

**EXTENDED ABSTRACT**

**Zoning Map of Drought Characteristics under Climate Change Scenario using Copula Method in the Zayandeh Roud River Catchment**

E. MotevaliBashi naeini<sup>1\*</sup>, A. M. Akhond Ali<sup>2</sup>, F. Radmanesh<sup>3</sup>, M. Sharifi<sup>4</sup> and J. Abedi Koupaei<sup>5</sup>

- 1\* - Corresponding Author, Ph. D Student, Department. of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, (*mbnaeini.e@gmail.com*).
- 2- Professor, Department. of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
- 3- Associate Professor, Department. of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
- 4- Asistant Professor, Department. of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
- 5- Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Received: 5 January 2017

Revised: 14 July 2017

Accepted: 16 July 2017

**Keywords:** Drought, Drought Duration, Drought Severity, Climate Change, Bivariate Copula Functions.  
**DOI:** 10.22055/jise.2017.20611.1485

**Introduction**

Drought is one of the extreme events that can impact vast areas gradually over time. Also understanding the implications of climate change on drought is important for water resources management in order to manage the available water resources in the basin appropriately. Having better understanding of drought condition, drought indices were developed. Several drought indices are used for identifying and quantifying droughts that among them the standardized precipitation index (SPI) provides proper results. Based on each drought indices, drought characteristics can be calculated namely drought duration and drought severity. Drought characteristics are highly correlated to each other. Trusting on one of the drought characteristics for managing the water resources may lead to inappropriate understanding of drought condition. Therefore, it is important to notice all characteristics together by using a joint distribution function that among them copula function is prevalently used in hydrology studies. Several studies were examined the impact of climate change on the drought conditions by using different drought indices in many basins in the word and Iran (Bazrafshan et al., 2015, Kouchaki ei al. 2007, Mahsafar, 2011, Eghtedarnejad et al., 2016, Naserzadeh and Ahmadi, 2012, Hoffman et al., 2009, Kirono et al., 2011, Selvaraju and. Baas, 2007, Lee et al., 2013, Serinaldi et al., 2009, Mirabbasi et al., 2013). There have been many studies which using copula function in order to compute the return period of the drought (Abbasian et al., 2014, Golian, 2010, Serinaldi et al., 2009, Mirabbasi et al., 2016, Maddadgar and Moradkhani, 2011, Chen et al., 2011).

Therefore, in this study drought condition was analyzed by using copula under climate change condition to have a better understanding of future drought situation and the return periods of drought events in the future. The SPI was used to extract the drought duration and drought severity in the ZayandehRoud River basin for a historical period (1979-2008), and the far future (2058-2099) by using 15 GCM models from the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) scenarios. A significant past

drought event in the basin was used as a benchmark with severity of -4.39 and duration of 6 months. The Archimedean and Elliptical families of copula functions were used to construct the joint distribution functions for evaluating the drought return periods in the basin. Results from historical analysis show that the return period of significant past drought is about 5 years and this period will increase to about 25 years in the future.

## **Methodology**

### **Standardized Precipitation Index (SPI)**

The Standardized Precipitation Index was developed by McKee (1993). Since precipitation is the only data that is needed to calculate the SPI, the computation is relatively simple. Some studies used SPI to calculate the drought characteristics (Golian et al. 2015; Madadgar and Moradkhani 2011). Drought severity and duration were calculated based on computed SPI values by using the past available data of 30 years (1979-2008) in the ZayandehRoud basin. Drought duration is defined as successive months with SPI value less than -1 and drought severity as the accumulative SPI value during the period with successive SPI value less than -1. Lognormal, exponential, gamma and Weibull functions were selected as the candidate distribution function for drought duration and drought severity. Best-fitted distribution functions were selected based on the Bayesian Information Criterion (BIC) method for severity and duration.

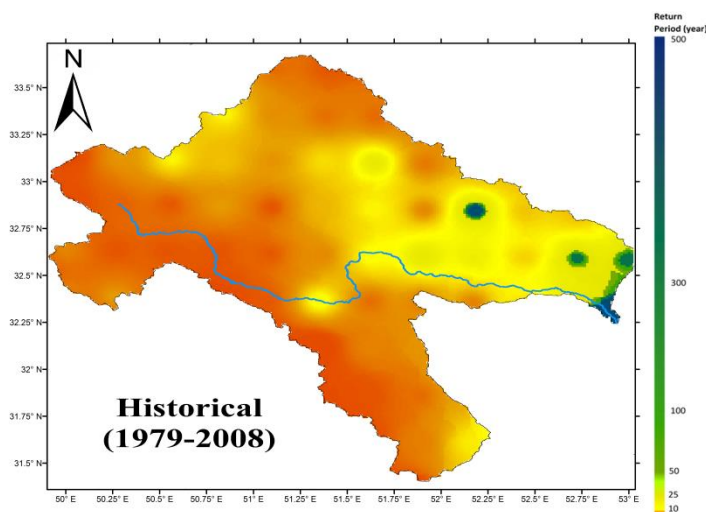
### **Copula and Climate Change**

Since there is a high correlation between drought characteristics, it is essential to use a joint distribution function. Copula is the joint distribution function which keeps all the information related to each dependence structure of marginal distribution. Copula functions are categorized into different families. Normal copula and t copula in elliptical copula family and Gumbel, Frank, and Clayton copula in the Archimedean copula family are commonly used copula functions families in the hydrology studies and are used in this study as well. The BIC method was used in order to choose the best fitted bivariate copula function in this study. The best-fitted copulas were used for the historical and future assessment of drought condition in order to calculate the return period of significant drought in the basin.

The last report of IPCC was AR5 which was published based on new set of scenarios, called Representative Concentration Pathways (RCPs), which describes an emission trajectory and concentration by the year 2100, and consequent forcing (Wayne 2013). For this study, daily precipitation data for the future periods of 84 years between 2016 and 2099 from 15 different GCMs for 2 different scenarios: RCP4.5 and RCP 8.5 was downloaded from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) dataset. These scenarios are representative of stabilized total radiated forcing and high greenhouse gas concentration levels, respectively. Return periods of significant drought were computed for 15 GCM models under selected scenarios.

### **Results and Discussion**

In this study, the 90 percentile of the drought duration and severity of past drought events in the historical period (1979-2008) was selected as the significant event. The characteristics of this significant historical drought were severity of SPI value of -4.39 and duration of 6 months. Then return period values of this event were calculated for the historical period (1979-2008), and far future (2058-2099) using bivariate copula for 15 GCM models under two selected scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). Finally spatial maps were generated by using the inverse distance weighting (IDW) method in the GIS software. For instance, Figure 1 shows the return period of severe drought based on the results of bivariate copula in the historical period (1979-2008).



**Fig. 1- Return period of severe drought (severity equal to SPI value of -4.39 and duration equal to 6 months) based on results of bivariate copula of Severity-Duration- in the historical period (1979-2008)**

### Conclusions

Drought is one of the extreme hydrological events that impact on agriculture and water resources. Climate change impact on drought may intensify the drought condition and its effects. So that, it is important to analyze the drought condition under climate change condition. In this study SPI index of drought was used to calculate the drought duration and drought severity in the ZayandehRoud basin in Iran. One of the severe past drought events during 1979 to 2008 was selected as the benchmark. Because of the high correlation between drought duration and severity the copula function was used as the joint distribution function to calculate the return period of significant drought in the past period (1979-2008), and the far future (2058-2099) for 15 GCM models under RCP4.5 and RCP8.5. Based on the results of 15 GCM models there is not any special trend for precipitation in the basin, but most of the models shows the trivial decreasing trend for precipitation especially in the upper part of the basin. Return periods of significant drought in the past is about less than 10 years and it may be less than 25 years in the near and future in the basin. However there is the uncertainty in the GCM models, it is essential to manage the water resources in the basin in order to overcome the possible severe drought condition in the future.

### References

- 1- Abbasian, M., Jalali, S., Mousavi Nadoushani, S., 2014. Multivariate Flood Frequency Analysis Using Copula Function and Parametric and Nonparametric Margin Distributions. *Modares Civil Engineering journal*, 14(4),pp.81-92 . (In Persian)
- 2- Bazrafshan, J., Hojaji, S. and Hasheminasab, A., 2015. Impact of Future Climate Change on the Possibilities of Transferring Drought Classes in Iran's Limited Climate (Case study: Bandar Anzali and Bushehr stations). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(1), pp.131-150. (In Persian)
- 3- Chen L, Singh V.P, and Guo S. 2011. Drought Analysis Based on Copulas. *Symposium on Data-Driven Approaches to Droughts*, Paper 45.
- 4- Eghtedarnejad, M., Bazrafshan, A., Sadeghi Lari, A., 2016. In the analysis of meteorological drought characteristics and SDI and RDI, SPI and Comparative Evaluation of Hydrological Indices (Case Study: Bam Plain). *Water and Soile Science*, 26(2),pp.69-81. (In Persian)
- 5- Golian, S., 2010. Flood Prediction Using Rainfall Threshold Method Based on Spatial Distribution. Thesis, AmirKabir Tecnology University of Tehran, Iran. (In Persian).

- 6- Hoffman, MT. Carrick, P. Gillson, L. West, A. 2009. Drought, climate change and vegetation response in the succulent karoo, South Africa. *South African Journal of Science* ,105,pp.54-60.
- 7- Kirono, D. Kent, D. Hennessy, K. Mpelasoka, F. 2011. Characteristics of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions: Results from 14 global climate models. *Journal of arid environments*, 75, pp.566-75.
- 8- Kouchaki, A., Nasiri, M. and Kamali, G., 2007. Study of Iran Index in Climate Change Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 5(1), pp.133-142. (In Persian).
- 9- Lee, T. Modarres, R. Ouarda, T. 2013. Data-based analysis of bivariate copula tail dependence for drought duration and severity. *Hydrological Processes*, 27, pp.1454-63.
- 10-Madadgar, S. Moradkhani, H. 2011. Drought analysis under climate change using copula. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18, pp.746-59.
- 11-Mahsifar, H., 2011. Climate change effects on Water Bill on Lake Urmia. *Iran Water Resources Research*, 7(1), pp.47-58. (In Persian).
- 12-McKee, TB. Doesken, NJ. Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society Boston. MA. 17:179-83.
- 13-Mirabbasi, R. Anagnostou, E. N. Fakheri-Fard, A. Dinpashoh, Y. Eslamian, S. 2013. Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology*, 492, pp.35–48.
- 14-Naserzadeh, M., Ahmadi, A., 2012. Performance Evaluation of Meteorological Drought Indicators in Drought Evaluation and its Zoning in Qazvin Province. *Scientific Journals Management System*, 12(162), pp.27-141. (In Persian).
- 15-Selvaraju, R. Baas, S. 2007. *Climate Variability and Change: Adaptation to Drought in Bangladesh: a Resource Book and Training Guide*. Food & Agriculture Org.
- 16-Serinaldi, F. Bonaccorso, B. Cancelliere, A. Grimaldi, S. 2009. Probabilistic characterization of drought properties through copulas. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 34, pp.596-605.
- 17-Wayne, G. 2013. *The beginner's guide to representative concentration pathways*. skeptical science. Version 1.0. <http://www.skepticalscience.com/rcp.php>.





## پهنه‌بندی خصوصیات خشکسالی تحت اثر تغییر اقلیم با استفاده از روش توابع مفصل در حوضه زاینده‌رود

اله متولی باشی نایینی<sup>۱\*</sup>، علی محمد آخوندعلی<sup>۲</sup>، فریدون رادمنش<sup>۳</sup>، محمدرضا شریفی<sup>۴</sup> و جهانگیر عابدی کوپایی<sup>۵</sup>

\* نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز mbnaeini.e@gmail.com

- ۱- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- دانشیار گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۵- استاد گروه مهندسی آب دانشکده مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۲۵

بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۲۳

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۶

### چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های حدی است که اثرات آن به‌طور تدریجی و در طول زمان، وسعت زیادی را در بر می‌گیرد. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی برای مدیریت منابع آب اهمیت به‌سزایی است. تاکنون شاخص‌های خشکسالی متعددی برای تعیین و کمی کردن خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در بین آن‌ها شاخص SPI نتایج بسیار مناسبی به‌دست داده است. در این مطالعه، از شاخص SPI برای محاسبه مدت و شدت خشکسالی در حوضه زاینده‌رود برای دوره تاریخی (۲۰۰۸-۱۹۷۹) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۵۸) با استفاده از داده‌های ۱۵ مدل GCM حاصله از سناریوهای پنجمین گزارش ارزیابی (AR5)ICPP، استفاده شد. یکی از شدیدترین خشکسالی‌های دوره تاریخی، با مدت شش ماه و شدت برابر با ۴/۳۹-، به‌عنوان خشکسالی معیار انتخاب شد. با توجه به مرور سوابق به‌دلیل همبستگی زیاد بین خصوصیات خشکسالی چند تابع مفصل از خانواده‌های ارشمیدسی و بیضوی، برای ایجاد توزیع توأم و ارزیابی دوره‌های بازگشت خشکسالی در حوضه، استفاده شدند. نتایج حاکی از آن بود که دوره بازگشت خشکسالی شدید معیار در دوره تاریخی حدود پنج سال بوده و این مقدار به حدود ۲۵ سال در آینده افزایش خواهد یافت.

کلید واژه‌ها: مدت خشکسالی، شدت خشکسالی، تغییرات اقلیم، توابع مفصل دو متغیره.

### مقدمه

خشکسالی نتیجه یک دوره شرایط هیدرولوژیکی غیرعادی است، که به‌خصوص با کاهش بارندگی در یک دوره مشخص زمانی پدیدار می‌شود. این پدیده، یکی از پدیده‌های متعارف در تمام انواع رژیم‌های آب و هوایی است (Chen et al., 2013). برخلاف سایر پدیده‌های حدی، اثرات خشکسالی به‌طور تدریجی در طول چندین ماه و حتی چندین سال آشکار می‌شود. تحلیل خشکسالی عموماً با محاسبه خصوصیات خشکسالی از جمله مدت و شدت خشکسالی انجام می‌گیرد (Yang, 2010). پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آتی در هر منطقه برای مدیریت منابع آب بسیار اهمیت دارد. در نیمکره شمالی، مناطق واقع در عرض‌های جغرافیایی مابین ۱۵ تا ۴۵ درجه، مستعد خشکسالی‌های شدیدتر می‌باشند که کشور ایران نیز در این منطقه واقع شده است (Mousavi, 2005).

مطالعه‌های زیادی برای بررسی اثرات تغییر اقلیم در اقلیم منطقه و همچنین بر خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی متعددی صورت گرفته است (Kouchaki et al., 2007; Mahsafar, 2011; Bazrafshan et al., 2015). به‌عنوان مثال، شاخص بارش استاندارد شده (SPI, Standardized

Precipitation Index) و شاخص شناسایی خشکی (RDI, Reconnaissance Drought Index)، شاخص بارش نرمال (PNPI, Normal Preipitaion Index)، شاخص بارش کشاورزی (ARI, Agricultural Rainfall Index)، شاخص خشکی استاندارد چند متغیره (MSDI, Multivariate Standardized Drought Index) و شاخص JDI برای تحلیل خشکسالی در مناطق مختلف جهان و ایران استفاده شده است (Eghtedarnejad et al., 2016; Bazrafshan et al., 2015; Naserzadeh and Ahmadi, 2012; Hoffman et al., 2009; Kirono et al., 2011; Selvaraju and Baas, 2007; Lee et al., 2013; Serinaldi et al., 2009; Mirabbasi et al., 2013). همبستگی زیادی بین مدت و شدت خشکسالی وجود دارد (Madadgar and Moradkhani, 2011). بنابراین تحلیل خشکسالی تنها براساس یکی از خصوصیات خشکسالی منجر به فهم نادرستی از پدیده خشکسالی خواهد شد. با محاسبه دوره بازگشت تنها بر اساس یکی از خصوصیات خشکسالی، دوره بازگشت برای آن خصوصیت مربوطه محاسبه می‌شود، ولی اطلاعاتی در مورد میزان بزرگی سایر خصوصیات در اختیار نیست. به‌عبارتی به‌عنوان نمونه می‌توان دوره بازگشت شدت خشکسالی را برای مقادیر بزرگتر از حد مشخصی محاسبه کرد، اما این دوره

برای گام‌های زمانی متفاوتی قابل محاسبه است (۳، ۱، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه). در محاسبه این شاخص ابتدا تابع توزیع گاما به داده‌های بارش برازش داده شده سپس احتمال تجمعی به‌دست آمده از توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف از میانگین یک انتقال داده می‌شود. رابطه (۱) برای محاسبه SPI مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$F(X) = \int_0^X f(X)dx = \frac{1}{\beta\alpha\Gamma(\alpha)} \int_0^X X^{\alpha-1} e^{-\frac{X}{\beta}} dx \quad (1)$$

شدت و مدت خشکسالی براساس تئوری RUN که توسط یوجویچ ارائه شد، محاسبه می‌شود (Yevjevich, 1967). با توجه به این روش در این مطالعه، سطح آستانه برای تعیین خشکسالی عدد ۱- در نظر گرفته شد تا وضعیت خشکسالی‌های شدیدتر مورد بررسی قرار گیرد (جدول ۱). از آنجایی که داده‌های بارش تنها برای ۳۰ سال در دسترس بود، به‌منظور درک بهتر از وقایع خشکسالی به‌صورت فصلی، محاسبه SPI سه ماهه در این مطالعه، مورد توجه قرار گرفت. بنا به تعریف، مدت خشکسالی به معنی ماه‌های متوالی است که در آن‌ها مقدار SPI کمتر از ۱- باشد، شدت خشکسالی قدرمطلق مقادیر تجمعی SPI در طول دوره‌ای است که مقادیر SPI به‌طور متوالی کمتر از ۱- می‌باشد.

توابع توزیع در نظر گرفته شده برای برازش به خصوصیات خشکسالی عبارتند از: تابع توزیع لوگ نرمال، تابع توزیع نمایی، تابع توزیع گاما و تابع توزیع ویبول. بهترین برازش توابع توزیعی برای شدت و مدت خشکسالی به کمک روش (Bayesian BIC information criterion) تعیین شدند. رابطه محاسبه BIC به‌صورت  $BIC = -2\log\text{likelihood} + d.\log(N)$  به کار می‌رود که در آن N اندازه نمونه و d تعداد پارامترهاست و مقادیر کمتر نشان‌دهنده برازش بهتر می‌باشد (Li et al., 2013).

### تحلیل خشکسالی تاریخی

همبستگی خطی میان پارامترهای مدت و شدت خشکسالی محاسبه شد و تقریباً تمامی مقادیر بالاتر از ۰/۵ به‌دست آمد (شکل ۱). دامنه مقادیر همبستگی بین شدت و مدت خشکسالی مابین ۰/۵ و ۰/۷ می‌باشد

براساس مطالعه‌های اخیر برای تعیین توابع توزیع برازش شده به هر یک از خصوصیات خشکسالی (Xu et al., 2015, Shiau, 2006) توابع توزیع نمایی، گاما، لوگ نرمال و ویبول به مدت و شدت خشکسالی برازش داده شدند. این توابع توزیع به خصوصیات خشکسالی محاسبه شده در دوره تاریخی برازش داده می‌شود. برای هر ایستگاه در حوضه بهترین تابع برازش داده شده تعیین می‌شود. جدول (۲) برای هر تابع توزیع حاشیه‌ای تعداد ایستگاه‌هایی که در آن‌ها تابع توزیع مشخص شده بهترین برازش را برای هریک از

بازگشت اطلاعاتی راجع به سایر خصوصیات خشکسالی مانند مدت خشکسالی نمی‌دهد. بنابراین ممکن است شدت مدنظر در مدت زمان کوتاهی رخ دهد، که در این صورت برنامه‌ریزی برای یک دوره کوتاه می‌تواند به راحتی با در نظر گرفتن تمهیداتی ساده انجام گیرد. همچنین ممکن است شدت مورد نظر در زمان نسبتاً طولانی به طول انجامد. برنامه‌ریزی برای مدت زمان طولانی‌تر نیاز به تأمل بیشتری داشته و حتی گاهی نیاز است از سال‌ها قبل برای آن برنامه‌ریزی کرده و آمادگی لازم را به‌دست آورد. بنابراین اطلاع از دوره بازگشت خشکسالی با توجه همزمان به خصوصیات خشکسالی امری ضروری به‌منظور برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشد. بدین منظور برای محاسبه دوره بازگشت خشکسالی از توابع انصالی استفاده شد.

مفصل تابع انصالی چند متغیره‌ای است که در مطالعه‌های هیدرولوژی به‌صورت روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرد (Abbasian et al., 2014, Golian, 2010, Serinaldi et al., 2009, Mirabbasi et al., 2013, Maddadgar and Moradkhani, 2011, Chen et al., 2011). در این مطالعه سه هدف اصلی مد نظر قرار گرفته شده است که عبارتند از: (۱) محاسبه مدت و شدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI، برازش توابع توزیع مختلف بر مدت و شدت خشکسالی و تعیین بهترین تابع توزیع برای هر خصوصیت، تعیین یکی از شدیدترین وقایع خشکسالی تاریخی که دارای بیشترین مدت و شدت بوده‌اند و نهایتاً استفاده از توابع مفصلی مناسب برای تخمین فراوانی وقوع خشکسالی با بیشترین مدت و شدت تعیین شده، (۲) بررسی اثر تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گردش عمومی (GCM) برای دوره‌های آتی، (۳) ارزیابی خصوصیات خشکسالی آتی با استفاده از توابع مفصل و محاسبه خصوصیات وقایع خشکسالی در دوره‌های آتی. رسم نقشه‌های مکانی دوره بازگشت‌های خشکسالی آتی و همچنین رسم نمودارهای شدت-مدت-بیشترین مقدار خشکسالی در هر دوره-فراوانی وقوع مد نظر خواهد بود. تاکنون مطالعه‌ای با در نظر گرفتن همزمان خصوصیات خشکسالی ضمن لحاظ آثار تغییر اقلیم و رسم نقشه‌های مکانی فراوانی وقوع شدیدترین خشکسالی بخصوص در منطقه مورد مطالعه انجام نشده است.

### مواد و روش‌ها

#### شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده توسط (McKee et al., 1993) توسعه داده شد. برای محاسبه این شاخص، در ابتدا تابع توزیع آماری مناسب به داده‌های طولانی مدت بارش برازش داده شده و سپس تابع توزیع تجمعی نرمالیزه می‌شود. مقدار SPI می‌تواند مثبت و یا منفی باشد، درحالی که مقادیر مثبت بیانگر دوره‌هایی است که بارش بیشتر از حد میانگین و مقادیر منفی نشانگر دوره‌هایی است که بارش کمتر از حد میانگین است (Shiau, 2006). شاخص SPI

تابع برازش داده شده به شدت و مدت خشکسالی، از روش BIC استفاده شد. توابع تعیین شده برای استخراج توابع توزیع شدت و مدت خشکسالی در دوره تاریخی برای دوره آتی نیز استفاده شدند.

مشخصات خشکسالی داشته است، مشخص کرده است. جدول (۳) توابع توزیع انتخاب شده برای هر یک از خصوصیات خشکسالی را نشان داده است. روش تخمین حداکثر درست‌نمایی (MLE) به‌منظور تخمین پارامترهای هر یک از توابع استفاده شد. برای تعیین بهترین

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص SPI

Table 1- Classification of SPI Index

SPI Value	Drought Condition
2.0 and more	Extremely Wet
1.5 to 1.99	Very Wet
1.0 to 1.49	Moderately Wet
-0.99 to 0.99	Near Normal
-1.0 to -1.49	Moderately Dry
-1.5 to -1.99	Severely Dry
-2 and less	Extremely Dry

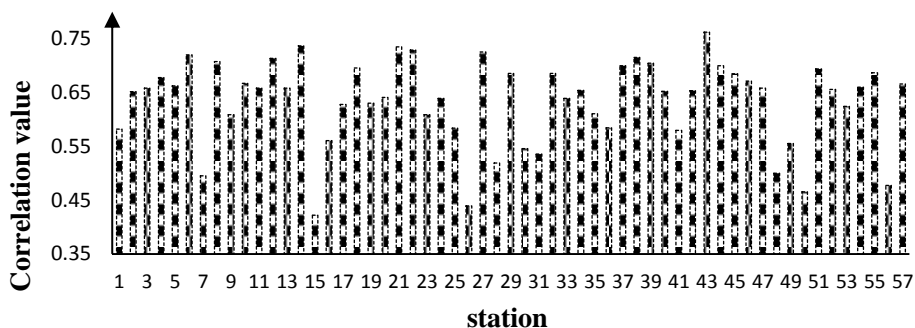


Fig 1- Correlation values between draught characteristics

شکل ۱- همبستگی بین خصوصیات خشکسالی

جدول ۲- تعداد ایستگاه‌ها با بهترین تابع برازش داده شده مشخص شده، برای هر خصوصیت خشکسالی

Table 1-The number of stations that has the best fit of defined distribution for each drought characteristic

Drought characteristic	Exponential	Gamma	Lognormal	Weibull
Severity	6	1	41	9
Duration	0	0	57	0

جدول ۳- توابع توزیع انتخاب شده برای هر یک از خصوصیات خشکسالی

Table 2-Selected distribution for each drought characteristic

Drought Characteristic	Selected Distribution
Severity	Lognormal
Duration	Lognormal

## توزیع احتمالاتی چند متغیره تابع مفصل

تابع مفصل یک تابع اتصالی چند متغیره است که برای اتصال توابع توزیع احتمالاتی مختلف به کار می‌رود. برای توضیح بیشتر یک بردار تصادفی  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  با توابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای پیوسته  $F_i(x) = P[X_i \leq x]$  را در نظر می‌گیریم. برای هر عضو از این بردار تصادفی، حاشیه‌های یکنواخت  $(U_1, U_2, \dots, U_d)$  به‌قرار ذیل موجود است (Nelsen 2007):

$$(U_1, U_2, \dots, U_d) = (F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_d(X_d)) \quad (2)$$

بنابراین تابع مفصل C به‌عنوان یک تابع توزیع اتصالی از  $(U_1, U_2, \dots, U_d)$  برای بردار  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  قابل تعریف است:

$$C(U_1, U_2, \dots, U_d) = P[U_1 \leq u_1, U_2 \leq u_2, \dots, U_d \leq u_d] \quad (3)$$

این رابطه می‌تواند به‌صورت ذیل بیان شود:

$$C(U_1, U_2, \dots, U_d) = P[X_1 \leq F_1^{-1}(u_1), X_2 \leq F_2^{-1}(u_2), \dots, X_d \leq F_d^{-1}(u_d)] \quad (4)$$

تئوری Sklar (1959) نشان داد که برای هر تابع توزیع تجمعی n بعدی H با حاشیه‌های متفاوت  $F_1, \dots, F_n$ ، تابع مفصل C را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود: (Nelsen 2007)

$$H(X_1, X_2, \dots, X_n) = C[F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_n(X_n)] = C(U_1, U_2, \dots, U_n) \quad (5)$$

که در آن توابع توزیع  $u_1, \dots, u_n$  توابع  $X_1, \dots, X_n$  هستند (Madadgar and. Moradkhani, 2011).

توابع حاشیه‌ای باید در دامنه (۰،۱) یکنواخت باشند. توابع مفصل خانواده‌های مختلفی داشته و بعضی از آن‌ها به‌طور روزافزون در مطالعه‌های هیدرولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yan, 2007). با توجه به مرور منابع مفصل نرمال و مفصل t در خانواده مفصل‌های بیضوی و مفصل‌های گامبل، فرانک و کلایتون در خانواده مفصل‌های ارشمیدسی، توابع مفصل مورد استفاده در این مطالعه در نظر گرفته شدند (Chen et al., 2013, Yang, 2010, Lee et al., 2013, Serinaldi et al., 2009, Mirabbasi et al., 2013, Madadgar and Moradkhani, 2011, Chen et al., 2011). جدول (۴) خصوصیات این توابع مفصل را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از استفاده از توابع مفصل براساس (Chen et al., 2012, Chen et al., 2011)، سه نوع از توابع مفصل پرکاربرد از خانواده ارشمیدسی (کلایتون، فرانک و گامبل) و دو نوع از توابع مفصل پرکاربرد در خانواده بیضوی (نرمال و t) برای تشکیل توابع اتصالی دو متغیره انتخاب شدند. بهترین برازش تابع مفصلی برای هر ایستگاه در حوضه به کمک روش BIC انتخاب شدند. جدول (۵) تعداد ایستگاه‌هایی که در آن‌ها تابع مفصل مشخص شده بهترین تابع محاسبه شده است، را نشان می‌دهد. تابع مفصل انتخاب شده برای ایجاد توزیع دو متغیره از شدت-مدت تابع گامبل می‌باشد. تابع مفصل انتخاب شده برای شدت-مدت، برای ارزیابی خشکسالی هم در دوره تاریخی و همین‌طور برای دوره آینده در نظر گرفته شد.

## جدول ۴- خصوصیات توابع مفصل مورد استفاده در این مطالعه

Table 3-Properties of used copula functions in this study

Copula type	Function	Relationship between parameters
Clayton	$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\tau^* = \frac{\theta}{2 + \theta}, \theta \in [1, \infty)$
Gumbel-Hougaard	$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$	$\tau^* = 1 - \frac{1}{\theta}, \theta \in (0, \infty)$
Frank	$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{(e^{\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\tau^* = 1 + \frac{4}{\theta} \left[ \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt - 1 \right], \theta \in R$
Normal	$C(u, v) = \int_{t_v^{-1}(v)}^{\theta^{-1}(u)} \int_{t_u^{-1}(u)}^{\theta^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi(1-\rho^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{x^2 - 2\rho xy + y^2}{2(1-\rho^2)}\right\} dx dy$	$\rho(X, Y) = \sin\left(\frac{\pi}{2}\tau\right)$
t	$C(u, v) = \int_{-\infty}^{\theta^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\theta^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi(1-\rho^2)^{1/2}} \exp\left\{1 + \frac{x^2 - 2\rho xy + y^2}{v(1-\rho^2)}\right\}^{- (v+2)/2}$	$\rho(X, Y) = \sin\left(\frac{\pi}{2}\tau\right)$

\*  $\tau$  denotes Kendall's tau, which is used to measure and test the dependence.



جدول ۵- تعداد ایستگاه‌ها با بهترین تابع مفصل انتخابی

Table 4-Number of stations with best fitted copula

copula	t	Normal	Gumbel	Frank	Clayton
Copula Severity-Duration	0	6	48	3	0

## سناریوهای تغییر اقلیم

بررسی تغییرات اقلیم در آینده عوامل مختلفی را دربرمی‌گیرد، عواملی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه تکنولوژی، تغییرات در روش‌های تولید انرژی و کاربری اراضی، اقتصاد منطقه‌ای و رشد جمعیت. چندین گروه مختلف این موضوع را تحت نظارت هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC)، بررسی می‌کنند. در سال ۲۰۱۴ پنجمین گزارش ارزیابی (AR5) برپایه سناریوهای مسیره‌های نماینده غلظت (RCP) منتشر شد، که این سناریوها بیانگر مسیره‌های انتشار و غلظت گازها و نتایج حاصله تا سال ۲۱۰۰ می‌باشد (Wayne, 2013). از آنجایی که AR5 آخرین گزارش منتشر شده توسط IPCC است، در این مطالعه از داده‌های این گزارش بهره گرفته شد. در این گزارش چهار سناریوی RCP تعریف شده است که عبارتند از: RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5. برای انجام این پژوهش دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 انتخاب شدند. سناریوی RCP8.5 شامل رویه‌هایی است که همراه با افزایش تغییر کاربری اراضی کشاورزی و چمن‌زارها، افزایش جمعیت کره زمین را نیز شاهد خواهد بود. بنابراین این سناریو نشان‌دهنده افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول زمان بوده و در نتیجه سطح بالای از غلظت گازهای گلخانه‌ای است. این سناریو در مقایسه با سناریوهای گزارش چهارم IPCC مشابه با سناریوی SRES A1F1 می‌باشد. سناریوی RCP4.5 سناریویی است که در آن میزان شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ تثبیت می‌شود به گونه‌ای که از سطح انتشار مطلوب فراتر نرود. این سناریو در مقایسه با سناریوهای اقلیمی و سناریوهای انتشار در گزارش چهارم مشابه با سناریوی SRES B1 می‌باشد (Wayne, 2013). سازمان ناسا، داده‌های پیش‌بینی شده تبادل جهانی زمین به صورت روزانه را در سایت خود (NEX-GDDP) با دقت ۰/۲۵ درجه در اختیار محققان قرار داده است (Thrasher et al., 2013). به منظور انجام این مطالعه داده‌های روزانه بارندگی برای دوره ۳۰ ساله تاریخی از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۸ و همچنین داده‌های روزانه بارندگی حاصل از ۱۵ مدل GCM تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۸۴ ساله آینده از سال ۲۰۱۶ تا سال ۲۰۹۹ از این سایت دانلود شد. سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب بیانگر کل نیروی تابشی تثبیت شده و سطوح بالای غلظت گازهای گلخانه‌ای است.

## دوره بازگشت براساس تابع مفصل

اطلاع از فراوانی پدیده‌های حدی در مطالعه‌های هیدرولوژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای ارزیابی خشکسالی، زمان مابین شروع یک دوره خشکسالی تا شروع دوره خشکسالی بعدی را زمان مابین دو رویداد خشکسالی متوالی می‌نامند و متوسط زمان مابین رخداد دو رویداد خشکسالی متوالی، دوره بازگشت تعریف می‌شود (Serinaldi et al., 2009).

در حالت تک متغیره، دوره بازگشت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_d = \frac{E(L)}{P_D(D \geq d)} \quad (6)$$

$$T_d = \frac{E(L)}{P_S(S \geq s)} \quad (7)$$

که در آن  $T_d$ : دوره بازگشت خشکسالی،  $E(L)$ : امید ریاضی زمان مابین خشکسالی،  $D$ : بیانگر مدت خشکسالی و  $S$ : شدت خشکسالی است. رابطه محاسبه دوره بازگشت برای حالت چند متغیره نیز براساس روش محاسبه دوره بازگشت حالت تک متغیره قابل توسعه است. با توجه به روش Kirono (2006) (Shiau)، محاسبه دوره بازگشت در حالت چند متغیره می‌تواند به کمک دو عملگر منطقی «و» و «یا» انجام شود. عملگر «و» بیانگر دوره بازگشت‌هایی است که تمامی متغیرها بزرگتر یا مساوی مقادیر مشخص شده است و عملگر «یا» بیانگر حالتی است که حداقل یکی از متغیرها بزرگتر یا مساوی مقادیر مشخص شده است.

دوره بازگشت برای حالتی که  $D \geq d$  و  $S \geq s$  و برای حالت  $D \geq d$  یا  $S \geq s$  به کمک روابط ذیل قابل محاسبه است:

$$T_{and} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{(1 - F_D(d) - F_S(s) + C[F_D(d), F_S(s)])} \quad (8)$$

$$T_{or} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \text{ or } S \geq s)} = \frac{E(L)}{(1 - C[F_D(d), F_S(s)])} \quad (9)$$

دوره بازگشت برای پدیده‌های خشکسالی که مدت و شدت خشکسالی بیشتر از مقدار مشخصی باشد، بیانگر پدیده‌های خشکسالی شدیدتری می‌باشد. بنابراین محاسبه  $T_{and}$  در این مطالعه مدنظر قرار گرفت.

**منطقه مطالعاتی**

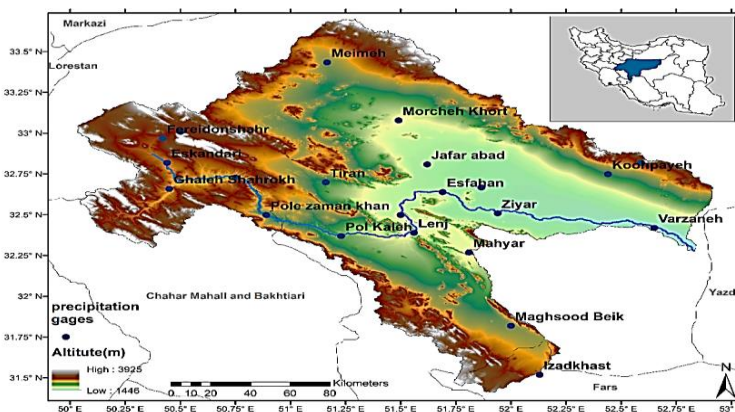
حوضه زایندهرود در استان اصفهان و در مرکز ایران واقع شده است (شکل ۲). این حوضه دارای مساحتی حدود ۲۸۰۰۰ کیلومترمربع بوده و در محدوده بین عرض‌های جغرافیایی ۳۴-۳۱ درجه شرقی و طول‌های جغرافیایی ۵۳-۴۹ درجه شمالی قرار دارد. رودخانه زایندهرود از رشته کوه‌های زاگرس در غرب ایران سرچشمه گرفته و سپس در حوضه جریان یافته و به تالاب گاوخونی در جنوب شرق استان اصفهان ختم می‌شود. ارتفاعات نقاط مختلف در حوضه متفاوت بوده و از ۱۴۴۶ متر تا ۳۹۲۵ متر متغیر است که همین امر منجر به رژیم‌های مختلف آب و هوایی در این حوضه می‌باشد. به‌طور کلی متوسط بارندگی سالانه در حوضه ۲۱۱ میلی‌متر است، در صورتی که در نقاط مختلف حوضه تفاوت زیادی در میزان بارش سالانه وجود دارد. همچنین متوسط سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه ۱۵۰۰ میلی‌متر است. متوسط دمای سالانه حوضه ۱۴/۵ درجه سلسیوس با کمترین دمای ۱۲/۵- درجه سلسیوس در دی ماه و بیشترین دمای

۴۳°C در تیرماه می‌باشد. Safavi et al., 2014 در مطالعه‌ای برای حوضه زایندهرود، ۱۱ سال خشک، چهار سال نرمال و شش سال تر را برای دوره سال‌های بین ۱۹۹۱ و ۲۰۱۱ تعیین کردند.

**داده‌ها و اطلاعات**

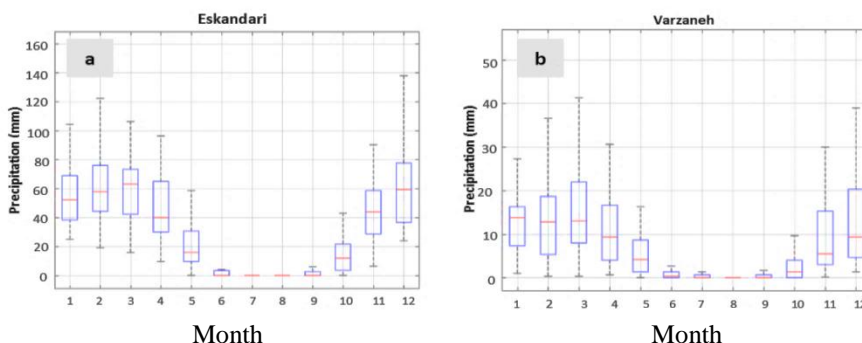
**داده‌های مشاهداتی**

به‌منظور انجام این مطالعه، داده‌های بارش ایستگاه‌های موجود در حوضه زایندهرود از سازمان هواشناسی ایران و وزارت نیرو اخذ شد. در میان ایستگاه‌های موجود، ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی با داده‌های ماهانه طی سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۸ انتخاب شدند. به‌منظور درک بهتر از الگوی بارش در حوضه دو ایستگاه مشخص در دو نقطه متفاوت در حوضه انتخاب شدند. یکی از ایستگاه‌ها در بالادست و دیگری در پایین‌دست حوضه قرار گرفته‌اند. شکل (۳) تغییرات ماهانه بارش را در دو ایستگاه منتخب نشان می‌دهد.



**Fig. 2- Geographic location of the ZayandehRoud basin, and the spatial distribution of the precipitation gauges**

**شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه زایندهرود و ایستگاه‌های باران‌سنجی**



**Fig. 3- Change in monthly precipitation during the past period (1979-2008): a) Eskandari station located at the upper part b) Varzaneh station located at the downstream**

**شکل ۳- تغییر در بارش ماهانه در طی سال‌های گذشته (۲۰۰۸-۱۹۷۹): (a) ایستگاه اسکندری در بالادست حوضه (b) ایستگاه ورزنه در پایین‌دست حوضه زایندهرود**

## تحلیل داده‌ها

پهنه‌بندی نتایج روی یک نقشه برای درک بهتر وضعیت حوضه بسیار مناسب و کمک‌کننده است. با استفاده از چنین نقشه‌ای بررسی و مطالعه وضعیت کلی حوضه و تشخیص قسمت‌های بحرانی‌تر حوضه ساده‌تر می‌باشد. بنابراین تصمیم‌گیرندگان براساس نقشه کلی از وضعیت حوضه، به‌راحتی می‌توانند منابع آب موجود را مدیریت کنند. از آنجایی که تعداد ۲۲ ایستگاه موجود درون حوضه برای تجزیه و تحلیل مکانی و تهیه نقشه مکانی نتایج، ناکافی هستند، تصمیم بر این شد که از داده‌های تاریخی موجود NEX-GDDP که برای ۵۷ شبکه درون حوضه موجود است، استفاده شود. بنابراین پس از تجزیه و تحلیل و مقایسه داده‌های مشاهداتی با داده‌های دانلود شده از NEX-GDDP برای ۱۵ مدل GCM تحت سناریوهای شبیه‌سازی شده، داده‌های دانلود شده به جای داده‌های مشاهداتی، برای تحلیل مکانی نتایج مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بررسی دقت داده‌های مدل‌های GCM استفاده شده، داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها با داده‌های متناظر مدل‌های GCM مقایسه شد.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، مدل CCSM4 کمترین میزان درصد تفاوت با داده‌های مشاهداتی را داشته و بنابراین داده‌های این مدل به‌منظور تجزیه و تحلیل پدیده خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های شبکه‌ای موجود از ۱۵ مدل GCM برای سال‌های آتی که از پایگاه داده NEX-GDDP دانلود شد. با کمک این داده‌ها بارش سالانه هر شبکه محاسبه شد. در هر شبکه متوسط بارندگی سالانه هر ۱۵ مدل GCM تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌طور جداگانه، به‌منظور ارزیابی روند بارندگی، محاسبه شد.

## نتایج و بحث

در این مطالعه، ۹۰ درصد بیشترین مقادیر شدت و مدت خشکسالی در پدیده‌های خشکسالی رخ داده در دوره تاریخی به‌عنوان خشکسالی شدید در حوضه در نظر گرفته شد. براین اساس، خصوصیات شدیدترین خشکسالی تاریخی که به‌عنوان معیار سنجش خشکسالی‌ها مدنظر قرار گرفت عبارتند از: شدت خشکسالی با مقدار SPI برابر با ۴/۳۹- و مدت خشکسالی برابر با شش ماه. با در نظر گرفتن این خصوصیات، دوره بازگشت خشکسالی برای تمامی نقاط شبکه‌ای درون حوضه برای دوره تاریخی (۱۹۷۹-۲۰۰۸)، دوره آینده نزدیک (۲۰۱۶-۲۰۵۷) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۵۸) محاسبه شد. نتایج حاصله از طریق روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)، در نرم‌افزار GIS بصورت نقشه‌های مکانی نمایش داده شد (شکل ۵). مقادیر کم بیانگر وقوع بیشتر خشکسالی است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل فراوانی به کمک تابع مفصل دو متغیره، دوره بازگشت وقوع شدیدترین خشکسالی در نقاط مختلف حوضه بین ۲ تا ۵۰۰ سال متغیر بود. به دلیل توپوگرافی متفاوت موجود در نقاط مختلف حوضه، این دامنه متفاوت از دوره بازگشت منطقی است. با توجه به شکل بدیهی است که بخش عمده حوضه از خشکسالی شدید در دوره تاریخی بین سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۸ (شدت خشکسالی کمتر از ۴/۳۹- و مدت خشکسالی بیش از شش ماه) با دوره بازگشتی کمتر از ۱۰ سال رنج می‌برد. این نتیجه با توجه به روند کاهشی بارش در این سال‌ها قابل قبول است.

## اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی تحت سناریوی RCP4.5

با توجه به گزارش ارزیابی پنجم منتشر شده توسط IPCC، سناریوی RCP4.5 نشان‌دهنده انتشار تثبیت شده گازهای گلخانه‌ای است. به کمک داده‌های مدل‌های تحت سناریوی RCP4.5 مقدار SPI برای تمامی نقاط شبکه‌ای درون حوضه محاسبه شد.

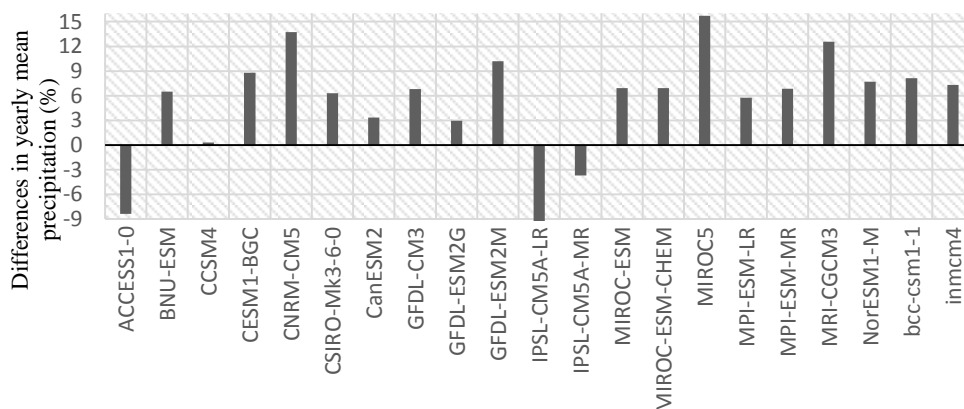
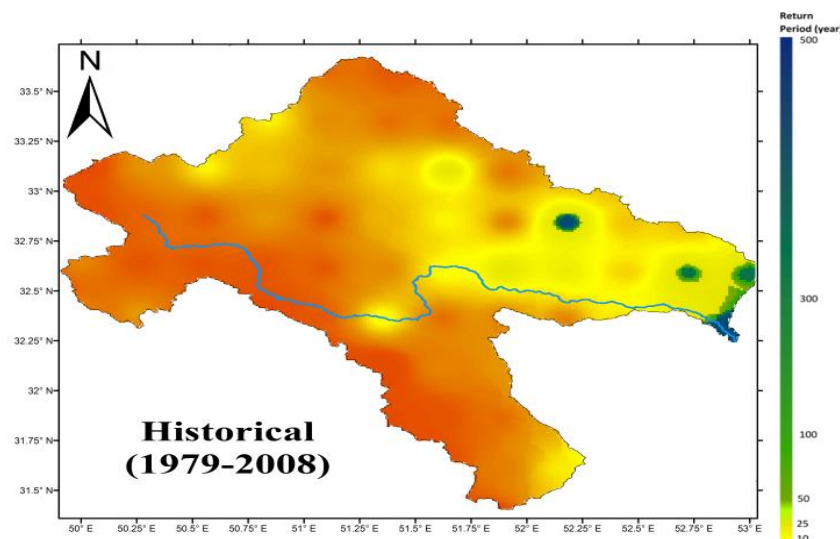


Fig. 4- Yearly mean precipitation differences of GCM models data with observation data in the basin

شکل ۴- درصد تفاوت بارش متوسط سالانه حاصله از داده‌های مدل‌های GCM با داده‌های مشاهداتی در حوضه



**Fig. 5-Return period of severe drought (severity equal to SPI value of -4.39 and duration equal to 6 months) based on results of bivariate copula of Severity-Duration- in the historical period (1979-2008)**  
**شکل ۵- پهنه‌بندی دوره بازگشت خشکسالی شدید (شدت خشکسالی با مقدار SPI برابر ۴/۳۹- و مدت خشکسالی ۶ ماه) بر اساس نتایج حاصل از تابع مفصل دو متغیره شدت-مدت در دوره تاریخی (۱۹۷۹-۲۰۰۸)**

کمتر از ۲۵ سال در آینده، تحت سناریوی RCP4.5 افزایش خواهد یافت.

#### اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5

اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی بر اساس داده‌های مدل‌های GCM تحت سناریوی RCP8.5 برای آینده دور در شکل (۷) نشان داده شده است.

دامنه تغییرات در دوره بازگشت محاسبه شده به کمک داده‌های مدل‌های GCM تحت سناریوی RCP8.5 در آینده دور بسیار متغیر و از حدود ۱۰ سال تا حدود ۴۰۰ سال متغیر است. برخی مدل‌ها دوره بازگشتی بیش از ۱۰۰ سال را پیش‌بینی می‌کنند. در مدل CESM1-BGC تقریباً تمامی بخش‌های حوضه دارای دوره بازگشت بیش از ۱۰۰ سال و حتی در برخی نواحی بیش از ۳۰۰ سال می‌باشد. مدل IPSL-CM5A-MR نیز برای نواحی بالادست حوضه دوره بازگشتی حدود ۵۰ سال پیش‌بینی می‌کند. به بیان دیگر بر اساس این دو مدل تحت سناریوی RCP8.5 روند افزایشی در بارش در طی آینده دور (۲۰۵۸-۲۰۹۹) قابل انتظار بوده و فراوانی وقوع خشکسالی شدید کمتر از دوره تاریخی خواهد بود. سایر مدل‌ها نیز دوره بازگشتی برابر با حدود ۲۵ سال برای خشکسالی شدید مد نظر برای حوضه پیش‌بینی می‌کنند.

تحلیل مکانی دوره بازگشت خشکسالی برای مدل‌های GCM مورد استفاده تحت سناریوی RCP4.5 برای دوره زمانی آینده دور (۲۰۵۸-۲۰۹۹) در شکل (۶) نشان داده شده است. در مدل GFDL-ESM2M تمامی حوضه در معرض خشکسالی شدید بوده و فراوانی وقوع خشکسالی شدید کمتر از پنج سال است. سایر مدل‌های GCM فراوانی وقوع کمتری برای خشکسالی شدید پیش‌بینی کرده و حتی در بعضی موارد دوره بازگشتی بیشتر از ۵۰ سال برای خشکسالی شدید محاسبه شده است. در مدل INMCM4 تمامی حوضه دارای فراوانی وقوع بیشتر از ۵۰ سال برای خشکسالی شدید می‌باشد. همچنین در مدل CNRM-CM5 افزایش دوره بازگشت در تقریباً تمامی قسمت‌های حوضه قابل مشاهده است.

با در نظر گرفتن نواحی بالادست و پایین‌دست حوضه، به نظر می‌رسد تفاوت چندانی در وضعیت خشکسالی بین آینده نزدیک و دور رخ نخواهد داد اما فراوانی وقوع خشکسالی شدید در حوضه در مقایسه با گذشته بر اساس مدل‌های GCM استفاده شده تحت سناریوی RCP4.5 کمتر خواهد بود. به بیان دیگر می‌توان گفت بارندگی در آینده نسبت به گذشته (۱۹۷۹-۲۰۰۸)، به میزان جزئی افزایش یافته و دوره بازگشت خشکسالی شدید از کمتر از ۱۰ سال در دوره تاریخی به

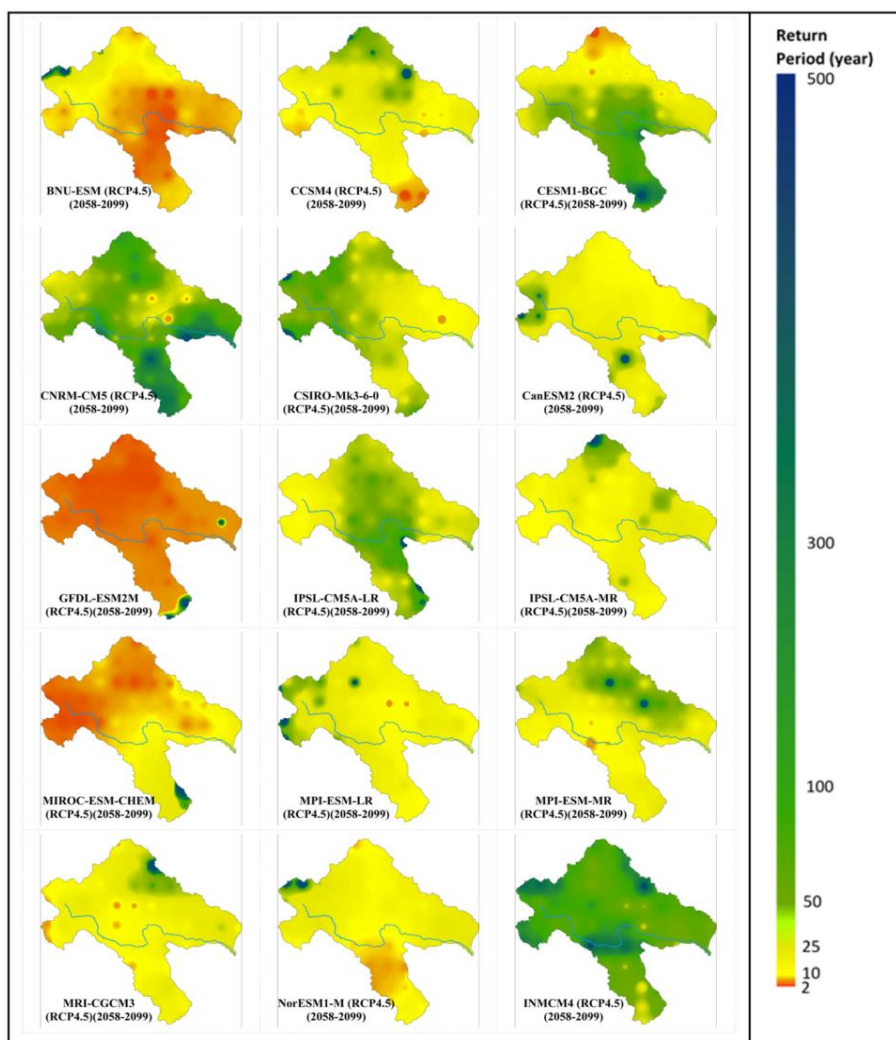


Fig. 6-Spatial analysis of return period based on bivariate copula of Severity-Duration in the far future (2058-2099) using 15 GCMs with RCP4.5 for severe drought (severity equal to SPI value of -4.39 and duration equal to 6)

شکل ۶- پهنه‌بندی دوره بازگشت خشکسالی شدید (شدت خشکسالی با مقدار SPI برابر ۴/۳۹- و مدت خشکسالی ۶ ماه) بر اساس نتایج حاصل از تابع مفصل دو متغییره شدت-مدت در دوره آینده دور (۲۰۵۸-۲۰۹۹) با استفاده از مدل‌های GCM تحت سناریوی RCP4.5

بازگشتی بیشتر از ۵۰ سال و حتی بیش از ۱۰۰ سال برای خشکسالی شدید در حوضه نشان می‌دهد. سایر مدل‌ها فراوانی وقوع کمتری برای خشکسالی شدید در حوضه در آینده دور را پیش‌بینی می‌کنند.

همان‌طور که در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است، مدل GFDL-ESM2M تحت سناریوی RCP4.5 خشکسالی شدیدتری نسبت به دوره تاریخی برای آینده دور در حوضه پیش‌بینی می‌کند. مدل‌های CNRM-CM5 و INMCM4 تحت سناریوی RCP4.5 و مدل CESM1-BGC تحت سناریوی RCP8.5 دوره

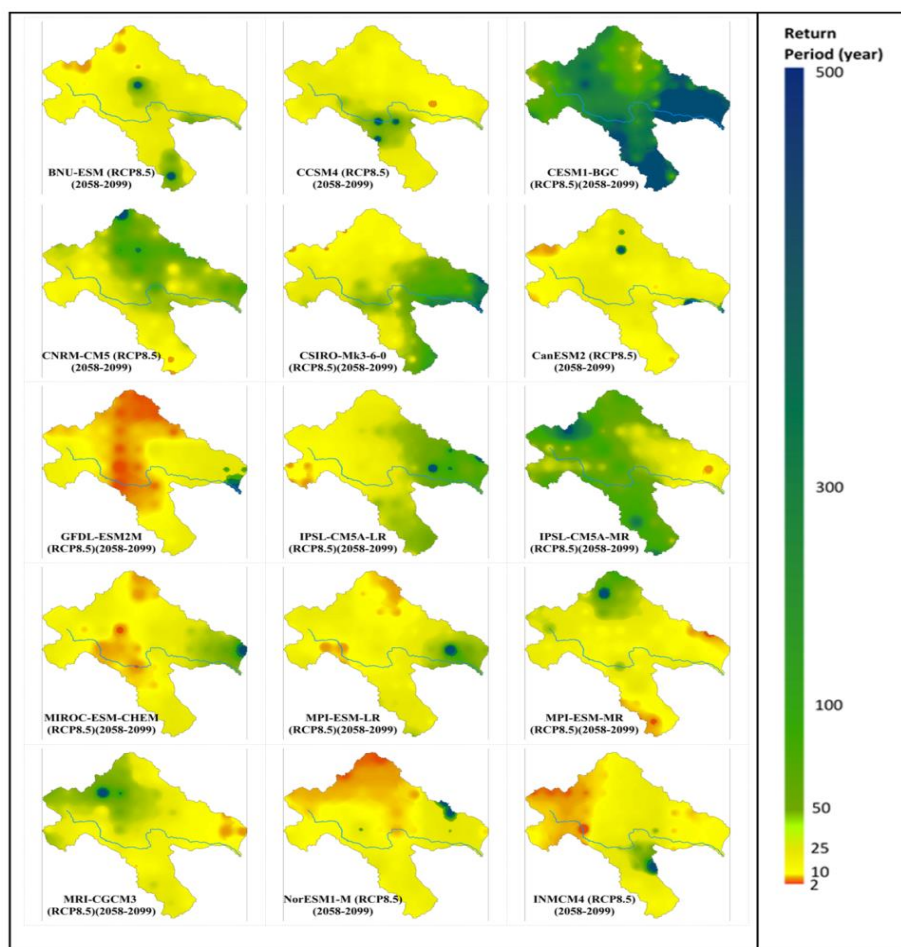


Fig. 7-Spatial analysis of return period based on bivariate copula of Severity-Duration in the far future (2058-2099) using 15 GCMs with RCP8.5 for severe drought (severity equal to SPI value of -4.39 and duration equal to 6)

شکل ۷- پهنه‌بندی دوره بازگشت خشکسالی شدید (شدت خشکسالی با مقدار SPI برابر ۴/۳۹- و مدت خشکسالی ۶ ماه) بر اساس نتایج حاصل از تابع مفصل دو متغیره شدت-مدت در دوره آینده دور (۲۰۵۸-۲۰۹۹) با استفاده از مدل‌های GCM تحت سناریوی RCP8.5

زاینده‌رود در ایران مورد استفاده قرار گرفت. مدت و شدت خشکسالی در حوضه برای دوره تاریخی (۱۹۷۹-۲۰۰۸) به کمک شاخص SPI محاسبه شد.

با محاسبه پدیده‌های خشکسالی رخ داده در حوضه، ۹۰ درصد از مدت و شدت خشکسالی‌های اتفاق افتاده در حوضه، به‌عنوان شدیدترین پدیده خشکسالی انتخاب شدند. مقادیر مربوطه عبارت بودند از: شدت خشکسالی با مقدار SPI برابر با ۴/۳۹- و مدت خشکسالی برابر با شش ماه.

به‌دلیل همبستگی زیاد بین خصوصیات خشکسالی، تابع دو متغیره مفصل به‌عنوان تابع اتصال دهنده برای ارزیابی دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید آبی در حوضه استفاده شد. سه نوع متداول تابع

### نتیجه‌گیری

خشکسالی یکی از پدیده‌های حدی است که اثرات آن در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی و منابع آب کاملاً مشهود است. با در نظر گرفتن تغییر اقلیم هم‌زمان با خشکسالی اثرات شدیدتری بسته به موقعیت و شرایط محیطی قابل درک است. بنابراین ضرورت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی برای مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شاخص‌های خشکسالی زیادی برای تشخیص و کمی کردن خشکسالی ارائه شده‌اند. یکی از این شاخص‌ها که در مطالعه‌های خشکسالی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، شاخص SPI می‌باشد. در این مطالعه نیز شاخص SPI به کمک تکنیک توابع مفصل برای ارزیابی خشکسالی‌های آبی در حوضه



بارش در آینده براساس مدل‌های GCM، با توجه به عدم قطعیت پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم، برنامه‌ریزی برای منابع آب موجود در حوضه برای مقابله با خشکسالی‌های طولانی مدت و شدید قابل توصیه است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از سازمان هواشناسی استان اصفهان که داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز را در اختیار این مطالعه قرار داده است، کمال تشکر را دارد. همچنین نویسنده مسئول از دانشگاه ویرجینیاتک در ایالات متحده امریکا که امکانات و فرصت انجام و تکمیل این مطالعه را در اختیار نویسنده قرار داده است، مراتب قدردانی خود را ابراز می‌دارد.

مفصل از خانواده ارشمیدسی (کلایتون، فرانک و گامبل) و دو تابع متدوال از خانواده بیضوی (t و نرمال) برای تشکیل تابع مفصل دو متغیره در این مطالعه انتخاب شدند. سپس بهترین تابع مفصل به روش BIC تعیین شده و اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی با استفاده از مدل GCM تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 محاسبه شد. دوره آینده دور (۲۰۵۸-۲۰۹۹) برای تعیین اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌های GCM تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 روند کاهشی یا افزایشی خاصی را برای بارش آینده در حوضه را نشان نمی‌دهند. همچنین با توجه به نتایج محاسبات انجام شده، دوره بازگشت خشکسالی در آینده دور برای حوضه نسبت به دوره تاریخی از مقدار کمتر از ۱۰ سال به حدود بیش از ۲۵ سال افزایش خواهد داشت. علیرغم روند افزایشی جزئی

### References

- 1- Abbasian, M., Jalali, S., Mousavi Nadoushani, S., 2014. Multivariate Flood Frequency Analysis Using Copula Function and Parametric and Nonparametric Margin Distributions. *Modares Civil Engineering Journal*, 14(4), pp.81-92. (In Persian).
- 2- Bazrafshan, J., Hojaji, S. and Hasheminasab, A., 2015. Impact of Future Climate Change on the Possibilities of Transferring Drought Classes in Iran's Limited Climate (Case study: Bandar Anzali and Bushehr stations). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(1), pp.131-150. (In Persian)
- 3- Chen L, Singh V.P, and Guo S. 2011. Drought Analysis Based on Copulas. *Symposium on Data-Driven Approaches to Droughts*, Paper 45.
- 4- Chen, L. Singh, VP. Guo, S. Mishra, AK. Guo, J. 2012. Drought analysis using copulas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18, pp.797-808.
- 5- Chen, YD. Zhang, Q. Xiao, M. Singh, VP, 2013. Evaluation of risk of hydrological droughts by the trivariate Plackett copula in the East River basin (China). *Natural Hazards*, 68, pp.529-47.
- 6- Eghtedarnejad, M., Bazrafshan, A., Sadeghi Lari, A., 2016. In the analysis of meteorological drought characteristics and SDI and RDI, SPI and Comparative Evaluation of Hydrological Indices (Case Study: Bam Plain). *Water and Soile Science*, 26(2), pp.69-81. (In Persian).
- 7- Golian, S., 2010. Flood Prediction Using Rainfall Threshold Method Based on Spatial Distribution. Thesis, *AmirKabir Tecnology University of Tehran*, Iran. (In Persian).
- 8- Hoffman, MT. Carrick, P. Gillson, L. West, A. 2009. Drought, climate change and vegetation response in the succulent karoo, South Africa. *South African Journal of Science*, 105, pp.54-60.
- 9- Kirono, D. Kent, D. Hennessy, K. Mpelasoka, F. 2011. Characteristics of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions: Results from 14 global climate models. *Journal of Arid Environments*, 75, pp.566-75.
- 10- Kouchaki, A., Nasiri, M. and Kamali, G., 2007. Study of Iran Index in Climate Change Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 5(1), pp.133-142. (In Persian).
- 11- Lee, T. Modarres, R. Ouarda, T. 2013. Data-based analysis of bivariate copula tail dependence for drought duration and severity. *Hydrological Processes*, 27, pp.1454-63.

- 12-Li, C. Singh, VP. Mishra, AK. 2013. A bivariate mixed distribution with a heavy-tailed component and its application to single-site daily rainfall simulation. *Water Resources Research*, 49, pp.767-89.
- 13-Madadgar, S. Moradkhani, H. 2011. Drought analysis under climate change using copula. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18, pp.746-59.
- 14-Mahsafari, H., 2011. Climate change effects on Water Bill on Lake Urmia. *Iran Water Resources Research*, 7(1), pp.47-58. (In Persian).
- 15-McKee, TB. Doesken, NJ. Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proc. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society Boston. MA. 17:179-83.
- 16-Mirabbasi, R. Anagnostou, E. N. Fakheri-Fard, A. Dinpashoh, Y. Eslamian, S. 2013. Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology*, 492, pp.35-48.
- 17-Mousavi, S-F. 2005. Agricultural drought management in Iran. Proc. Water Conservation, Reuse, and Recycling: Proceedings of an Iranian-American Workshop. National Academies Press, pp.106-13.
- 18-Naserzadeh, M., Ahmadi, A., 2012. Performance Evaluation of Meteorological Drought Indicators in Drought Evaluation and its Zoning in Qazvin Province. *Scientific Journals Management System*, 12(162), pp.27-141. (In Persian).
- 19-Nelsen, RB. 2007. *An introduction to copulas*. Springer Science & Business Media.
- 20-Safavi, HR. Esfahani, MK. Zamani, AR. 2014. Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran. *Water Resources Management*, 28, pp.1671-88.
- 21-Selvaraju, R. Baas, S. 2007. *Climate Variability and Change: Adaptation to Drought in Bangladesh: a Resource Book and Training Guide*. Food & Agriculture Org.
- 22-Serinaldi, F. Bonaccorso, B. Cancelliere, A. Grimaldi, S. 2009. Probabilistic characterization of drought properties through copulas. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 34, pp.596-605.
- 23-Shiau, J. 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, 20, pp.795-815.
- 24-Thrasher, B. Xiong, J. Wang, W. Melton, F. Michaelis, A. Nemani, R. 2013. Downscaled climate projections suitable for resource management. *Eos. Transactions American of Geophysical Union*, 94, pp.321-3.
- 25- Wayne, G. 2013. *The beginner's guide to representative concentration pathways*. skeptical science. Version 1.0. <http://www.skepticalscience.com/rcp.php>.
- 26-Xu, K. Yang, D. Xu, X. Lei, H. 2015. Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China. *Journal of Hydrology* 527:630-40.
- 27-Yan, J. 2007. Enjoy the joy of copulas: with a package copula. *Journal of Statistical Software*, 21, pp.1-21.
- 28-Yang W. 2010. Drought analysis under climate change by application of drought indices and copulas, Dissertations and Theses, *Portland State University*, Portland. 716P.
- 29-Yevjevich, VM. 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers (Colorado State University)*.no. 23.