

## Monitoring of hydrological drought in Caspian Sea Basin

Sima Rahimi Bondarabadi<sup>1\*</sup>, Bahram Saghafian<sup>2</sup> and Tayeb Raziei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Sciences and Researches Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 14 September 2019

Accepted: 14 January 2020

### Extended abstract

#### Introduction

Monitoring of hydrological droughts is one of the basic needs of water resources management in watersheds, especially in the field of water agriculture. Drought is divided into three major groups: meteorology, agriculture and hydrology. Hydrologic drought can be studied in different ways. One of the common methods is the use of low flow indexes and threshold level approach.

#### Materials and methods

In this research, the minimum flow indices ( $Q_{75}$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$ ) extracted from the flow continuity curve and minimum flow series (10 and 30 days) as well as the amount of flow deficit for hydrological drought monitoring in the Caspian Sea Basin were investigated and evaluated. For this purpose, 40 hydrometric stations with 41-year statistics (1970-2011) were selected. In the next step, the data of the studied stations were evaluated in terms of homogeneity, independence and randomness. Then, with the help of hierarchical cluster analysis and step-by-step regression, hydrological homogenous areas were determined and regional analysis of these indicators was done.

#### Results and discussion

In order to investigate the characteristics of the minimum current in the Caspian Sea Basin, first, the continuous flow curve was drawn for each of the stations, and then, three indices  $Q_{75}$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$  were calculated for each of the stations. For the spatial comparison of the minimum flow, the specific minimum discharge or  $q_s$  (minimum discharge value divided by the area) was used.  $q_{s75}$  index varies between 0.0006 and 13  $m^3s^{-1}$  per  $km^2$ . The value of  $q_{s75}$  is less (drier) in the eastern parts and in the western parts of the region, the amount of dryness of the stream is less than other places. Examining the spatial distribution maps of these three indicators shows that the trend of their spatial changes is almost similar and they all indicate that the western regions of the Caspian Sea Basin are more humid than the eastern and central regions. In the next step, to examine the minimum flow indicators, a series of minimum flows of 10 and 30 days was prepared. By comparing distribution parameters with the help of scoring method, Log-Pearson type 3 distribution was selected as the best distribution in most stations. After choosing the most appropriate distribution, the values of the 10-day and 30-day minimum indices with different return periods were calculated. Examining the average indicators shows that the minimum discharge value of 10 days with a value equal to 0.01  $m^3s^{-1}$  in Vatana Station (12-035) located in the east of the basin and the highest with a value of 19.2  $m^3s^{-1}$ , it is at Rudbar Station (17-034) in the western region of the basin. Regarding the average minimum discharge of 30 days, the lowest value is equal to 0.20  $m^3s^{-1}$  and the highest value is equal to 8.52  $m^3s^{-1}$  in these two stations. In order to investigate the temporal changes of hydrological drought intensity, the annual time series of 10-day and 30-day low flow at each station were plotted in relation to the year of their occurrence, in order to determine the trend of changes in the drought situation in different years. Examining the time trend of the minimum flow indicators on the graphs, shows a

\* Corresponding author: rahimi\_si@yahoo.com

decrease in the value of the indicators in recent years and a negative trend of the indicators. In other words, the graphs in almost all stations show hydrological droughts (reduction of minimum flow indicators) during recent years. In order to determine the length of minimum flow periods, 10 and 30 day moving averages of discharge were compared with  $Q_{90}$  index value in different stations. The results show that the persistence of drought in the central parts of the Caspian Sea Basin (Pulor, Razan, Karsang, Tange Lavij, Pol Zoghal and Zowat sub-basins) is more than the rest of the regions, these sub-basins are located in Mazandaran Province. The lowest duration of drought (between 22 and 25 days) is related to the sub-basins of Shalman, Pol-e-Sazman, Pashaki, Astana and Tutkabon in the eastern part of the Caspian Sea Basin and in Gilan Province. The eastern parts of the basin have also experienced a drought period between 28 and 30 days.

### Conclusion

Results indicate that the years 1990 to 2010 have undergone severe and long droughts in most of the stations. The review of the spatial distribution of indexes shows better conditions in the western parts of the study area compared to the eastern sections in terms of dryness. However, the duration of hydrological droughts in the central study area is longer than in other parts of the basin. Investigating the time trend of the indexes also shows the increase in the frequency and duration of hydrological droughts in recent years. A comparison of different indexes shows that all of them have similar results in the region. The results of cluster analysis divided the area into three distinct homogenous units (in 0.01 significant level). The result of the regional analysis showed that in the eastern homogeneous region, the influencing factor on low flow indexes is elevation, while in the central and western regions, the drainage area and density have a greater impact.

**Keywords:** Drought deficit volume, Drought index, Flow duration curves, Low flow index, Regional analysis

Cite this article: Rahimi Bondarabadi, S., Saghafian, B., Razi, T., 2023. Monitoring of hydrological drought in Caspian Sea Basin. *Watershed Engineering and Management* 15(4), 570-587.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## پایش خشکسالی هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز دریای خزر

سیما رحیمی بندرآبادی<sup>۱\*</sup>، بهرام ثقفیان<sup>۲</sup> و طیب رضیئی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۳

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

شناخت فرکانس وقوع خشکسالی‌های با شدت و تداوم‌های مختلف و پیش‌بینی به موقع آن‌ها برای اعلام هشدار، یکی از نیازهای اساسی پروژه‌های منابع آب است. پدیده خشکسالی، به سه گروه عمده هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی تقسیم می‌شود. پایش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی، یکی از نیازهای اساسی مدیریت منابع آب در حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در بخش کشاورزی آبی به شمار می‌آید. در سال‌های اخیر، شاخص‌ها و روش‌های جدیدی برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی در سطح جهان ارائه شده است.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، شاخص‌های جریان کمینه ( $Q_{75}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$ ) مستخرج از منحنی تداوم جریان و سری‌های جریان کمینه (۱۰ و ۳۰ روزه) و همچنین، حجم کمبود جریان برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی در حوزه دریای خزر، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، ۴۰ ایستگاه هیدرومتری که دارای آمار ۴۱ ساله (از سال آبی ۱۳۵۱-۱۳۵۰ تا ۱۳۹۱-۱۳۹۰) بود، انتخاب شد. در مرحله بعد، داده‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر همگنی، استقلال و تصادفی بودن، مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس، به کمک روش تحلیل خوشه‌ای مرتبه‌ای و رگرسیون گام به گام، مناطق همگن هیدرولوژیکی تعیین و تحلیل منطقه‌ای این شاخص‌ها انجام شد.

#### نتایج و بحث

برای بررسی ویژگی‌های جریان کمینه در حوزه دریای خزر، ابتدا منحنی تداوم جریان برای هر یک از ایستگاه‌ها رسم و سپس، سه شاخص  $Q_{75}$ ،  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه شد. برای مقایسه مکانی جریان کمینه، از دبی کمینه ویژه یا  $qs$  (مقدار دبی کمینه تقسیم بر سطح) استفاده شد. شاخص  $qs_{75}$ ، بین  $0.0006$  تا  $13$  متر مکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع تغییر می‌کند. مقدار  $qs_{75}$ ، در قسمت‌های شرقی، کمتر (خشک‌تر) و در قسمت‌های غربی منطقه، مقدار خشکی جریان کمتر از سایر نقاط است. بررسی نقشه‌های توزیع مکانی این سه شاخص، نشان می‌دهد که روند تغییرات مکانی آن‌ها تقریباً مشابه است و همگی بیانگر مرطوب‌تر بودن مناطق غربی حوزه دریای خزر نسبت به مناطق شرقی و مرکزی هستند. در مرحله بعد، برای بررسی شاخص‌های جریان کمینه، ابتدا سری جریان‌های کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه تهیه شد. با مقایسه پارامترهای

توزیع به کمک روش امتیازدهی، توزیع لوگ پیرسون تیپ سه، به‌عنوان بهترین توزیع در بیشتر ایستگاه‌ها انتخاب شد. پس از انتخاب مناسب‌ترین توزیع، مقادیر شاخص‌های کمینه ۱۰ روزه و ۳۰ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. بررسی میانگین شاخص‌ها نشان می‌دهد که کمترین مقدار دبی کمینه ۱۰ روزه با مقدار ۰/۱ متر مکعب بر ثانیه در ایستگاه وطن (۱۲-۰۳۵) واقع در شرق حوضه و بیشترین میزان با مقدار ۹۱/۲ متر مکعب در ثانیه در ایستگاه رودبار (۱۷-۰۳۴) در منطقه غرب حوضه است. در مورد میانگین دبی کمینه ۳۰ روزه نیز کمترین مقدار برابر ۰/۲۰ متر مکعب بر ثانیه و بیشترین مقدار برابر ۸/۵۲ متر مکعب بر ثانیه در همین دو ایستگاه است. به‌منظور، بررسی تغییرات زمانی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی، سری‌های زمانی سالانه جریان کم ۱۰ و ۳۰ روزه در هر ایستگاه نسبت به سال وقوع آن‌ها ترسیم شدند تا روند تغییرات وضعیت خشکسالی در سال‌های مختلف مشخص شود. بررسی روند زمانی شاخص‌های جریان کمینه بر روی نمودارها، نشان از کاهش مقدار شاخص‌ها طی سال‌های اخیر و روند منفی شاخص‌ها دارد. به عبارت دیگر، نمودارها تقریباً در همه ایستگاه‌ها بیان از خشکسالی‌های هیدرولوژیکی (کاهش شاخص‌های جریان کمینه) طی سال‌های اخیر دارند. برای تعیین طول دوره‌های جریان کمینه نیز، در ایستگاه‌های مختلف میانگین‌های متحرک ۱۰ و ۳۰ روزه دبی با مقدار شاخص  $Q_{90}$  مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که تداوم خشکسالی در قسمت‌های مرکزی حوضه دریای خزر (زیرحوضه‌های پلور، رزن، کرسنگ، تنگه لایوچ، پل‌ذغال و زوات) بیشتر از بقیه مناطق است که این زیرحوضه‌ها در استان مازندران واقع هستند. کمترین تداوم خشکسالی (بین ۲۲ تا ۲۵ روز) نیز مربوط به زیرحوضه‌های شلمان، پل‌سازمان، پاشاکی، آستانه و توتکاین در قسمت شرقی حوضه دریای خزر و در استان گیلان است. قسمت‌های شرقی حوضه نیز طول دوره خشکسالی بین ۲۸ تا ۳۰ روز را تجربه کرده‌اند.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰، در بیشتر ایستگاه‌ها شدیدترین و طولانی‌ترین خشکسالی‌ها اتفاق افتاده است. بررسی توزیع مکانی شاخص‌های جریان کمینه و حجم کمبود جریان، بیانگر خشک‌تر بودن قسمت‌های شرقی حوضه نسبت به مرکزی و غرب حوضه دریای خزر است. هرچند، طول دوره خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در خزر مرکزی بیشتر از سایر نقاط حوضه است. بررسی روند زمانی شاخص‌ها نیز بیانگر افزایش تکرار و طول مدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در سال‌های اخیر است. مقایسه شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد که همه شاخص‌ها نتایج مشابهی در منطقه دارند. بررسی روابط منطقه‌ای نشان داد که در منطقه همگن شرقی عامل تاثیرگذار بر شاخص‌های جریان، ارتفاع است. در حالی که در منطقه مرکزی و غربی مساحت و تراکم زهکشی، تاثیر بیشتری دارند.

### واژه‌های کلیدی: تحلیل منطقه‌ای، جریان کمینه، حجم کمبود جریان، شاخص خشکسالی، منحنی تداوم جریان

### مقدمه

در کشور که گستره‌های وسیعی را سیراب می‌کند، اهمیت مطالعه خشکسالی‌های هیدرولوژیک در کشور را توجه می‌کند.

سامانه‌های هیدرولوژیکی، حلقه اتصال مناطق مختلف به یکدیگر هستند و کمبود بارش در یک منطقه ممکن است مناطقی خارج از محدوده خود را نیز تحت تاثیر قرار دهد. توجه به این نکته که بر اثر تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر و گرم شدن کره زمین و افزایش وقوع خشکسالی‌های بلند مدت در کشور از یک سو و افزایش جمعیت کشور و

وقوع خشکسالی، از ویژگی‌های اصلی آب و هوای ایران محسوب می‌شود که هم در قلمرو آب و هوای مرطوب و هم خشک قابل مشاهده است. این حالت، در نتیجه وجود نوسانات آب و هوایی شدید در مقیاس‌های مختلف زمانی حاصل می‌شود. ویژگی‌های خشکسالی ایران نشان می‌دهد که به‌طور کلی هیچ منطقه‌ای از کشور، از این پدیده در امان نبوده، به نسبت موقعیت طبیعی خود اثرهای این پدیده مخرب را تجربه می‌کند. وجود رودخانه‌های مهمی

برای تخمین شاخص‌های جریان کم در چندین حوزه آبخیز در آفریقای جنوبی استفاده کرد.

Stahl and Demuth (2003) با استفاده از تحلیل خوشه‌ای و شناسایی مناطق همگن، خشکسالی‌های مهم هیدرولوژیکی را در سطح اروپا از نظر مکانی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و پهنه‌بندی کردند. همچنین، روش‌های مختلف تحلیل مکانی برای تعیین گستره مکانی خشکسالی در اروپا توسط Santos et al., (2001) مورد بررسی قرار گرفته و خشکسالی‌های مهم پهنه‌بندی شد. Fleig (2004) برای بررسی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک از شاخص‌های جریان کمینه ۱۰ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف و همچنین، از شاخص‌های به‌دست آمده از منحنی‌های تداوم جریان از جمله  $Q_{90}$ ،  $Q_{70}$ ،  $Q_{50}$  و  $Q_{95}$  استفاده کرد. آن‌ها در پژوهش خود بیان می‌کند که استفاده از منحنی‌های تداوم جریان روش مناسبی برای مقایسه وضعیت جریان در مناطق مختلف با اقلیم‌های متفاوت است.

Lahha and Bloschl (2007) روشی را برای تخمین شاخص  $Q_{95}$  در حوضه‌های دارای آمار و فاقد آمار اتریش ارائه کردند. آن‌ها برای تخمین این شاخص از روش‌های مختلفی استفاده کردند تا بتوانند بهترین روش را برای تخمین این شاخص ارائه دهند. آن‌ها برای افزایش صحت روش تخمین این شاخص، از اطلاعات مختلف شامل آمار کوتاه مدت و بلند مدت جریان و همچنین، ویژگی‌های حوضه استفاده کردند. آن‌ها در نهایت نقشه‌های منطقه‌ای  $Q_{95}$  را برای زیرحوضه‌های مورد بررسی در کشور اتریش ارائه دادند.

Wu et al., (2018) مشخصات خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و اثرات آن‌ها را در منطقه‌ای در چین بررسی کردند. آن‌ها از شاخص‌های SPI و SRI (Standardized Runoff Index) در ۱۷ زیرحوضه منطقه مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۳ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که روند هر دو خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی طی دوره مورد مطالعه، افزایشی است. هرچند متوسط دوره و شدت

نیاز بیشتر به آب از سوی دیگر، زندگی و فعالیت‌های اقتصادی در کشور تا چه میزان به آب‌های زیرزمینی بستگی پیدا کرده است، اهمیت مطالعه و پایش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی بیشتر روشن می‌شود.

شاخص‌های جریان کمینه به‌طور گسترده به‌منظور برنامه‌ریزی برای توسعه منابع آب استفاده می‌شود و یک روش مناسب برای بررسی حدود جریان هستند (Pyrcce, 2004; Tharme, 2003). در ایالات متحده از شاخص جریان کمینه به‌صورت حداقل هفت روزه سالانه در طی دوره بازگشت ۱۰ سال به‌منظور بررسی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک و همچنین، بررسی حدود جریان در مناطق مختلف استفاده شده است (Hisdal et al., 2004). Tallaksen et al., (1997) و Hisdal et al., (2001) با روش Annual Maximum Series و روش Partial Duration Series و دستیابی به توزیع احتمالاتی مناسب تداوم و کمبود جریان توانستند خطر وقوع خشکسالی را در اروپا تعیین کنند. Hisdal and Tallaksen (2000)، Kjeldsen and Lundorf (1997) و (1987) Zelenhasic and Salvai نشان دادند که استفاده از روش‌های آماری مثل روش ران تئوری در مطالعه جریان در مقیاس‌های روزانه و ماهانه بسیار مناسب است.

Smakhtin and Toulouse (1998) رابطه‌ای را بین شاخص‌های جریان به‌دست آمده از منحنی تداوم جریان و چند شاخص جریان کم دیگر به‌دست آوردند. آن‌ها از شاخص‌های  $Q_{95}$ ،  $Q_{90}$ ،  $Q_{75}$ ،  $Q_{50}$ ،  $Q_{7.10}$  و  $Q_{7.2}$  برای ۲۰۰ ایستگاه هیدرومتری استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که بین بسیاری از ویژگی‌های جریان کم همبستگی شدیدی وجود دارد. بدین معنی که اغلب یک شاخص جریان کم می‌تواند از شاخص دیگری به‌وسیله همبستگی رگرسیونی به‌دست آید.

Smakhtin (1998) طی پژوهشی نشان داد که روش‌های متفاوتی برای تخمین شاخص‌های جریان کم وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان، تکنیک شبیه سازی بارش-رواناب، منحنی‌های تداوم جریان و استفاده از داده‌های جریان ماهانه تولید شده اشاره کرد و برای نشان دادن قابلیت کاربرد این روش‌ها، از این تکنیک‌ها

من کندهال جریان کمینه در سرشاخه‌های حوضه دارای روند منفی طی دوره آماری هستند. با توجه به اهمیت حوضه دریای خزر از نظر آبدهی و با توجه به این که مطالعه کمتری در این منطقه صورت گرفته است، این حوضه برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شده است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه، حوضه دریای خزر است (شکل ۱). میانگین سالانه بارندگی در این حوضه از ۲۰۰۰ میلی‌متر در نواحی ساحلی تا کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر در دره رودخانه نمارستاق متغیر است. منطقه مورد مطالعه در سامانه طبقه‌بندی دومارتن اصلاح شده، واجد اقلیم نیمه‌خشک تا خیلی مرطوب نوع ب است و آب و هوای آن به‌علت قرار گرفتن بین سلسله کوه‌های البرز مرکزی و دریای خزر به شدت متأثر از ارتفاع است و ارتفاع آن از زیر صفر در کناره‌های دریا تا ۵۶۷۰ متر در قله دماوند متغیر است. میانگین متوسط دمای متوسط روزانه در حوضه از ۱۶ درجه سانتی‌گراد تا کمتر از ۲/۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است.

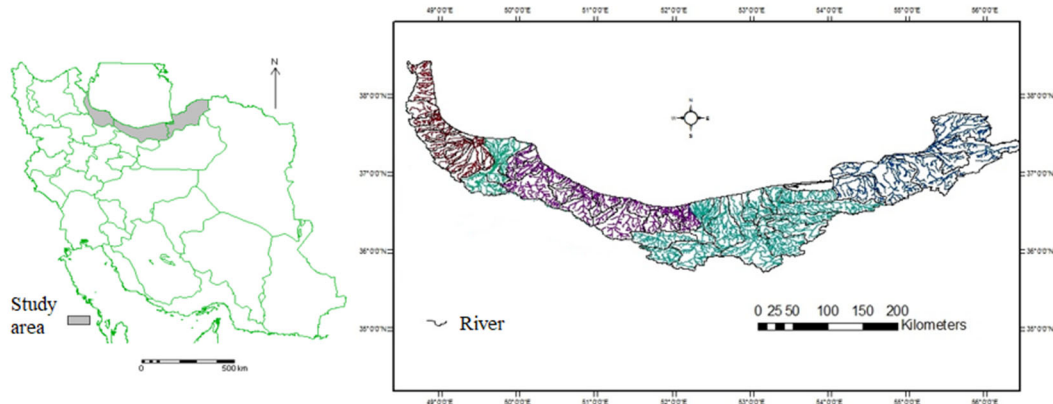
این حوضه، در تابستان تحت تاثیر توده هوای بری تروپیکال از دو منشا جنوب شرقی و جنوب غرب، بحری تروپیکال از اطلس و مدیترانه، بحری قطبی از طریق دریای سیاه و بری قطبی از شمال و شمال غرب و در زمستان، تحت تاثیر بری قطبی از میدا سبیری، بحری قطبی از شمال غرب و غرب، مدیترانه‌ای از محور غربی و بری تروپیکال از جنوب غرب قرار دارد. رودخانه‌های این حوضه شرایط متفاوتی دارند، در بخش غربی و نیز قسمت هایی از بخش میانی رودخانه‌ها طول کمی داشته، غالباً از یک یا چند دره کوچک در امتداد شمال به جنوب تشکیل شده‌اند. در بخش مرکزی و شرقی حوضه، رودخانه‌ها عموماً حوزه آبخیز وسیعی دارند. شبکه آبراهه‌ها و موقعیت رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه در شکل ۱، ارائه شده است.

خشکسالی‌های هیدرولوژیکی نسبت به هواشناسی بیشتر است.

Rivera (2021). پژوهشی بر روی شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی اخیر با استفاده از سوابق جریان ۱۵ حوضه رودخانه‌ای آرژانتین انجام دادند. شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی به‌دست آمده از روش سطح آستانه و شاخص استاندارد جریان، غیرمعمول بودن دوره‌های خشک در ۴۹ سال گذشته را نشان می‌دهد. همچنین، نتایج بیانگر کمبود آب‌های سطحی در طول دهه گذشته، همراه با بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی است که چالش‌هایی را پیش روی مدیران برای تأمین آب برای آبیاری در واحدهای اصلی کشاورزی قرار داده است. شدت خشکسالی هیدرولوژیکی از سال ۲۰۱۷ افزایش یافته است.

Sarhadi et al., (2007). برای تحلیل فراوانی منطقه ای مقادیر جریان کم در منطقه جیرفت از روش گشتاورهای خطی استفاده کردند. نتایج نشان داد که توزیع پیرسون تیپ سه، بهترین توزیع منطقه‌ای است و سپس، مقادیر دبی با دوره بازگشت‌های مختلف را برآورد کردند. در نهایت، با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره، مساحت حوضه به‌عنوان پارامتر اصلی برای برآورد جریان کم با دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه‌های فاقد آمار مشخص شد.

Jahanbakhsh et al., (2016) به بررسی زمانی و مکانی جریان کمینه در حوزه آبخیز کرخه پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که از بین شاخص‌های محاسبه شده  $Q_{95}$  و  $Q_{10,100}$  کمترین مقدار را دارند که با افزایش دوره بازگشت، مقادیر این شاخص‌ها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۸، ۲۰۰۰-۱۹۹۹ و ۲۰۰۱-۲۰۰۰، در بیشتر ایستگاه‌ها شدیدترین و طولانی‌ترین خشکسالی‌ها را تجربه کرده‌اند. بررسی توزیع مکانی شاخص‌ها نیز بیانگر وضعیت بهتر قسمت‌های جنوب شرقی حوضه نسبت به مناطق شمالی و جنوبی حوضه از نظر خشکی است. از طرف دیگر، طبق آماره اسپیرمن و



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه و نقشه شبکه آبراهه منطقه  
 Fig. 1. The location of the study area and the map of the streams network

به منظور محاسبه شاخص‌های جریان کمینه، نیاز به آمار بلند مدت دبی در حوزه آبخیز مورد نظر است. بدین منظور، ۴۰ ایستگاه هیدرومتری که دارای آمار ۴۱ ساله (از سال آبی ۱۳۵۱-۱۳۵۰ تا ۱۳۹۱-۱۳۹۰) بود، انتخاب شدند. در مرحله بعد، داده‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر همگنی، استقلال و تصادفی بودن مورد ارزیابی قرار گرفت و سری‌های مشکوک حذف و یا اصلاح شد. بازسازی داده‌های گم‌شده نیز، به روش اتو رگرسیون، برآورد و تکمیل شد.

دسته دوم، شاخص‌های سری جریان کمینه سالانه هستند که از تحلیل فراوانی به دست می‌آیند (Refai et al., 2000; Durransan and Tomic, 2001). این شاخص، به صورت کمینه جریان روزانه، در طول یک سال و یا کمترین جریان متوسط در چند روز متوالی مانند هفت، ۱۵، ۳۰ روز و بیشتر، در طول یک سال تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، جریان کم  $n$  روزه در یک سال، کمترین مقدار میانگین متحرک  $n$  روزه جریان‌های روزانه در آن سال است.

**حجم کمبود جریان:** یکی دیگر از روش‌هایی که در این پژوهش برای تشخیص و بررسی خشکسالی جریان رودخانه استفاده شده است، روش حد آستانه است. در مورد این نوع خشکسالی، مناسب‌ترین نوع تحلیل، بررسی دوره‌های پیوسته‌ای است که دبی رودخانه در زیر یک حد<sup>۲</sup> (حدهای) آستانه از پیش تعیین شده قرار می‌گیرند. اصطلاح دبی مرجع<sup>۳</sup> و سطح برشی<sup>۴</sup> نیز گاهی به جای حد

به منظور محاسبه شاخص‌های جریان کمینه، نیاز به آمار بلند مدت دبی در حوزه آبخیز مورد نظر است. بدین منظور، ۴۰ ایستگاه هیدرومتری که دارای آمار ۴۱ ساله (از سال آبی ۱۳۵۱-۱۳۵۰ تا ۱۳۹۱-۱۳۹۰) بود، انتخاب شدند. در مرحله بعد، داده‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر همگنی، استقلال و تصادفی بودن مورد ارزیابی قرار گرفت و سری‌های مشکوک حذف و یا اصلاح شد. بازسازی داده‌های گم‌شده نیز، به روش اتو رگرسیون، برآورد و تکمیل شد.

**تحلیل جریان کمینه:** اغلب، از جریان کم رودخانه‌ها به خشکسالی هیدرولوژیک تعبیر می‌شود. با استفاده از داده‌های پیوسته جریان، می‌توان ویژگی‌هایی از جریان کمینه را به عنوان شاخص‌های جریان کمینه انتخاب کرد. شاخص‌های جریان کم به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، شاخص‌هایی هستند که از منحنی تداوم جریان<sup>۱</sup> استخراج می‌شوند (Pyrce, 2004). منحنی تداوم جریان، نشان‌دهنده ویژگی‌های هیدرولوژیکی و برای مقایسه پاسخ و رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بسیار مفید است (Yilmaz et al., 2018).

منحنی تداوم جریان، نشان‌دهنده رابطه بین فراوانی و بزرگی دبی، دارای اطلاعات مفیدی است که تمامی دبی‌های رودخانه، اعم از کم و جریان سیلابی را نشان می‌دهد (WMO, 2008). این منحنی، به شکل‌های مختلف ترسیم می‌شود. در رسم آن، یا از تمام آمار ثبت شده (Vogel

<sup>3</sup> Reference discharge

<sup>4</sup> Truncation level

<sup>1</sup> Flow duration curve

<sup>2</sup> Threshold

است. استفاده از تحلیل منطقه‌ای بر این فرض استوار است که حوضه‌ها به لحاظ آب و هوایی، فیزیوگرافی، زمین شناسی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و خاک، دارای عکس العمل مشابهی هستند. لذا، برای این کار لازم است مناطق همگن شناسایی شوند که برای این منظور، از روش خوشه بندی سلسه مراتبی استفاده شده است. در این روش، داده ها به گروه‌هایی تقسیم می‌شوند که در آنها تغییرات داخل گروهی به کمینه و تغییرات بین گروهی به بیشینه برسد. طبقه‌بندی با محاسبه فاصله هر فرد از سایر افراد شروع و سپس گروه‌ها بر اساس فرایند تجمعی یا تقسیمی تشکیل می‌شوند. پس از تعیین فاصله، که معمولاً به یکی از روش‌های اقلیدسی، مربع اقلیدسی و چند روش شناخته شده دیگر اندازه‌گیری می‌شود، گروه‌های همگن با یکی از روش‌های نزدیکترین همسایه، ارتباط بین گروه‌ها، دورترین همسایه، میانه و Ward's استخراج می‌شوند. برای آزمون صحت گروه‌بندی نیز از روش تحلیل تابع تشخیص<sup>۱</sup> استفاده شد. از این روش، زمانی که تعداد و اعضای گروه‌ها مشخص باشد، برای پیش‌بینی صحت گروه‌ها استفاده می‌شود (Stockburger et al., 1998).

بعد از این مرحله، در هر یک از این گروه‌ها روابط همبستگی با موثرترین عوامل استخراج می‌شوند. برای این منظور، از روش رگرسیون گام به گام استفاده می‌شود که در آن، اولین متغیر مستقل بر اساس بالاترین ضریب همبستگی صفر مرتبه با متغیر وابسته وارد تحلیل می‌شود. از آن پس، سایر متغیرهای پیش‌بین بر حسب ضریب همبستگی تفکیکی (جزیی) و نیمه‌تفکیکی (نیمه جزیی) در تحلیل وارد می‌شود. در این روش، پس از ورود هر متغیر جدید، ضریب همبستگی نیمه‌تفکیکی یا تفکیکی تمام متغیرهایی که قبلاً در معادله وارد شده‌اند، به‌عنوان آخرین متغیر ورودی مورد بازبینی قرار می‌گیرد و چنانچه با ورود متغیر جدید، معنی‌داری خود را از دست داده باشد، از معادله خارج می‌شود. لازم به ذکر است که برای ارزیابی مدل‌ها از ضریب تعیین و خطای استاندارد برآورد و همچنین، قدر مطلق خطا<sup>۲</sup> کمک گرفته شد.

آستانه به کار می‌روند. می‌توان حد آستانه را به روش‌های مختلف، که تابع نوع و شرایط کمبود آب منطقه مورد مطالعه است، محاسبه کرد (Saghafian et al., 2011).

برای انتخاب حد آستانه می‌توان از صدکی از منحنی تداوم جریان استفاده کرد. چنانچه از داده‌ای روزانه استفاده شود، منحنی تداوم جریان نشان‌دهنده رابطه بین دبی‌های روزانه و احتمال وقوع  $P(X \leq x)$  است. در روش حد آستانه دوره‌های (Runs) بالا و پایین حد آستانه مشخص شده، بررسی می‌شوند و در اصل به نام نظریه دنباله‌ها نامگذاری شده است (Hisdal and Tallaksen, 2000).

اولین کاربرد روش دنباله‌ها در هیدرولوژی به‌وسیله Yevjevich (1967)، انجام شد. طول دنباله (تداوم خشکسالی یا di) و مجموع آن (حجم کمبود جریان یا بزرگی si) به‌عنوان عوامل خشکسالی نقطه‌ای توصیه شده اند.

**تحلیل فراوانی:** هدف اصلی از تحلیل فراوانی، پیش‌بینی مقدار یک واقعه به ازای دوره برگشت‌های مشخص است. برای این منظور، با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای، پارامترهای مربوط به توابع توزیع احتمال محاسبه می‌شوند. سپس، با کمک توزیع برازش داده شده، مقدار با احتمال وقوع مورد نظر که بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از وقایع ثبت شده هستند، پیش‌بینی می‌شود. در استفاده از توزیع فراوانی برای پیش‌بینی، مهم‌ترین مساله، تشخیص تابع توزیع مناسب از بین توابع مختلف است. برای انتخاب تابع توزیعی که بهترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌ای دارد، از آزمون‌های نکویی برازش استفاده می‌شود. آزمون‌های متعددی در این زمینه وجود دارند که در این پژوهش، از نتایج آزمون کای‌اسکووار برای انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع برازش داده شده، استفاده شده است.

**تحلیل منطقه‌ای جریان:** با توجه به ناکافی بودن داده‌های هیدرومتری، در بسیاری از مناطق، تحلیل منطقه‌ای، روش مناسبی برای تعمیم ویژگی‌های هیدرومتری و از جمله جریان کمینه برای حوضه‌های بالادست این ایستگاه‌ها با کمک ایستگاه‌های دارای آمار

<sup>2</sup> Mean Absolute Error (MAE)

<sup>1</sup> Discriminate function analysis



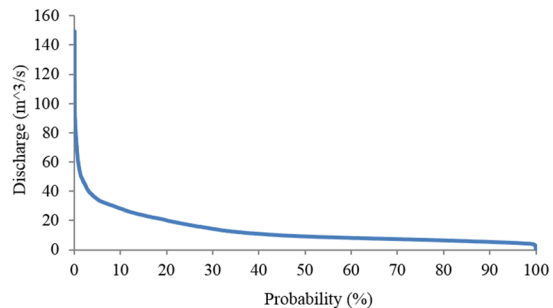
## نتایج و بحث

رسد که مقایسه این شاخص‌ها به صورت کلی نمی‌تواند جواب درستی از وضعیت توزیع مکانی خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه باشد.

لذا، برای مقایسه مکانی جریان کمینه، از دبی کمینه ویژه یا QS (مقدار دبی کمینه تقسیم بر سطح) استفاده شد (جدول ۱). برای بررسی تغییرات مکانی این شاخص‌ها در طول حوضه، نقشه تغییرات مکانی این نمایه‌ها، با دوره بازگشت ۷۵، ۹۰ و ۹۵ ساله در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، شاخص QS75 بین ۰/۰۰۰۶ تا ۱۳ متر مکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع تغییر می‌کند. مقدار QS75، در قسمت‌های شرقی، کمتر (خشک تر) و در قسمت‌های غربی منطقه، مقدار خشکی جریان کمتر از سایر نقاط است. مقدار شاخص QS90 بین ۰/۰۰۰۳ تا ۰/۰۰۰۷ متر مکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع و مقدار QS95 بین ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۵۷ متر مکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع تغییر می‌کند. بررسی نقشه‌های توزیع مکانی این سه شاخص نشان می‌دهد که روند تغییرات مکانی آن‌ها تقریباً مشابه است و همگی بیانگر مرطوب‌تر بودن مناطق غربی حوضه دریای خزر نسبت به مناطق شرقی و مرکزی هستند.

در مرحله بعد، برای بررسی شاخص‌های جریان کمینه، ابتدا سری جریان‌های کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه تهیه شد. آن‌گاه به منظور انتخاب مناسب‌ترین توزیع منطبق بر این سری‌ها، توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال، لوگ نرمال سه پارامتری، گامبل، پیرسون تیپ سه، لوگ پیرسون تیپ سه و تابع حد نهایی تعمیم یافته، بررسی شدند. با مقایسه پارامترهای توزیع به کمک روش امتیازدهی، توزیع لوگ پیرسون تیپ سه، به عنوان بهترین توزیع در بیشتر ایستگاه‌ها انتخاب شد. پس از انتخاب مناسب‌ترین توزیع، مقادیر شاخص‌های کمینه ۱۰ روزه و ۳۰ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد (جدول ۱). بررسی میانگین شاخص‌ها نشان می‌دهد، کمترین مقدار دبی کمینه ۱۰ روزه با مقدار برابر ۰/۰۱ متر مکعب بر ثانیه در ایستگاه وطن (۵۳-۱۲) واقع در شرق حوضه و بیشترین آن با مقدار حدود ۱۹/۲ متر مکعب بر ثانیه در ایستگاه رودبار (۴۳-۱۷) در منطقه غربی حوضه است. در مورد

به منظور بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه دریای خزر، شاخص‌های جریان کمینه و همچنین، حجم کمبود جریان به عنوان شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفت. از شاخص‌های جریان کمینه، مقادیر Q70، Q90 و Q95 منحنی تداوم جریان، استخراج شد. مقادیر شاخص‌های دبی حداقل ۱۰ روزه و ۳۰ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف نیز از سری‌های جریان کمینه محاسبه شد. با استفاده از تئوری ران و با کمک شاخص Q90، حجم کمبود جریان محاسبه شد. طول مدت و دوره‌های خشکسالی نیز با کمک شاخص‌های برآورد شده، محاسبه شده است. برای بررسی ویژگی‌های جریان کمینه در حوضه دریای خزر، ابتدا منحنی تداوم جریان برای هر یک از ایستگاه‌ها رسم شد. شکل ۲، برای نمونه، منحنی تداوم جریان در ایستگاه پل ذغال را نشان می‌دهد. سپس، با استفاده از منحنی‌های تداوم جریان، سه شاخص Q75، Q90 و Q95 برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه شد.

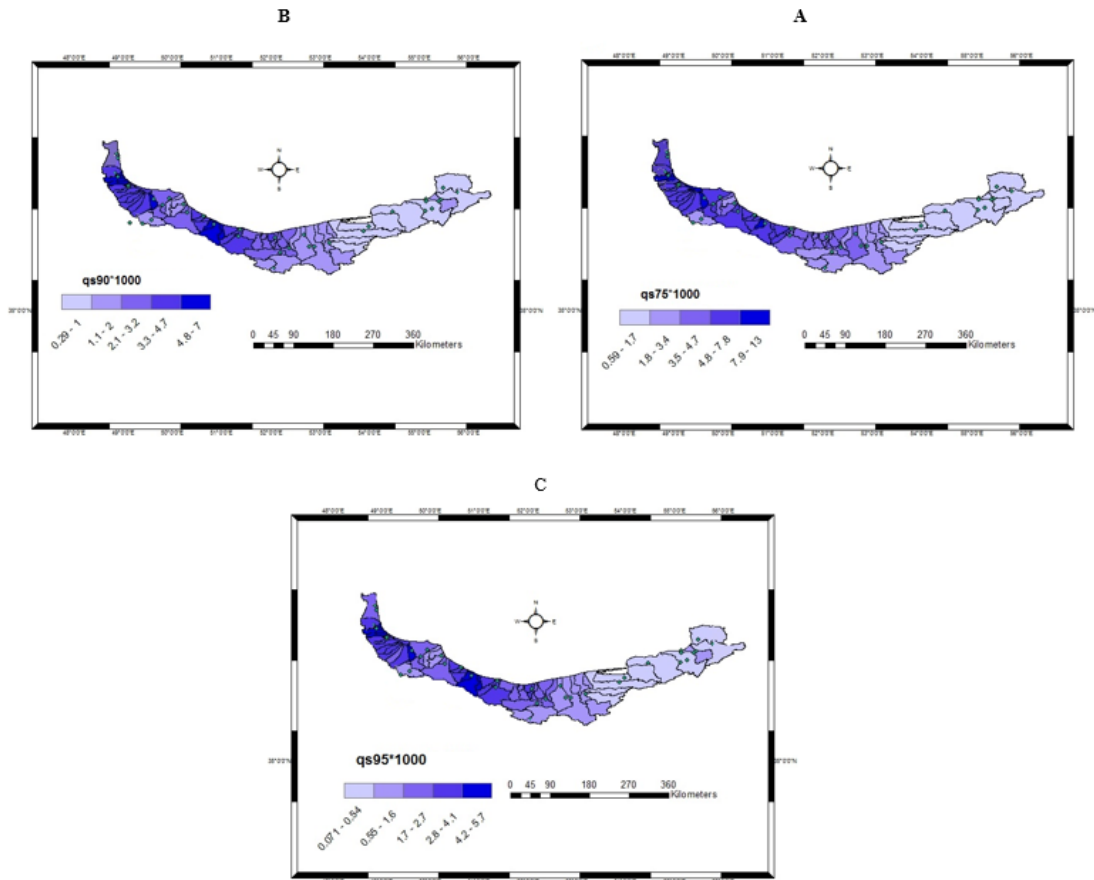


شکل ۲- منحنی تداوم جریان ایستگاه پل ذغال (۱۶-۰۲۱)  
Fig. 2. Flow duration curve of Polzoghgal Station (16-021)

بررسی شاخص‌ها، نشان می‌دهد که کمترین مقدار دبی‌های کمینه به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های وطن، تنگراه، چوبر بالامحله و سفیدچاه است که این ایستگاه‌ها در قسمت‌های غربی نوار ساحلی دریای خزر و در استان گیلان قرار دارند. به عبارت دیگر، این مناطق از لحاظ هیدرولوژیکی خشک‌تر از سایر مناطق حوضه دریای خزر هستند. بیشترین مقدار شاخص‌ها نیز به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های رودبار، کرسنگ و گیلان است. این ایستگاه‌ها در قسمت غرب حوضه دریای خزر قرار دارند. به نظر می

برای میانگین سری جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه در واحد سطح نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، خشکسالی‌های شدید، در قسمت‌های شرقی و مناطق با خشکسالی کمتر، در قسمت‌های مرکزی و غربی حوضه قرار دارند.

میانگین دبی کمینه ۳۰ روزه نیز کمترین مقدار (برابر ۰/۰۲ متر مکعب بر ثانیه) و بیشترین مقدار (برابر ۲۵/۸ متر مکعب بر ثانیه) در همین دو ایستگاه است. برای مقایسه مکانی شدت خشکسالی در حوضه، از نمایه میانگین سری جریان‌های حداقل ۱۰ و ۳۰ روزه در واحد سطح استفاده شد. شکل ۴، توزیع مکانی این نمایه را



شکل ۳- توزیع مکانی شاخص دبی حداقل ویژه (متر مکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع) با دوره بازگشت‌های مختلف (qs) در حوضه دریای خزر : (A) دبی حداقل ویژه با دوره بازگشت ۷۵ سال، (B) دبی حداقل ویژه با دوره بازگشت ۹۰ سال، (C) دبی حداقل ویژه با دوره بازگشت ۹۵ سال  
**Fig. 3.** Spatial distribution of specific low flow index ( $m^3s^{-1}$  per  $km^2$ ) with different return periods (qs) in the Caspian Sea Basin: A) the 100 years return period, B) the 90 years return period, C) the 75 years return period

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های سری‌های جریان حداقل سالانه در ایستگاه‌های مورد بررسی (متر مکعب بر ثانیه)

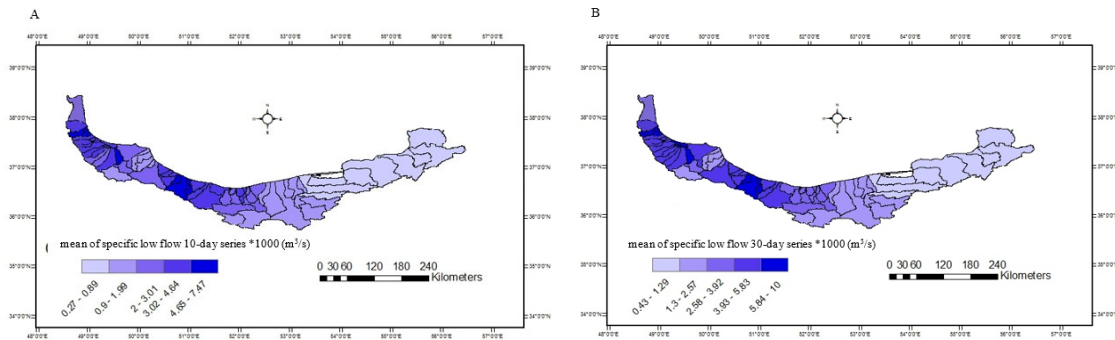
**Table 1.** The values of annual low flow index series in the study stations ( $m^3s^{-1}$ )

Station	12-001	12-005	12-007	12-011	12-013	12-017	12-019
Q <sub>10,100</sub>	0.48	0.70	1.73	5.94	0.99	1.09	1.23
Q <sub>10,50</sub>	0.41	0.57	1.58	2.85	0.89	0.94	0.70
Q <sub>10,25</sub>	0.34	0.44	1.43	1.35	0.78	0.80	0.39
Q <sub>10,10</sub>	0.25	0.29	1.21	0.48	0.63	0.60	0.18
Q <sub>30,100</sub>	0.63	0.92	1.88	7.04	1.11	1.78	3.22
Q <sub>30,50</sub>	0.55	0.78	1.75	4.25	1.03	1.57	1.86
Q <sub>30,25</sub>	0.46	0.65	1.62	2.47	0.95	1.36	1.04
Q <sub>30,10</sub>	0.35	0.47	1.41	1.10	0.82	1.06	0.46

ادامه جدول ۱

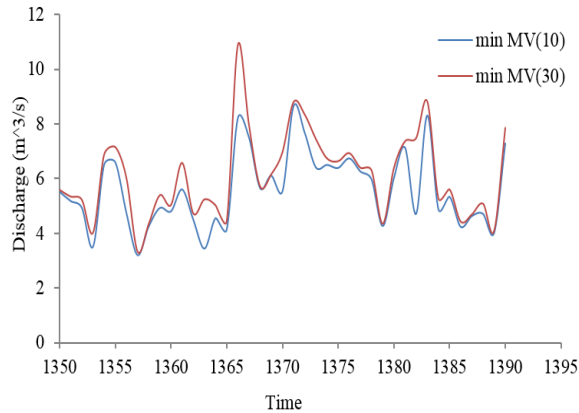
Table 1 Continued

Station	12-021	12-037	12-053	13-005	13-025	14-001	14-005
Q <sub>10,100</sub>	0.31	2.00	0.05	1.25	7.20	4.31	0.95
Q <sub>10,50</sub>	0.22	1.72	0.04	0.84	6.59	4.01	0.82
Q <sub>10,25</sub>	0.15	1.44	0.03	0.55	5.95	3.69	0.70
Q <sub>10,10</sub>	0.08	1.07	0.02	0.29	5.00	3.20	0.53
Q <sub>30,100</sub>	0.40	5.35	0.10	1.16	8.34	5.78	1.36
Q <sub>30,50</sub>	0.33	4.29	0.08	0.91	7.77	5.35	1.20
Q <sub>30,25</sub>	0.26	3.33	0.06	0.69	7.15	4.89	1.05
Q <sub>30,10</sub>	0.18	2.23	0.03	0.44	6.22	4.21	0.83
Station	14-011	14-017	15-007	15-015	15-017	16-003	16-021
Q <sub>10,100</sub>	3.06	3.39	4.17	3.32	26.76	0.63	9.63
Q <sub>10,50</sub>	2.67	2.88	3.65	3.16	25.06	0.61	9.03
Q <sub>10,25</sub>	2.27	2.36	3.11	2.98	23.23	0.59	8.39
Q <sub>10,10</sub>	1.74	1.68	2.37	2.68	20.57	0.55	7.49
Q <sub>30,100</sub>	4.82	5.91	5.47	3.51	28.35	0.91	10.63
Q <sub>30,50</sub>	4.30	5.20	4.34	3.33	26.42	0.84	9.93
Q <sub>30,25</sub>	3.77	4.49	3.36	3.13	24.40	0.76	9.20
Q <sub>30,10</sub>	3.02	3.54	2.25	2.84	21.54	0.65	8.18
Station	16-025	16-041	16-051	16-059	16-061	18-039	17-021
Q <sub>10,100</sub>	3.81	27.48	1.09	0.93	0.87	0.34	7.68
Q <sub>10,50</sub>	3.28	23.05	1.02	0.82	0.68	0.28	6.36
Q <sub>10,25</sub>	2.78	18.78	0.94	0.72	0.51	0.23	5.07
Q <sub>10,10</sub>	2.15	13.45	0.83	0.57	0.31	0.17	3.42
Q <sub>30,100</sub>	4.37	31.85	1.53	1.34	3.78	0.64	10.64
Q <sub>30,50</sub>	3.90	25.30	1.38	1.16	2.58	0.53	8.14
Q <sub>30,25</sub>	3.42	19.84	1.23	0.99	1.70	0.43	6.05
Q <sub>30,10</sub>	2.76	13.98	1.03	0.77	0.90	0.31	3.81
Station	17-029	17-033	17-035	17-039	17-043	17-045	17-053
Q <sub>10,100</sub>	10.27	14.31	3.96	5.31	66.64	1.58	2.49
Q <sub>10,50</sub>	8.35	12.64	3.85	4.81	58.38	1.39	2.23
Q <sub>10,25</sub>	6.51	10.90	3.71	4.31	49.94	1.19	1.97
Q <sub>10,10</sub>	4.22	8.47	3.48	3.63	38.32	0.92	1.63
Q <sub>30,100</sub>	16.02	21.84	5.50	5.88	87.71	1.63	4.14
Q <sub>30,50</sub>	13.13	18.90	5.18	5.40	76.67	1.49	3.72
Q <sub>30,25</sub>	10.34	15.92	4.84	4.90	65.54	1.33	3.29
Q <sub>30,10</sub>	6.82	11.89	4.33	4.20	50.55	1.10	2.72
Station	17-055	17-057	18-019	18-021	18-027	18-029	18-035
Q <sub>10,100</sub>	1.05	48.56	1.43	3.11	2.39	3.50	0.89
Q <sub>10,50</sub>	0.76	40.94	1.20	2.82	2.37	3.33	0.72
Q <sub>10,25</sub>	0.54	33.56	0.99	2.53	2.33	3.14	0.55
Q <sub>10,10</sub>	0.33	24.20	0.73	2.14	2.25	2.84	0.35
Q <sub>30,100</sub>	1.40	72.44	1.78	4.07	3.92	4.17	1.77
Q <sub>30,50</sub>	1.12	61.91	1.50	3.65	3.60	3.93	1.30
Q <sub>30,25</sub>	0.87	51.55	1.24	3.23	3.27	3.68	0.93
Q <sub>30,10</sub>	0.59	38.12	0.93	2.67	2.84	3.29	0.56



شکل ۴- توزیع مکانی میانگین سری جریان حداقل، الف) : سری ۱۰ روزه و ب) سری ۳۰ روزه  
 Fig. 4. Spatial distribution of the mean of low flow series, A) 10 days series, B) 30 days series

دهد، از میانگین‌های متحرک ۱۰ و ۳۰ روزه، استفاده شده است.



شکل ۵- تغییرات زمانی سری‌های زمانی سالانه جریان کم در ایستگاه ۱۶-۰۲۱

Fig. 5. Temporal variability of annual time series of low flow at station 16-021

بررسی نمودارهای ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که طول دوره خشک در ایستگاه‌های مختلف و در سال‌های مختلف، یکسان نیست. لذا، توزیع مکانی متوسط تداوم خشکسالی برای منطقه مورد مطالعه برآورد شد (شکل ۶). میانگین تغییرات این نمایه از ۲۲ تا ۳۲ روز است.

همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشخص است، تداوم خشکسالی در قسمت‌های مرکزی حوضه دریای خزر (زیرحوضه‌های پلور، رزن، کرسنگ، تنگه لایوچ، پل‌ذغال و زوات) بیشتر از بقیه مناطق است که این زیرحوضه‌ها واقع در استان مازندران هستند.

کمترین تداوم خشکسالی (بین ۲۲ تا ۲۵ روز) نیز مربوط به زیرحوضه‌های شلمان، پل سازمان، پاشاکی، آستانه و توتکابن در قسمت شرقی حوضه دریای خزر و در استان گیلان است. قسمت‌های شرقی حوضه نیز طول دوره خشکسالی بین ۲۸ تا ۳۰ روز را تجربه کرده‌اند.

برای محاسبه شاخص حجم کمبود جریان، دبی‌هایی که از حد آستانه  $Q_{90}$  پایین‌تر قرار دارند، مشخص و مقدار دبی از مقدار دبی  $Q_{90}$  کم می‌شود (DQi). سپس، برای هر دوره در هر ایستگاه مقدار این اختلاف، طی هر دوره

به‌منظور بررسی تغییرات زمانی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی، سری‌های زمانی سالانه جریان کم ۱۰ و ۳۰ روزه در هر ایستگاه نسبت به سال وقوع آن‌ها ترسیم شدند تا روند تغییرات وضعیت خشکسالی در سال‌های مختلف مشخص شود. شکل ۵، برای نمونه نمودار تغییرات زمانی سالانه شاخص‌ها را برای ایستگاه پل‌ذغال (۱۶-۰۲۱) نشان می‌دهد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد شدت خشکسالی‌های اتفاق افتاده در هر ایستگاه و زمان وقوع شدیدترین خشکسالی‌ها در ایستگاه‌های مختلف، با یکدیگر متفاوت است.

نتایج نشان می‌دهد در بیشتر ایستگاه‌ها، از سال ۱۳۷۷ خشکسالی شدیدی شروع شده که تا سال ۱۳۹۰ ادامه دارد. هر چند در برخی ایستگاه‌ها، دبی یک تا دو سال طی این دوره به وضعیت نرمال برگشته است، ولی مجدداً خشکسالی شروع و تا سال ۱۳۹۰ ادامه یافته است. خشکسالی هیدرولوژیک دیگری که در بیشتر زیرحوضه‌ها وجود داشته مربوط به سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۵۶ است که البته شدت آن بسیار کمتر از دوره ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰ است.

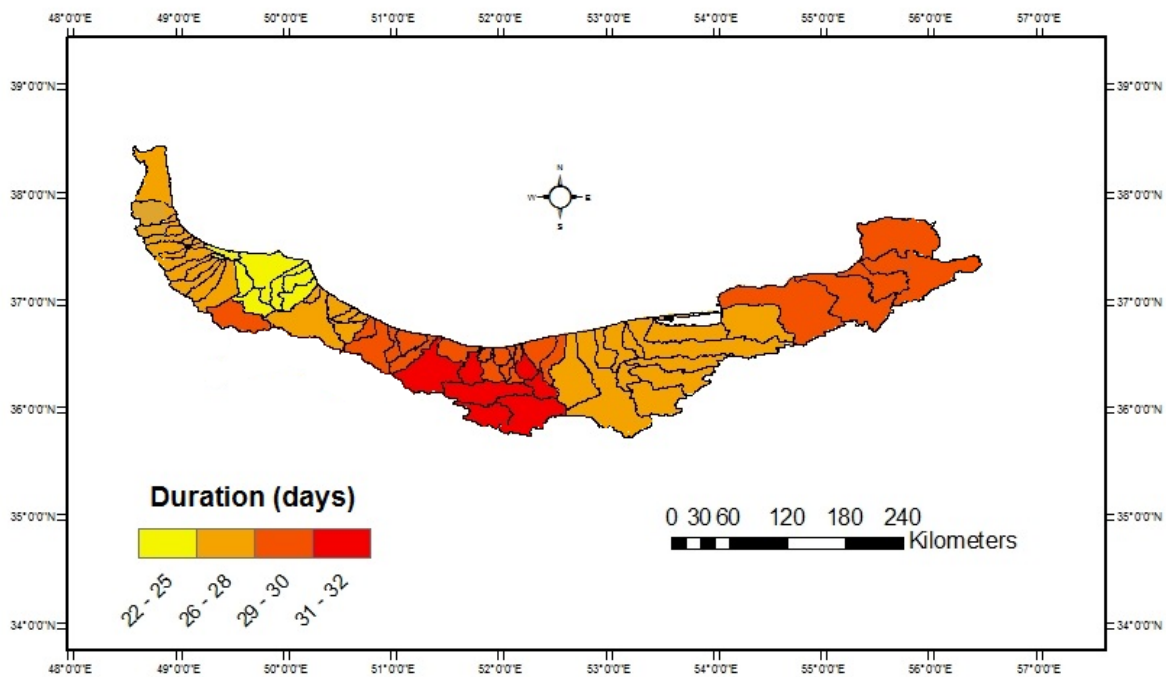
لازم به ذکر است که خشکسالی دوره ۱۳۵۳ تا ۱۳۵۶ در برخی ایستگاه‌ها با تاخیر اتفاق افتاده است. از طرف دیگر، بررسی روند زمانی شاخص‌های جریان کمینه بر روی نمودارها نشان از کاهش مقدار شاخص‌ها طی سال‌های اخیر و روند منفی شاخص‌ها دارد. به عبارت دیگر، نمودارها تقریباً در همه ایستگاه‌ها بیان از خشکسالی‌های هیدرولوژیکی (کاهش شاخص‌های جریان کمینه) طی سال‌های اخیر دارند.

برای تعیین طول دوره‌های جریان کمینه نیز، در ایستگاه‌های مختلف میانگین‌های متحرک ۱۰ و ۳۰ روزه دبی با مقدار شاخص  $Q_{90}$  مقایسه شد تا تعداد روزهایی به‌دست آید که در هر سال، مقدار دبی از مقدار شاخص  $Q_{90}$  کمتر است (Rivera-Ramire et Smakhtin, 2001; al., 2002). از آنجایی که مقایسه دبی در هر روز طی یک سال، معیار درستی از طول دوره خشکسالی به‌دست نمی

کمبود جریان به حجم دبی کمینه (دبی‌های کمتر از  $Q_{90}$ ) استفاده شد که به‌عنوان درصد حجم کمبود معرفی به‌کار رفته است. در شکل ۷، توزیع مکانی درصد حجم کمبود جریان در زیرحوضه‌های دریای خزر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، درصد کمبود جریان در قسمت شرق منطقه بیشتر از قسمت‌های مرکزی و غربی حوضه است. به عبارت دیگر، شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در قسمت‌های غربی بیشتر از مرکز و شرق حوضه دریای خزر است. درصد حجم کمبود جریان بین سه تا ۱۰۰ درصد در طول حوضه متغیر است که مقدار متوسط منطقه‌ای آن برابر ۳۴/۵ درصد است. متوسط منطقه‌ای حجم کمبود جریان نیز برابر ۴۶۳ هزار متر مکعب است.

جمع می‌شود (Vi). بیشترین دوره خشکسالی مربوط به ایستگاه‌های تمر (گرگان) و پاشاکی، با شش دوره خشک و ایستگاه‌های شیرگاه و پل سازمان با پنج دوره خشکسالی با تداوم بیش از دو سال است. ایستگاه گیلوان، تنها منطقه‌ای در حوضه دریای خزر است که فقط یک دوره خشکسالی هیدرولوژیکی بیش از دو سال را تجربه کرده است. هر چند، این خشکسالی دارای شدت زیاد و تداوم طولانی ۱۳ ساله (از سال ۱۳۹۰) است.

به‌دلیل این‌که مقدار و ماهیت دبی جریان در قسمت‌های شرقی و غربی متفاوت است، لذا، مقایسه مقادیر حجم کمبود جریان نمی‌تواند گویای خشک‌تر بودن یا نبودن برخی قسمت‌های منطقه باشد. لذا، برای بررسی توزیع مکانی حجم کمبود جریان از نسبت حجم



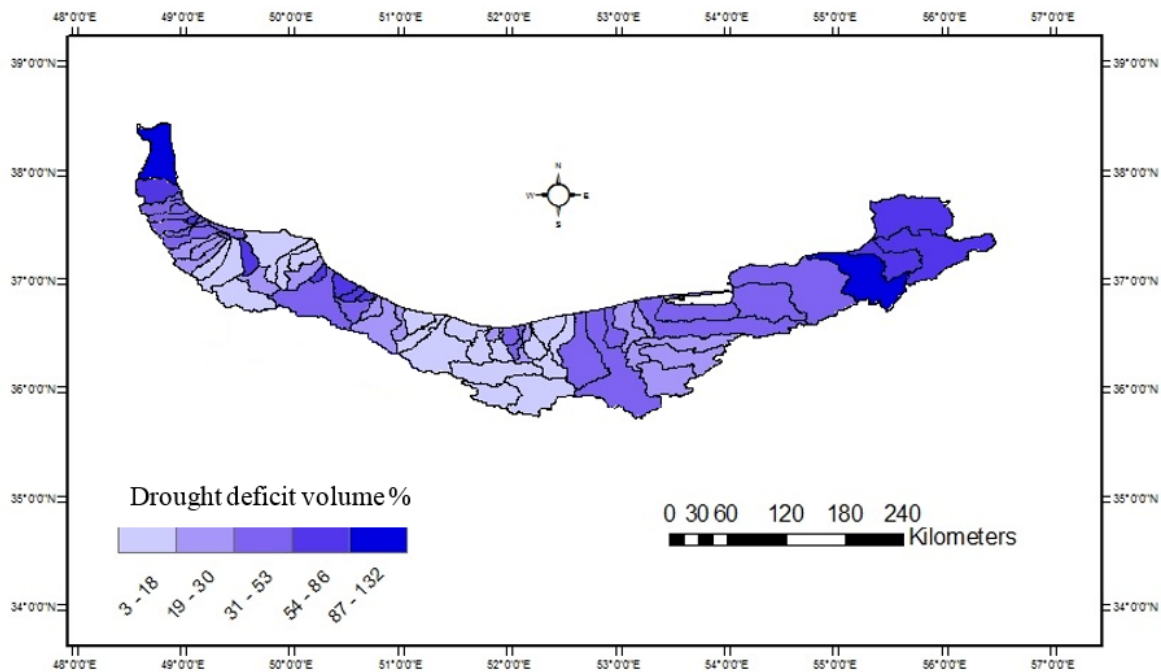
شکل ۶- نقشه تداوم خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه‌ها  
 Fig. 6. Spatial distribution of hydrological drought duration in basins

ایستگاه‌های تمر (گرگان) و پاشاکی، با شش دوره خشک و ایستگاه‌های شیرگاه و پل سازمان با پنج دوره خشکسالی با تداوم بیش از دو سال است. ایستگاه گیلوان، تنها منطقه‌ای در حوضه دریای خزر است که فقط یک دوره خشکسالی هیدرولوژیکی بیش از دو سال را تجربه کرده

برای محاسبه شاخص حجم کمبود جریان، دبی‌هایی که از حد آستانه  $Q_{90}$  پایین‌تر قرار دارند، مشخص و مقدار دبی از مقدار دبی  $Q_{90}$  کم می‌شود (DQi). سپس، برای هر دوره در هر ایستگاه مقدار این اختلاف، طی هر دوره جمع می‌شود (Vi). بیشترین دوره خشکسالی مربوط به

خزر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، درصد کمبود جریان در قسمت شرق منطقه بیشتر از قسمت‌های مرکزی و غربی حوضه است. به عبارت دیگر، شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در قسمت‌های غربی بیشتر از مرکز و شرق حوضه دریای خزر است. درصد حجم کمبود جریان بین سه تا ۱۰۰ درصد در طول حوضه متغیر است که مقدار متوسط منطقه‌ای آن برابر ۳۴/۵ درصد است. متوسط منطقه‌ای حجم کمبود جریان نیز برابر ۴۶۳ هزار متر مکعب است.

است. هر چند، این خشکسالی دارای شدت زیاد و تداوم طولانی ۱۳ ساله (از سال ۱۳۹۰) است. به دلیل این‌که مقدار و ماهیت دبی جریان در قسمت‌های شرقی و غربی متفاوت است، لذا، مقایسه مقادیر حجم کمبود جریان نمی‌تواند گویای خشک‌تر بودن یا نبودن برخی قسمت‌های منطقه باشد. لذا، برای بررسی توزیع مکانی حجم کمبود جریان از نسبت حجم کمبود جریان به حجم دبی کمینه (دبی‌های کمتر از  $Q_{90}$ ) استفاده شد که به‌عنوان درصد حجم کمبود معرفی به‌کار رفته است. در شکل ۷، توزیع مکانی درصد حجم کمبود جریان در زیرحوضه‌های دریای



شکل ۷- نقشه درصد حجم کمبود جریان در حوضه دریای خزر

Fig. 7. Map of the percentage of drought deficit volume in Caspian Sea Basin

جدول ۳، مشخصات پارامترهای مورد استفاده برای تحلیل منطقه‌ای را نشان می‌دهد. برای تعیین مناطق همگن، تحلیل خوشه‌ای مرتبه‌ای وارد بر روی این عوامل اجرا شد. بر این اساس، حوضه به سه گروه همگن تقسیم‌بندی می‌شود. برای سنجش صحت درستی همگن‌بندی، تست همگنی Discriminate نیز انجام شد که در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار بود. نقشه منطقه مورد مطالعه به تفکیک مناطق همگن در شکل ۸، نشان داده شده است. سپس،

به‌منظور انجام تجزیه و تحلیل منطقه‌ای خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص‌های  $Q_{90}$  و دبی‌های کمینه ۱۰ روزه با دوره بازگشت‌های دو، ۵۰ و ۱۰۰ ساله، به‌عنوان متغیرهای وابسته مد نظر قرار گرفتند. از بین عوامل مختلف فیزیوگرافی و اقلیمی، عواملی مانند طول رودخانه اصلی، متوسط ارتفاع حوضه، طول حوضه، شیب حوضه، مساحت حوضه، تراکم زهکشی و میانگین بارش به‌عنوان عامل‌های موثر بر جریان کمینه منطقه به‌کار گرفته شد.

برای هر یک از گروه‌ها و در کل منطقه استخراج شد که مقادیر آن در مقایسه با میانگین مقادیر شاخص‌ها نشان دهنده رضایت‌مندی برآورد مدل‌ها بعد از همگن‌سازی منطقه است. بررسی روابط استخراج شده نشان می‌دهد در منطقه ۱، عوامل کمتری با شاخص‌ها همبستگی دارند و برای بیشتر شاخص‌ها، ارتفاع حوضه، عامل تاثیرگذار بوده است. این در حالی است که در روابط استخراج شده برای منطقه ۲ و ۳، عوامل بیشتری سهیم‌اند. به طوری که عامل مساحت و تراکم زهکشی، بیشترین همبستگی را با شاخص‌ها در منطقه ۲ و ۳ داشته است، هرچند بقیه عوامل نیز موثر هستند.

در هر یک از این گروه‌ها و در کل منطقه با کمک رگرسیون قدم به قدم<sup>۱</sup> (به دلیل استفاده از عواملی که دارای همبستگی بیشتری هستند) روابط منطقه‌ای هر یک از شاخص‌ها استخراج شد (جدول ۴). همان‌طور که در جدول نیز مشخص است، متغیرهای مستقل برای هر یک از مناطق و شاخص‌ها متفاوت است. به طوری که روابط رگرسیونی با کمک متغیرهایی که بیشترین ارتباط را با شاخص‌ها در هر یک از مناطق دارند، توسعه داده شده است.

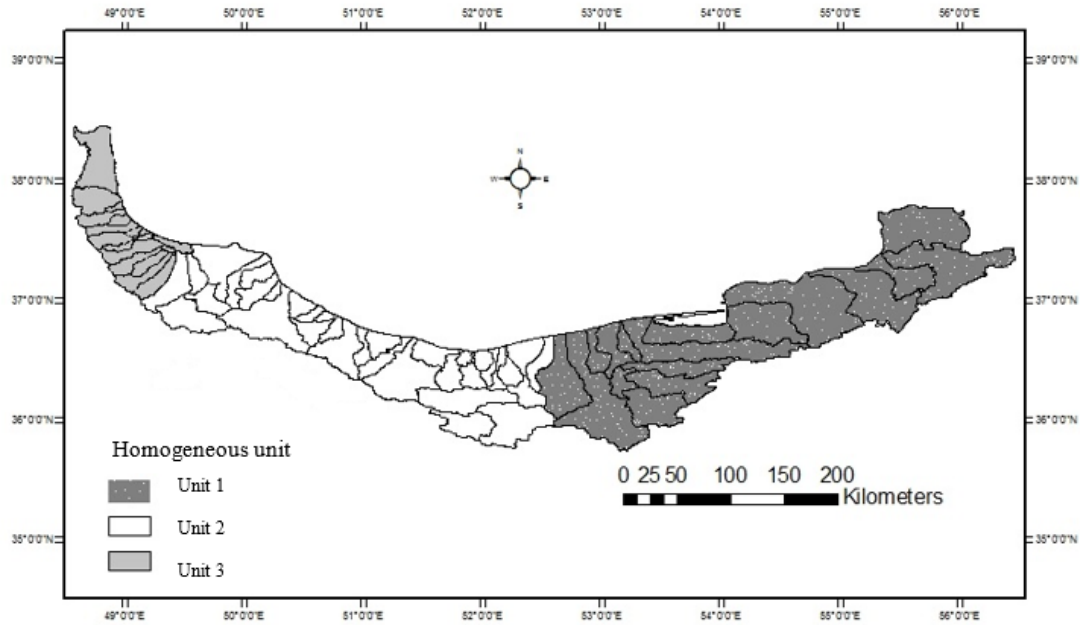
لازم به ذکر است که برای ارزیابی مدل‌ها در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ از ضریب تعیین و خطای استاندارد برآورد کمک گرفته شد. از طرف دیگر، مقدار MAE نیز

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در تحلیل منطقه‌ای جریان حداقل حوضه دریای خزر  
Table 3. Parameters used in the regional analysis of the low flow in Caspian Sea Basin

Basin cod	X (degree)	Y (degree)	Area (Km <sup>2</sup> )	Perimeter (km)	Length of main stream (km)	Mean of elevation (m)	Slope (%)	Drainage density	Length of main stream (km)	Length of stream (km)	Areal mean of rainfall (km)
12-025	57.74	37.21	2703		25	2014	43.35	2.61	2.85	24.75	680
13-019	53.23	36.25	1329	204.5	22	2095	33.12	2.67	3.9	39.75	657
14-005	53.23	36.25	352	122.5	24.75	1831	35.28	2.7	5.46	34.37	979
14-011	53.23	36.25	434	101.8	32.78	1692	30.35	2.93	7.72	35.83	971
14-017	52.67	36.53	1654.35	195.15	797.8	13.81	0.28	4.3	70	49	764.74
15-015	52.18	36.18	119.157	187	68.75	2777	25.62	0.27	3.21	81.35	581.37
15-017	52.18	36.18	3941	346.25	18.5	2989	29.98	2.79	2.91		536
16-003	52.05	36.40	112.26	50.52	21.5	1412	30.57	0.25	12.79	21.5	843.77
16-007	51.90	36.57	34.8	26.99	10.25	426	14.7	0.43	10.73	10.25	922.31
16-011	51.47	36.67	75.67	50.08	19.5	762	12.25	0.29	3.13	19.5	793.77
16-016	50.22	37.17	378.95	94.75	37	684	21.81	0.39	6.75	37	1183.08
16-021	51.34	36.51	1622	209.7	33.03	3030	20.94	2.47	5.49	42.37	625
16-023	51.24	36.47	191		14.55	2410	34.69	2.92	11.3	19.85	620
16-035	51.08	36.72	168.65	63.33	20.25	1042	20.52	0.18	6.17	20.25	1078.89
16-041	50.83	36.75	778	146.76	55.4	2352	39.74	0.18	7.11	55.4	880.50
16-049	50.73	36.83	416.2	16.2	38	2030	32.56	0.34	7.76	38	1035.42
16-051	50.63	36.92	117.42	48.16	18.5	1549	29.98	0.39	14.05	18.5	1112.77
16-059	50.30	36.98	100.9	47.32	25	1233	43.35	0.24	16.97	20.2	956.83
16-063	49.87	37.12	162.4	62.49	22	858.5	33.12	1.14	3.76	48.08	1217.08
16-089	51.00	36.65	206.11	69.17	24.75	1969	35.28	0.24	13.13	24.75	898.40
17-045	49.52	36.88	433.53	102.59	32.78	1296.7	30.35	1.1	4.98	39.75	553.34
17-051	49.67	37.02	244.25	76.5	24.75	97.903	35.07	0.9	7.24	34.37	727
17-055	49.80	37.13	121.13	49.28	17.5	366	20.94	0.93	3.3	35.83	959.36
18-019	49.08	37.48	128	70.2	28.5	1031	34.69	1.22	6.22	32.78	1453.17
18-021	49.08	37.53	346.9	100.7	36.4	847	35.18	1.63	5.9	43.7	2025.63
18-023	49.07	37.62	211.07	93.54	33.03	1242	36.17	1.54	4.31	42.37	1505.66
18-025	49.00	37.68	73.3	309.1	14.55	185.2	28.02	1.46	7.76	19.85	1635.36
18-035	48.88	38.10	86.62	61.39	24.98	1367.5	35.7	1.62	10.39	28.47	977.92
18-039	48.87	38.18	70.03	42.8	28.5	1203	20.94	2.91	12.2	18.5	1015
18-047	48.85	38.33	41.95	41.95	15.46	633	34.69	1.12	6.6	18.38	977.92
18-055	48.88	38.05	67.54	45.38	17.5	455.2	35.18	1.66	10.96	20.2	977.92
18-029	48.84	37.80	585	121.75	28.5	1639	20.52	2.95	6.25		845

<sup>1</sup> Step wise





شکل ۸- نقشه مناطق همگن هیدرولوژیکی  
 Fig. 8. Map of homogenous hydrological areas

جدول ۴- روابط منطقه‌ای شاخص‌های جریان حداقل در منطقه مورد مطالعه

Table 4. Regional relations of low flow indices in the study area

Low flow index	unit	Relation	R <sup>2</sup>	SE	MAE
Q <sub>90</sub>	1	Q= 82.4 - 0.04*ELE	0.99	0.87	4.3
	2	Q= 51.9 - 75.3*Dd + 0.003*L + 0.8*S - 0.1*LB - - 0.02*R	0.99	0.001	5
	3	Q= 22.9 - 0.004*A - 50.6*Dd + 0.01*ELE + 0.15*L - 0.1*LB	0.99	0.49	7.5
Q <sub>10,20</sub>	1	Q= 13.8 + 0.017*R - 0.01*ELE	0.99	0.03	1.8
	2	Q=34.2 - 49.8*Dd + 0.001*L + 0.5*S - 0.07*LB - 0.01*R	0.99	0.001	0.6
	3	Q=19 - 0.002*A - 29.5*Dd + 0.01*L + 0.3*S - 0.05*LB - 0.01*R	0.99	0.45	5.9
Q <sub>10,50</sub>	1	Q= 11.66 + 0.013*R - 0.01*ELE	0.99	0.01	1.3
	2	Q=29.9 - 43.4*Dd + 0.001*L + 0.45*S - 0.06*LB - 0.01*R	0.99	0.001	0.3
	3	Q=12.5 - 0.002*A - 27.2*Dd + 0.005*ELE + 0.01*L - 0.06*LB	0.99	0.34	8.4
Q <sub>10,100</sub>	1	Q= -0.84 + 0.37*R - 42.1*Dd	0.99	0.14	0.1
	2	Q=27.1 - 39.2*Dd + 0.001*L + 0.4*S - 0.05*LB - 0.01*R	0.99	0.001	0.1
	3	Q=11.2 - 0.002*A - 24.4*Dd + 0.004*ELE + 0.005*L - 0.05*LB	0.99	0.3	1.1

R: Rainfall, S: Basin slope, L: Length of main stream, LB: Length of basin, ELE: Mean of elevation, A: Area

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک حوزه آبخیز دریای خزر، از روش تئوری ران (حجم کمبود جریان) و شاخص‌های جریان کم (منحنی تداوم جریان و سری‌های جریان کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه) استفاده شده است. بدین منظور، از آمار روزانه ۴۰ ایستگاه هیدرومتری واقع در حوزه آبخیز خزر در دوره زمانی ۱۳۹۰-۱۳۵۰ استفاده شد.

در این پژوهش ماهیت شاخص‌های Q<sub>75</sub>، Q<sub>90</sub> و Q<sub>95</sub> از منحنی‌های تداوم جریان و چند شاخص دیگر مانند Q<sub>10,50</sub>، Q<sub>10,100</sub>، Q<sub>30,5</sub>، Q<sub>30,50</sub> و Q<sub>30,100</sub> از تحلیل

فراوانی جریان‌های کم ۱۰ و ۳۰ روزه بررسی و تحلیل

منطقه‌ای شدند. نتایج بیانگر موارد زیر است:

- نتایج تحلیل فراوانی سری‌های دبی کمینه ۱۰ و ۳۰ روزه نشان می‌دهد که تابع توزیع لوگ پیرسون سه پارامتری، بهترین برازش را با داده‌ها دارد.

- بررسی شاخص‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰، در بیشتر ایستگاه‌ها، شدیدترین خشکسالی‌ها اتفاق افتاده است.

- نتایج بیانگر آن است که در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰، در بیشتر ایستگاه‌ها طولانی‌ترین دوره‌های خشکسالی رخ داده است.



- نتایج تحلیل خوشه‌بندی منطقه را براساس شاخص‌های جریان کمینه و عوامل اقلیمی و فیزیوگرافی به سه واحد همگن تقسیم می‌کند.

- بررسی رابطه‌های منطقه‌ای نشان داد که در منطقه همگن شرقی عامل تاثیرگذار بر شاخص‌های جریان ارتفاع است، درحالی که در منطقه مرکزی و غربی مساحت و تراکم زهکشی تاثیر بیشتری دارند.

### تشکر و قدردانی

پژوهش انجام شده با حمایت مالی و معنوی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شده است که بدین وسیله از کلیه عزیزانی که ما را در این راه کمک نموده‌اند، تشکر می‌شود.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

- بررسی توزیع مکانی شاخص‌های جریان کمینه، بیانگر خشک‌تر بودن قسمت‌های شرقی حوضه نسبت به مرکزی و غرب حوضه دریای خزر است.

- نتایج بررسی حجم کمبود جریان نشان می‌دهد که مناطق شرقی حوضه نسبت به مرکز و غرب حوضه دریای خزر خشکسالی بیشتری متحمل می‌شوند.

- مقایسه شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد که همه شاخص‌ها نتایج مشابهی در منطقه دارند.

- نتایج نشان داد که با وجود این که مناطق شرقی خشکسالی هیدرولوژیکی شدیدتری نسبت به مرکز حوضه دریای خزر دارند، ولی طول دوره خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در خزر مرکزی بیشتر از سایر نقاط حوضه است.

- بررسی روند زمانی شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیک نشان از افزایش تکرار و طول مدت خشکسالی‌ها در سال‌های اخیر دارند.

### منابع مورد استفاده

- Awass, A.A., 2009. Hydrological drought analysis–occurrence, severity, risks: the case of Wabi Shebele River Basin, Ethiopia. Doctoral Thesis, University Siegen, Germany.
- Baren, M.A., 1985. Hydrological aspects of droughts. UNESCO/WMO, 203 pages.
- Dracup., J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G.Jr., 1980a. On the definition of droughts. *Water Resource. Res.* 16(2), 289-296.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G.Jr., 1980b. On the definition of droughts. *Water Resource. Res.* 16(2), 297-302.
- Durrans, S.R., Tomic, S., 2001. Comparison of parametric tail estimators for low-flow frequency analysis. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37(5), 1203-1214.
- Fleig, A., 2004. Hydrological drought–comparative study using daily discharge series from around the world. *Der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.*
- Jahanbakhsh, S., Sari Sarraf, B., Ghafouri Roozbahani, A., Rahimi Bandarabadi, S., 2016. The spatio-temporal analysis of low flow in Karkkeh Drainage Basin. *Watershed Engine. Manage.* 8(1), 55-67 (in Persian).
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M., 2000. Drought event definition. Technical Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute No. 6.
- Hisdal, H., Clausen, B., Gustard, A., Peters, E., Tallaksen, L.M., 2004. Event definitions and indices. in: Tallaksen, L.M. and H.A.J. Lanen. (eds). *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science*, 48, Amsterdam, Elsevier Science.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M., Demuth, S., 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent?. *Int. J. Climatol.* 21(3), 317-333.
- Kjeldsen, T.R., Lunderof, A., Rosbjerg, D., 2000. Use of a two-component exponential distribution in partial duration modelling of hydrological droughts in Zimbabwean rivers. *Hydrol. Sci. J.* 45(2), 285-298.
- Lahha, G., Bloschl, G., 2007. A national low flow estimation procedure for Austria. *J. Hydrol. Sci.* 52(4), 625-644.
- Nosrati, K., Eslamian, S., Shahbazi, A., 2004. Investigation of effect of climate change on hydrological drought. *J. Agricul.* 6(1), 49-56 (in Persian).

- Pitman, W.V., 1993. Simulation of run-of-river schemes using monthly data. Proceedings of the Sixth South African Hydrology Symposium. Pietermaritzburg, South Africa, 1, 445-452.
- Pyrce, R., 2004. Hydrological low flow indices and their uses. Watershed Science Center, Report No. 4., 33 pages.
- Raziei, T., Saghafian, B., Shokoohi, A.R., 2003. Drought monitoring using SPI index in Yazd Province. VI Inter-Regional Conference on Environment, Water, Albacete, Spain.
- Rifai, H.S., Brock, S.M., Ensor, K.B., Bedient, P.B., 2000. Determination of low flow characteristics for Texas streams. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 126(5), 310-319.
- Rivera, J.A., Otta, S., Lauro, C., Zazulie, N., 2021. A decade of hydrological drought in central-western Argentina. *Front. Water* 3: 1-20.
- Rivera-Ramirez, H.D., Warner, G.S., Scatena, F.N., 2002. Prediction of master recession curves and baseflow recessions in the Luquillo mountains of Puerto Rico. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 38, 693-704.
- Saghafian, B., Shokoohi, A., Raziei, T., 2003. Drought spatial analysis and development of severity-duration-frequency curves for an arid region. International symposium of Hydrology of Mediterranean and Semi-Arid Regions, Montpellier, France.
- Samiee, M., Mahdavi, M., Saghafian, B., 2006. Regional analysis of hydrological drought in Tehran watersheds. *Iranian J. Nat. Resour.* 59(1), 27-40 (in Persian).
- Santos, M.J., Verissimo, R., Fernandes, S., Orlando, M., Rodrigues, R., 2001. Evaluation of regional drought in Europe. International Seminar on Hydrology of Mediterranean Regions. Technical Documents in Hydrology, UNESCO.
- Sarhadi, A., Soltani, S., Modarres, R., 2007. Regional low flow frequency distribution in Jiroft area by L-moments. *Iran. Water Res. J.* 2(3), 45-54 (in Persian).
- Sen, Z., 1980a. Statistical analysis of hydrologic critical droughts. *J. Hydrol. Eng.* 106(1), 99-115.
- Sen, Z., 1980b. Critical drought analysis of periodic-stochastic processes. *J. Hydrol.* 46, 251-263.
- Sharma, T.C., 2000. Drought parameters in relation to truncation levels. *Hydrol. Process.* 14, 1279-1788.
- Smakhtin, V.U., Watkins, D.A., Hughes, D.A., 1995. Preliminary analysis of low-flow characteristics of South African rivers. *Water SA* 21, 201-210.
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.* 240, 147-186.
- Smakhtin, V.Y., 1998. Generation of natural flow sequences in regulated rivers. *Regul. Rivers Res. Manag.* 15, 311-323.
- Smakhtin, V.Y., Toulouse, M., 1998. Relationships between low flow characteristics of South African streams. *Water SA* 24(2), 107-112.
- Stahl, K., Demuth, S., 2003. Regional patterns of streamflow drought in Europe. Institute of Hydrology. University of Freiburg, Final Report.
- Stockburger, D.W., 1998. Multivariate statistics: concepts, models and applications. Southwest Missouri State University.
- Tallaksen, L.M., Madsen, H., Clausen, B., 1997. On the definition and modelling of streamflow, drought duration and deficit volume. *Hydrol. Sci. J.* 42(1), 15-33.
- Thompson, S., 1999. Hydrology for water management. Prentice Hall Inc.
- Tharme, R.E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Res. Appl.* 19(5-6), 397-441.
- Wu, J., Miao, C., Zheng, H., Duan, Q., Lei, X., Li, H., 2018. Meteorological and hydrological drought on the loess plateau, China: evolutionary characteristics, impact, and propagation. *JGR: Atmospheres* 123(20), 11569-11584.
- Yevjevich, V.M., 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought. Colorado State University Hydrology Paper No. 23, Fort Collins, Colorado, USA.
- Yevjevich, V., 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Yilmaz, K.K., Gupta, H.V., Wagener, T., 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resour. Res.* 44, W09417.
- Zelenhasic, E., Salvai, A., 1987. A method of stream-flow drought analysis. *Water Resour. Res.* 23(1), 156-168.