



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Dynamic Analysis of Hydrological Drought using Constant Threshold Method and Vensim Software

Monir Alishahi Chegeni¹, Shahla Paimozd^{2*} and Mahdi Rahimi³

¹M.Sc. Alumni, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran

²Assist. Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran

³M.Sc. Alumni, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Tehran University, Karaj, Iran

Article information

Received: December 10, 2022

Revised: January 14, 2023

Accepted: January 14, 2023

Keywords:

Drought Duration

Drought Volume

Frequency Analysis

System Thinking

*Corresponding author:

s-paimozd@araku.ac.ir



Abstract

This study aimed to present a dynamic simulation of hydrological drought using Vensim and the constant threshold level method in the Dorud-Borujerd basin in the 1991-2019 period. First, the threshold levels were estimated, and then the drought duration and volume were quantified. Next, the frequency of the highest duration and volume values was analyzed to determine the return periods. While confirming the superiority of the systems thinking approach, the results showed that the highest drought duration figures were 229 and 123 days, respectively, at the 70 and 90% threshold levels of the flow duration curve in the Bitun station. Tire station recorded 21.320 and 38.47 MCM for 70% and 90% threshold levels, respectively, which were the largest figures for drought volume. The frequency analysis of these figures obtained from dynamic simulation showed that the drought duration and volume will have a return period of 25 and 8 years and 4 and 14 years, respectively, at 70% and 90% threshold levels. Moreover, 2012 and 2015 were very dry years in terms of both duration and volume. Therefore, drought episodes have been occurring in the Dorud-Borujerd basin for many years and will continue with more intensity in the future.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introduction

The drought recurrence, continued dry days, and falling surface water resource levels affect the management of water resource systems. Investigating the drop in river water level due to hydrological drought and implementing preventive measures require a thorough understanding of the complex systems of water resources and their behavior over time. The dynamic approach explores the behaviors of a

complex system, focusing on feedback loops and nonlinear effects. Therefore, considering the importance of factors such as the duration of dry, the volume of hydrological drought, and their role in water resources management and planning, this study conducted a simulation of hydrological drought in the Dorud-Borujerd basin using constant threshold level in the Vensim environment within the 1991-2019 period.



Material and Methods

Dorud-Borujerd basin is located in Lorestan province, covering an area of 2546 km² in the northernmost part of the Great Karun Watershed. Tire is one of the rivers flowing in this basin, which constitutes the basin's surface water resource together with Bitunn, Rahim Abad, and Mohammad Haji rivers. In the first step, the discharge levels of these rivers were evaluated in their respective stations in terms of homogeneity and accuracy. To start the simulation, the daily discharges were listed in a descending order. The probability of their occurrence was calculated and the Q_{70} and Q_{90} threshold values were estimated by drawing the flow duration curve in Vensim Software. Then, the model calculated the number of dry days (drought duration) after comparing the threshold level and the daily discharges of all the stations, which were fed to the model through the flow variable. In this stage, the model created a counter using the delay variable, which aggregates the number of dry days during the defined periods using the

stock variable. The drought volume is calculated by comparing the values of discharge threshold and daily discharge, and if necessary the aggregation and volume of drought during the period under study. In the next step, small droughts were eliminated using the Internal Criterion method. Then the initial model output which included the threshold levels, drought duration, and drought volume during the predefined periods was reviewed by the model and the maximum drought volume and duration were calculated. Easyfit was used to determine the best probability distribution and return period for the maximum drought duration and volume.

Results

By comparing the threshold and daily discharge values, the number of dry days was extracted as the basis for calculating the drought duration in the research periods. Fig. 1 shows the annual drought duration at the Q_{70} and Q_{90} thresholds in all stations of the region.

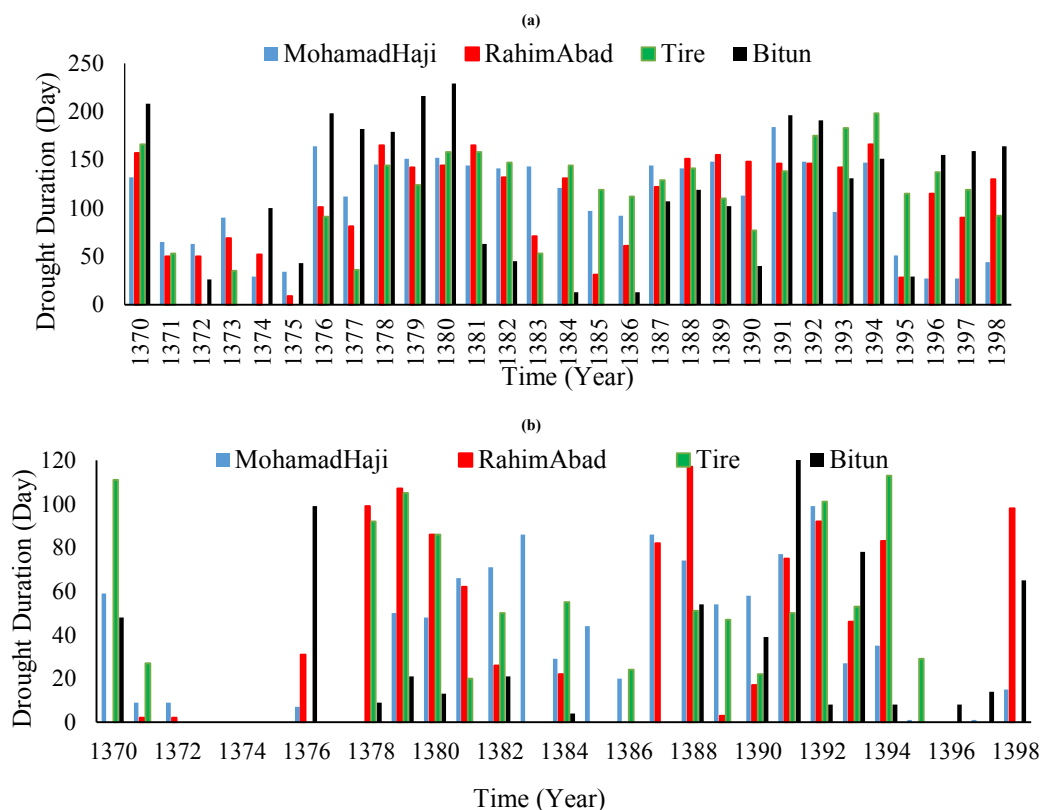


Fig. 1 Discharge drought duration in the study area stations at (a) 70% and (b) 90% of the flow duration curve

As shown above, the region shows similar behavior throughout the simulation period at 70 and 90% discharge threshold levels under the flow duration curve. In Fig. 1a, at the 70% of the flow duration curve, the Bitun station recorded 229 days of drought in the region in 2001, which

is higher than the values recorded by all stations throughout the research period. According to Fig. 1, in the entire period, the drought duration is 70% less than the threshold level, which is due to the lower discharge values at the 90% threshold level. According to Fig. 1b, the Bitun station

recorded the longest drought duration in the 90% threshold with 123 dry days in 2012. This is because of the lower amount of flow passing through this station compared to other stations in the region.

The highest drought volume values at the 70% level were recorded in the 1999-2002 and 2012-2015 periods. In 2014, Tire experienced a 198-day drought with the highest recorded drought volume of 21.320 (MCM). The highest drought volume values at the 90% level were recorded in Tire followed by the Rahim Abad station. The discharge showed smaller volumes in about 60% periods in Tire station, which affects the slope of this station's flow duration curve. Therefore, the 70 and 90% thresholds show higher figures than those in periods with lower and similar discharge trends throughout the whole period. As a result, droughts will occur with a higher volume and in shorter periods. The same can be seen in Rahim Abad and Mohammad Haji stations, respectively, with the same trend and less intensity. Regarding the Bitun station, the lowest and highest discharge were being repeated with fewer fluctuations throughout the period. Therefore, the discharge figures of the 70 and 90% threshold levels are closer to those of the entire period with higher duration and less drought volume.

The results of the frequency analysis showed that the highest drought duration at the 70 and 90% levels belonged to the Bitun and Rahim Abad stations, respectively, with 151 and 116 days. The return period of these drought events is 9 and 5 years, respectively. Regarding the drought volume, the highest deficiency at the 70 and 90% levels belonged to the flow of the Tire station at

198.3 (m^3/s) and 44.53 (m^3/s), respectively. At these levels, the return period of these drought events is 12 and 4 years.

Conclusions

In most of the years, short but continued droughts have occurred in the Dorud-Borujerd basin. The highest duration values were recorded at the Bitun station, indicating the greatest drought duration. Therefore, in similar climates within the Dorud-Borujerd basin, shallow rivers experience droughts with higher duration and smaller volumes. Tire station showed the highest drought volume. The drought duration and volume cannot be the same simultaneously considering the changes in the slope of the flow duration curve due to different fluctuations in each station. This region has completely different climates susceptible to drought. Therefore, the drought volume (magnitude) will involve short periods in high-discharge tributaries experiencing hydrological drought in basins with different climates. The return period of the maximum drought duration and volume in Dorud-Borujerd basin was at least one year. In addition, the high-discharge river of Tire will show signs of hydrological drought through reduced volume at least once every four years.

Data Availability

The data used in this research are presented in the paper.

Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

تحلیل دینامیکی خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از روش حد آستانه ثابت و نرم افزار Vensim

منیر علیشاهی چگنی^۱، شهلا پایمزد^{۲*} و مهدی رحیمی^۳

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران
^۲استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران
^۳دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۰۹/۱۹]	هدف پژوهش حاضر، شبیه سازی دینامیکی خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از نرم افزار Vensim و روش حد آستانه ثابت در حوضه دورد-بروجرد طی دوره آماری ۱۳۷۰ الی ۱۳۹۸ می باشد. لذا با برآورد مقادیر سطوح آستانه در محیط Vensim، تداوم روزهای خشک و حجم خشکسالی ها محاسبه شد. در ادامه، آنالیز فراوانی مقادیر حداکثر تداوم و حجم خشکسالی، جهت تعیین دوره بازگشت وقایع انجام شد. نتایج ضمن برتری تفکر سامانه ای، نشان داد حداکثر مقادیر تداوم خشکسالی معادل ۲۲۹ و ۱۲۳ day به ترتیب در سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان در ایستگاه بیاتون رخ داده و ایستگاه تیره با ثبت مقادیری معادل ۲۱/۳۲۰ و ۳۸/۴۷ MCM به ترتیب برای سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪، بیش ترین حجم خشکسالی را به خود اختصاص داده است. آنالیز فراوانی مقادیر حداکثر تداوم و حداکثر حجم خشکسالی های منتج از شبیه سازی دینامیک، نشان داد تداوم و حجم خشکسالی در سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪، به ترتیب دوره بازگشتی معادل ۲۵ و ۸ yaer و نیز ۴ و ۱۴ year خواهند داشت. همچنین سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ از جمله سال های بسیار خشک به لحاظ تداوم روزهای خشک و حجم خشکسالی برآورد گردید. لذا در حوضه دورد-بروجرد وقوع خشکسالی از سال ۱۳۹۱ شروع شده و در آینده نیز با شدت بیش تری ادامه خواهد داشت.
تاریخ بازنگری: [۱۴۰۱/۱۰/۲۴]	
تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۱۰/۲۴]	
واژه های کلیدی:	
آنالیز فراوانی	
تداوم خشکسالی	
تفکر سیستمی	
حجم خشکسالی	
*نویسنده مسئول:	
s-paimozd@araku.ac.ir	
	

۱- مقدمه

منابع آب و مدیریت آنها از جمله چالش های جدی سال های اخیر است. وقوع خشکسالی های متعدد باعث شده تأمین آب در اغلب نقاط دنیا و نیز کشور ایران، به عنوان یکی از مهم ترین مسائل مد نظر قرار گیرد. تصمیم گیری مدیران جهت برنامه ریزی طی سال های آتی، به منابع آب موجود،

خشکسالی های اتفاق افتاده و پیش رو بستگی دارد. لذا سامانه ای که بتواند از این تصمیمات پشتیبانی کند و اتفاقات درون سامانه ای را هم زمان به مدیران ارائه دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع در هر بررسی و شبیه سازی دو دیدگاه وجود دارد که به نوع خطی و غیرخطی (دینامیک)



منطقه‌ای خشکسالی می‌باشد. روش سطح آستانه همچنین توسط Edmund (2011) مورد بررسی قرار گرفت. تعریف سطح آستانه خشکسالی هیدرولوژیکی توسط این محقق با به‌کارگیری معیارهای مناسب منطقه صورت گرفت. معیارهای مختلفی که برای شناسایی یک خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند براساس روش سطح آستانه ارائه می‌شوند. در این پژوهش معیارهای ژنتیکی و نیز تغییرپذیری زمانی تحلیل می‌شوند و در نهایت معیارهای ژنتیکی برای منطقه توصیه می‌شود. (Staudinger et al. 2015). جهت تعیین آنالیز حساسیت به خشکسالی، ۲۴ زیرحوضه در سوئیس را در تحقیقی، طبق دو سناریو از سری‌های زمانی دبی و بارش براساس مدل رواناب بارش بکار بردند. نتایج حاکی از آن بود که شیب، ارتفاع متوسط و مساحت زیر حوضه‌ها از ویژگی‌های اصلی حساسیت به خشکسالی در این مناطق می‌باشند. مقایسه دو شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی تحقیق دیگری است که (Abhishek et al. 2016) مورد توجه قرار دادند. نتایج هر دو شاخص نشان داد خشکسالی متوسط بین سال‌های ۱۹۸۶-۱۹۸۸ و ۲۰۰۱-۲۰۰۵ رخ داده است. (Salajegheh et al. 2017) با استفاده از روش حد آستانه ثابت به بررسی خشکسالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز سد کرج پرداختند. نتایج نشان داد که سال ۱۳۷۷ یکی از خشک‌ترین سال‌ها در این حوضه بوده‌است. بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و تأثیر آن بر کیفیت آب رودخانه گدارخوش واقع در استان ایلام در بازه زمانی ۱۳۶۵ الی ۱۳۹۱، در پژوهش (Gheisouri et al. 2019) انجام شد. نتایج بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI و خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص کمبود جریان Q_{90} حاکی از افزایش شدت و تداوم خشکسالی‌ها به‌ویژه خشکسالی هیدرولوژیک در سال‌های اخیر و وجود تأخیر زمانی ۱۲ ماهه بین وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک بوده است. مطالعه و تحلیل خشکسالی هیدرولوژیک رودخانه ارمند توسط (Ghorbani et al. 2019) انجام شد. در این پژوهش، با استفاده از شاخص‌های منحنی تداوم جریان، ویژگی‌های کمبود، تحلیل فراوانی جریان و شاخص جریان پایه و نیز آمار روزانه جریان مربوط به ایستگاه آب‌سنجی ارمند به تعیین آستانه خشکسالی، طول مدت خشکسالی، حجم و شدت کمبود جریان و فراوانی وقوع جریان‌های کم پرداختند. بر اساس نتایج، رودخانه ارمند طی ۲۸، ۲۲ و ۱۴ year (از کل دوره آماری) در تمام سطوح

تقسیم می‌شود (Paimozd 2021). درک رفتارهای یک سامانه پیچیده در طول زمان ویژگی اصلی دیدگاه دینامیک می‌باشد. دیدگاه دینامیک^۱ رفتارهای یک سامانه پیچیده را در طول زمان، با تمرکز بر حلقه‌های بازخورد، تأثیرات غیرخطی و تأخیرهای زمانی در میان متغیرها و همچنین ماهیت انباشتی و یا جریانی آن‌ها، مورد بررسی قرار می‌دهد (Paimozd 2021). لذا تحقیق در حیطه خشکسالی نیز می‌تواند به دو دیدگاه خطی و دینامیک تقسیم‌بندی شود. به موازات دیدگاه محققین، درک صحیحی از چگونگی برآورد خشکسالی و تأثیرات آن بر حوضه‌های مختلف و نتایج حاصل از آن بر تمامی بخش‌های یک جامعه، به‌خصوص تغییرات در سیاست‌گذاری‌ها، اهمیت بالای پرداختن به این موضوع و نحوه ارزیابی آن را دو چندان می‌کند. به عقیده Zhang et al. (2021) شاخص‌های خشکسالی متعددی برای پایش خشکسالی ایجاد شده‌اند. با این حال انواع خشکسالی و شاخص‌های وابسته به آن، ویژگی‌های متفاوتی دارند که بسته به محیط و نوع اقلیم منطقه انتخاب می‌شوند. تأخیر زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی و دیگر خشکسالی‌ها، به مدیران و تصمیم‌گیران امکان ویژه‌ای خواهد داد تا فرصت اجرای اقدامات لازم جهت تعدیل اثرات سو خشکسالی را داشته باشند (Zandifar et al. 2021). متداول‌ترین تعریف کمی خشکسالی هیدرولوژیکی براساس تبیین یک حد آستانه می‌باشد. بدین‌صورت که اگر جریان رودخانه از سطح آستانه مد نظر، کمتر شود، خشکسالی هیدرولوژیک اتفاق افتاده است. روش حد آستانه پرکاربردترین روش برای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی و کم‌آبی‌ها است. به‌عبارتی این روش پایه و اساس تعریف مشخصات خشکسالی‌ها و کم‌آبی‌ها می‌باشد (Bonacci 1993). در این روش، دوره‌های بالا و پایین سطح آستانه تعیین شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند. این نوع ارزیابی و بررسی تحت عنوان تئوری دنباله‌ها مطرح شده است (Hisdal and Tallaksen 2003).

روش حد آستانه توسط (Saghafian and Byazedi 2011) با حد آستانه ۷۰٪، سری‌های حداکثر سالانه، تداوم و حجم خشکسالی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که عامل مساحت دارای بالاترین همبستگی با حجم جریان سطحی بوده ۳۶ و لذا همانند بسیاری دیگر از مدل‌های منطقه‌ای مؤثرترین متغیر مستقل در برآورد

^۱Dynamic

الی ۱۳۹۸ پرداخته شد. بدین منظور با استفاده از نرم افزار Vensim، شبیه سازی خشکسالی هیدرولوژیکی با روش حد آستانه ثابت^۳ انجام شد. در منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر تاکنون خشکسالی هیدرولوژیک مورد بررسی قرار نگرفته و لازم به تأکید است تاکنون نیز تحقیقی با مبنای شبیه سازی دینامیکی شاخص خشکسالی صورت نگرفته است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان لرستان با میانگین بارش سالانه ۴۵۰ mm بعد از حوضه های دریای خزر و دریاچه ارومیه، سومین حوضه، پر باران کشور است. حجم بارندگی استان حدود ۱۷ km³ برآورد شده است که ۵۰٪ آن به جریان سطحی تبدیل می شود. در استان لرستان بیش از ۱۳۰ رودخانه دائمی و فصلی وجود دارد. سه رودخانه اصلی به نام های سیمره، کشکان و سزار به طول حدود ۱۴۵۴ km شریان های آبی اصلی استان را تشکیل می دهند. استان لرستان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص از اقلیم متنوعی برخوردار می باشد. اقلیم حوضه دورود-بروجرد دارای نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان سرد می باشد (Lashani Zand et al. 2011). حوضه دورود-بروجرد واقع در استان لرستان، با وسعتی معادل ۲۵۴۶ km² در شمالی ترین قسمت حوضه آبخیز کارون بزرگ واقع شده است. کمترین ارتفاع محدوده ۱۴۳۷ m، مربوط به بخش های خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع محدوده ۴۰۱۵ m از سطح دریا، مربوط به جنوب شرقی محدوده است. به علت ورود جریانات سطحی به این محدوده و همچنین وجود بارندگی کافی و برف گیر بودن ارتفاعات این محدوده، مسیل های واقع در آن دائمی بوده و رودخانه های سیلاخور، ماربره و تیره زهکش اصلی این محدوده را تشکیل می دهند. میانگین بارش سالانه در دشت های این محدوده ۴۹۲/۸ mm، حداکثر دما ۴۷/۴ °C و حداقل دما ۳۶ °C- برآورد شده است (Beiranvand et al. 2022). در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی و موقعیت ایستگاه های هیدرومتری حوضه دورود-بروجرد مشخص شده است.

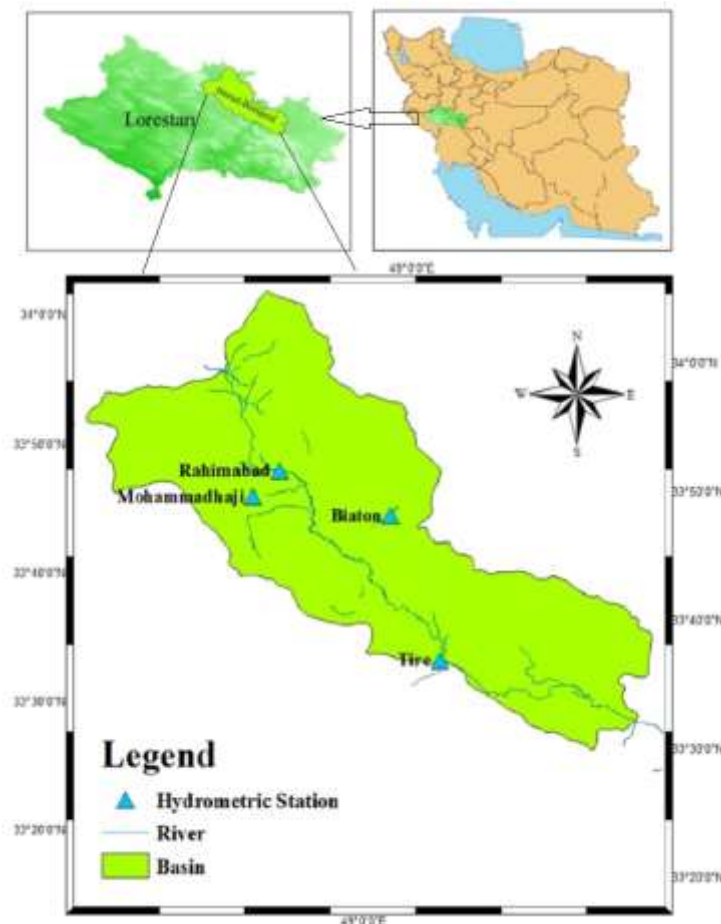
آستانه دارای جریان کمتر بوده است. Yarahmadi and Rostami zad (2019) به بررسی و تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی در رودخانه دریان چای در یک دوره ۳۱ year پرداختند. نتایج نشان داد در مجموع ۳۸ دوره خشکی هیدرولوژیک در این رودخانه رخ داده است. تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص خشکسالی جریان رودخانه ای توسط Jamal et al. (2020) مد نظر قرار گرفت. نتایج نشان داد طبق بررسی ۶۵ توزیع، جابه جایی طبقات خشکسالی به تابع توزیع بستگی دارد. همچنین بیشترین فراوانی جابه جایی طبقات خشکسالی حاصل از کاربرد توزیع برتر در طبقه نرمال رخ داده است. Mortezaei et al. (2020) با استفاده از شاخص منابع آب زیرزمینی^۱ (GRI) و شاخص خشکسالی جریانات رودخانه ای^۲ (SDI) به ارزیابی فاصله زمانی بین وقوع خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی پرداختند. مطابق نتایج، شاخص GRI در مقایسه با شاخص SDI در مقیاس زمانی و دوره آماری یکسان از مقادیر بالاتر بیشینه شدت خشکسالی و بیشینه تداوم خشکسالی برخوردار است. (Mozafari et al. 2022) به بررسی نقش خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در خشک شدن دریاچه های بختگان و زلشک پرداختند. با تعیین روند تغییرات مساحت دریاچه ها مشخص شد که وسعت پهنه آبی آنها از سال ۱۳۸۷ روند کاهشی به خود گرفته و از سال ۱۳۹۱ در بیشتر زمان ها این دریاچه ها خشک بوده اند.

توجه به مطالعات گذشته نشان می دهد تحقیقات صورت گرفته در خصوص خشکسالی هیدرولوژیک در کشور با توجه به اهمیت آن مورد توجه ویژه ای بوده است. اما آنچه که حائز اهمیت است، دیدگاه محققین به بررسی شاخص خشکسالی است که براساس تفکر خطی بوده است. حتی در موارد دینامیک بودن بررسی، شاخص خشکسالی مد نظر، به صورت دینامیکی شبیه سازی نشده و اغلب با تعریف سناریوها تأثیر خشکسالی بر مدیریت آب مورد توجه قرار گرفته است (Teimoori et al. 2019). لذا با توجه به اهمیت موضوع در زمینه خشکسالی هیدرولوژیکی و نقش مهم آن در مدیریت و برنامه ریزی های کوتاه مدت و بلندمدت، در این پژوهش با استفاده از روش غیرخطی به بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه دورود-بروجرد طی دوره آماری ۱۳۷۰

¹Ground Water Resources Index

²Surface Water Drought Index

³Constant Threshold Level



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه دورود-بروجرد
Fig. 1 Geographical location and hydrometric stations of Dorud-Borujerd Basin

۲-۲-آمار و اطلاعات

مورد بررسی قرار گرفت. در بین ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی، ایستگاه محمدحاجی دارای نقص آماری بود که با استفاده از روش رگرسیون و نرم‌افزار SPSS آمار این ایستگاه، بازسازی شد.

در این پژوهش از داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری دورود-بروجرد، طی سال‌های آبی ۱۳۷۰ الی ۱۳۹۸ جهت بررسی خشکسالی هیدرولوژیک استفاده شد. جدول (۱) مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه دورود-بروجرد را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه دورود-بروجرد

Table 1 Specifications of the hydrometric stations of Dorud-Borujerd basin

Station	River	Height (m)	Latitude	Longitude
Biatun	Biatun	1620	33° 42' 00"	48° 58' 47"
Tire	Tire	1450	33° 28' 11"	49° 03' 36"
Mohamad Haji	Absardeh	1570	33° 43' 47"	48° 45' 00"
Rahim Abad	Silakhor	1490	33° 46' 48"	48° 47' 59"

۲-۳-روش حد آستانه

روش حد آستانه پایه و اساس تعریف مشخصات خشکسالی‌ها

یک دوره خشک طولانی است. در رابطه با مورد دوم می‌توان گفت در طول یک دوره خشکسالی، دبی جریان برای یک دوره زمانی کوتاه، از حد آستانه تجاوز نموده و باعث می‌شود خشکسالی به تعداد خشکسالی‌های کوچک‌تر و وابسته تفکیک شود. به‌منظور رفع این مشکل باید ترکیب خشکسالی‌های جزئی انجام شود که اغلب یکی از روش‌های معیار داخلی^۲، میانگین متحرک^۳ و الگوریتم دبی اوج متوالی^۴ انتخاب می‌شود.

۴-۲- روش‌های ترکیب خشکسالی‌های جزئی

در بین روش‌های ترکیب خشکسالی‌های جزئی روش معیار داخلی، دقت بیش‌تری دارد (Hisdal et al. 2004). در این پژوهش نیز روش معیار داخلی انتخاب شد. در این روش برای حذف خشکسالی‌های جزئی و ادغام خشکسالی‌های وابسته از ضرایب T_c ، D_{min} استفاده شد. a ضریبی است که برای حذف موارد خشکسالی جزئی به کار می‌رود، بدین ترتیب اگر در یک خشکسالی حجم (S_i) کمتر از حاصل‌ضرب a در حداکثر کمبود مشاهده شده باشد ($S_i < a \cdot S_{max}$) آن مورد حذف خواهد شد. مقدار آن معمولاً بین $0.005 - 0.01$ در نظر گرفته می‌شود. D_{min} نیز حداقل فاصله زمانی است که خشکسالی جزئی با تداوم مساوی یا کمتر از آن ($D_i < D_{min}$) حذف می‌شود و معمولاً کمتر از ۵ day در نظر گرفته می‌شود، T_c زمان بحرانی نامیده می‌شود. به نحوی اگر دو واقعه خشکسالی وابسته با فاصله‌ی زمانی $T_i < T_c$ به وقوع بپیوندند با هم ادغام خواهند شد و به جای S_i حجم کمبود بحرانی (S_c) در نظر گرفته می‌شود. در هر دو حالت تداوم و حجم وقایع ادغام شده (D_{pool} و S_{pool}) به‌صورت روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود (Fleig et al. 2006).

$$D_{pool} = D_i + D_{i+1} \quad (4)$$

$$S_{pool} = S_i + S_{i+1} \quad (5)$$

با توجه به تحقیقات Fleig et al. (2006) مقدار a برابر با 0.005 و D_{min} برابر با ۲ و T_c برابر با ۵ day در نظر گرفته شد.

۴-۵- مدل Vensim

در تفکر دینامیک (سامانه‌ای) با توجه به تئوری فرآیندهای بازخوردی، مدل‌سازی به‌صورت بسته در نظر گرفته می‌شود

و کم‌آبی‌ها می‌باشد. در این روش دوره‌های بالا و پایین آستانه مشخص شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. اگر مقادیر دبی از یک حد آستانه کم‌تر باشد خشکسالی و یا کم‌آبی رخ می‌دهد. مهم‌ترین زمینه کاربرد تحلیل‌های آستانه خشکسالی طراحی نیروگاه‌های آبی، مدیریت منابع آب، سامانه‌های تأمین آب، برنامه‌ریزی آبیاری و حفظ کیفیت آب می‌باشد. در این پژوهش سطح آستانه مناسب جهت استخراج دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از منحنی تداوم جریان که نشان دهنده رابطه بین دبی‌های روزانه و احتمال وقوع آن‌ها می‌باشد، انتخاب می‌گردد (Ghorbani et al. 2019). این منحنی با استفاده از روش ترسیمی و با استفاده از داده‌های روزانه و رابطه ویبول^۱ که به‌صورت به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود، برای هر ایستگاه قابل ترسیم است (Salajegheh et al. 2017).

$$P\% = \frac{m}{n+1} \times 100 \quad (1)$$

سطح آستانه می‌تواند دبی‌هایی از منحنی تداوم جریان روزانه بین 70% و 90% در نظر گرفته شود. اگر تفاضل سری زمانی دبی روزانه (Q_k) و مقدار دبی مرجع یا دبی حد آستانه (Q_a) منفی شود ($Q_k - Q_a < 0$)، بیان‌گر وقوع خشکسالی است و برای تحلیل خشکسالی باقی‌مانده‌های منفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طول توالی منفی بیان‌گر تداوم خشکسالی یعنی تعداد روزهایی است که خشکسالی تداوم داشته است. مجموع این توالی‌ها بزرگی یا حجم خشکسالی را نشان می‌دهد. تداوم خشکسالی (D_i) و حجم (بزرگی) خشکسالی (S_i) به‌عنوان ویژگی‌های خشکسالی نقطه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. با در نظر گرفتن سری زمانی دبی روزانه (Q_k) و مقدار دبی مرجع (Q_a) می‌توان رابطه بین مشخصات مدل را به‌صورت روابط (۲) و (۳) بیان نمود (Fleig et al. 2006):

$$D_Q = \{(Q_a - Q_k \text{ if } Q_k < Q_a \cap \text{if } Q_k \leq Q_a)\} \quad (2)$$

$$S_i = 86.4000 \sum_{j=1}^{D_i} D_Q \quad (3)$$

که، D_Q کمبود دبی روزانه (m^3/s) و S_i برابر با حجم خشکسالی i (به MCM) و $86/4000$ ضریب تبدیل مربوط به مقیاس زمانی است. گام زمانی به رژیم هیدرولوژیکی منطقه تحت مطالعه بستگی دارد. با وجود این، استفاده از مقیاس روزانه با دو مشکل مواجه می‌باشد، اول وابستگی بین خشکسالی‌ها و دیگری وجود خشکسالی‌های جزئی در طی

²Internal Criterion

³Moving Average

⁴Sequent Peak Algorithms

¹Weibull

محیط Vensim زیرسامانه‌ای تعریف شد تا آمار دبی روزانه چهار ایستگاه موجود به‌طور همزمان به مدل وارد، محاسبات انجام و خروجی‌ها در اختیار قرار بگیرد و نیاز به تکرار محاسبات نباشد. در ادامه با در نظر گرفتن تعداد روزهای خشک، به‌عنوان مبنای محاسبات، دوره‌های خشکسالی یا تداوم خشکسالی^۵ استخراج شد.

جهت محاسبه حجم خشکسالی^۶ با ورود متغیرهای جریان (دبی) به متغیر حالت و سطوح آستانه محاسبات انجام می‌شود. در این مرحله نیز حجم خشکسالی می‌تواند طی هر دوره تعریف شده به مدل، محاسبه گردد که می‌تواند کل دوره، ارقام سالانه یا دوره خاص دیگری باشد. پس از استخراج روزهای خشک، توالی و حجم آن‌ها، جهت ترکیب خشکسالی‌های وابسته و حذف خشکسالی‌های کوچک، ادغام‌سازی با به‌کار بردن روش معیار داخلی انجام شد. در شبیه‌سازی حاضر با استفاده از تعریف یک ایستگاه به‌صورت متغیر خارجی^۷ و معرفی ماتریس‌ها و آرایه‌های سه‌بعدی، کل منطقه در یک View شبیه‌سازی و نیازی به تکرار محاسبات متناسب با تعداد ایستگاه‌ها و تعداد دوره‌های خشکسالی نبود. با توجه به قابلیت ونسیم خروجی‌ها (جداول و نمودارها) هم‌زمان برای چهار ایستگاه و برای تمام متغیرها در کسری از ثانیه نمایش داده شد. در مرحله بعد خروجی اولیه مدل که شامل سطوح آستانه، تداوم خشکسالی و حجم خشکسالی طی دوره‌های تعریف شده به مدل هستند، توسط مدل بازخوانی شده و به محاسبه حداکثر حجم و حداکثر تداوم خشکسالی جهت تعیین مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی (آنالیز فراوانی) پرداخت. در نهایت جهت تعیین بهترین تابع و دوره بازگشت حداکثر حجم و تداوم خشکسالی محاسبه شد.

۲-۶- آنالیز فراوانی خشکسالی هیدرولوژیکی

جهت انجام آنالیز فراوانی در وقایع هیدرولوژیکی، پس از تعیین توابع توزیع احتمال از نظر تئوری، داده‌های هیدرولوژی موجود با توابع توزیع تئوری برازش داده شده و با انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع، تعیین دوره بازگشت وقایع برآورد می‌گردند. در روش حد آستانه ثابت، هدف از آنالیز فراوانی خشکسالی هیدرولوژیکی، پیدا کردن توزیع احتمالاتی حداکثر حجم و تداوم خشکسالی است تا بتواند خطر خشکسالی‌های آینده را پیش‌بینی کند. لذا در پژوهش حاضر،

بازخوردها توسط ابزارهای نموداری بازنمایی و در قالب معادلات شبیه‌سازی سیستم، به‌صورت ریاضی نمادسازی و در نهایت مدل‌سازی صورت می‌گیرد (Clancy 2018). یکی از این مدل‌ها Vensim می‌باشد. متغیرهای اصلی در این مدل‌سازی، متغیرهای حالت^۱ و جریان^۲ هستند. در واقع متغیر حالت (انبار یا ذخیره) انتگرال یا تجمیع ورودی‌هایی است که از طریق جریان به آن وارد می‌شود. کلیه تصمیمات، برنامه‌ریزی‌ها و اقداماتی که در یک سیستم مورد نظر مدیران و تصمیم‌گیرندگان است در شبیه‌سازی با سیستم دینامیک توسط کاربر و در متغیر تصمیم نوشته می‌شود. متغیر تصمیم در Vensim اغلب جریان‌های ورودی یا متغیرهای خارجی هستند که تصمیمات را به سیستم اطلاع می‌دهند. در ادامه این نرم‌افزار با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل‌های محدود رفتار سیستم را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد (Paimozd 2021). شبیه‌سازی در محیط Vensim این قابلیت را دارا می‌باشد که به کاربر اجازه می‌دهد به‌عنوان یک سیستم پشتیبانی از تصمیم‌گیری از مدل خود بهره بگیرد. به‌گونه‌ای که پس از اجرای مدل، تمام جداول و نمودارها هم‌زمان در یک View نمایش داده خواهد شد و امکان تغییرات لحظه‌ای مدل را به کاربر خواهد داد. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک، با روش حد آستانه در محیط Vensim انجام شد. بدین منظور، پس از ورود آمار دبی روزانه ایستگاه‌های منطقه به مدل، داده‌ها به‌صورت نزولی مرتب شدند و با اختصاص یک شمارنده به هر یک از داده‌های مرتب شده، احتمال از رابطه (۱)، محاسبه شد. سپس منحنی تداوم جریان ترسیم و حد آستانه Q_{70} و Q_{90} که مقادیر دبی در احتمال ۷۰ و ۹۰٪ هستند، تعیین شد. در ادامه مدل، پس از مقایسه سطح آستانه و دبی‌های روزانه کل ایستگاه‌ها که با متغیر جریان به مدل معرفی شده‌اند، به محاسبه تعداد روزهای خشک متوالی طی یک سال و به تفکیک دوره (برای هر ایستگاه) پرداخت. در این مرحله، مدل با استفاده از متغیر تأخیر^۳ شمارنده‌ای ایجاد می‌کند که با ورود به متغیر حالت^۴ به انباشت تعداد روزهای خشک، طی دوره‌های تعریف شده می‌پردازد. تحت این شرایط تعداد دوره‌ها با انتخاب کاربر می‌تواند مرتبط با یک دوره خاص، سالانه یا کل دوره باشد. در این پژوهش، در

Stock

²Flow

³Delay variable

⁴Stock variable

⁵Drought Duration

⁶Drought Volume

⁷Exogenous Variable

آمار دبی روزانه چهار ایستگاه جهت شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک، وارد مدل Vensim شد که در ادامه به نتایج اشاره شده است.

۲-۳- شبیه‌سازی در محیط Vensim

در شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از امکانات Vensim به معرفی آرایه‌هایی پرداخته شد تا ضمن خلاصه نمودن محیط نرم‌افزار، بدون تکرار معادلات و به‌صورت هم‌زمان خروجی کل ایستگاه‌های منطقه در دسترس قرار گیرد. شکل (۲) شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک در حوضه دورود-بروجرد را نشان می‌دهد. جهت پرهیز از تکرار متغیرها در تک‌تک ایستگاه‌ها و تقطیع خطوط بازخوردی، به معرفی زیرمجموعه‌ها، آرایه‌های چند بعدی و متغیرهای سایه پرداخته شد. در شکل (۲) پس از محاسبه سطوح آستانه، همزمان تداوم خشکسالی، حجم خشکسالی، حداکثر تداوم و حداکثر حجم خشکسالی در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه و حتی دوره‌های خاص همانند خشکسالی‌های پیوسته، در سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ در قالب نمودارها و جداول برای تمام ایستگاه‌های واقع در منطقه مطالعاتی قابل مشاهده و دریافت است. تحت این شرایط نتایج هرگونه تغییر در متغیرها در کسری از ثانیه قابل استخراج است. نتایج محاسبات به ترتیب در ادامه آمده است.

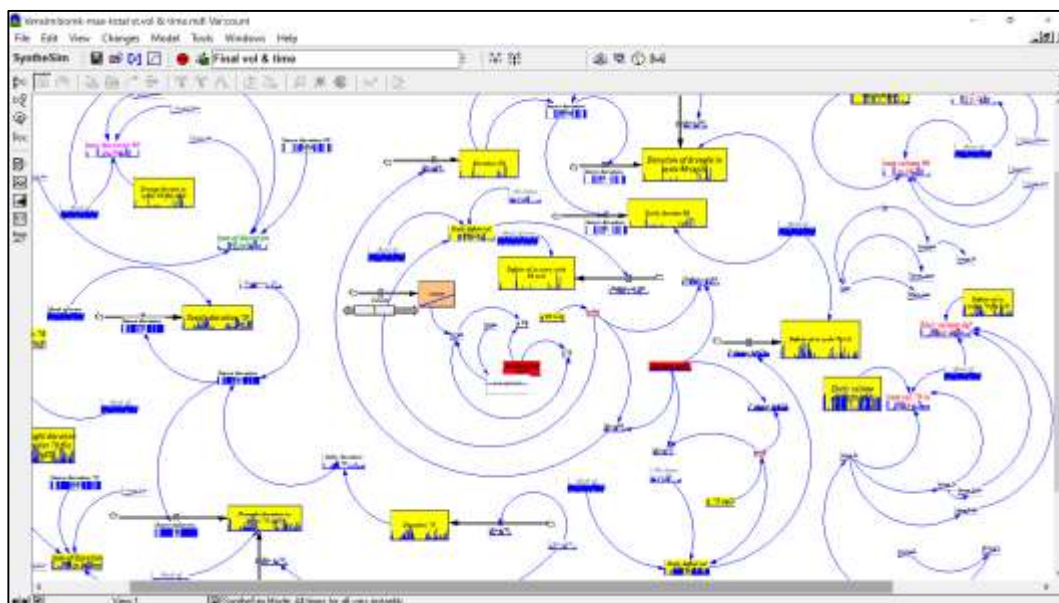
ابتدا با شبیه‌سازی در محیط Vensim، تداوم و حجم روزانه، دوره‌ای و سالانه خشکسالی و نیز حداکثر تداوم خشکسالی و حداکثر حجم خشکسالی در سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان هر یک از ایستگاه‌ها استخراج شدند. سپس جهت تعیین بهترین تابع برازش داده شده از نرم‌افزار Easyfit استفاده شد. در نرم‌افزار Easyfit بر اساس آزمون‌های ناپارامتریک جهت رتبه‌بندی و تعیین بهترین تابع توزیع، استفاده می‌شود. در واقع توسط این آزمون‌ها، مطابقت توزیع جامعه آماری با یک تابع توزیع مشخص انجام می‌شود. در این پژوهش از سه آزمون موجود در نرم‌افزار استفاده شد. بدین منظور، سری‌های حداکثر حجم و تداوم خشکسالی برآورد شده در مراحل قبل، به نرم‌افزار Easyfit وارد شدند. سپس بر اساس رتبه‌بندی انجام شده توسط Easyfit، بهترین تابع انتخاب شد. در ادامه، بر اساس احتمال وقوع حاصل از توزیع احتمالاتی $F(x)$ ، دوره بازگشت حداکثر تداوم خشکسالی و حداکثر حجم خشکسالی در سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$T = \frac{1}{F(x)} \quad (6)$$

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- داده‌های آماری

پس از بررسی همگنی داده‌ها و بازسازی داده‌های ایستگاه محمدحاجی (با استفاده از نرم‌افزار SPSS و روش رگرسیون)



شکل ۲- شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از Vensim

Fig. 2 Hydrological drought simulation using Vensim Professional

پس از ورود آمار دبی روزانه، محاسبه احتمالات و ترسیم

۳-۳- تعیین سطح آستانه

خشکسالی را با تداوم‌های گوناگون تجربه نموده است.

جدول ۲- مقادیر حد آستانه دبی در سطح ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان در حوضه دورود-بروجرد

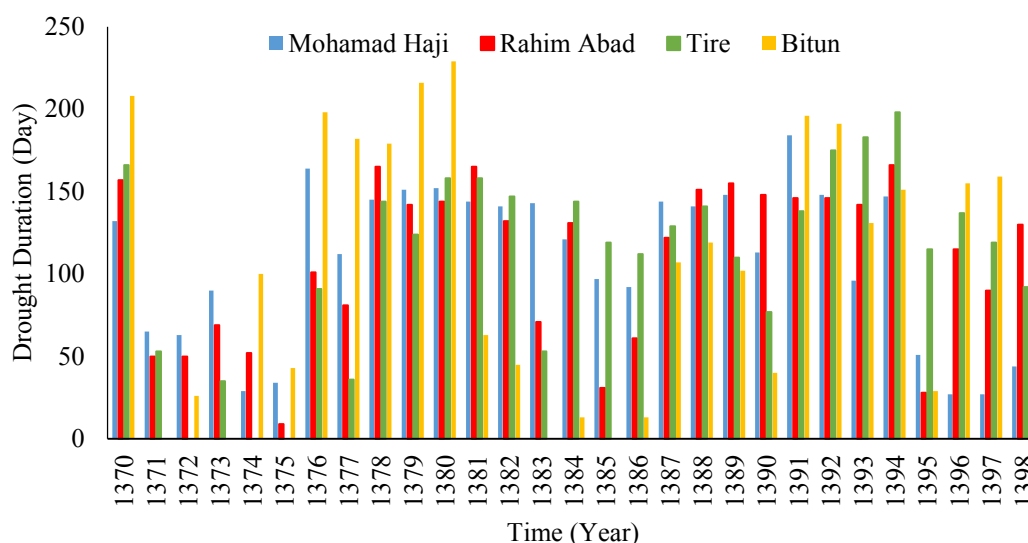
Table 2 Threshold limit discharge at the 70 and 90% level of the flow duration curve in Dorud-Borujerd basin

Station	basin	
	Q ₇₀ (m ³ /s)	Q ₉₀ (m ³ /s)
Bitun	0.06	0.02
Tire	2.18	0.96
Mohamad Haji	0.66	0.34
Rahim Abad	1.21	0.18

منحنی تداوم جریان در محیط Vensim، حد آستانه Q₇₀ و Q₉₀ تعیین شد. مقادیر حد آستانه Q₇₀ و Q₉₀ در جدول (۲) آمده است.

۳-۴- تداوم خشکسالی

در این مرحله با در نظر گرفتن سطوح آستانه و مقادیر دبی روزانه، تعداد روزهای خشک، به عنوان مبنای محاسبات، جهت محاسبه تداوم خشکسالی طی دوره‌های موجود استخراج شد. شکل (۳) تداوم خشکسالی سالانه در آستانه Q₇₀ در کل ایستگاه‌های منطقه را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از شکل (۳) مشخص است، کل دوره شبیه‌سازی،

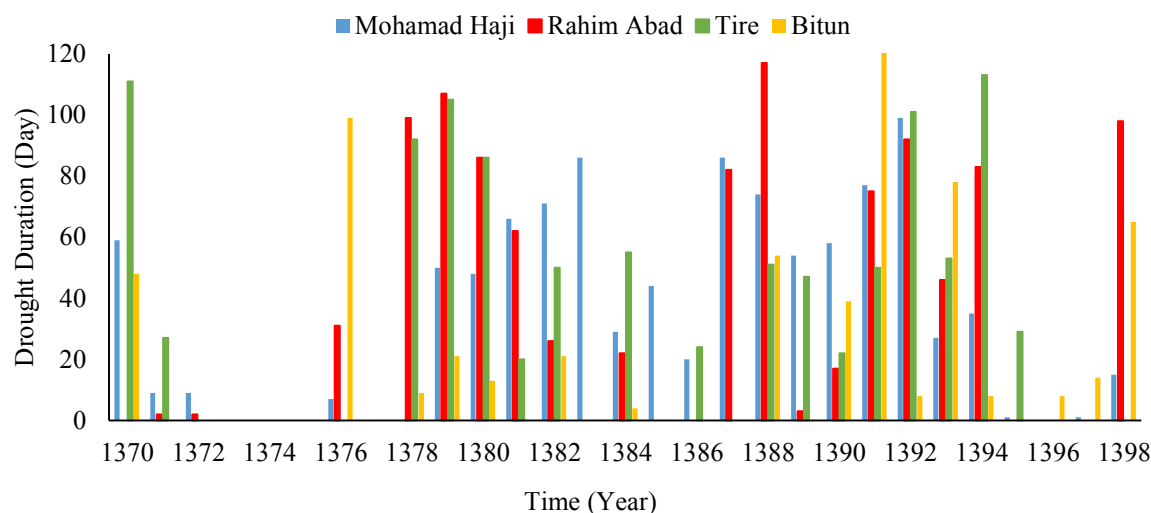


شکل ۳- تداوم خشکسالی دبی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سطح آستانه ۷۰٪ منحنی تداوم جریان

Fig. 3 Discharge drought duration in the study area stations at the 70% of the flow duration curve

سال‌های ۱۳۷۸ الی ۱۳۸۰ و همچنین ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۴ خشکسالی در کل ایستگاه‌ها تداوم بیشتری داشته است. در سال ۱۳۷۷ و از سال ۱۳۷۱ الی ۱۳۷۶ و ۱۳۹۵ الی ۱۳۹۷ تداوم خشکسالی نزدیک به صفر بوده است. در واقع، منطقه رفتار مشابهی را در کل دوره شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک در سطوح آستانه دبی ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان از خود نشان می‌دهد. در این شکل نیز، رفتار ایستگاه بیاتون در ثبت تعداد روزهای خشک همانند سطح آستانه ۷۰٪ است. مطابق شکل (۴) ایستگاه بیاتون بیشترین تداوم خشکسالی در آستانه ۹۰٪ منحنی تداوم جریان را با ۱۲۳ day خشک در سال ۱۳۹۱ به خود اختصاص داده است. دلیل این اتفاق در میزان دبی عبوری از ایستگاه بیاتون است که نسبت به دیگر ایستگاه‌های واقع در منطقه از جریان رودخانه بسیار کمتری برخوردار است.

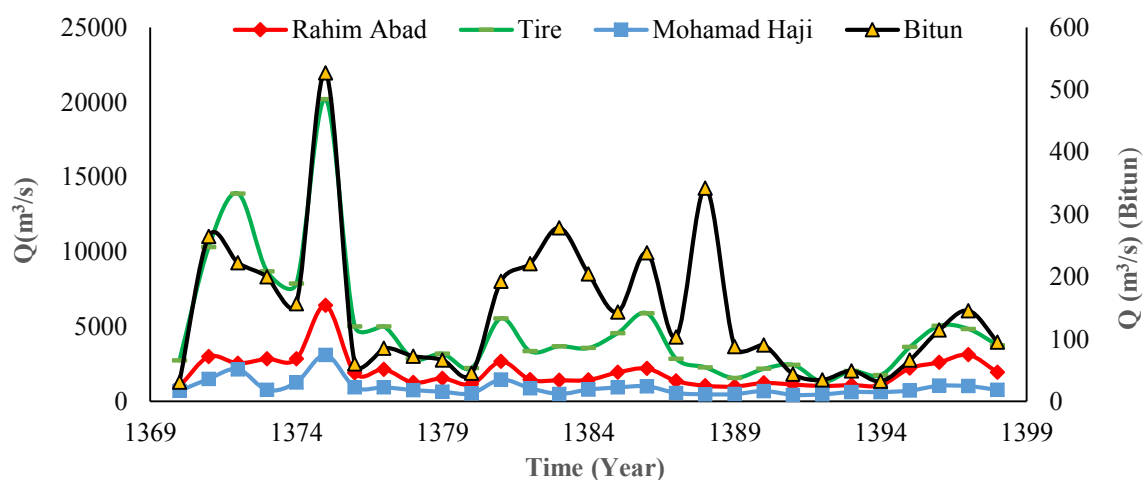
همچنین در کل منطقه بیشترین تداوم‌ها طی سال‌های ۱۳۷۶ الی ۱۳۸۰ و نیز طی سال‌های ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۸ غیر از سال ۱۳۹۵ اتفاق افتاده است. با مقایسه تداوم خشکسالی متناسب با دبی‌های ثبت شده، ایستگاه بیاتون در سطح آستانه ۷۰٪ منحنی تداوم جریان شدت بیشتری از خود نشان داده است. به‌گونه‌ای که در سال ۱۳۸۰ با حداکثر مقدار نسبت به کل ایستگاه‌ها و کل دوره، 229 day تداوم خشکسالی در منطقه را ثبت نموده است. از طرفی این ایستگاه طی سال ۱۳۹۰ تداوم خشکسالی کمتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها داشته است. جهت بررسی دقیق‌تر تداوم خشکسالی در سطح آستانه ۹۰٪ منحنی تداوم جریان در شکل (۴) آمده است. با مشاهده شکل (۴) می‌توان دریافت که در کل دوره تداوم خشکسالی نسبت به سطح آستانه ۷۰٪ کمتر است که البته این اتفاق به دلیل کمتر بودن مقادیر دبی در سطح آستانه ۹۰٪ منحنی تداوم جریان است. طی



شکل ۴- تداوم خشکسالی دبی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سطح آستانه ۹۰٪ منحنی تداوم جریان
Fig. 4 Discharge drought duration in the study area stations at the 90% of the flow duration curve

عبوری رودخانه در ایستگاه‌های رحیم‌آباد و تیره دارای روند مشابهی است با این تفاوت که جریان در ایستگاه تیره دارای حداکثر مقدار در کل منطقه و همچنین دارای مقادیر بیشتری نسبت به دبی عبوری از ایستگاه رحیم‌آباد می‌باشد. طی سال‌های ۱۳۷۱ الی ۱۳۷۵ نیز به دلیل افزایش دبی نسبت به کل دوره در تمام ایستگاه‌ها تداوم خشکی حداقلی ثبت شده است. از طرفی به نظر می‌رسد زمانی که میزان جریان عبوری از یک ایستگاه دارای افت‌وخیز مشهودی باشد، تداوم خشکسالی نمایان خواهد شد. در ایستگاه محمد حاجی در سال ۱۳۸۳ در پی توالی افت دبی از ۱۴۵۶ به $5.08 \text{ m}^3/\text{s}$ و همچنین افت دبی در سال ۱۳۸۷ از میزان $10.15 \text{ m}^3/\text{s}$ به ۵۶۸ تداوم خشکسالی با مقدار ۸۶ day در سطح دبی ۹۰٪ منحنی تداوم جریان رخ داده است.

شکل (۵) دبی سالانه ایستگاه‌های حوضه دورود-بروجرد و جدول (۳) حداقل و حداکثر دبی عبوری از ایستگاه‌های واقع در منطقه را نشان می‌دهند. با مقایسه مقادیر دبی کاملاً مشخص است که جریان رودخانه بیاتون دلیل تداوم خشکی طی کل دوره می‌باشد. اما علی‌رغم میزان کم دبی این ایستگاه، از سال ۱۳۸۱ الی ۱۳۹۰ تداوم خشکی در ایستگاه بیاتون کمتر از سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. روند افزایشی دبی از سال‌های ۱۳۸۱ الی ۱۳۹۰ در این رودخانه، سبب شده است تداوم خشکی نسبت به سایر ایستگاه‌ها طی این دوره، کاهش داشته باشد. در خصوص دبی ایستگاه‌های رحیم‌آباد و تیره می‌توان مشاهده نمود که تداوم خشکسالی در این رودخانه‌ها، رفتار مشابهی را در سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ از خود نشان می‌دهند. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، جریان



شکل ۵- جریان رودخانه سالانه ایستگاه‌های رحیم‌آباد، تیره، محمد حاجی و بیاتون
Fig. 5 The annual river discharge of the Rahim Abad, Tire, Mohamad Haji and Bitun Station

بررسی قرار نگیرد، دلیلی بر شدت بیشتر خشکسالی، در تداوم‌های بیشتر نیست. در ادامه، حجم خشکسالی در دبی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی محاسبه و تصویر شده‌اند.

۳-۵- حجم خشکسالی

در این مرحله نیز حجم خشکسالی می‌تواند برای هر دوره زمانی مشخص به وسیله مدل، محاسبه شود. این دوره‌ها می‌تواند کل دوره، ارقام سالانه یا دوره خاص دیگری باشد. شکل (۶) حجم خشکسالی در سطح آستانه دبی ۷۰٪ منحنی تداوم جریان ایستگاه‌های حوضه دورود-بروجرد را نشان می‌دهد.

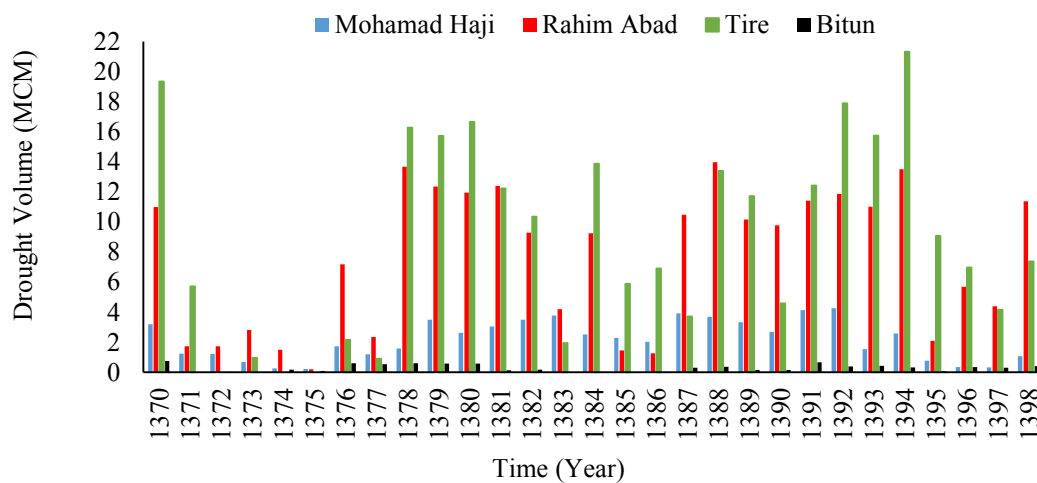
جدول ۳- مقادیر دبی‌های حداکثر و حداقل سالانه در

ایستگاه‌های واقع در حوضه دورود-بروجرد

Table 3 The maximum and minimum annual discharge values at the stations located in the Dorud-Borujerd basin

Row	Station	Q _{Max} (m ³ /s)	Q _{Min} (m ³ /s)
1	Bitun	527	31
2	Tire	20196	1310
3	Mohamad Haji	3106	444
4	Rahim Abad	6416	1005

بررسی تداوم خشکسالی تنها به تعداد روزهای خشک و توالی آنها اشاره می‌کند و تا زمانی که حجم خشکسالی نیز مورد



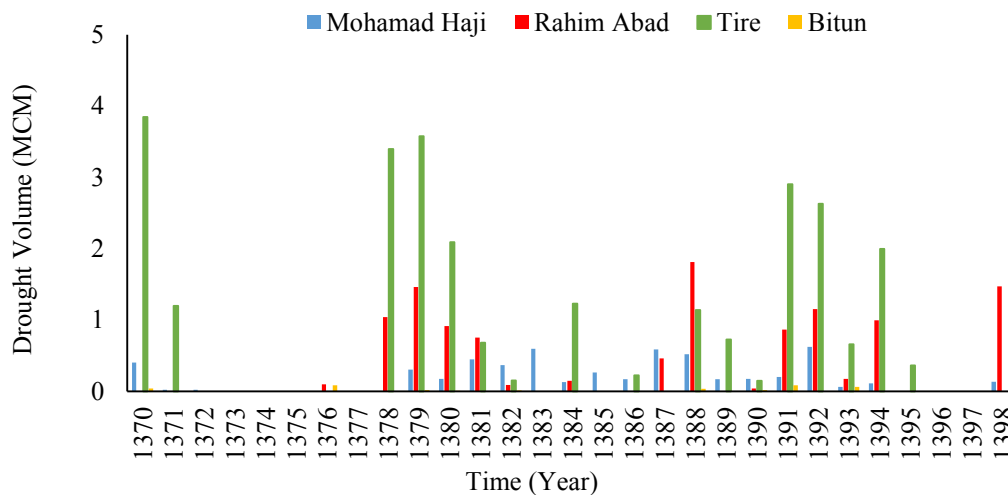
شکل ۶- حجم خشکسالی دبی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سطح آستانه ۷۰٪ منحنی تداوم جریان

Fig. 6 Discharge of the drought volume in the study area stations at the 70% of the flow duration curve

از آنجا که ایستگاه تیره در پایین‌دست حوضه واقع شده است و جریان‌های ورودی به این ایستگاه تجمیع کل خروجی از بالادست می‌باشد، دارای دبی‌های کاملاً متفاوتی از سایر ایستگاه‌هاست. از طرفی روند دبی در شکل (۷) نشان می‌دهد جریان عبوری از این ایستگاه دارای مقادیر حداکثر m^3/s ۲۰۱۹۶ و حداقل m^3/s ۱۳۱۰ (۶٪ دبی حداکثر) است که تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای دارند. در واقع از ابتدای دوره تا سال ۱۳۷۶ مقادیر دبی دارای این ویژگی است که مقادیر حد بالا و پایین نزدیک به یکدیگر دارد و نسبت به سال ۱۳۷۶ الی ۱۳۹۸ از مقادیر بالاتری برخوردار است. از آنجا که حدود ۶۰٪ طول دوره (از سال ۱۳۷۶ الی ۱۳۹۸)، دبی مقادیر کمتری داشته است، این امر شیب منحنی تداوم جریان این ایستگاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌گونه‌ای که دبی حد آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان دارای ارقام بالاتری نسبت به زمانی است که دبی‌ها از یک روند مشابه و حدود

مطابق شکل (۶) بیش‌ترین حجم خشکسالی طی دوره‌های ۱۳۷۸ الی ۱۳۸۲ و نیز ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۴ اتفاق افتاده است. جریان‌های عبوری از ایستگاه تیره و سپس ایستگاه رحیم‌آباد دارای بیش‌ترین حجم خشکسالی بوده‌اند. در سال ۱۳۹۴ تیره تداوم خشکسالی معادل ۱۹۸ day را با بیش‌ترین حجم خشکسالی معادل MCM ۲۱/۳۲۰ تجربه کرده است. حجم خشکسالی در سطح آستانه دبی ۹۰٪ منحنی تداوم جریان در شکل (۷) نیز تأیید این مطلب است که به ترتیب تیره و سپس رحیم‌آباد نسبت به دبی دیگر ایستگاه‌ها، دارای حداکثر حجم خشکسالی می‌باشند و این در حالی است که دبی‌های ایستگاه بیاتون نسبت به جریان عبوری از سایر ایستگاه‌ها، کمترین حجم خشکسالی را داشته است. در حالی که بیش‌ترین تداوم خشکسالی در سطح ۷۰٪ منحنی تداوم جریان مربوط به این ایستگاه بوده است.

پایین تری در کل دوره، پیروی کنند.



شکل ۷- حجم خشکسالی دبی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سطح آستانه ۹۰٪ منحنی تداوم جریان

Fig. 7 Discharge of the drought volume in the study area stations at the 90% of the flow duration curve

به ذکر است در مواردی که دبی‌ها در ایستگاه‌ها نسبت به کل دوره ارقام بالاتری داشته‌اند، همانند سال‌های ۱۳۷۱ الی ۱۳۷۵، خشکسالی با حجم حداقلی رخ داده است.

۳-۶- آنالیز فراوانی

زمانی که حدود تکرار وقایع خشکسالی در اختیار باشد، تصمیم‌گیری و مدیریت بحران با تدبیر بیشتری صورت خواهد گرفت. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار ونسیم مقادیر حداکثر تداوم و حداکثر حجم خشکسالی سالانه استخراج شدند. سپس مقادیر ذکر شده به نرم‌افزار Easyfit وارد و مناسب‌ترین توزیع با استفاده از آزمون کای‌اسکوآر برای هر یک از سری‌های حداکثر سالانه حجم و تداوم خشکسالی انتخاب شد. مناسب‌ترین توزیع آماری ایستگاه‌های واقع در منطقه در جدول (۴) آمده است.

تحت این شرایط در طول دوره و در مقیاس روزانه نمودار مقادیر دبی از تغییرات قابل‌ملاحظه و نوسانات بیشتر، در فاصله زمانی کمتر برخوردار خواهد بود. این امر سبب می‌شود حجم خشکسالی به دلیل تفاوت چشمگیر مقادیر ماکزیمم و مینیمم دارای مقادیر بالا و تداوم دوره کمتری داشته باشد. در واقع خشکسالی با حجم بالا و در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر اتفاق خواهد افتاد. این امر در ایستگاه رحیم‌آباد و محمدحاجی به ترتیب با همان روند و شدت کمتر تکرار شده است. چراکه به ترتیب ایستگاه رحیم‌آباد و محمدحاجی دارای مقادیر دبی عبوری کمتری می‌باشند. در خصوص ایستگاه بیاتون چون در کل دوره مقادیر دبی حداکثر و حداقل با نوسانات کمتری تکرار شده است، این اتفاق سبب خواهد شد، دبی سطح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان به دبی‌های کل دوره نزدیکتر و قاعدتاً تداوم بیشتر و حجم کمتری از خشکسالی را تجربه کند. البته لازم

جدول ۴- مناسب‌ترین توزیع آماری هر یک از سری‌های حداکثر سالانه حجم و تداوم خشکسالی

Table 4 The most appropriate statistical distribution for each of the annual maximum series of drought volume and duration

Station	Maximum deficiency volume		Maximum Drought duration	
	Q ₇₀	Q ₉₀	Q ₇₀	Q ₉₀
Biaton	Gen Extreme value	Gen Pareto	Gen Pareto	Beta
Tire	Gen Extreme value	Gen Pareto	Johnson SB	Normal
Mohamad Haji	Normal	Gen Extreme value	Log.logestic	Gen Extreme value
Rahim Abad	Gen Pareto	Gen Pareto	Gen Extreme value	Gen Pareto

بازگشت براساس شدیدترین حجم خشکسالی (در سطح آستانه ۷۰٪ منحنی تداوم جریان)، از ۹ الی ۱۴ year در ایستگاه‌های گوناگون متغیر است، این بدان معنا است که

نتایج حاصل از آنالیز فراوانی در سطح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان با استفاده از نوع توزیع محاسبه شده و نتایج حاصل در جدول (۵) آمده است. طبق جدول (۵) دوره

داشت. لذا در منطقه مطالعاتی حوضه دورود-بروجرد حداکثر فاصله زمانی شدیدترین تداوم خشکسالی، ۲۵ year در سطح عنوان شده خواهد بود. همانند حجم خشکسالی، کمترین مقدار حداکثر تداوم خشکسالی، نیز همیشگی (دوره بازگشت 1 year) و برای تمام ایستگاه‌ها رخ خواهد داد.

شدیدترین حجم خشکسالی‌ها در فاصله زمانی حداکثر year ۱۴ و کمترین مقدار حداکثر حجم خشکسالی، همیشگی (دوره بازگشت 1 year) و در تمام ایستگاه‌های منطقه اتفاق می‌افتد. در خصوص تداوم خشکسالی‌ها، ماکزیمم یا در واقع شدیدترین خشکسالی در سطح منطقه با آستانه ۷۰٪ منحنی تداوم جریان، دوره بازگشتی بین ۱۱ تا ۲۵ year خواهد

جدول ۵- نتایج آنالیز فراوانی در حد آستانه ۷۰٪ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان

Table 5 Frequency analysis results at the threshold of 70% and 90% flow duration curve

Station	Longest Drought		Most Severe Drought	
	Max & Min's Drought Volume (m ³ /s)	Max & Min's Return Period (Years)	Max and Min's Drought Duration (Days)	Max & Min's Return Period (Years)
70% flow duration curve				
Bitun	7.10-9.43	1-9	1-151	1-9
Tire	0.39-198.63	1-12	1-134	1-19
Mohamad Haji	2.00-42.66	1-13	1-123	1-25
Rahim Abad	2.32-153.63	1-14	8-148	1-21
90% flow duration curve				
Bitun	0.002-0.97	1-4	1-98	1-2
Tire	0.089-44.53	1-4	1-111	1-5
Mohamad Haji	0.013-6.82	1-6	1-86	1-8
Rahim Abad	0.42-20.93	1-4	1-116	1-5

می‌کنند. همچنین از بررسی نتایج این‌گونه استنباط می‌شود که دوره بازگشت خشکسالی‌ها براساس تحلیل تداوم و تحلیل حجم در همه ایستگاه‌ها متفاوت بوده‌است و این بدان علت است که دوره‌های خشک که حداکثر حجم را داشته‌اند، دارای حداکثر تداوم نبوده‌اند. (Karimi et al. (2016 و Gheisouri et al. (2019 نیز در تحقیق خود اشاره داشته‌اند که لزوماً تداوم و حجم خشکسالی دارای یک توزیع نبوده و نیز دوره‌های خشک همزمان دارای حجم و تداوم حداکثری نیستند. در این پژوهش نیز اشاره شد به دلیل شیب منحنی تداوم جریان و تغییر سطح آستانه، حداکثر تداوم و حجم خشکسالی همزمان رخ نخواهند داد. آنچه که از اهمیت بالایی برخوردار است این است که در منطقه پژوهش حاضر، به‌طور پیوسته و دائمی در تمام رودخانه‌های منطقه حتی رودخانه پرآب تیره خشکسالی رخ داده است به‌گونه‌ای که سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ به لحاظ تداوم و حجم سال‌های بسیار خشک اعلام شد. (Ahmadi et al. (2021 نیز در تحقیق خود که به مقایسه روش‌های خشکسالی هیدرولوژیکی پرداخته‌اند، اشاره داشته‌اند که حوضه دورود-بروجرد دارای خشکسالی‌های پیوسته بوده و با بررسی شاخص خشکسالی مؤثر^۱ (EDI) سال‌های فوق را بسیار

جدول (۵) نتایج حاصل از آنالیز فراوانی دبی ۹۰٪ منحنی تداوم جریان را نشان می‌دهد. طبق جدول (۵) شدیدترین حجم خشکسالی در منطقه با دوره بازگشت ۴ الی ۶ year و کمترین مقدار حجم خشکسالی، به‌طور مداوم (دوره بازگشت 1 year) رخ خواهد داد. از طرفی شدیدترین تداوم خشکسالی نیز بین ۲ الی ۸ year تکرار خواهد شد و کمترین مقدار حداکثر تداوم خشکسالی، معادل ۰/۰۰۲ m³/s به‌طور پیوسته ادامه دارد.

مطابق جدول (۵) حداکثر تداوم خشکسالی در سطح ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان با تعداد ۱۵۱ و ۱۱۶ day، به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های بیاتون و رحیم‌آباد است. دوره بازگشت این وقایع نیز به ترتیب، ۹ و ۵ year است. در خصوص حجم خشکسالی نیز حداکثر حجم، در سطح ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان، متعلق به جریان‌های ایستگاه تیره است که مقادیری به ترتیب معادل ۱۹۸/۳ و ۴۴/۵۳ m³/s خواهد داشت. در سطح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان این مقادیر هر ۱۲ و ۴ year یکبار رخ خواهند داد. نتایج آنالیز فراوانی در کل ایستگاه‌ها، صحت برآورد تداوم و حجم خشکسالی را توسط نرم‌افزار Vensim تأیید می‌کند. نتایج آنالیز فراوانی نشان می‌دهد، در این منطقه حداکثر تداوم و حجم خشکسالی از توزیع‌های آماری متفاوتی تبعیت

¹Effective Drought Index

باشد:

۱- در بیش تر سال ها در این حوضه تداوم خشکسالی به طور پیوسته هرچند برای مدت کوتاهی اتفاق افتاده است. با توجه به ثبت حداکثر مقادیر تداوم خشکسالی دبی در ایستگاه بیاتون، معادل ۲۲۹ و ۱۲۳ day به ترتیب در آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان این ایستگاه بیشترین تداوم خشکی را به خود اختصاص داده است. لذا در اقلیم مشابه حوضه دورد-بروجرد، رودخانه های کم آب، خشکی با تداوم بیشتر در حجم خشکسالی کمتر اتفاق می افتد.

۲- در خصوص حجم خشکسالی ایستگاه تیره با ثبت حجم معادل ۲۱/۳۲۰ و ۳۸/۴۷ MCM به ترتیب برای سطوح آستانه ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان، بیشترین حجم را به خود اختصاص داده است

۳- منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم های کاملاً متفاوت و مستعد خشکسالی است. این حوضه در ایستگاه های بیاتون و تیره به ترتیب با ارقام حداکثر دبی سالانه ۵۲۷ و ۲۰۱۹۶ m³/s خشکسالی را با تداوم و حجم حداکثری تجربه نموده است. لذا در حوضه های با اقلیم متفاوت در سرشاخه های پرآبی که خشکسالی هیدرولوژیکی را تجربه می کنند، حجم (بزرگی) خشکسالی در تداوم های کوتاه رخ خواهد داد.

۴- دوره بازگشت حداکثر تداوم و حجم خشکسالی در حوضه دورد-بروجرد حداقل ۱ year بوده است. همچنین در سطوح دبی ۷۰ و ۹۰٪ منحنی تداوم جریان دوره بازگشتی به ترتیب معادل ۲۵ و ۸ year برای تداوم و نیز ۱۴ و ۴ year برای حجم خشکسالی برآورد شد. لذا حداقل ۴ year یکبار رودخانه پرآب تیره خشکسالی هیدرولوژیکی را با کاهش حجم خود نشان خواهد داد.

دسترسی به داده ها

داده های استفاده شده یا تولید شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که، هیچ گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

Abhishek, A., Channaveerappa, B., & Dodamani, M. (2016). Comparison of two hydrological drought indices. *Perspect. Sci.*, 8, 626-628.

خشک اعلام نمودند. لذا این بررسی نیز تأیید این مطلب است که خشکسالی در حوضه دورد-بروجرد به طور پیوسته و دائمی در تمام رودخانه های منطقه رخ داده است و با وجود رودخانه ای پرآب همچون تیره، وقوع خشکسالی در کل منطقه به طور مشخص از سال ۱۳۹۱ شروع شده و در آینده نیز با شدت بیشتری ادامه خواهد داشت. در تحقیق حاضر، خشکسالی قبل از سال ۱۳۹۱ در دبی های ایستگاه های منطقه مشاهده گردید که در تحقیق Ahmadi et al. (2021) نیز به آن اشاره شده است. اما لزوماً شدت و حجم خشکسالی دبی ها در کل ایستگاه های منطقه بطور یکسان و همزمان رخ نداده است. لذا مطلب حائز اهمیت، در تفاوت شدت حجم و تداوم خشکسالی، در دبی ایستگاه های تحقیق حاضر بود. به گونه ای که خشکسالی با حجم بالا و در دوره های زمانی کوتاه تر در جریان های ایستگاه پر آب تیره مشاهده شد که تفاوت قابل ملاحظه ای در دبی حداکثر و حداقل آن با رقم ۱۸۸۸۶ m³/s وجود داشت. این امر به دلیل شیب منحنی تداوم جریان و نوع نوسانات دبی در طول دوره بود. شدت حجم و تداوم و نیز وقوع خشکسالی در دبی هر ایستگاه وابسته به سطوح آستانه و سطوح آستانه، وابسته به شیب منحنی تداوم جریان و تفاوت مقادیر دبی حداکثر و حداقل و نیز نوسانات دبی است. در ایستگاه های رحیم آباد و محمدحاجی که دارای مقادیر دبی عبوری کمتر و روندی مشابه دبی ایستگاه تیره بودند، تداوم و حجم خشکسالی با شدتی کمتر تکرار گردید. از طرفی در ایستگاه بیاتون که مقادیر دبی حداکثر و حداقل در کل دوره به گونه ای تکرار شده است که تفاوت چشمگیری نداشته و نیز از نوسانات کمتری برخوردارند، دبی سطوح آستانه به دبی های کل دوره نزدیکتر و تداوم بیشتر و حجم کمتری از خشکسالی ثبت گردید.

۴- نتیجه گیری

بررسی شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی هیدرولوژیکی در چهار ایستگاه حوزه آبخیز دورد-بروجرد در دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۸ هدف پژوهش حاضر بوده است که در این راستا با استفاده از نرم افزار Vensim روش حد آستانه ثابت شبیه سازی شده است. نتایج کلی پژوهش به صورت زیر می

DOI: [10.1016/j.pisc.2016.06.039](https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.039).

Ahmadi, M., Paimozd, S., & Rahimi, M. (2021). Comparison of hydrological and

- meteorological drought monitoring using RDI and EDI indices. *Environ. Water Eng.*, 7(4), 683–696. DOI: [10.22034/jewe.2021.276629.1531](https://doi.org/10.22034/jewe.2021.276629.1531) [In Persian].
- Beiranvand, I., Gabdomkar, A., Abbasi, A., & Khodaghali, M. (2022). Statistical-Synoptic Analysis of April 2019 Heavy Rainfall in Doroud-Boroujerd Basin. *J. Nat. Environ. Hazard.*, 11(32), 169-188. DOI: [10.22111/jneh.2022.38564.1806](https://doi.org/10.22111/jneh.2022.38564.1806) [In Persian].
- Byazedi, M., & Saghaian, B. (2011). Regional analysis of river flow drought in the southwestern regions of the country. *Iran-Watershed Manag. Sci. Eng.*, 14(5), 37-52 [In Persian].
- Bonacci, O. (1993). Hydrological Identification of drought. *Hydrol. Process.*, 7, 249-262. DOI: [10.1002/hyp.3360070303](https://doi.org/10.1002/hyp.3360070303).
- Clancy, T. (2018). Systems thinking: Three system archetypes every manager should know. *IEEE Eng. Manag. Rev.*, 4(6), 32-41. DOI: [10.1109/EMR.2018.2844377](https://doi.org/10.1109/EMR.2018.2844377).
- Edmund, T. (2011). Defining the threshold level of hydrological drought in lake catchments. *Limnol. Rev.*, 11(2), 81-88. DOI: [10.2478/v10194-011-0029-x](https://doi.org/10.2478/v10194-011-0029-x).
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., & Demuth, S. (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10(4), 535-552. DOI: [10.5194/hess-10-535-2006](https://doi.org/10.5194/hess-10-535-2006).
- Gheisouri, M., Soltani-Gerdefaramarzi, S., & Ghasemi, M. (2019). Assessment of Meteorological and Hydrological Drought and its Effect on Water Quality: (Case Study: Godarkhosh River). *Irrig. Sci. Eng.*, 41(4), 91-105. DOI: [10.22055/jise.2017.20927.1499](https://doi.org/10.22055/jise.2017.20927.1499) [In Persian].
- Ghorbani, M., Mozayyan, M., & Zarei, H. (2019). Hydrological drought investigation of Armand River using low flows analysis. *J. Water Soil Conserv.*, 26(3), 247-263. DOI: [10.22069/jwsc.2019.15189.3037](https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15189.3037) [In Persian].
- Hisdal, H., Clausen, B., Gustard, A., Peters, E., & Tallaksen, L. M. (2004). Hydrological Drought Characteristics. Elsevier Science, The Netherlands, Developments in Water Science, chap. 5, 139-198.
- Hisdal, H., & Tallaksen, L. M. (2003). Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: A case study for Denmark. *J. Hydrol.*, 281(3), 230-247. DOI: [10.1016/S0022-1694\(03\)00233-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00233-6).
- Jamal, M., Ebrahimi, H., & Mousavi Jahrom, H. (2020). Hydrological drought index correction based on determining the most appropriate probability distribution. *J. Water Soil Resour. Conserv.*, 9(5), 135-152. DOI: [20.1001.1.22517480.1399.9.4.9.3](https://doi.org/20.1001.1.22517480.1399.9.4.9.3) [In Persian].
- Karimi, M., Shahedi, K., & Khosravi, K. (2016). Investigation of meteorological and hydrological drought using drought indicators in the Gharezu watershed. *Earth Space Phys.*, 1(42), 159-170 [In Persian].
- Lashani Zand, M., Parvaneh B., & Beiranvand, F. (2011). Climatic zoning of Lorestan Province using statistical methods and determining the most suitable experimental method. *Nat. Geogra. Quart.*, 4(9), 89-106 [In Persian].
- Mortezaii, G. H., lotfi, J., khalighi Sigarodi, S., Saravi, M., & Nazari Samini, A. (2020). Analysis and evaluation of hydrological drought indicators in Kurdistan Province. *J. Watershed Eng. Manag.*, 12(2), 441-453. DOI: [10.22092/ijwmse.2019.123305.1566](https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.123305.1566) [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. *J. Nat. Environ. Hazard.*, 11(34). DOI: [10.22111/jneh.2022.39448.1835](https://doi.org/10.22111/jneh.2022.39448.1835).
- Paimozd, S. (2021). Simulating surface water allocation and identifying systemic archetype using vensim software: A case study of Qorveh Dehgolan's basin. *Desert Ecosyst. Eng. J.*, 10(31), 123-141. DOI: [10.22052/DEEJ.2021.10.31.61](https://doi.org/10.22052/DEEJ.2021.10.31.61) [In Persian].
- Salajegheh, A., Mesbah zade, T., Soleimani sardoo, F., & Alipour, N. (2017). Assessment of hydrological drought using constant threshold level method (Case Study: karaj Dam Basin). *Iran-Watershed Manag. Sci. Eng.*, 11(39), 89-99. DOI: [20.1001.1.20089554.1396.11.39.10.8](https://doi.org/20.1001.1.20089554.1396.11.39.10.8) [In Persian].
- Staudinger, M., Weiler, M., & Seibert, J. (2015). Quantifying sensitivity to droughts –an

- experimental modeling approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(3), 1371–1384. DOI: [10.5194/hess-19-1371-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-1371-2015).
- Teimoori, M., Mirdamadi, S. M., & Hosseini, S. J. F. (2019). Modeling of climate change effects on groundwater resources: the application of dynamic systems approach. *Int. J. Agri. Manag. Develop.*, 9(2), 107-118. DOI: [20.1001.1.21595852.2019.9.2.3.3](https://doi.org/10.1001.1.21595852.2019.9.2.3.3).
- Yarahmadi, J., & Rostami zad, G. H. (2019). Analysis of hydrological droughts in the north of Urmia Lake. *Hydrogeomorph.*, 6(19), 79-100. DOI: [20.1001.1.23833254.1398.6.19.5.6](https://doi.org/10.1001.1.23833254.1398.6.19.5.6).
- [In Persian].
- Zandifar, S., Dragahian, F., Fijani, E., & Naeimi, M. (2021). The trend of groundwater variations and drought in the Karkheh Watershed. *Watershed Manag. Res.*, 34(3), 53-73. DOI: [10.22092/wmej.2021.343333.1352](https://doi.org/10.22092/wmej.2021.343333.1352).
- Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, C., & Tong, Q. (2021). Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sens. Environ.*, 190(1), 96-106. DOI: [10.1016/j.rse.2016.12.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.010).

How to cite this paper:

Alishahi Chegeni, M., Paimozd, S., and Rahimi, M. (2023). Dynamic analysis of hydrological drought using constant threshold method and vensim software. *Environ. Water Eng.*, 9(4), 467-484. DOI: [10.22034/EWE.2023.376058.1832](https://doi.org/10.22034/EWE.2023.376058.1832).