

## Comparative study of drought meteorological (SPI) and hydrological (SSI) indices based on the best cumulative distribution function for Urmia Basin

Mohammad Hossein Jahangir<sup>1\*</sup>, Fatemeh Asghari Kaleshani<sup>2</sup>, Katayoon Sataryan asil<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Renewable Energies and Environment Department, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Student, Renewable Energies and Environment Department, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

#### Introduction

Atmospheric conditions such as climate change, ocean temperatures, changes in the jet stream, and changes in the local landscape are all factors that contribute to drought. Drought not only threatens agriculture but also causes a series of ecological, social, and economic damages. Therefore, it is necessary to have valid and appropriate indicators that can evaluate and measure drought efficiently. Drought monitoring by meteorological and hydrological indicators has always been of interest to researchers. Decreasing or increasing precipitation has a direct effect on river flow rate and groundwater level.

#### Materials and Methods

Drought monitoring was performed for 10 meteorological stations and 10 hydrometric stations in the western basin area of Urmia with different distribution functions to identify the best distribution function for fitting data based on standardized precipitation index (SPI) as meteorological drought index and standardized streamflow index (SSI) as hydrological drought index. SPI and SSI values were measured with four cumulative functions, i.e., Gamma, Weibull, logarithmic normal, and Gaussian normal functions. Some performance criteria such as MAE were used to evaluate the efficiency of the functions. This research has been conducted on an annual scale for 31 years from 1989 to 2019. Drought continuity zoning was done through the Inverse distance weighting (IDW) method based on drought continuity.

#### Results and Discussion

The results of the SSI showed that the cumulative gamma function had the best performance for fitting data for nine stations. Only at the Merakand station, the Weibull cumulative distribution function provide a better fit for the data. Babarood station with 99% correlation and MSE of 0.017 had the best fit among other stations. In order to understand the drought conditions of the region, according to the selected indicators and based on positive values for wet conditions and negative values for drought conditions, the stations have been studied. Finally, a zoning map of drought continuity is presented.

#### Conclusion

The SSI and SPI indicators are directly related to each other. The SPI is better for predicting the onset of drought and the SSI is better for measuring the severity and persistence of drought. During the last three decades (1998-2000), Urmia basin has witnessed the highest severity of hydrological drought. Based on the zoning map of the northwest region, especially the upper Chihriq station, it has always enjoyed more favorable conditions and has experienced a milder drought than other regions. However, the extent of severe drought changed from the western part in 1998 to the eastern part in 2000. the severity of drought in 1998 was less than in 2000. In 2000, the drought intensity reached the highest value just in the Merakand station.

**Keywords:** Gamma distribution, Drought monitoring, Standardized rainfall index, Standardized flow rate index, Urmia lake

**Article Type:** Research Article

\*Corresponding Author, E-mail: mh.jahangir@ut.ac.ir

**Citation:** Jahangir, M.H., Asghari Kolshani, F., Sataryan asil, K. (2022). Comparative study of drought meteorological (SPI) and hydrological (SSI) indices based on the best cumulative distribution function for Urmia Basin. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 53-63.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10810.1089

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.4.5

Received: 15 May 2022, Received in revised form: 21 June 2022, Accepted: 22 June 2022, Published Online: 27 June 2022  
*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2022, Vol. 2, No. 4, pp. 53-63

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیک (SSI) بر اساس بهترین تابع توزیع تجمعی برای حوضه آبریز ارومیه

محمدحسین جهانگیر<sup>۱\*</sup>، فاطمه اصغری کلشانی<sup>۲</sup>، کتایون ستاریان اصیل<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

خشکسالی نه تنها کشاورزی را مورد تهدید قرار می‌دهد، بلکه باعث ایجاد زنجیره‌ای از آسیب‌های بوم‌شناختی، اجتماعی و اقتصادی است. از این‌رو، وجود شاخص‌های معتبر و مناسب که بتواند خشکسالی را به‌طور کارآمد ارزیابی و سنجش کند، ضروری است. پایش خشکسالی توسط شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژی همواره مورد توجه محققان و دانشمندان بوده است. کاهش یا افزایش بارش تأثیر مستقیم بر دبی جریان رودخانه و تراز آب زیرزمینی دارد. کاهش بارش منجر به خشکسالی هیدرولوژیک می‌شود. بر همین اساس، در این پژوهش به پایش خشکسالی برای ۱۰ ایستگاه هواشناسی و ۱۰ ایستگاه هیدرومتری در غرب حوضه آبریز ارومیه با توابع توزیع مختلف برای شناسایی بهترین تابع توزیع برای برازش داده‌ها پرداخته شد. برای دستیابی به هدف مورد نظر، برای بازه زمانی ۳۱ ساله از تاریخ ۱۳۶۸-۱۳۹۸ در مقیاس سالانه در نرم‌افزار متلب مقادیر دو شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و جریان دبی استاندارد (SSI) تعیین شدند و سپس مقایسه‌ای برای تعیین بهترین برازش تابع توزیع انجام شد. نتایج بررسی SSI نشان داد که تابع تجمعی گاما بهترین عملکرد را برای برازش داده‌ها برای نه ایستگاه داشته است. فقط در ایستگاه مراکند تابع توزیع تجمعی ویبول برازش بهتری را برای داده‌ها ارائه کرد. ایستگاه بابرود با همبستگی ۹۹ درصد و میانگین مربعات خطا MSE برابر ۰/۰۱۷ بهترین برازش را در میان ایستگاه‌های دیگر داشته است. در این پژوهش عملکرد تطبیقی دو شاخص SPI و SSI نشان داد که این دو شاخص با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. همچنین مشخص شد که شاخص SPI برای پیش‌بینی شروع خشکسالی و شاخص SSI برای سنجش شدت و تداوم خشکسالی بهتر هستند. بر اساس دو شاخص SPI و SSI منطقه مورد مطالعه پس از سال ۱۳۶۸ در یک روند خشکسالی شدید با طول دوره طولانی را تا سال ۱۳۸۰ تجربه کرده است. این موضوع در حالی است که در سال‌های بین ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ شرایط با نوسان بین دوره ترسالی و خشکسالی حالت طبیعی‌تری را گذرانده است. از سال ۱۳۹۵ دوره‌های ترسالی با شدت کم‌تر و طول دوره کوتاه‌تر و برعکس دوره‌های خشکسالی با شدت و طول دوره بیش‌تری را تجربه کرده است.

**واژه‌های کلیدی:** پایش خشکسالی، تابع تجمعی گاما، دریاچه ارومیه، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص جریان دبی استاندارد (SSI)

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mh.jahangir@ut.ac.ir

**استناد:** جهانگیر، م.ح.، اصغری کلشانی، ف. و ستاریان اصیل، ک. (۱۴۰۱). مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیک (SSI) بر اساس بهترین تابع توزیع تجمعی برای حوضه آبریز ارومیه. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۴)، ۵۳-۶۳.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10810.1089

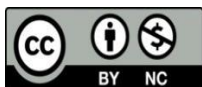
DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.4.5

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

*مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۱، دوره ۲، شماره ۴، صفحه ۵۳ تا ۶۳

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که در اثر کمبود بارش، منابع تأمین آب (آب‌های سطحی و زیرزمینی) کاهش می‌یابد. این پدیده می‌تواند ماه‌ها و یا سال‌ها ادامه داشته باشد و خسارات قابل توجهی بر بوم‌سازگان، کشاورزی و اقتصاد منطقه وارد کند (Sobral et al., 2019). خشکسالی یک ویژگی تکرارشونده آب و هوایی است. بنابراین با پیش‌بینی آن می‌توان راهکارهای مدیریتی برای عبور از این وضعیت با تحمل آسیب کم‌تر داشت. با توجه به تغییرات آب و هوایی کره زمین در چند دهه گذشته دوره‌های خشکسالی شدیدتر از قبل شده‌اند که این موضوع اهمیت پرداختن به پیش‌بینی این رویداد را دوچندان می‌کند. ضرورت این مسأله باعث افزایش مطالعات در این زمینه شده است (Mielby & Henriksen, 2020). فلات ایران در ۲۵-۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴-۶۵ درجه طول شرقی قرار دارد. ایران در این مختصات جغرافیایی با حضور در کمربند کوهستانی آلپ-همیالیا و کمربند خشک جهان، دوره‌های خشکسالی بسیاری را تجربه کرده است (Soleimani Sardou & Bahremand, 2014). خشکسالی دارای تعاریف متعددی است و به انواع هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی طبقه‌بندی می‌شود. اولین اثرات در خشکسالی هواشناسی قابل مشاهده و بررسی است؛ در واقع زمانی است که میزان بارش از حد مشخصی کم‌تر شود. تاکنون برای پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی شاخص‌های متعددی درصد شاخص بارش ناهنجار (PNPI<sup>۱</sup>)، شاخص بارش استاندارد (SPI<sup>۲</sup>)، شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI<sup>۳</sup>)، شاخص بارندگی سالانه استاندارد (SIAP<sup>۴</sup>) بر اساس بارش طراحی شده است. از این میان شاخص SPI توسط مک کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ معرفی شد که یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش خشکسالی هواشناسی است (Jahangir and Mousavi, 2020). این شاخص SPI به دلیل قابلیت استفاده در مقیاس‌های زمانی مختلف اعم از روزانه، ماهانه، سالانه و مقیاس‌های مختلف مکانی خرد و کلان و نیز دسترسی نسبتاً آسان به داده (بارش)، در دهه‌های گذشته زیاد مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج مناسبی را برای بررسی ابعاد مختلف پایش خشکسالی ارائه کرده است (Salimi et al., 2021).

زمانی که خشکسالی هواشناسی تداوم یابد باعث ظهور خشکسالی هیدرولوژیک می‌شود. بررسی خشکسالی هیدرولوژیک برای برنامه‌ریزی و مدیریت تولید آب، کشت و سدهای ذخیره‌ای،

پیش‌بینی سیل، تعیین روابط بارش-رواناب و مدیریت آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت است. برخی از شاخص‌های هیدرولوژیک مانند SDI<sup>۵</sup> (شاخص کمبود جریان سطحی)، SSI<sup>۶</sup> (شاخص جریان سطحی استاندارد شده) بر اساس میزان دبی جریان رودخانه است (Mortezai Frizhandiand Mirakbari, 2018). برای یافتن رابطه‌ای منطقی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک پژوهش‌های متعددی روی این دو شاخص انجام گرفته است. برای نمونه، در دشت بم مقایسه سه شاخص SPI، RDI<sup>۷</sup> و SDI<sup>۸</sup> نشان داد که دبی جریان و بارش هر دو روند کاهشی داشته، اما دما روند افزایشی داشته است. این پژوهش نشان داد که در آن منطقه دبی جریان مستقیماً از بارش تأثیرپذیر است (Eghtedar Nezhad et al., 2016). بررسی شرایط خشکسالی در کالیفرنیا و کارولینای شمالی بر اساس شاخص‌های SPI، SSI، و SDI نشان داد که شاخص چندمتغیره استاندارد MSDI شروع و پایان خشکسالی را بر اساس ترکیب SPI و SSI نشان می‌دهد، در حالی که شروع آن تحت سلطه SPI و ماندگاری خشکسالی بیش‌تر شبیه رفتار SSI است. به‌طور کلی، MSDI پیشنهادی یک مدل منطقی برای ترکیب احتمالی چند شاخص است. آن‌چه در این مطالعه مشخص شد این است که اگر چه خشکسالی هیدرولوژی از خشکسالی هواشناسی تأثیرپذیر است، اما با اختلاف زمانی نسبت به خشکسالی هواشناسی بروز پیدا می‌کند و تداوم بیش‌تری دارد (Hao & AghaKouchak, 2013). در مطالعه دیگر رابطه بین شاخص‌های SPI، SSI و MSDI در کالیفرنیا و شمال کارولینا در آمریکا مشخص کردند که نتایج حاصل از شاخص MSDI با رفتار شاخص SSI رابطه نزدیکی دارد (AghaKouchak, 2015).

مطالعه شاخص SSI و SDI در حوضه آبریز کرخه نشان داد که همبستگی این دو شاخص در سطح ۹۹ درصد معنادار است و این همبستگی در بازه ۴۸ ماهه به حداکثر می‌رسد (MesbahZadeh et al., 2018). شاخص خشکسالی هیدرولوژیک SSI نه تنها با شاخص خشکسالی SPI در ارتباط است، بلکه مطالعات نشان می‌دهد که با سایر شاخص‌های خشکسالی نیز ارتباط نزدیک دارد. مطالعه شاخص‌های SPEI<sup>۹</sup> و SSI در حوضه ناورود استان گیلان نشان از همبستگی این دو شاخص در سطح ۹۹ درصد دارد. مقایسه شاخص‌های SPI،

<sup>۵</sup> Streamflow deficient index

<sup>۶</sup> Standard streamflow index

<sup>۷</sup> Reconnaissance drought index

<sup>۸</sup> Multivariate standardized drought index

<sup>۹</sup> Standardized precipitation-evapotranspiration index

<sup>۱</sup> Percent of annually precipitation index

<sup>۲</sup> Standardize precipitation index

<sup>۳</sup> Rainfall anomaly index

<sup>۴</sup> Standard index of annual precipitation

همبستگی را دارد که حاکی از تأثیرگذاری خشکسالی هواشناسی پس از گذشت دو سال و بیش‌تر بر منابع آب زیرزمینی است. فراوانی گروه‌های مختلف شاخص GRI در دوره آماری ۳۵ ساله نشان داد که خشکسالی نرمال دارای بیش‌ترین درصد فراوانی است. شاخص SDI از حداکثر تداوم بالاتری در مقیاس‌های زمانی پایین نسبت به شاخص‌های خشکسالی هواشناسی برخوردار است (Mortezaii Frizhandi & Mirakbari, 2018). با توجه به مطالب فوق، از آن‌جا که این دو شاخص عملکرد قابل قبولی را در نواحی دیگر از خود نشان داده‌اند، در این پژوهش رفتار این دو شاخص در غرب حوضه آبریز ارومیه طی دوره زمانی ۳۱ سال مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی این دو شاخص می‌توان روند خشکسالی را مشاهده کرده و مورد تحلیل و ارزیابی قرار داد. همچنین بهترین تابع توزیع برای هر ایستگاه هیدرومتری مورد سنجش و بررسی قرار گرفته است تا بهترین تابع توزیع برای پایش خشکسالی از طریق این دو شاخص برای هر ایستگاه مشخص شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران، بزرگ‌ترین دریاچه آب شور خاورمیانه و ششمین دریاچه بزرگ آب شور جهان است. آب این دریاچه بیش‌تر از رودهای زربینه‌رود، سیمینه‌رود، تلخه‌رود، گادر، باراندوز، زولا و نالو تغذیه می‌شود. مساحت این حوضه آبریز ۵۱۷۸۶ کیلومتر مربع بوده و در مختصات جغرافیایی بین مدار ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. به دلیل ویژگی‌ها و تنوع زیستی منحصر به فرد، این منطقه جزء نه ذخیره‌گاه زیست‌کره در ایران به ثبت رسیده است. سازمان محیط زیست ایران اغلب نقاط این دریاچه را پارک ملی شناسایی کرده است (شکل ۱).

با خشک شدن دریاچه ارومیه کویر نمکی به وسعت ۴۴۰۰ کیلومتر مربع تشکیل می‌شود. باد نمک‌های موجود را از شورزارها به سمت مزارع منتقل خواهد کرد و باعث آسیب دیدن باغات و مزارع کشاورزی به‌ویژه در دشت‌های حاصل‌خیز آذربایجان شرقی و غربی که مهم‌ترین منبع درآمد ساکنان روستایی این ناحیه است، می‌شود. همچنین بر سلامت ساکنان منطقه اثرات منفی خواهد داشت (Barani Pesyan et al., 2017). برای هر مطالعه اقلیمی وجود داده‌های آماری مشخص و صحیح از ملزومات اولیه کار است. برای این پژوهش از اطلاعات ۱۰ ایستگاه هیدرومتری در بازه زمانی ۳۱ ساله (۱۳۶۸-۱۳۹۸) استفاده شد. اطلاعات مورد استفاده از سامانه آمار و اطلاعات وزارت نیرو و سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی

SPEI و SSI در حوضه‌های آبریز ليقوان، ناورود و سقز همبستگی بالای شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک دیده شد (Salimi et al., 2021). از دیگر شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیک می‌توان به SDI اشاره کرد. مطالعه شاخص‌های SRI<sup>۱</sup> و SDI در حوضه آبریز رودخانه گاتاپراپها<sup>۲</sup> در هندوستان نشان داد که همبستگی خوبی بین این دو شاخص هواشناسی و هیدرولوژیک در بازه زمانی نه ماهه وجود دارد و در بازه ۱۲ ماهه این همبستگی افزایش می‌یابد. در این پژوهش مشخص شد که سایر شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیک با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در ارتباط هستند (Pathak and Dodamani, 2016). در مطالعه‌ای دیگر ارتباط بین جریان سطحی و شاخص SSI در حوضه آبریز Ebro در اسپانیا مورد سنجش قرار گرفت. این بررسی ارتباط قوی را برای بازه‌های زمانی زیر یک سال نشان داد، اما برای بازه‌های بیش‌تر شواهدی یافت نشد (Telesca et al., 2012). مطالعه شاخص‌های SSI، SPI و SRI برای حوضه آبریز رودخانه زرد چین همبستگی مثبت و قوی بین آن‌ها نشان داد (Li et al., 2020). شاخص‌های DI، PNI و SPI در پنج ایستگاه کهورستان برای یک دوره ۲۵ ساله مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش‌ها نشان داد شاخص‌های PNI و DI برای تشخیص خشکسالی شدید دقت بیش‌تری نسبت به شاخص SPI دارند، اما شاخص SPI زمان شروع خشکسالی را با دقت بیش‌تری برآورد می‌کند؛ همان‌طور که در مطالعه‌های قبل‌تر نیز بیان شد شاخص SPI برای زمان شروع خشکسالی شاخص مناسبی است (Nohegar and Mahmoodabadi, 2012). شاخص‌های DI<sup>۳</sup>، SPI و EDI<sup>۴</sup> برای پایش خشکسالی تهران برای سال‌های آبی ۱۹۹۷-۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص DI نوسانات شدیدی نسبت به بارندگی داشت و در مقابل، SPI نوسانات کم‌تری داشت. شاخص EDI، به‌عنوان یک شاخص نسبتاً جدید خشکسالی، قادر به تعیین مطلوبی از اعلام وضعیت خشکسالی و تغییرات مکانی آن بود و کارآمدترین شاخص برای پایش خشکسالی در این استان تشخیص داده شد (Moghadas et al., 2004). شاخص‌های SPEI، SDI و شاخص منبع آب زیرزمینی GRI برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ در حوضه آبریز رودخانه اعظم هرات استان یزد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که شاخص SPEI در مقیاس ۲۴ و ۴۸ ماهه با ۳ ماه تأخیر با شاخص GRI بیش‌ترین

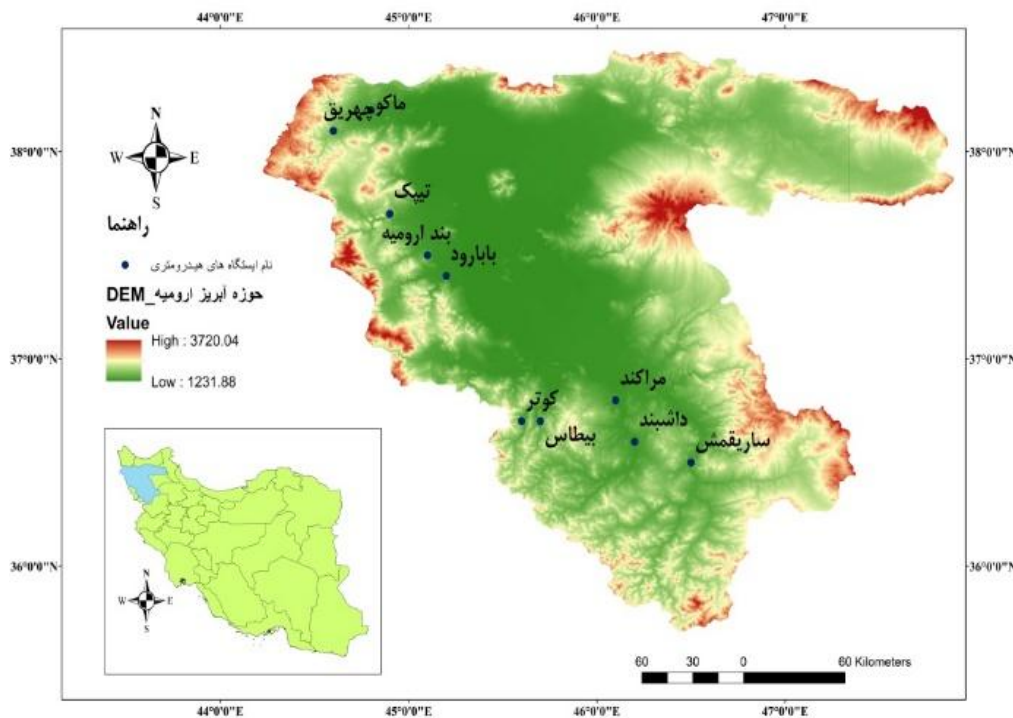
1 Standardized Rainfall Index

2 Ghatapraha river

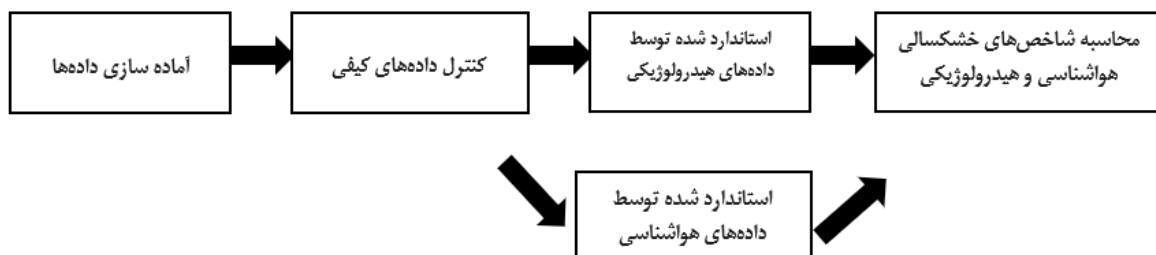
3 Deciles index

4 Effective drought index

استخراج شد. موقعیت قرارگیری این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز ارومیه و ایستگاه‌های پایش آن در استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان، ایران  
Figure 1- Location of Urmia Basin and its monitoring stations in West Azerbaijan, East Azerbaijan, and Kurdistan provinces, Iran



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش حاضر  
Figure 2- Flowchart of the current research

$$\begin{aligned}
 SPI &= - \left[ t - \frac{C_0 + C_1t + C_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3} \right] & (1) \\
 t &= \sqrt{\ln\left(\frac{1}{Hx^2}\right)} & 0 < Hx \leq 0.5 \\
 SPI &= + \left[ t - \frac{C_0 + C_1t + C_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3} \right] \\
 t &= \sqrt{\ln\left(\frac{1}{1-Hx^2}\right)} & 0.5 < Hx \leq 1
 \end{aligned}$$

در رابطه ۱ مقادیر ثابت عبارتند از:  $C_0 = 53537/2$ ,  $C_1 = 802853/0$ ,  $C_2 = 30328/0$ ,  $d_1 = 432788/3$ ,  $d_2 = 18929/0$  و  $d_3 = 003308/0$  مقدار تابع تجمعی کل  $Hx$  از رابطه ۸ به دست می‌آید (McKee et al., 1993). طبقه‌بندی

۲-۲- محاسبه شاخص‌های خشکسالی و توابع توزیع  
شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) بر اساس محاسبه احتمالات بارندگی برای بازه‌های زمانی مختلف برای پایش خشکسالی از طرف مک کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ مطرح شد (McKee et al., 1993). از نظر McKee et al. (1993) تابع چگالی گاما مناسب‌ترین برازش را برای این شاخص ارائه می‌دهد. بر همین اساس، برای محاسبه SPI ابتدا داده‌ها در تابع چگالی گاما برازش داده می‌شوند. شاخص SPI از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (McKee et al., 1993).

معرفی توابع توزیع تجمعی: تابع چگالی گاما<sup>۱</sup>، از رابطه ۳ به دست می‌آید (Abramowitz and Irene, 1970):

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad x > 0 \quad (3)$$

مقدار متغیر  $X$  در این پژوهش داده‌های بارش،  $\gamma$  پارامتر تابع گاما،  $1.46 \geq \alpha$  پارامتر شکل و  $\beta$  پارامتر مقیاس است به ترتیب از طریق رابطه‌های ۴ تا ۶ محاسبه می‌شوند.

$$f(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[ 1 + \sqrt{\frac{4A}{3}} \right] \quad (5)$$

$$A = \ln(x) - \frac{x \ln(x)}{n} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{x}{\alpha}$$

$n$ ، تعداد مشاهدات بارش است.

احتمال تجمعی گاما از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$F_x = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (7)$$

تابع تجمعی گاما برای داده‌های مساوی با صفر صدق نمی‌کند. برای همین موضوع میزان  $F_x$  تجمعی از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$H_x = q + (1 - q)F_x \quad (8)$$

در این رابطه،  $H_x$  تابع تجمعی کل و  $q$  احتمال مقادیر صفر می‌باشد. اگر  $m$  تعداد مقادیر بارندگی باشد که در سری زمانی احتمال آن صفر است، آن‌گاه مقدار  $q$  برابر با رابطه ۹ خواهد بود.

$$q = \frac{m}{n} \quad (9)$$

توابع (۱۰) تا (۱۲) توابع توزیع به کار رفته در این پژوهش شامل تابع نرمال گوسی<sup>۲</sup>، ویبول<sup>۳</sup>، تابع لوگ نرمال<sup>۴</sup> را نشان می‌دهد.

$$f(x) = \frac{1}{x\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\delta^2}\left(\frac{\ln x - \ln \alpha}{\delta}\right)^2} \quad (10)$$

$$\ln \alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln X_i \quad (11)$$

$$f(x) = n(x - b)^{n-1} (m - b)^n \exp \left\{ - \left[ \frac{(x-b)}{(m-b)} \right]^n \right\} \quad (12)$$

### ۲-۳- تعیین شدت خشکسالی

مقادیری از  $SPI$  که زیر صفر و پیوسته باشد، رویداد خشکسالی محسوب می‌شود. بر اساس تعریف مک‌کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ برای تعیین شدت خشکسالی از  $SPI$  (رابطه ۱۳) استفاده

ترسالی و خشکسالی بر اساس شاخص  $SPI$  در جدول ۱ ذکر شده است (McKee et al., 1993).

جدول ۱- طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس  $SPI$   
Table 1- Drought classification based on  $SPI$

SPI	طبقه
$\geq 2$	به شدت مرطوب
1.99_1.5	بسیار مرطوب
1.49_1	مرطوب
-0.99_0.99	نرمال
-1.49_-1	خشک
-1.99_-1.5	خیلی خشک
$\leq -2$	شدیداً خشک

شاخص خشکسالی جریان سطحی استاندارد ( $SSI$ ) بر اساس محاسبه تابع توزیع تجمعی بر اساس آمار دبی سالیانه رودخانه خشکسالی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این پژوهش برای محاسبه  $SSI$  از توابع توزیع مختلف برای برازش داده استفاده شده تا در نهایت بهترین تابع توزیع برای هر ایستگاه مشخص شود. شاخص  $SSI$  از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (McKee et al., 1993).

$$SSI = \left[ W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \right] \quad (2)$$

$$\text{اگر } p \leq 0.5; \quad p = 1 - F_x$$

$$\text{اگر } p > 0.5; \quad p = F_x$$

$$W = \sqrt{-2 \ln(p)}$$

مقادیر ثابت در رابطه بالا عبارتند از:  $C_0 = 515517/2$ ،  $C_1 = 802853/0$ ،  $C_2 = 10328/0$ ،  $d_1 = 432788/1$ ،  $d_2 = 001308/0$  و  $d_3 = 189269/0$  علامت نهایی  $SSI$  برعکس می‌شود. مقادیر نهایی محاسبه شده با  $SSI$  نرمال بوده به طوری که میانگین آن برابر با صفر و انحراف معیار آن برابر با یک است. طبقه‌بندی خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص  $SSI$  در جدول ۲ ارائه می‌شود (McKee et al., 1993).

جدول ۲- طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس  $SSI$  (McKee et al., 1993)  
Table 2- Drought classification based on  $SSI$  (McKee et al., 1993)

شرایط	SSI
خیلی مرطوب	$\geq 1.46$
مرطوب	1.46_0.52
نرمال	0.52_-0.52
خشک	-1.46_-0.52
خیلی خشک	-1.46 >

<sup>1</sup> Gamma distribution

<sup>2</sup> Normal Distribution

<sup>3</sup> Log-Normal Distribution

<sup>4</sup> Weibull type III



با این تفاوت که شاخص SSI تلاوم خشکسالی طولانی‌تری را نسبت به شاخص SPI نشان می‌دهد. این نتایج در پژوهش‌های Hao and Nohegar and Mahmoodabadi (2012) و AghaKouchak (2013) نیز مشاهده شد.

بر اساس محاسبات، بهترین تابع برای تمام ایستگاه‌ها تابع گاما به دست آمد. مقادیر حاصل از محاسبه SSI در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. غیر از ایستگاه چهریق که بین سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۷۷ ترسالی را نشان می‌دهد، سایر ایستگاه‌ها روند نسبتاً یکسانی را در رویدادهای خشکسالی تجربه کرده‌اند. بر اساس طبقه‌بندی این شاخص حوضه آبریز ارومیه در ۳۱ سال گذشته با ترسالی بیش‌تری مواجه بوده است. از طرفی این حوضه در سال‌های اخیر شدت خشکسالی کم‌تری نسبت به سال‌های گذشته تجربه کرده است. شدیدترین بازه خشکسالی در این شاخص بین سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۷۷ رخ داده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تلاوم خشکسالی در SSI مدت بیش‌تری نسبت به SPI دارد. اما هر دو شاخص روند نسبتاً یکسانی را به نمایش می‌گذارند که نشان از همبستگی این دو شاخص دارد. همبستگی بین این دو شاخص در مطالعات متعدد دیگر نیز تأیید شده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش‌های Li et al. (2020) و Salimi et al. (2021) اشاره کرد.

بر اساس محاسبات بیش‌ترین مقدار خشکسالی بر اساس SSI در ایستگاه بابارود در سال ۱۳۷۸، در ایستگاه بیطاس در سال ۱۳۷۷، در ایستگاه داشبند در سال ۱۳۷۷، در ایستگاه کوتر در سال ۱۳۷۷، در ایستگاه مراکند در سال ۱۳۷۹، در ایستگاه ماکو در سال ۱۳۷۸، در ایستگاه تپیک در سال ۱۳۷۷، در ایستگاه ساریقمش در سال ۱۳۸۶، در ایستگاه بند ارومیه ۱۳۷۷ و در ایستگاه چهریق در سال ۱۳۸۸ رخ داده است. به‌منظور تطابق دو شاخص خشکسالی SPI و SSI نمودارهای مقایسه‌ای بین این دو شاخص تهیه شد. برای نمونه، نمودار سه ایستگاه هواشناسی و سه ایستگاه هیدرومتری در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، هر دو خشکسالی روند نسبتاً یکسانی را طی می‌کنند. بدین معنی که بر اساس شاخص SPI حوضه آبریز ارومیه ترسالی بیش‌تری نسبت به خشکسالی تجربه کرده است. همچنین در سال‌های اخیر شدت خشکسالی کم‌تری نسبت به سال‌های گذشته رخ داده است. در شکل (۵) هم‌سویی روند این دو شاخص کاملاً قابل مشاهده است. بر اساس پژوهش‌های پیشین مانند پژوهش‌های Bazrafshan et al. (2015) در دشت بم و Pathak and Dodamani (2016) در حوضه آبریز رود گاتپراتها، که بر رودخانه زرد با هدف ارزیابی شاخص هواشناسی

می‌شود (McKee et al 1993)، تلاوم و شدت خشکسالی دو ویژگی مهم در هر خشکسالی است.

$$S = - \sum_{i=1}^D SPI_i \quad (13)$$

پس از کنترل کیفی داده‌ها طبق شکل ۲ به‌وسیله تحلیل داده‌های آماری بارش و دبی جریان، شاخص‌های خشکسالی SPI و SSI بر اساس مقیاس سالانه در نرم‌افزار متلب محاسبه و تحلیل شدند. مقادیر SSI به‌عنوان شاخص هیدرولوژیک با چهار تابع تجمعی سنجیده شد. تابع تجمعی گاما، ویبول، نرمال لگاریتمی و نرمال گوسی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای ارزیابی کارایی توابع از ضریب همبستگی (COR)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، خطای میانگین مربعات (MSE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. نتایج حاصل از برآزش داده‌های دبی جریان توسط این چهار تابع در جدول ۳ نشان داده شده است. این مقادیر برای بازه زمانی (۱۳۶۸-۱۳۹۸) و برای ۱۰ ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت. بهترین تابع توزیع تابعی است که میزان خطای کم‌تری دارد. بر این اساس، با کم‌ترین MSE و MAE و ضریب همبستگی نزدیک ۱ است. بر اساس آزمون کلموگروف-اسمیرنوف بهترین تابع توزیع انتخاب شد (Jahangir and Mousavi, 2020). برای صحت‌سنجی مقادیر خطای هر ایستگاه و نیز ضریب همبستگی به‌صورت جداگانه محاسبه شد و در جدول ۳ بیان شده است.

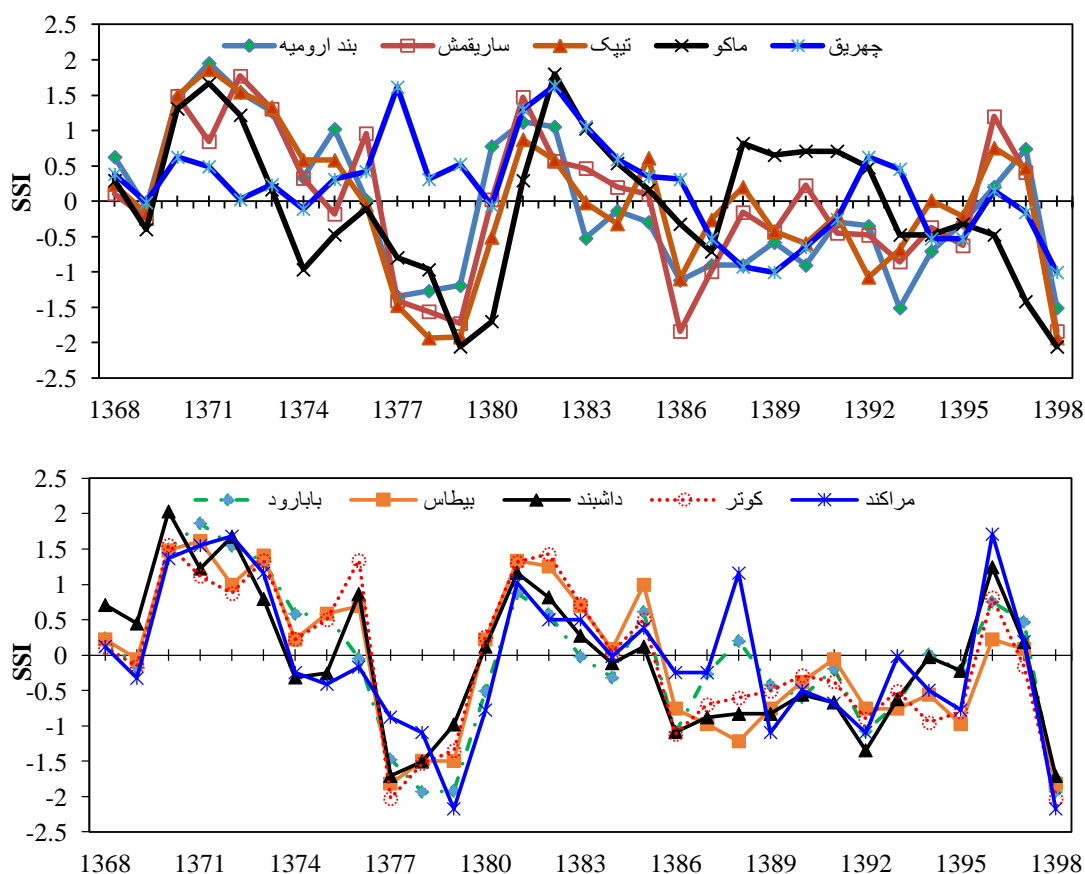
### ۳- نتایج و بحث

۳-۱- یافته‌های حاصل از ارزیابی خشکسالی توسط SPI و SSI  
تعداد ۱۰ ایستگاه هیدرومتری غرب و جنوب حوضه آبریز ارومیه برای بررسی خشکسالی برای بازه زمانی ۳۱ سال (۱۳۶۸-۱۳۹۸) مورد مطالعه قرار گرفت. برای مطالعه SPI از تابع تجمعی گاما برای برآزش داده‌ها استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقادیر مثبت نشانه ترسالی و مقادیر منفی زیر نمودار نشانه خشکسالی هستند. شدیدترین خشکسالی بر اساس شاخص SPI در ایستگاه بیکران در سال ۱۳۷۶، ایستگاه چهریق در سال ۱۳۹۵، ایستگاه کمپ ارومیه در سال ۱۳۷۶، ایستگاه مرز سرو در سال ۱۳۸۶، ایستگاه موش‌آباد در سال ۱۳۷۷، ایستگاه پل میان‌دوآب در سال ۱۳۷۶، ایستگاه ساریقمش در سال ۱۳۷۶، ایستگاه اشنویه در سال ۱۳۸۵، ایستگاه شاهین دژ در سال ۱۳۷۶، ایستگاه بابارود در سال ۱۳۸۵، رخ داده است. آن‌چه در نمودار کاملاً قابل مشاهده است، شاخص SPI زمان شروع خشکسالی را زودتر از شاخص SSI نمایان می‌کند. در شاخص SPI شدیدترین حالت خشکسالی بین سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۷۷ اتفاق افتاده که مقدار آن حدود ۲- است. همین دوره در شاخص SSI نیز قابل مشاهده است

و هیدرولوژی صورت گرفته، نشان‌دهنده تطابق این دو شاخص است.

جدول ۳- مقایسه توابع توزیع تجمعی برای محاسبه SSI  
Table 3- Comparison of cumulative distribution functions for calculating SSI

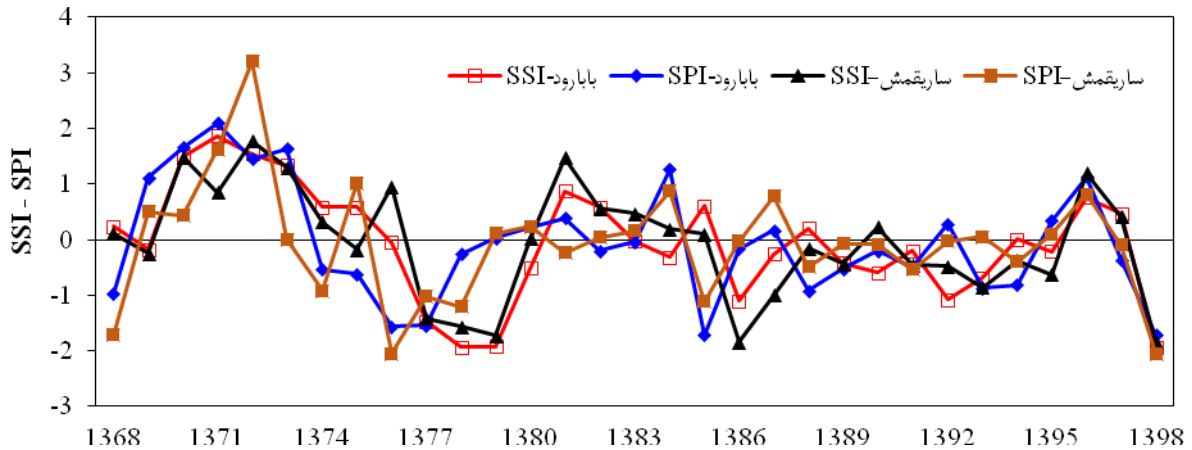
نام ایستگاه	ویبول-لوگ نرمال			ویبول-گاما			گاما-نرمال				
	E_MAE	E_RMS_E	E_MSE	COR	E_MAE	E_RMS_E	E_MSE	COR	E_MAE	E_RMS_E	E_MSE
بابارود	2.011	2.320	5.383	-0.870	0.602	0.132	0.017	0.990	1.520	1.828	3.344
بیطاس	1.428	1.563	2.444	-0.645	0.613	0.731	0.535	0.993	1.707	1.972	3.889
داشبند	1.159	1.375	1.891	-0.995	0.552	0.734	0.539	0.990	1.394	1.740	3.039
کوثر	1.058	1.254	1.572	-0.997	0.820	0.966	0.934	0.568	1.503	1.807	3.268
مراکند	1.226	1.310	1.718	-0.976	0.870	1.539	1.110	-0.110	1.930	2.151	4.630
ماکو	1.166	1.323	1.752	-0.985	0.609	0.690	0.476	0.991	1.327	1.604	2.575
ساریقمش	1.234	1.458	2.126	-0.979	0.620	0.739	0.546	0.992	1.544	1.926	3.711
تیپک	1.012	1.221	1.492	-0.989	0.552	0.717	0.515	0.981	1.476	1.816	3.298
چهریق	0.852	1.129	1.275	-0.954	0.548	0.719	0.518	0.968	1.530	1.881	3.539
بندارومیه	1.578	1.786	3.190	-0.686	0.585	0.728	0.530	0.986	1.361	1.768	3.128



شکل ۳- تغییرات SSI برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۸

Figure 3- SSI changes for the studied stations in the period 1989-2019



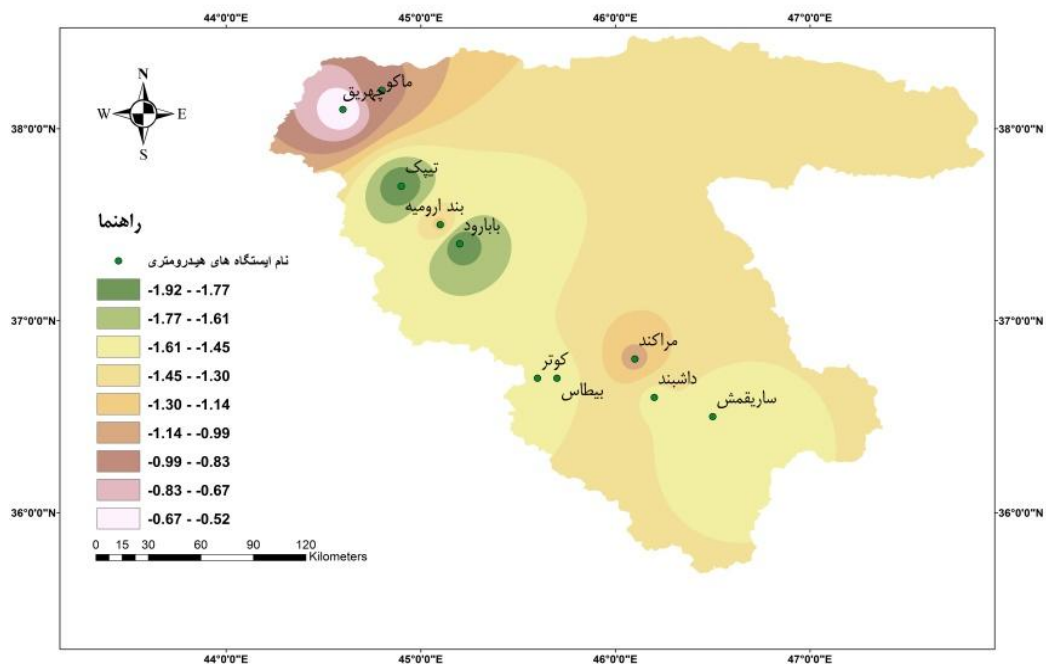


شکل ۴- مقایسه شاخص‌های SSI و SPI  
Figure 4- Comparison of SPI and SSI indexes

بیش‌ترین مقدار خشکسالی با شاخص SSI سال ۱۳۹۸ در ایستگاه ماکو به مقدار  $۰.۵/۲-$  بوده است. به دلیل استفاده از توابع مختلف برای محاسبه SSI نتایج پهنه‌بندی برای هر تابع توزیع با تابع توزیع دیگر برای ایستگاه یکسان متفاوت بود. بیش‌ترین تفاوت در ایستگاه مراکند دیده شد. همچنین، با بررسی تداوم خشکسالی در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۸ به غیر از ایستگاه چهریق اغلب ایستگاه‌ها خشکسالی ملایم و شدید را در بازه زمانی ۱۳۷۹-۱۳۷۷ تجربه کرده‌اند.

### ۳-۲- پهنه‌بندی شدت و تداوم خشکسالی

پس از مطالعه شاخص‌های خشکسالی همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، بیش‌ترین شدت خشکسالی در بین سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۷۹ رخ داده است. پهنه‌بندی تداوم خشکسالی از طریق روش IDW بر اساس تداوم خشکسالی در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۸ انجام شد. در شکل ۵ طبقه‌بندی بر اساس درون‌یابی با روش IDW برای بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۸ در نه طبقه ذکر شده است. بیش‌ترین مقدار خشکسالی با شاخص SSI در سال ۱۳۶۸ در ایستگاه داشبند با مقدار  $۰.۶۳/۰$  بود، در حالی که



شکل ۵- پهنه‌بندی تداوم خشکسالی بر اساس شاخص SSI در سال ۱۳۷۸ (شدیدترین خشکسالی)  
Figure 5- Zoning drought continuity based on SSI in 1999 (The most severe drought)

## ۴- نتیجه‌گیری

پدیده خشکسالی، توسط دو شاخص SPI و SSI از طریق داده‌های آماری سالانه بارش و دبی جریان برای غرب حوضه آبریز ارومیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از پژوهش‌ها به شرح زیر است.

۱) با مطالعه شاخص‌های SSI و SPI مشخص شد که نتایج این دو شاخص تطابق داشته و نوسانات دبی جریان از بارش متأثر است. به طوری که با کاهش و افزایش بارش تغییر می‌کند.

۲) انتخاب بهترین تابع توزیع تجمعی برای این حوضه آبریز از دیگر اهداف این پژوهش بوده است. در نه ایستگاه، تابع توزیع گاما بهترین تابع برای برازش داده‌ها انتخاب شد و تنها در ایستگاه مراکند توزیع ویبول انتخاب شد. در میان این ۱۰ ایستگاه، ایستگاه بابارود با همبستگی ۹۹ درصد و خطای MSE (۰/۰۱۷) بهترین برازش داده را با تابع توزیع گاما داشته است. بر اساس پژوهش‌های پیشین تابع گاما بهترین تابع برای برازش داده‌های شاخص SSI مشخص شده است. بر اساس این پژوهش، شاخص گاما برای ۹۰ درصد ایستگاه‌های منتخب شاخص مناسب بوده و تنها برای یک ایستگاه از تابع ویبول برای برازش داده‌ها استفاده شد که این موضوع به افزایش دقت محاسبات کمک می‌کند.

## منابع

اقتدارنژاد، م.، بذرافشان، ا.، و صادقی لاری، ع. (۲۰۱۷). ارزیابی تطبیقی شاخص‌های SPI، RDI و SDI در تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: دشت بم). *دانش آب و خاک*، ۳۶(۴۲)، ۶۹-۸۱.

بارانی پسینی، و.، پوراکرمی، م.، فتوحی مهربانی، ب.، و پوراکرمی، س. (۱۳۹۶). تحلیل روند خشک شدن دریاچه ارومیه و مهم‌ترین تاثیرات آن بر سکونتگاه‌های پیرامونی. *پژوهش‌های روستایی*، ۳۸(۳)، ۴۴۱-۴۵۳.

جهانگیر، م.ح.، و موسوی، م. (۱۳۹۹). مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و هیدرولوژیکی SSI بر اساس بهترین تابع توزیع تجمعی در استان تهران. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۴(۴۸)، ۱-۱۰.

مرتضایی فریزندی، ق.، و میراکبری، م. (۱۳۹۷). پایش خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های SDI و GRI در حوزه

۳) طی سه دهه گذشته در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۷۹ این حوضه شاهد بیش‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیکی بوده است. همان‌طور که در نقشه پهنه‌بندی مشاهده می‌شود شمال غرب منطقه به‌ویژه ایستگاه چهریق علیا همواره از شرایط مناسب‌تری برخوردار بوده و خشکسالی ملایم‌تری را نسبت به سایر مناطق تجربه کرده است. اما گستره خشکسالی شدید از قسمت غرب در سال ۱۳۷۷ به شرق در سال ۱۳۷۹ تغییر وضعیت داده است. به‌طور کلی شدت خشکسالی در سال ۱۳۷۷ کم‌تر از ۱۳۷۹ بوده است. شدت خشکسالی در سال ۱۳۷۹ در ایستگاه مراکند به بیش‌ترین مقدار (۲/۱۷-) رسیده است، در حالی که در هیچ یک از ایستگاه‌ها در سال ۱۳۷۷ چنین شدتی مشاهده نمی‌شود.

۴) بر اساس نتایج به دست آمده خشکسالی طی سی سال گذشته در غرب حوضه آبریز ارومیه روند رو به کاهش داشته و طی ۱۰ سال اخیر خشکسالی شدید رخ نداده و غالباً شاخص‌ها بین درجه مرطوب و خشک در نوسان بوده‌اند.

پیشنهاد می‌شود که مدیران و دست‌اندرکاران برای دستیابی به مدیریت بهینه منابع آبی کشور از شاخص‌های خشکسالی متنوع بهره‌جویند و بر اساس تحلیل روند خشکسالی و ترسالی به مدیریت و برنامه‌ریزی و پیش‌بینی خشکسالی بپردازند.

آبخیز رودخانه اعظم هرات استان یزد. مرتع و آبخیزداری، ۷۱(۳)، ۷۷۵-۷۸۵.

مصباح‌زاده، ط.، و سلیمانی‌ساردو، ف. (۱۳۹۷). بررسی روند زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی در حوضه آبخیز کرخه. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲(۴۰)، ۱۰۵-۱۱۴.

مقدسی، م.، مرید، س.، بایون، ا.، قائمی، ه.، سامانی جمال، م.و. (۱۳۸۳). پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI، DI و EDI در استان تهران، ایران. *تحقیقات کشاورزی ایران*، ۲۳(۱)، ۹۵-۱۱۰.

میراکبری، م.، مرتضایی، ق.، و محسنی، م. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های SPI، SPEI، SDI و GRI. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲(۴۲)، ۷۰-۸۰.

نوحه‌گر، ا.، و محمودآبادی، س. (۱۳۹۱). ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه کهورستان. *جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)*، ۲(۲)، ۸۹-۹۸.

## References

Abramowitz, M., & Irene, S. (1964). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. National Bureau of Standards Applied Mathematics Series, 470 pages.

AghaKouchak, A. (2015). A multivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010-2011 East Africa drought. *Journal of Hydrology*, 526, 127-135.

Barani Pesyan, V., Porakrami, M., Fotouhi Mehrbani, B., & Porakrami, S. (2017). The investigation of lake urmia drying trend and its

- important consequence on the surrounding settlements. *Journal of Rural Research*, 8(3), 438-453 (in Persian).
- Bazrafshan, J., Nadi, M., & Ghorbani, K. (2015). Comparison of empirical copula-based joint deficit index (JDI) and multivariate standardized precipitation index (MSPI) for drought monitoring in Iran. *Water Resources Management*, 29, 2027-2044.
- Eghtedar Nezhad, M., Bazrafshan, O., & Sadeghi Lari, A. (2016). Adaptive evaluation of SPI, RDI and SDI indices in analyzing the meteorological and hydrological drought characteristics (Case study: Bam Plain). *Journal of Water and Soil Science*, 26(4.2), 69-81 (in Persian).
- Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12-18.
- Jahangir, M.H., & Mousavi, M. (2020). Comparative study of meteorological (SPI) and hydrological drought index (SSI) based on the best cumulative distribution function in Tehran Province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 14(48), 1-10 (in Persian).
- Li, Y., Luo, L., Chang, J., Wang, Y., Guo, A., Fan, J., & Liu, Q. (2020). Hydrological drought evolution with a nonlinear joint index in regions with significant changes in underlying surface. *Journal of Hydrology*, 585, 124794.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, Pp. 83-179.
- MesbahZadeh, T., & Soleimani Sardoo, F. (2018). Temporal trend study of hydrological and meteorological drought in Karkheh watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(40), 105-114 (in Persian).
- Mielby, S., & Henriksen, H.J. (2020). Hydrogeological studies integrating the climate, freshwater cycle, and catchment geography for the benefit of urban resilience and sustainability. *Water*, 12(12), 3324.
- Mirakbari, M., Mortezaei, G., & Mohseni, M. (2018). Investigation of effect meteorological drought on surface and ground water resources by indices SPI, SPEI, SDI and GRI. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(42), 70-80 (in Persian).
- Moghadasi, M., Morid, S., Byon, H., Ghaemi, H., & Samani Jamal, M.V. (2004). Drought monitoring using deciles index, standardized precipitation index and effective drought index in Tehran Province, Iran. *Iran Agricultural Research*, 23(1), 95-110 (in Persian).
- Mortezaei Frizhandi, G., & Mirakbari, M. (2018). Hydro logical drought monitoring using SDI and GRI indicators In the watershed of Azam Herat, Yazd province. *Journal of Range and Watershed Management*, 71(3), 775-785 (in Persian).
- Nohegar, A., & Mahmoodabadi, S. (2012). Assessment of Some indicators of drought-regional and appointment of the most suitable indicator in the Kahorestan Zone. *Geography (Regional Planning)*, 2(2), 89-98 (in Persian).
- Pathak, A.A., & Dodamani, B.M. (2016). Comparison of two hydrological drought indices. *Perspectives in Science*, 8, 626-628.
- Salimi, H., Asadi, E., & Darbandi, S. (2021). Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Applied Water Science*, 11(11), 1-10.
- Sobral, B.S., de Oliveira-Junior, J.F., de Gois, G., Pereira-Júnior, E.R., de Bodas Terassi, P.M., Muniz-Júnior, J.G.R., Lyra G.B., & Zeri, M. (2019). Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO. *Atmospheric Research*, 220, 141-154.
- Soleimani Sardou, F., & Bahremand, A. (2014). Hydrological drought analysis using SDI index in Halilrud basin of Iran. *Environmental Resources Research*, 2(1), 48-56.
- Telesca, L., Lovallo, M., Lopez-Moreno, I., & Vicente-Serrano, S. (2012). Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(4), 1662-1678.