC شد. در این مدل وضعیت خشکسالی ایستگاه‌های منتخب در سه گام زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه با استفاده از SPI محاسبه شد. نتایج روند SPI در گام‌ها و سناریوهای مختلف هر ایستگاه در شکل ۳ ارائه شده است.

پس از مرتب نمودن داده‌های اقلیمی، اقلیم آینده برای یک دوره ۲۷ ساله (۲۰۲۳-۲۰۵۰) تحت تأثیر دو سناریوی خوشبینانه (RCP2.6) و سناریوی بدبینانه (RCP8.5) در سه ایستگاه منتخب (کردخیل، سلیمان تنگه، ریگ چشمه) پیش‌بینی شد. به منظور بررسی وضعیت خشکسالی در هر ایستگاه و هر سناریو،

<sup>1</sup> Ordinary least squares



شکل ۳- روند خشکسالی هواشناسی ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز تاجن در دوره ۲۰۲۳-۲۰۵۰  
 Figure 3- Climate drought trend of different stations of Tajan Watershed in the period 2023-2050



ادامه شکل ۳- روند خشکسالی هواشناسی ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز تاجن در دوره ۲۰۲۳-۲۰۵۰  
Continued Figure 3- Climate drought trend of different stations of Tajan Watershed in the period 2023-2050

ریگ چشمه را در گام‌های زمانی ۱۲ ماهه و برای دو سناریوی خوشبینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) با استفاده از SPI نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص برای ایستگاه ریگ چشمه در سناریوی بدبینانه از ۲/۷۶ تا ۲/۱۱- متغیر است که کمترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۲۹-۲۰۳۰ (خشکسالی خیلی شدید) و بیشترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۳۹-۲۰۴۰ (فرامرطوب) رخ خواهد داد. همچنین، مقادیر این شاخص برای ایستگاه ریگ چشمه در سناریوی خوشبینانه از ۲/۷۷ تا ۲/۰۷- متغیر است که کمترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۲۹-۲۰۳۰ (خشکسالی خیلی شدید) و بیشترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۳۹-۲۰۴۰ (فرامرطوب) رخ خواهد داد. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که در سال نوعی ۲۰۲۹-۲۰۳۰ امکان رخداد یک خشکسالی خیلی شدید اقلیمی در این منطقه وجود داشته باشد که باید بر اساس آن تدابیر لازم انجام شود. این نتایج با یافته‌های Babolhakami et al. (2020) مبنی بر افزایش پدیده خشکسالی در بخش شرقی مازندران در دوره‌های آبی در هر سه سناریوی اقلیمی نسبت به دوره پایه مطابقت دارد.

جدول ۴ نتایج حاصل از وضعیت خشکسالی هواشناسی و مقادیر شاخص طول دوره پیش‌بینی شده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) ایستگاه سلیمان تنگه را در گام‌های ۱۲ ماهه و برای دو سناریوی خوشبینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) با استفاده از SPI نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص برای ایستگاه سلیمان تنگه در سناریوی بدبینانه از ۱/۸۹ تا ۲/۱۶- متغیر است که کمترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۴۹-۲۰۵۰ (خشکسالی خیلی شدید) و بیشترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۴۲-۲۰۴۱ (بسیار مرطوب) به دست آمد. همچنین، مقادیر این شاخص برای ایستگاه سلیمان تنگه در سناریوی خوشبینانه از ۱/۹۴ تا ۲/۱۸- متغیر است که کمترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۴۹-۲۰۵۰ (خشکسالی خیلی شدید) و بیشترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۴۱-۲۰۴۲ (نسبتاً مرطوب) ارزیابی شد. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که در سال نوعی ۲۰۴۹-۲۰۵۰ امکان رخداد یک خشکسالی خیلی شدید اقلیمی در این منطقه وجود داشته باشد که باید بر اساس آن تدابیر لازم انجام شود. همچنین نتایج نشان‌دهنده عدم تفاوت معناداری در شاخص خشکسالی دو سناریو در آینده است.

جدول ۵ نتایج حاصل از وضعیت خشکسالی هواشناسی و مقادیر شاخص طول دوره پیش‌بینی شده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) ایستگاه

جدول ۴- وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه سلیمان تنگه در آینده تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه

Table 4- Climate drought situation of Soleyman Tangeh station in the future under two optimistic and pessimistic scenarios

وضعیت خشکسالی	RCP8.5 SPI (12 ماهه)	وضعیت خشکسالی	RCP2.6 SPI (12 ماهه)	سال
نزدیک نرمال	0.08	نزدیک نرمال	0.08	2023-24
خشکسالی متوسط	-1.07	خشکسالی متوسط	-1.13	2024-25
نزدیک نرمال	-0.38	نزدیک نرمال	-0.20	2025-26
نسبتاً مرطوب	1.09	نسبتاً مرطوب	1.13	2026-27
نسبتاً مرطوب	1.18	نسبتاً مرطوب	1.22	2027-28
نزدیک نرمال	0.65	نزدیک نرمال	0.45	2028-29
خشکسالی شدید	-1.58	خشکسالی شدید	-1.57	2029-30
نزدیک نرمال	-0.02	نزدیک نرمال	-0.03	2030-31
نزدیک نرمال	-0.45	نزدیک نرمال	-0.29	2031-32
خشکسالی متوسط	-1.18	خشکسالی متوسط	-1.15	2032-33
خشکسالی متوسط	-1.40	خشکسالی شدید	-1.55	2033-34
نزدیک نرمال	0.07	نزدیک نرمال	0.25	2034-35
نزدیک نرمال	0.45	نزدیک نرمال	0.38	2035-36
نزدیک نرمال	0.07	نزدیک نرمال	0.10	2036-37
نزدیک نرمال	-0.92	نزدیک نرمال	-0.83	2037-38
نزدیک نرمال	-0.10	نزدیک نرمال	-0.27	2038-39
نسبتاً مرطوب	1.22	نسبتاً مرطوب	1.20	2039-40
نزدیک نرمال	0.88	نزدیک نرمال	0.77	2040-41
بسیار مرطوب	1.89	بسیار مرطوب	1.94	2041-42
نسبتاً مرطوب	1.40	نسبتاً مرطوب	1.35	2042-43
نزدیک نرمال	-0.63	نزدیک نرمال	-0.64	2043-44
نزدیک نرمال	0.20	نزدیک نرمال	0.15	2044-45
نسبتاً مرطوب	1.04	نسبتاً مرطوب	1.08	2045-46
نزدیک نرمال	0.13	نزدیک نرمال	0.21	2046-47
نزدیک نرمال	0.62	نزدیک نرمال	0.57	2047-48
خشکسالی متوسط	-1.09	خشکسالی متوسط	-1.03	2048-49
خشکسالی خیلی شدید	-2.16	خشکسالی خیلی شدید	-2.18	2049-50
خشکسالی خیلی شدید	-2.20	خشکسالی متوسط	-1.20	2050-51

جدول ۵- وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه ریگ چشمه در آینده تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه

Table 5- Climate drought situation of Rig Cheshmeh station in the future under two optimistic and pessimistic scenarios

وضعیت خشکسالی	RCP8.5 SPI (12 ماهه)	وضعیت خشکسالی	RCP2.6 SPI (12 ماهه)	سال
نزدیک نرمال	-0.73	نزدیک نرمال	-0.84	2023-24
نسبتاً مرطوب	1.44	نسبتاً مرطوب	1.45	2024-25
نزدیک نرمال	-0.58	نزدیک نرمال	-0.43	2025-26
نسبتاً مرطوب	1.07	نسبتاً مرطوب	1.05	2026-27
نزدیک نرمال	-0.89	نزدیک نرمال	-0.95	2027-28
نزدیک نرمال	-0.62	نزدیک نرمال	-0.60	2028-29
خشکسالی خیلی شدید	-2.11	خشکسالی خیلی شدید	-2.07	2029-30
نزدیک نرمال	-0.28	نزدیک نرمال	-0.31	2030-31
نزدیک نرمال	0.05	نزدیک نرمال	0.19	2031-32
خشکسالی متوسط	-1.23	خشکسالی متوسط	-1.20	2032-33
نزدیک نرمال	-0.01	نزدیک نرمال	-0.02	2033-34
نزدیک نرمال	-0.58	نزدیک نرمال	-0.59	2034-35
نزدیک نرمال	0.14	نزدیک نرمال	0.10	2035-36
نسبتاً مرطوب	1.47	نسبتاً مرطوب	1.44	2036-37
نزدیک نرمال	0.86	نزدیک نرمال	0.76	2037-38
نزدیک نرمال	0.22	نزدیک نرمال	0.17	2038-39
فرامرطوب	2.76	فرامرطوب	2.77	2039-40
نزدیک نرمال	-0.58	نزدیک نرمال	-0.49	2040-41
نزدیک نرمال	0.00	نزدیک نرمال	0.00	2041-42
خشکسالی متوسط	-1.04	خشکسالی متوسط	-1.12	2042-43
نزدیک نرمال	0.94	نسبتاً مرطوب	1.00	2043-44
نزدیک نرمال	0.91	نسبتاً مرطوب	1.00	2044-45
نزدیک نرمال	0.05	نزدیک نرمال	-0.04	2045-46
نزدیک نرمال	0.40	نزدیک نرمال	0.38	2046-47
نزدیک نرمال	-0.03	نزدیک نرمال	-0.01	2047-48
خشکسالی متوسط	-1.05	خشکسالی متوسط	-1.05	2048-49
نزدیک نرمال	-0.60	نزدیک نرمال	-0.60	2049-50
نزدیک نرمال	-0.72	نزدیک نرمال	-0.24	2050-51

جدول ۶ نتایج حاصل از وضعیت خشکسالی هواشناسی و مقادیر شاخص طول دوره پیش‌بینی شده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) ایستگاه کردخیل را در گام‌های زمانی ۱۲ ماهه و برای دو سناریوی خوشبینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) با استفاده از SPI نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص برای ایستگاه کردخیل در سناریوی بدبینانه از ۱/۵۸ تا ۲/۸۵- متغیر است که کم‌ترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۳۳-۲۰۳۲ (۲/۸۵-) و خشکسالی خیلی شدید (بیش‌ترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۲۹-۲۰۳۰ (۱/۵۸) و بسیار مرطوب) رخ خواهد داد. هم‌چنین، مقادیر این شاخص برای ایستگاه کردخیل در سناریوی خوشبینانه از ۱/۵۹ تا ۲/۹۲- متغیر است که کم‌ترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۳۳-۲۰۳۲ (۲/۹۲-) و خشکسالی خیلی شدید (بیش‌ترین مقدار آن در سال نوعی

جدول ۶- وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه کردخیل در آینده تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه

Table 6- Climate drought situation of Kordkheil station in the future under two optimistic and pessimistic scenarios

وضعیت خشکسالی	RCP8.5 SPI (12 ماهه)	وضعیت خشکسالی	RCP2.6 SPI (12 ماهه)	سال
نزدیک نرمال	0.51	نزدیک نرمال	0.51	2023-24
نزدیک نرمال	0.14	نزدیک نرمال	0.20	2024-25
نزدیک نرمال	0.32	نزدیک نرمال	0.42	2025-26
نزدیک نرمال	0.56	نزدیک نرمال	0.87	2026-27
نزدیک نرمال	0.15	نزدیک نرمال	-0.03	2027-28
نزدیک نرمال	0.06	نزدیک نرمال	0.02	2028-29
بسیار مرطوب	1.58	بسیار مرطوب	1.59	2029-30
نزدیک نرمال	-0.54	نزدیک نرمال	-0.40	2030-31
نزدیک نرمال	-0.79	نزدیک نرمال	-0.77	2031-32
خشکسالی خیلی شدید	-2.85	خشکسالی خیلی شدید	-2.92	2032-33
نزدیک نرمال	0.32	نزدیک نرمال	0.28	2033-34
خشکسالی متوسط	-1.11	خشکسالی متوسط	-1.14	2034-35
نزدیک نرمال	-0.19	نزدیک نرمال	-0.10	2035-36
نزدیک نرمال	0.60	نزدیک نرمال	0.53	2036-37
نزدیک نرمال	-0.17	نزدیک نرمال	-0.15	2037-38
خشکسالی خیلی شدید	-2.03	خشکسالی خیلی شدید	-2.05	2038-39
نسبتاً مرطوب	1.11	نزدیک نرمال	0.90	2039-40
خشکسالی شدید	-1.52	خشکسالی شدید	-1.51	2040-41
نزدیک نرمال	-0.25	نزدیک نرمال	-0.26	2041-42
نزدیک نرمال	-0.13	نزدیک نرمال	-0.19	2042-43
نزدیک نرمال	0.42	نزدیک نرمال	0.38	2043-44
نزدیک نرمال	0.22	نزدیک نرمال	0.25	2044-45
نسبتاً مرطوب	1.33	نسبتاً مرطوب	1.34	2045-46
نزدیک نرمال	0.58	نزدیک نرمال	0.56	2046-47
نزدیک نرمال	0.30	نزدیک نرمال	0.31	2047-48
بسیار مرطوب	1.65	نسبتاً مرطوب	1.57	2048-49
نزدیک نرمال	-0.25	نزدیک نرمال	-0.18	2049-50
نزدیک نرمال	0.32	نزدیک نرمال	0.45	2050-51

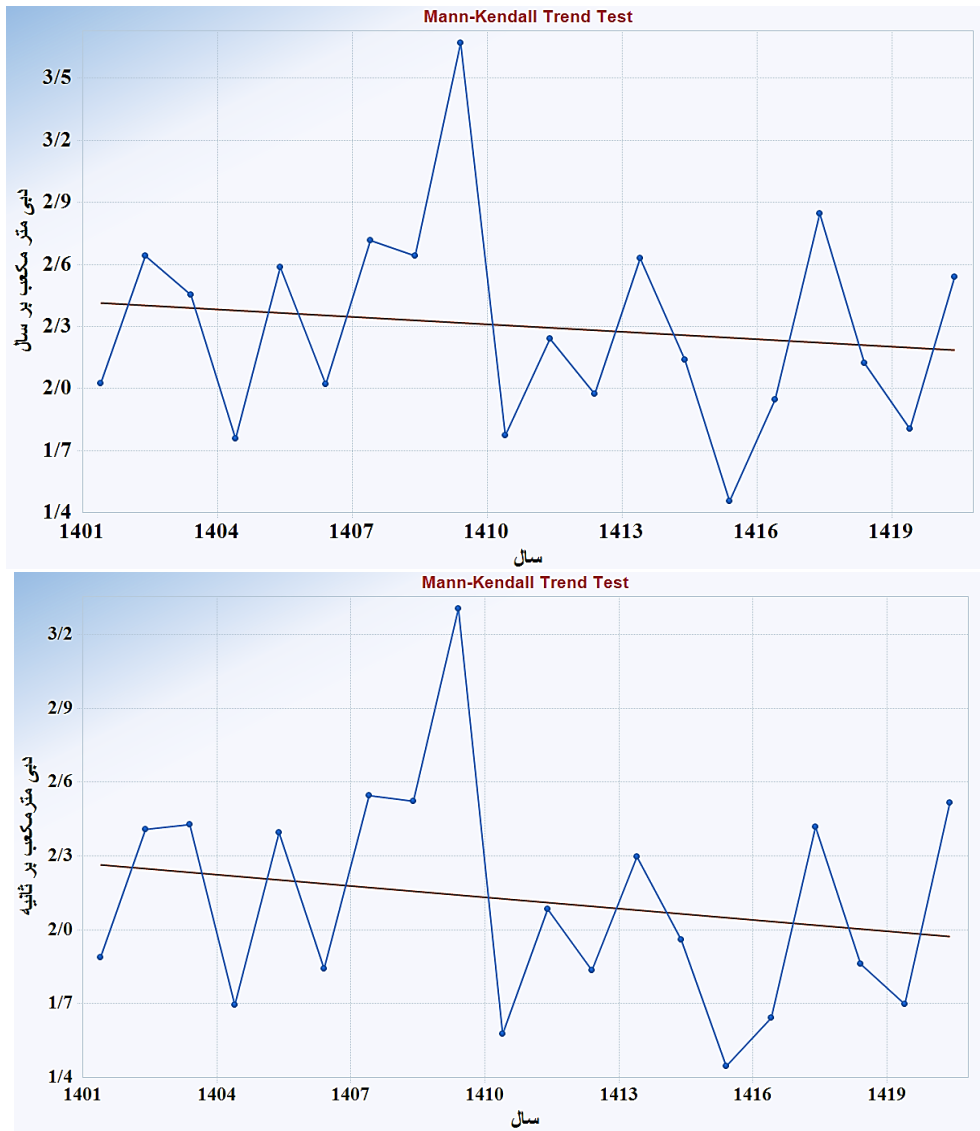
کاهش خواهد بود (جدول ۷ و شکل ۴). از این‌رو، تغییر در میزان دبی جریان رودخانه تجن کم‌تر متأثر از تغییرات اقلیم بوده و عوامل دیگری از قبیل تغییرات کاربری اراضی و یا برداشت در مناطق بالادست به‌دلیل دیگر نقش مؤثرتر در تغییرات دبی جریان این رودخانه خواهد داشت.

۳-۲- ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز تجن  
ابتدا به‌منظور بررسی روند داده‌های دبی در زمان آینده در ایستگاه کردخیل از آزمون من-کندال و شیب رگرسیون OLS استفاده شد. نتایج نشان داد که در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۰) روند داده‌های دبی با شیب بسیار کمی در هر دو سناریوی انتشار

جدول ۷- مشخصات آماری روند دبی ایستگاه کردخیل در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰

Table 7- Statistical characteristics of discharge trend of Kordkheil station in 2020-2040

OLS	M-K test value	P-value	Sig.	ضریب اطمینان	سناریو	ایستگاه
-0.012	-20	0.26	0.05	0.95	RCP2.6	کردخیل
-0.022	-24	0.22			RCP8.5	



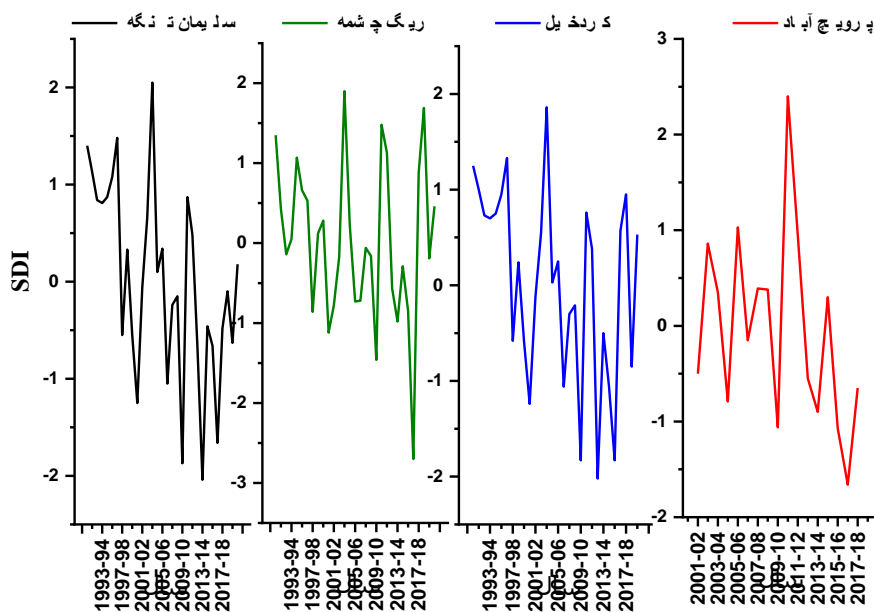
شکل ۴- روند دبی ایستگاه کردخیل در اثر دو سناریوی RCP2.6 (بالا) و RCP8.5 (پایین) در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰

Figure 4- The discharge trend of Kordkheil station under two scenarios RCP2.6 (top), and RCP8.5 (bottom) in the period 2020-2040

بالادست و پایین‌دست حوزه آبخیز سعی شده از ایستگاه‌های هیدرومتری در نقاط مختلف استفاده شود. بنابراین، ایستگاه پرویج‌آباد در بالادست و ایستگاه کردخیل در پایین‌دست حوزه آبخیز و در خروجی آبخیز انتخاب شدند.

در شکل ۵ روند مقادیر خشکسالی داده‌های مشاهداتی در چهار ایستگاه هیدرومتری با استفاده از شاخص SDI در یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۱) و در یک گام زمانی ۱۲ ماهه نشان داده شده است. در این پژوهش به‌منظور بررسی دقیق‌تر میزان دبی در

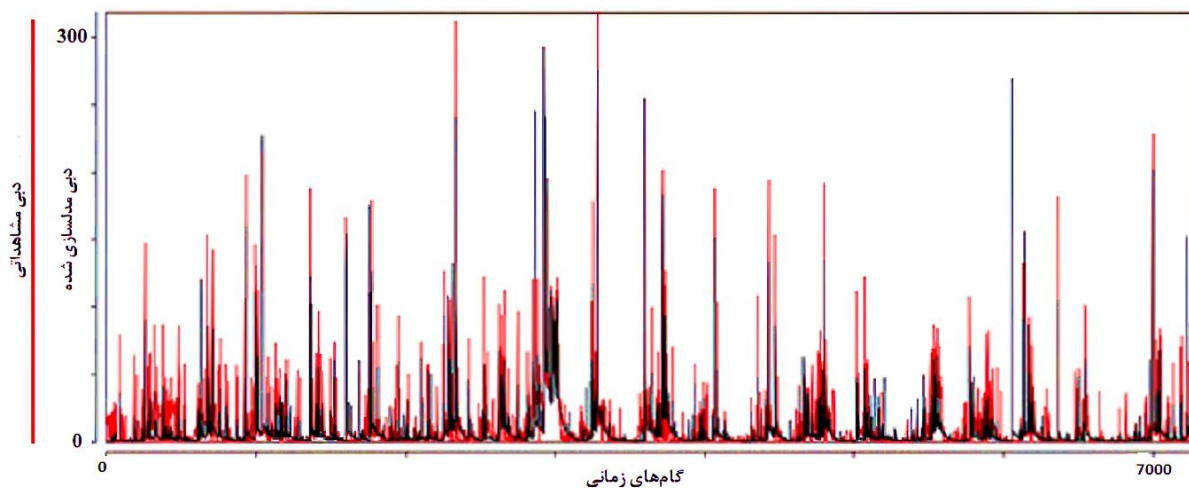




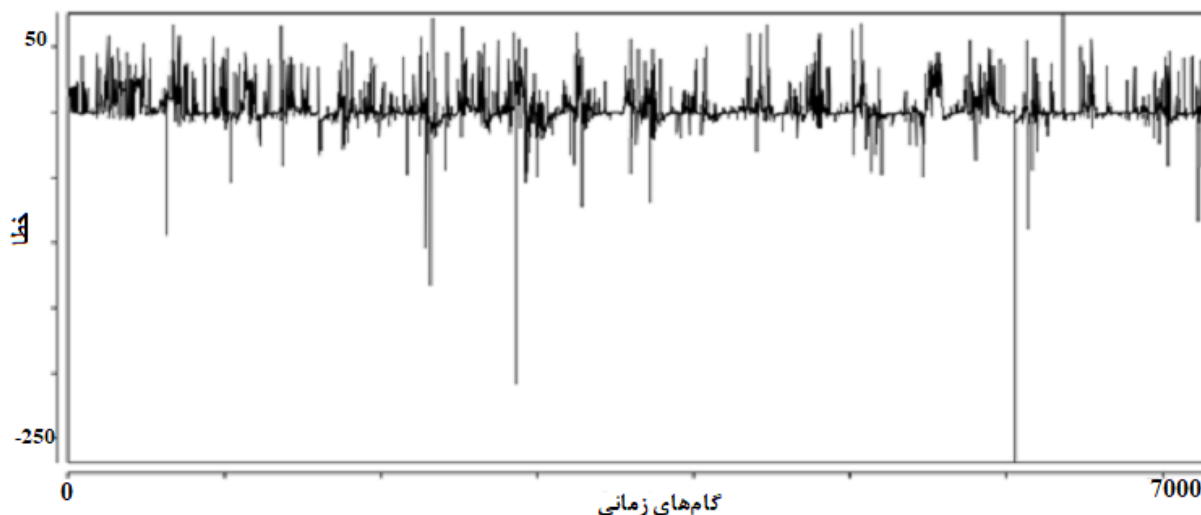
شکل ۵- روند خشکسالی هیدرولوژیکی داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های منتخب  
Figure 5- Hydrological drought trend of observational data of selected stations

توانسته است تا حد قابل قبولی اقدام به شبیه‌سازی دبی نماید و دو نمودار انطباق خوبی با یکدیگر دارند. مقدار خطای مدل‌سازی نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳-۳- نتایج حاصل از مدل هیدرولوژیکی IHACRES  
در شکل ۶ نمودار مقایسه دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است مدل



شکل ۶- مقایسه دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مرحله واسنجی مدل هیدرولوژیکی  
Figure 6- Comparison of simulated discharge and observations in the calibration phase of the hydrological model



شکل ۷- نمودار خطای مدل‌سازی در دو دوره واسنجی و ارزیابی مدل

Figure 7- Diagram of modeling error in two periods of calibration and evaluation of the model

به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۵۳ به دست آمده که بر اساس نتایج حاصل از پژوهش Mojerloo et al. (2019) مناسب است. بعد از این که واسنجی مدل انجام شده داده‌های بارش و دمای حوزه آبخیز در دوره زمانی آینده (۲۰۲۲-۲۰۴۰) وارد مدل شده و رواناب حوزه آبخیز برای این دوره شبیه‌سازی شد.

در جدول ۸ نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه شده است. در این جدول Q بخشی از بارش است که در کل دوره واسنجی و ارزیابی در ایجاد رودخانه حوزه آبخیز مشارکت داشته و P بارش کل دوره واسنجی یا ارزیابی بوده که هر دو عامل بر حسب میلی‌متر در سال محاسبه شدند. مقدار ضریب در دو مرحله ارزیابی و واسنجی

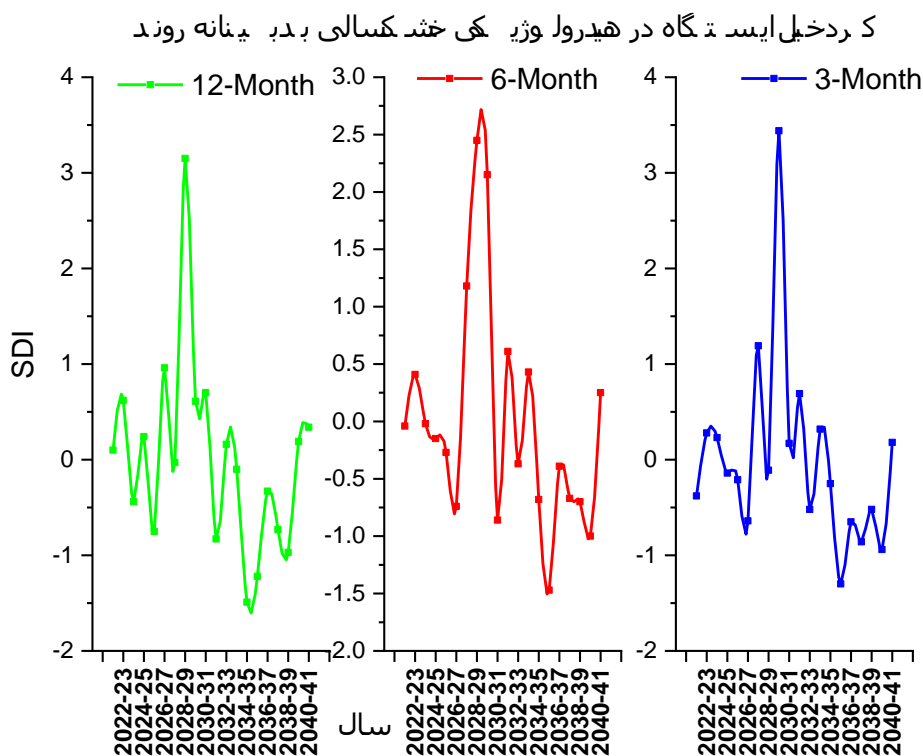
جدول ۸- نتایج واسنجی و ارزیابی مدل در ایستگاه کردخیل حوزه آبخیز تجن در دوره ۱۹۹۷-۲۰۱۷

Table 8- The results of calibration and evaluation of the model at the Kordkheil station of the Tajan Watershed in the period of 1997-2017

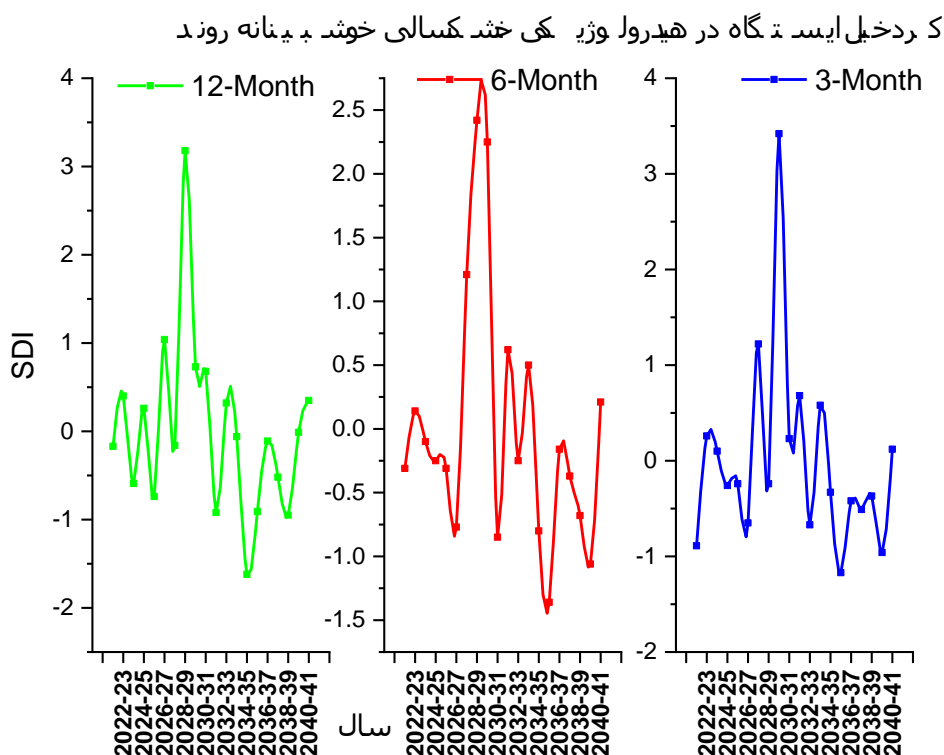
R Squared	NSE	Bias (mm y <sup>-1</sup> )	Q (mm y <sup>-1</sup> )	P (mm y <sup>-1</sup> )	گام زمانی	دوره	ایستگاه
0.58	0.48	26.16	61.22	838.23	روزانه	ارزیابی	کردخیل
0.64	0.53	21.12	-	-	روزانه	واسنجی	

صرفاً نشان‌دهنده اثر تغییرات اقلیم بر دبی است، این احتمال وجود دارد که به دلیل مسائل دیگری میزان دبی دچار تغییرات شود. برای نمونه تغییرات کاربری اراضی که توسط پژوهشگرانی از قبیل Asghari Sersekanroud and Reiahi et al. (2017) و Saeedi Seta (2023) مورد بررسی قرار گرفته است و یا انتقال آب بین حوضه‌ای که در پژوهش Rahimi and Zarei (2019) به آن اشاره شده است، از جمله عوامل تأثیرگذار بر دبی جریان محسوب می‌شوند. نتایج این پژوهش با یافته‌های Babolhakami et al. (2020) مبنی بر کاهش دبی رودخانه نکا در استان مازندران در دوره‌های آتی در اثر خشکسالی مطابقت ندارد و دلایل زیادی از قبیل نوع کاربری‌ها و یا افزایش نگره‌داشت آب پشت سد گلورد و غیره می‌تواند باعث این کاهش حجم رواناب در این منطقه باشد.

در شکل‌های ۸ و ۹ نیز نتایج حاصل از بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاه کردخیل با استفاده از SDI در یک دوره ۲۰ ساله و در گام‌های زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه با استفاده از سناریوهای بدینانه (RCP8.5) و خوشبینانه (RCP2.6) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها نیز مشخص است بیش‌ترین تغییرات خشکسالی در دوره آینده در این دو سناریو نیز مربوط به گام زمانی سه ماهه خواهد بود و میزان تغییرات از حدود ۱/۵- (خشکسالی متوسط) تا حدود ۳/۵ (بدون خشکسالی) نوسان خواهد داشت. بنابراین، این نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که میزان دبی حوزه آبخیز در آینده بر اثر تغییرات اقلیمی دچار تغییرات زیادی نخواهد شد و دلیل آن احتمالاً رخدادهای بارشی شدید در اثر تغییر اقلیم باشد که باعث سیلابی شدن دبی رودخانه می‌شود. با توجه به این که این نتایج



شکل ۸- روند خشکسالی هیدرولوژیکی آینده ایستگاه کردخیل با استفاده از سناریوی RCP8.5 با SDI  
Figure 8- Future hydrological drought trend of Kordkheil station using RCP8.5 scenario with SDI



شکل ۹- روند خشکسالی هیدرولوژیکی آینده ایستگاه کردخیل با استفاده از سناریوی RCP2.6 با SDI  
Figure 9- Future hydrological drought trend of Kordkheil station using RCP2.6 scenario with SDI

کردخیل را در گام‌های زمانی ۱۲ ماهه و برای دو سناریوی خوشبینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) با استفاده از SDI

در جدول ۹ نتایج حاصل از وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی و مقادیر شاخص طول دوره پیش‌بینی شده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) ایستگاه

چنین، نزدیک بودن به دریای خزر نیز با ایجاد بارش‌های بیش‌تر در این منطقه زمینه‌افزایش رواناب را ایجاد کرده است که این نتایج با یافته‌های (Tavangar et al. (2019) مبنی بر تشدید وقایع بارش و تأثیر آن بر رواناب حوزه‌های آبخیز در شمال کشور مطابقت دارد. با این وجود بر اساس نتایج موجود احتمال ایجاد خشکسالی هیدرولوژیکی شدید در هر دو سناریو در سال ۲۰۳۵-۲۰۳۴ زیاد است که به احتمالاً زیاد ناشی از تغییرات بارش در این دوره باشد. بنابراین، باید تدابیر لازم در آن سال و سال قبل و بعد از آن جهت کاهش خسارت به کشاورزان آبی حاشیه رودخانه‌تجن اندیشیده شده و اطلاع‌رسانی‌های قبلی جهت اتخاذ کشت مناسب در آن سال‌ها انجام شود.

نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص برای ایستگاه کردخیل در سناریوی بدبینانه از ۳/۱۵ تا ۱/۴۹- متغیر است که کم‌ترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۳۴-۲۰۳۵ (۱/۴۹-) و خشکسالی متوسط) و بیش‌ترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۲۸-۲۰۲۹ (۳/۱۵) و فاقد خشکسالی) رخ خواهد داد. همچنین، مقادیر این شاخص برای ایستگاه کردخیل در سناریوی خوشبینانه از ۳/۱۸ تا ۱/۶۲- متغیر است که کم‌ترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۳۴-۲۰۳۵ (۱/۶۲-) و خشکسالی شدید) و بیش‌ترین مقدار آن در سال نوعی ۲۰۲۸-۲۰۲۹ (۳/۱۸) و فاقد خشکسالی) رخ خواهد داد. با توجه به این که این ایستگاه در خروجی حوزه آبخیز قرار دارد و اغلب رواناب‌های ناشی از حوزه آبخیز بالادست وارد این رودخانه می‌شود دبی این رودخانه معمولاً زیاد بوده و کم‌تر تحت تأثیر تغییرات می‌باشد. هم

جدول ۹- وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاه کردخیل در آینده تحت دو سناریوی مختلف

Table 9- Hydrological drought situation of Kordkheil station in the future under two different scenarios

وضعیت خشکسالی	RCP8.5 SDI (12 ماهه)	وضعیت خشکسالی	RCP2.6 SDI (12 ماهه)	سال
فاقد خشکسالی	0.10	خشکسالی ملایم	-0.17	2021-22
فاقد خشکسالی	0.62	فاقد خشکسالی	0.40	2022-23
خشکسالی ملایم	-0.44	خشکسالی ملایم	-0.59	2023-24
فاقد خشکسالی	0.24	فاقد خشکسالی	0.26	2024-25
خشکسالی ملایم	-0.75	خشکسالی ملایم	-0.74	2025-26
فاقد خشکسالی	0.96	فاقد خشکسالی	1.04	2026-27
خشکسالی ملایم	-0.03	خشکسالی ملایم	-0.16	2027-28
فاقد خشکسالی	3.15	فاقد خشکسالی	3.18	2028-29
فاقد خشکسالی	0.61	فاقد خشکسالی	0.73	2029-30
فاقد خشکسالی	0.70	فاقد خشکسالی	0.68	2030-31
خشکسالی ملایم	-0.83	خشکسالی ملایم	-0.92	2031-32
فاقد خشکسالی	0.16	فاقد خشکسالی	0.32	2032-33
خشکسالی ملایم	-0.10	خشکسالی ملایم	-0.06	2033-34
خشکسالی متوسط	-1.49	خشکسالی شدید	-1.62	2034-35
خشکسالی متوسط	-1.22	خشکسالی ملایم	-0.91	2035-36
خشکسالی ملایم	-0.33	خشکسالی ملایم	-0.11	2036-37
خشکسالی ملایم	-0.73	خشکسالی ملایم	-0.52	2037-38
خشکسالی ملایم	-0.97	خشکسالی ملایم	-0.95	2038-39
فاقد خشکسالی	0.19	خشکسالی ملایم	-0.01	2039-40
فاقد خشکسالی	0.34	فاقد خشکسالی	0.35	2040-41

نشان‌دهنده نوسانات اقلیمی است که یکی از نشانه‌های بروز تغییرات اقلیمی در یک منطقه است. بنابراین، بر اساس نتایج به‌دست آمده نمی‌توان بیان کرد که ۳۰ سال آینده کاملاً در وضعیت خشک و یا در وضعیت کاملاً مرطوب قرار خواهد داشت. اگر چه استفاده از رویکردهای سازگاری جهت کاهش اثرات خشکسالی در یک بازه زمانی بلندمدت ضرورت دارد. وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی در رودخانه‌تجن نیز نشان‌دهنده نوساناتی بوده؛ به طوری که در برخی از سال‌ها روند دبی جریان کاهشی و در برخی سال‌ها روند افزایشی است. این نوسانات نیز نشان‌دهنده یکی دیگر از اثرات تغییرات اقلیمی در یک منطقه است که باعث ایجاد بارش‌های شدید و سیلابی شده و دبی رودخانه‌ها را در برخی

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی هواشناسی در دوره پایه زمانی ۲۰۱۹-۱۹۹۲ و در دوره آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۳ و خشکسالی هیدرولوژیکی رودخانه‌تجن در ۲۰ سال آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۰) در قالب دو سناریوی خوشبینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) ارزیابی شد. نتایج ارزیابی نشان داد که در هر دو سناریوی انتشار احتمال رخداد خشکسالی‌های اقلیمی حتی خیلی شدید در برخی از سال‌ها در آینده وجود دارد گرچه در برخی از سال‌ها نیز وضعیت اقلیمی می‌تواند بسیار مرطوب باشد. این تغییرات در وضعیت خشکسالی هواشناسی در یک دوره ۲۷ ساله

- ۱۱۸-۹۵ (۳)۳۴  
doi:10.22108/GEP.2023.134432.1535  
باب‌الحکمی، علی، غلامی سفیدکوهی، محمدعلی، و عمادی، علیرضا (۱۳۹۹). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی و پیش‌بینی رواناب حوضه رودخانه نکا طی دوره‌های آتی. *اکوهیدرولوژی*، ۷(۲)، ۲۹۱-۳۰۲. doi:10.22059/IJE.2020.287020.1190
- بروغنی، مهدی، فهیمی‌نژاد، الهام، و پژوهان، ایمان (۱۴۰۱). پیش‌بینی خشک‌سالی سواحل دریای خزر با تأثیر تغییر اقلیم. *علوم محیطی*، ۲۰(۲)، ۹۹-۱۱۶.
- بروغنی، مهدی، مرادی، حمیدرضا، زنگنه اسدی، محمدعلی، و پورهایمی، سیمیا (۱۳۹۸). ارزیابی نقش خشکسالی بر فراوانی وقوع گرد و غبار در استان خراسان رضوی. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۱(۵)، ۱۰۹-۱۲۱. doi:10.52547/envs.2022.1038
- توانگر، شهلا، مرادی، حمیدرضا، و مساح بوانی، علیرضا (۱۳۹۸). اثر تغییر اقلیم بر مقدار و شدت باران در شمال ایران. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۲)، ۱۹۰-۲۰۴. doi:10.22125/IWE.2019.100751
- چمنی، رضا، صادقی، سیدحمیدرضا، وفاخواه، مهدی، و نقدی، مریم (۱۴۰۱). پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری حوزه آبخیز چالوس مبتنی بر شاخص خشک‌سالی. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۴(۱)، ۶۵-۷۵. doi:10.22092/ijwmse.2021.352600.1855
- دودانگه، اسماعیل، شاهدی، کاکا، و سلیمانی، کریم (۱۳۹۷). کاربرد تئوری کوپلا جهت ارزیابی عملکرد مدل هیدرولوژیکی IHACRES (مطالعه موردی: حوضه آبریز طالقان). *فیزیک زمین و فضا*، ۴۴(۱)، ۷۱-۸۸. doi:10.22059/JESPHYS.2017.206373.1006789
- راهواره، ملیحه، معتمد وزیری، بهارک، مقدم نیا، علیرضا، و مریدی، علی (۱۴۰۱). بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه زربینه‌رود با استفاده از شاخص‌های SPI و SRI تحت سناریوهای تغییر اقلیم. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۱(۳۷)، ۱۵-۲۶. doi:10.22052/deej.2023.248790.1005
- رجایی، فاطمه، دهمرده بهروز، رضا، و قلی‌پور، مصطفی (۱۳۹۹). مدل‌سازی بار فسفات ورودی به دریای خزر از حوزه آبخیز تجن با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۸)، ۱۶۹-۱۸۱. doi:10.22034/JEST.2018.20105.2911
- رحیمی، داریوش، و زارعی، فرحناز (۱۳۹۸). اثرات تغییر اقلیم بر حجم منابع آب و انتقال آب بین‌حوضه‌ای. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۲(۳)، ۶۱-۷۴. doi:10.22055/JISE.2017.21862.1565
- رحیمیان ایرانی‌شاهی، حمید، مرادی، حمیدرضا، و جلیلی، خلیل (۱۴۰۱). روند تغییرات بارش و دما در مقیاس‌های زمانی مختلف در حوزه آبخیز کرخه. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۱-۱۲. doi:10.22098/MMWS.2022.9520.1048
- ریاحی، محمدرضا، سلیمانی، کریم، موسوی، سیدرمضان، و بنی‌هاشمی، معصومه (۱۳۹۶). بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر دبی رودخانه با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز لکشا نکارود). *پژوهش آب ایران*، ۱۱(۱)، ۳۳-۴۳.

از مواقع سال افزایش می‌دهد. با این حال اتکا به بررسی میزان دبی جریان منطقه به تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده دقیق وضعیت خشکسالی باشد؛ زیرا برخی از اقدامات در حوزه‌های آبخیز می‌تواند تا حد زیادی دبی جریان یک رودخانه را متأثر نموده و باعث تغییر در داده‌های دبی جریان شود. از این‌رو، به‌منظور بررسی تغییرات بلندمدت دبی جریان، باید به عوامل تأثیرگذار دیگر از قبیل تغییرات کاربری اراضی، انتقال آب بین‌حوضه‌ای، ایجاد تأسیسات آب‌بر در منطقه و هر نوع بارگزاری جدید بر جریان رودخانه توجه شود. از این‌رو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اثر عوامل مختلف بر دبی جریان رودخانه به‌صورت جامع با یک‌دیگر دیده شود. به هر تقدیر بر اساس جمیع شرایط و وضعیت اقلیمی حاکم بر کشور ما بروز چنین نوساناتی در دوره‌های مختلف دور از انتظار نبوده و وضعیت ترسالی یک سال نمی‌تواند نشان‌دهنده گذر از وضعیت خشکسالی باشد. بر این اساس تمامی اقدامات و رویکردهای اتخاذی در حوزه‌های آبخیز باید بر اساس سازگاری و انطباق با نوسانات اقلیمی باشد تا از بروز خسارت‌های شدید در مواقع ترسالی (سیلاب‌های ناگهانی) و خشکسالی (تلفات کشاورزی) جلوگیری شود.

### سپاس‌گزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از حمایت مادی صندوق پژوهش‌گران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۱۴۸۱۷ تشکر نمایند.

### تضاد منافع نویسندگان

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

### دسترسی به داده‌ها

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

### مشارکت نویسندگان

محمدتقی آوند: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ حمیدرضا مرادی: راهنمایی، کنترل نتایج؛ زینب حزباوی: مشاوره، ویرایش و بازبینی متن مقاله.

### منابع

اصغری سراسکانرود، صیاد، و سعیدی ستا، علیرضا (۱۴۰۲). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی روی رواناب حوضه رودخانه قره‌چای با استفاده از مدل SWAT. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*،

- قنبری، سبروس، شایان، محسن و یوسفی‌پور، سیدینوس (۱۳۹۹). ارزیابی اثرات خشکسالی (خشکسالی هواشناسی) بر توسعه روستایی در روستاهای شهرستان نیمروز. کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، ۲(۸)، ۲۴۷-۲۶۶.
- کیانی سلمی، صدیقه، و امینی فسخودی، عباس (۱۳۹۶). تبیین عوامل اجتماعی خشکسالی و شناسایی آثار آن. *برنامه‌ریزی فضایی*، ۷(۴)، ۱-۱۸. doi:10.22108/sppl.2017.81267.0
- محیط اصفهانی، پوریا، سلطانی، سعید، مدرس، رضا، و پورمنافی، سعید (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص خشکسالی چندمتغیره MSDI و پایش خشکسالی هواشناسی-کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری. *علوم آب و خاک*، ۳(۳)، ۳۳-۴۷. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3957-fa.html>
- مظفری، مرتضی، حسینی، زینب، و فیجانی، الهام (۱۴۰۱). ارزیابی نقش خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بر خشکیدن دریاچه‌های بختگان و طشک. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۴)، ۷۹-۱۰۰. doi:10.22111/JNEH.2022.39448.1835
- مفیدی‌پور، نازنین (۱۳۹۱). بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز اترک. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۳(۵)، ۱۶-۲۶. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-52-fa.html>
- موجرلو، فاطمه، فضل‌اولی، رامین، و عمادی، علیرضا (۱۳۹۸). کاربرد مدل IHACRES برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبریز تجن. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۱)، ۱۲۹-۱۴۱. doi:20.1001.1.20087942.1398.13.1.12.8
- زارعی، مهدی، حبیب‌نژاد روشن، محمود، شاهدی، کاکا، و قنبرپور، محمدرضا (۱۳۹۰). کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی IHACRES به‌منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه آب و خاک. doi:10.22067/JSW.V0I0.8512.۱۱۴-۱۰۴، ۱(۲۵)
- زندیدره‌غریبی، فاطمه، خورسندی کوهانستانی، زهره، مزین، ملیحه، و آرمان، نسیم (۱۳۹۶). مقایسه عملکرد دو مدل هیدرولوژیکی IHACRES و GR2M در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه آبخیز دره تخت. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۰(۲)، ۱۴۷-۱۵۸. doi:10.22055/JISE.2017.13169
- ساعدی، زهرا، مقدسی، مهنوش، پایمزد، شهلا، و فراهانی، امیرحسین (۱۳۹۸). بررسی رابطه‌ی خشکسالی هیدرولوژیکی در واکنش به خشکسالی هواشناسی و اثرات مخزن (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۹)، ۲۳۴۱-۲۳۵۳. doi:10.22059/IJSWR.2019.276183.668128
- سلیمانی مطلق، مهدی، طالبی، علی، و زارعی، مهدی (۱۳۹۴). بررسی اثرات خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی حوزه آبخیز کشکان. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۶(۱۲)، ۱۵۴-۱۶۵. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-566-fa.html>
- طالبی، علی، شهرپور، مهراناز ملکی‌نژاد، حسین، پورمحمدی، سمانه، و حسینی، زین‌العابدین (۱۳۹۸). بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر سیل‌خیزی و رسوب‌زایی حوزه آبخیز حنیفقان، فارس. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۰(۲۰)، ۳۷-۲۵. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-817-fa.html>
- Asghari Sersekanroud, S., & Saeedi Seta, A. (2023). Investigating the effects of land use changes on the runoff of Qara Chai River Basin using the SWAT model. *Geography and Environmental Planning*, 34(3), 95-118. doi: 10.22108/gep.2023.134432.1535. [In Persian]
- Babolhakami, A., Gholami Sefidkouhi, M.A., & Emadi, A. (2020). Assessing the impact of climate change on drought and forecasting Neka River Basin Runoff in future periods. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 7(2), 291-302. doi: 10.22059/ije.2020.287020.1190. [In Persian]
- Boroghani, M., Moradi, H., Zangane Asadi, M., & Pourhashemi, S. (2019). Evaluation of the role of drought in frequency of dust in Khorasan Razavi province. *Environmental Science and Technology*, 21(5), 109-121. doi: 10.22034/jest.2019.10464. [In Persian]
- Boroghani, M., Fahiminejad, E., & Pazhouhan, I. (2022). Predicting drought impact on the Caspian Sea coast affected by climate change. *Environmental Sciences*, 20(2), 99-116. doi: 10.52547/envs.2022.1038. [In Persian]
- Chen, S., Zhang, L., Zhang, Y., Guo, M., & Liu, X. (2020). Evaluation of tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite precipitation products for drought monitoring over the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 30(1), 53-67. doi:10.1007/s11442-020-1714-y.
- Ding, Y., Xu, J., Wang, X., Cai, H., Zhou, Z., Sun, Y., & Shi, H. (2021). Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China. *Journal of Environmental Management*, 283, 111980. doi:10.1016/j.jenvman.2021.111980
- Dodangeh, E., Shahedi, K., & Soleimani, K. (2018). Application of Copula theory for IHACRES hydrologic model evaluation (Case study: Taleghan watershed). *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(1), 71-88. doi: 10.22059/jesphys.2017.206373.1006789 [In Persian]
- Fooladi, M., Golmohammadi, M.H., Safavi, H.R., & Singh, V.P. (2021). Application of meteorological drought for assessing watershed health using fuzzy-based reliability, resilience, and vulnerability. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, 102616. doi:10.1016/j.ijdrr.2021.102616.
- Ghanbari, S., Shayan, M., & Usefipoor, Y. (2021). Assessing the effects of drought (meteorological drought) on the rural



- development in the villages of Nimroz County. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 8(2), 247-266.
- Jakeman, A.J., Littlewood, I.G., & Whitehead, P.G. (1990). Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology* 117, 275-300. doi:10.1016/0022-1694(90)90097-H
- Kiani Salmi, S., & Amini Faskhoodi, A. (2018). Identifying the Social factors of drought and uncovering its effects. *Spatial Planning*, 7(4), 1-18. doi: 10.22108/sppl.2017.81267.0. [In Persian]
- Mofidipour, N. (2012). The analysis of relationship between meteorological and hydrological droughts in Atrak Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 3(5), 16-26 <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-52-fa.html> [In Persian]
- Mohit Esfahani, P., Soltani, S., Modarres, R., & Pourmanafi, S. (2020). Assessment of multivariate standardized drought index (MSDI) and meteorological agricultural drought monitoring in Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Journal of Water and Soil Science*, 24(3), 33-47 <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3957-fa.html>. [In Persian]
- Mojerloo, F., Fazloulou, R., & emadi, A. (2019). Application of the IHACRES model to assess the effects of climate change on the discharge of Tajan Watershed. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(1), 129-141. [In Persian]
- Mozafari, M., Hosseini, Z., & Fijani, E. (2022). Assessing the role of meteorological and hydrological droughts on the drying up of the Bakhtegan and Tashk lakes. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 79-100. doi: 10.22111/jneh.2022.39448.1835. [In Persian]
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *Journal of European Water*, 23(24), 67-77.
- Portner, H.O., Roberts, D.C., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., & Okem, A. (2022). IPCC: *Summary for policymakers*. <https://edoc.unibas.ch/91322/>
- Rahimi, D., & Zarei, F. (2019). The effect of climate change on volume of water resources and transfer of Inter-Basin water. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 42(3), 61-74. doi: 10.22055/jise.2017.21862.1565. [In Persian]
- Rahimiani Iranshahi, H., Moradi, H.R., & Jalili, K. (2022). Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 1-12. doi: 10.22098/mmws.2022.9520.1048. [In Persian]
- Rahvareh, M., Motamedvaziri, B., Moghaddamnia, A., & Moridi, A. (2023). Investigating meteorological and hydrological drought in Zarrineh River Basin. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 11(37), 15-26. doi: 10.22052/deej.2023.248790.1005. [In Persian]
- Rajaei, F., Dahmardeh Behrooz, R., & Gholipour, M. (2020). Modelling of input phosphate load to the Caspian Sea from Tajan Watershed using soil and water assesment tool. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(8), 169-181. doi: 10.22034/jest.2018.20105.2911. [In Persian]
- Reiahi, M., Solimani, K., Mosavi, S.R., & Banihashemi, M. (2017). Investigation effect of land use change on the river discharge using HEC-HMS model (Case study: watershed Neka Leaksha). *Iranian Water Researches Journal*, 11(1), 33-43. [In Persian]
- Saedi, Z., Moghaddasi, M., Paimozd, S., & Farahani, A.H. (2020). Evaluation of hydrological and meteorological drought relationship and reservoir impacts (Case study: Zayandeh Rood River Basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2341-2353. doi: 10.22059/ijswr.2019.276183.668128. [In Persian]
- Soleimani Motlagh, M., Talebi, A., & Zareei, M. (2016). The study of drought on the quality of surface water resources in Kashkan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 6(12), 154-165. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-566-fa.html>. [In Persian]
- Talebi, A., Shahrivar, M., Malekinezhad, H., Poormohamadi, S., & Hosseini, Z. (2019). Investigation of the effects of land use change on flooding and sedimentation in Honifaqan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 10(20), 25-37. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-817-fa.html>. [In Persian]
- Tavangar, S., Moradi, H., & Massah Bavani, A.R. (2019). Climate change effect on the rainfall amount and intensity in the southern coast of the Caspian Sea. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 10(2), 190-204. doi: 10.22125/iwe.2019.100751. [In Persian]
- Vidarthi, V.K., & Jain, A. (2020) Knowledge extraction from trained ANN drought classification model. *Journal of Hydrology*, 585, 124804. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124804.
- Wilhite, D.A., & Buchanan-Smith, M. (2005). Drought as hazard: understanding the natural and social context. Drought and water crises: *Science, Technology, and Management Issues*, 3, 29.
- Wu, J., Chen, X., Yao, H., & Zhang, D. (2021). Multi-timescale assessment of propagation thresholds from meteorological to hydrological drought. *Science of the Total Environment*, 765, 144232. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144232

- Zandi Daregharibi, F., Khorsandi, Z., Mozayan, M., & Arman, N. (2017). Comparing the performance of two hydrological models, IHACRES and GR2M For simulating monthly flow of Dareh-Takht Basin. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 40(2), 147-158. doi: 10.22055/jise.2017.13169. [In Persian]
- Zarei, M., Habibnejad, M., Shahedi, K., & Ghanbarpour, M. (2011). Calibration and evaluation of IHACRES hydrological model for daily flow simulation. *Journal of Water and Soil*, 25(1), 104-114. doi: 10.22067/jsw.v0i0.8512. [In Persian]
- Zhao, C., Brissette, F., Chen, J., & Martel, J.L. (2020). Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America. *Journal of Hydrology*, 584, 124316. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124316