

EXTENDED ABSTRACT

Determination of Optimum Two-Dimensional Copula Functions in Analyzing Groundwater Changes Using Meta Heuristic Algorithms

M. Nazeri Tahroudi¹, Y. Ramezani^{2*}, C. De Michele³ and R. Mirabbasi⁴

1- Ph.D Student of Water Resources Management, University of Birjand, Iran.

2* - Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Iran. (y.ramezani@birjand.ac.ir)

3- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Italy.

4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 October 2019

Revised: 31 December 2019

Accepted: 4 January 2020

Keywords:

Copula, Joint Analysis, Lake Urmia, Rainfall Deficiency, Water Resources signatures.

TO CITE THIS ARTICLE :

Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., Mirabbasi, R. (2021). 'Determination of Optimum Two-Dimensional Copula Functions in Analyzing Groundwater Changes Using Meta Heuristic Algorithms', *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(1), pp. 93-109. doi: 10.22055/jise.2020.31289.1882.

Introduction

One of the important factors in recharging the groundwater aquifers in each region is rainfall. Reducing rainfall, and even extreme values of it, can have a huge impact on reducing groundwater levels, which can cause serious damage to aquifers and their construction. Hydrological frequency analysis methods mainly consist of two steps, including selection of an appropriate sample distribution and estimation of selected distribution parameters. Using distribution functions for univariate hydrological analysis has been discussed by many researchers. Different probability distribution models have been used in hydrological studies including the two-parameter distribution such as those by Gumbel, Weibull, Gamma, and Lognormal in several studies (Du et al., 2005; Giraldo Osorio & García Galiano, 2012; Jiang et al., 2015; Villarini, 2009), the distribution of three parameters, such as GEV in other studies (Cannon, 2010; El Adlouni et al., 2007), and the Pearson-type III distribution in the studies by Chen et al., (2010, 2015). Therefore, due to the importance of drought and its effects on groundwater level, there are two objectives in this paper. The first is to investigate the artificial intelligence methods and meta-heuristic algorithms to determine the parameters of the copula functions, and the second is the bivariate analysis of precipitation and groundwater shortage signatures in the Nazloochai sub-basin located in the west of Lake Urmia.

Materials and Methods

In this study, monthly precipitation and groundwater level data for the period 2003-2016 were used. Precipitation and groundwater shortage data were extracted in a continuous duration of up to 30 days using the equation proposed by Nazeri Tahroudi et al. (2019). In the conventional method of estimating the return period of the extreme values, different statistical distributions are fitted to the data series.

After fitting the statistical distributions to the data series, the fit of each distribution should be examined by Kolmogorov-Smirnov test. The probability distribution is accepted if the significance level of 5% is confirmed by the Kolmogorov-Smirnov test. Also, Copula function was used to fit the two-dimensional of signature. In this research, genetic algorithms, grasshopper optimization, multiverse, particle swarm and whale algorithms were used to estimate the parameters of the copula functions to be compared with IFM algorithm.

Results and Discussion

The results of comparing different algorithms and the common method of estimating the parameters of the copula functions indicated that based on the root mean square error, the usual IFM method is more accurate than the meta-heuristic algorithms. The results also showed that among the genetic algorithms, grasshopper optimization, multi-verse, particle swarm, and whale optimization, the genetic algorithm provided relatively higher accuracy. However, the accuracy of all these algorithms was the same and about 0.2. The results showed that the Gumbel-Hougaard copula showed more accuracy for two-dimensional analysis of the deficiency signature in the basin with 131% superiority of IFM method than other algorithms to investigate the copula parameter. The results of the two-dimensional analysis of the investigated signatures showed that with increasing precipitation reduction signature, the probability of increasing groundwater drop signature increases significantly. By examining the conditional return period of groundwater deficiency signature and taking into consideration the rainfall deficiency signature during a 30-day continuous duration, a drop of 0.6 m / year can be observed with 90% probability of minimum groundwater level .

Conclusion

The results of the meta-heuristic algorithms in parameter estimation of the copula functions indicated that all of the mentioned algorithms achieved their optimality after a maximum of 45 iteration. The results also showed that the accuracy of all the algorithms evaluated in parameter estimation of the various copula functions were almost identical and all the algorithms introduced the Ali-Mikhail-Haq copula function as the superior copula function. The findings showed that IFM method was better than other algorithms in estimating the parameter of copula functions. The IFM method based on the RMSE and NS values introduced the Gamble-Hoagard copula function as the superior copula function. The results of the accuracy of different methods in estimating the joint parameters showed that IFM method improves the accuracy of the Copula parameter estimation by about 131% compared to the best algorithm (GA). The results of evaluating the return period of the studied signatures showed an increase in the signature return period in the "and" mode, which means that the probability of simultaneous occurrence of two signatures in the study area increases with respect to the "or" mode. The results of exceedance probability of studied signatures showed that by increasing precipitation shortage signature, the probability of groundwater level shortage signature is also increased so that with probabilities of 10% to 90%, it can be possible to estimate incremental values of groundwater shortage signature due to precipitation shortage signature. The results showed that given the prevailing conditions in the region and the 30-day continuous precipitation shortage signature, the groundwater level of the study area would decrease by 0.6 to 1 m, with a probability of 90 to 50%, respectively. Of course, this is mentioned in the two-year return period, which is not unexpected.

Aknowlegment

This article is part of the first author's doctoral dissertation at the University of Birjand, Therefore, the authors are thankful to the University of Birjand, Birjand, Iran.

References

- 1- Cannon, A.J., 2010. A flexible nonlinear modelling framework for nonstationary generalized extreme value analysis in hydroclimatology. *Hydrological Processes*, 24, pp. 673–685.
- 2- Chen, L., Guo, S., Yan, B., Liu, P. and Fang, B., 2010. A new seasonal design flood method based on bivariate joint distribution of flood magnitude and date of occurrence, *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), pp. 1264–1280.
- 3- Chen, L., Singh, V.P., Guo, S. and Zhou, j., 2015. Copula-based method for multisite monthly and daily streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, 528, pp. 369–384
- 4- Du, T., Xiong, L., Xu, C.Y., Gippel, C.J., Guo, S. and Liu, P., 2015. Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change, *Journal of Hydrology*, 527, pp. 234–250.
- 5- El Adlouni, S., Ouarda, T., Zhang, X., Roy, R. and Bobée, B., 2007. Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model, *Water Resources Research*, 43(3), pp. 1–13.
- 6- Giraldo Osorio, J.D. and García Galiano, S.G., 2012. Non-stationary analysis of dry spells in monsoon season of Senegal River Basin using data from regional climate models (RCMs), *Journal of Hydrology*, 45, pp. 82–92.
- 7- Jiang, C., Xiong, L., Xu, C.Y. and Guo, S., 2015. Bivariate frequency analysis of nonstationary low-flow series based on the time-varying copula, *Hydrological Processes*, 29(6), pp. 1521–1534.
- 8- Villarini, G., Serinaldi, F., Smith, J.A. and Krajewski, W.F., 2009. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century, *Water Resources Research*, 45, pp. 1–17.
- 9- Nazeri Tahroudi, M., Pourreza-Bilondi, M. and Ramezani, Y., 2019. Toward coupling hydrological and meteorological drought characteristics in Lake Urmia Basin, Iran, *Theoretical and Applied Climatology*,



تعیین توابع مفصل دو بعدی بهینه در تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

محمد ناظری تهرودی¹، یوسف رضضانی²، کارلو دی میکله³ و رسول میرعباسی⁴

1- دانش آموخته دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

2- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند y.ramezani@birjand.ac.ir

3- استاد گروه عمران، دانشگاه پلی تکنیک میلان.

4- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهر کرد.

تاریخ پذیرش: 1398/10/14

بازنگری: 1398/10/10

دریافت: 1398/7/25

چکیده

کاهش بارش‌ها و حتی حدی شدن آن‌ها می‌تواند تأثیرات زیادی در کاهش سطح آب زیرزمینی داشته باشد که در پی آن آسیب‌های جدی به سفره‌ها و ساختمان آن‌ها وارد می‌شود. در این مطالعه ضمن بررسی روش‌ها و الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف برآورد و تخمین توابع مفصل دو بعدی سیگنال‌های کمبود بارش و سطح آب زیرزمینی در محدوده زیرحوضه ایستگاه هیدرومتری تپیک در حوضه آبریز نازلوجای در دوره آماری 95-1382 پرداخته شد. نتایج مقایسه الگوریتم‌های مختلف و روش معمول تخمین پارامترهای توابع مفصل نشان داد که بر اساس معیار جذر میانگین مربعات خطا، روش معمول IFM نسبت به الگوریتم‌های فراابتکاری از دقت بالاتری در برآورد ضریب مفصل‌های مورد استفاده برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که از بین الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌یاب ملخ، چندجهانی، ازدحام ذرات و بهینه‌یاب نهنگ، الگوریتم ژنتیک دقت به نسبت بالاتری را ارائه نموده و دقت تمامی این الگوریتم‌ها یکسان و در حدود 0/2 بود. با نسبت برتری 131 درصد روش IFM نسبت به الگوریتم‌های مورد بررسی نتایج نشان داد که مفصل گامبل-هوگارد دقت قابل قبولی برای تحلیل دو بعدی سیگنال‌های کمبود در منطقه دارد. نتایج تحلیل دو بعدی سیگنال‌های مورد بررسی نشان داد که با افزایش سیگنال کاهش بارش، احتمال افزایش سیگنال افت سطح آب زیرزمینی نیز به شدت افزایش می‌یابد. با بررسی دوره بازگشت شرطی سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی و با در نظر گرفتن سیگنال کمبود بارش در مدت دوام پیوسته سی روزه می‌توان با احتمال 90 درصد، شاهد حداقل افت سطح آب زیرزمینی برابر با 0/6 متر در سال بود.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، تحلیل توام، دریاچه ارومیه، سیگنال منابع آب، کمبود بارش، مفصل.

مقدمه

مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین این‌که آیا مدل توزیع آماری می‌تواند به‌طور مناسب با سری داده‌ها برازش یابد، می‌توان از آزمون‌های مناسبی از قبیل اندرسون دارلینگ (Anderson-Darling)، کلموگروف - اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) و Chi-square) استفاده کرد.

در یک دهه گذشته، توابع مفصل برای تجزیه و تحلیل هیدرولوژیک چندمتغیره استفاده شده است. Favre et al. (2004) برای توصیف وابستگی بین حداکثر و حجم جریان از مفصل‌های دومتغیره استفاده کردند. Shiau et al. (2006) فراوانی دوبعدی توام حداکثر و حجم سیل را بررسی کردند. Zhang و Singh (2006) برای توزیع دوجانبه دبی حداکثر و حجم سیلاب، حداکثر سیل و مدت دوام آن و حجم سیلاب و مدت دوام آن از توابع ارشمیدس استفاده نمودند. Grimaldi

روش‌های تجزیه و تحلیل فراوانی هیدرولوژیک عمدتاً شامل دو مرحله شامل انتخاب توزیع نمونه مناسب و برآورد پارامترهای توزیع انتخاب شده است. استفاده از توابع توزیع برای تجزیه و تحلیل هیدرولوژیک تک‌متغیره توسط بسیاری از تحقیقات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مدل‌های توزیع احتمالی متعدد در مطالعات فراوانی هیدرولوژیک شامل توزیع دو پارامتر مثل گامبل (Gumbel)، ویبول (Weibull)، گاما (Gamma) و لاگ نرمال (Lognormal) در مطالعه‌های (Du et al. 2015)؛ Giraldo Villarini et al. (2012)؛ Jiang et al. (2015)؛ Osorio et al. (2009) و توزیع سه پارامتر، مثل GEV در مطالعه‌های Cannon et al. (2010)؛ El Adlouni et al. (2007) و توزیع پیرسون نوع سه در مطالعه‌های (Chen et al. 2010 & 2015)

می‌شود. لذا با توجه به اهمیت خشک‌سالی و اثرات آن بر سطح آب زیرزمینی، در این مقاله ضمن معرفی سیگنال‌های کمبود سطح آب زیرزمینی و کمبود بارش، دو هدف مد نظر می‌باشد. نخست بررسی روش‌های هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری در تعیین پارامترهای توابع مفصل و در جایگاه دوم، تحلیل دومتغیره سیگنال‌های کمبود بارش و کمبود سطح آب زیرزمینی در زیرحوضه نازلوچای واقع در غرب دریاچه ارومیه اهداف این تحقیق می‌باشند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه نازلوچای در قسمت غربی دریاچه ارومیه واقع شده و از نظر وسعت سومین زیرحوضه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. حدود جغرافیایی آن از شمال به زیرحوضه زولاچای، از جنوب به زیرحوضه مهابادچای، از غرب به کشور ترکیه و از شرق به دریاچه ارومیه محصور می‌گردد و بین 44 درجه و 25 دقیقه تا 45 درجه و 26 دقیقه طول شرقی و 37 درجه و 06 دقیقه تا 38 درجه و 07 دقیقه عرض شمالی قرار دارد. رودخانه‌های این زیرحوضه در جلگه ارومیه و اراضی نسبتاً مسطح و دشتی آن جریان دارند و منبع تغذیه آن‌ها نزولات جوی و برف‌های انباشته شده در ارتفاعات می‌باشد. مساحت زیرحوضه نازلوچای 5100 کیلومتر مربع است که از این مقدار 3262/5 کیلومتر مربع در سطوح ارتفاعی 900 تا 1800 متر، 1712/5 کیلومتر مربع در سطوح ارتفاعی 1800 تا 2700 متر و 125 کیلومتر مربع در سطوح ارتفاعی بالاتر از 2700 متر واقع شده است. از رودخانه‌های مهم آن می‌توان به نازلوچای به طول 95 کیلومتر، شهرچای (78 کیلومتر)، باراندوزچای (65 کیلومتر)، روضه‌چای (56 کیلومتر)، شیوبرو (54 کیلومتر) و برادوست (35 کیلومتر) اشاره نمود. در این مطالعه از داده‌های بارش و سطح آب زیرزمینی در مقیاس ماهانه در دوره آماری 95-1382 استفاده شد. موقعیت حوضه آبریز نازلوچای و ایستگاه‌های هواشناسی و پیژومتری مورد مطالعه به شرح شکل (1) قابل مشاهده می‌باشد. متوسط بارندگی ماهانه در ایستگاه مورد بررسی 86/45 میلی‌متر و متوسط تبخیر تعرق پتانسیل حدود 150 میلی‌متر در ماه است.

استخراج سیگنال‌های منابع آب

مقادیر کمبود بارش و سطح آب زیرزمینی تا مدت دوام پیوسته سی روزه براساس رابطه پیشنهادی Nazeri Tahroudi et al (2019) استخراج گردید. مقادیر تولیدشده از این پس با نام "سیگنال" یاد می‌شوند. سیگنال کمبود به‌عنوان یک بازه یاد می‌شود که در آن پارامتر مورد نظر نسبت به میانگین بلند مدت کمتر می‌باشد. میانگین بلند مدت روزانه (Mean individual -MIDL -daily long-term period) برای مقادیر بارش و سطح آب زیرزمینی برای هر 365 روز سال (به‌عنوان مثال: داده‌های 1382 تا 1395) به شرح رابطه (1) استخراج می‌گردد (Nazeri Tahroudi et al. 2019).

Serinaldi (2006 a, b) یک توزیع سه‌بعدی متغیرهای رویداد سیل را با استفاده از توابع مختلط ارشمیدسی به‌طور کامل و یا نامتقارن ساخته و شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای را برای برجسته کردن تفاوت‌ها با همبستگی‌های مشهور متقارن ارشمیدسی انجام داده‌اند. Salvadori و De Michele (2007) برخی از پیشرفت‌های مدل‌سازی هیدرولوژیک مانند محاسبه احتمالات شرطی و دوره‌های بازگشت دو رویداد را ارائه دادند که از توابع مفصل استفاده شده است. Zhang و Singh (2007a) از تابع مفصل گامبل هوگارد (Gumbel-Hougaard) برای بررسی توزیع سه‌گانه‌ای از دبی حداکثر، حجم و مدت سیلاب بهره بردند. Govindaraju و Kao (2007) یک تابع غیر ارشمیدسی از خانواده توزیع پلاکت (Plackett) را مورد بررسی قرار دادند و آن را برای توزیع زمانی حوادث بارش حدی به‌کار بردند. Serinaldi et al. (2009) توابع مفصل را جهت تحلیل احتمالاتی ویژگی‌های خشک‌سالی استفاده کردند. از توابع مفصل در هیدرولوژی و منابع آب در موضوعات مختلف استفاده شده است. به‌طور مثال در تجزیه و تحلیل فراوانی بارندگی De Michele و Salvadori (2003)؛ Grimaldi و Serinaldi (2006a)؛ Govindaraju و Kao (2007)؛ Zhang و Singh (2007a)؛ Kuhn et al (2007)؛ Keef et al (2009)، تحلیل فراوانی سیل Favre et al (2004)؛ Shiau et al (2006)؛ Singh و Zhang (2006) و (2007b)؛ Xiao et al (2007)؛ Lang و Renard (2009)؛ تحلیل فرکانس خشک‌سالی Shiau (2006)؛ Kao و Govindaraju (2010)؛ Singh (2010)، تحلیل طوفان‌های دریایی De Michele et al (2007)؛ شبیه‌سازی جریان Chen et al (2010)، و برخی دیگر از تحلیل‌های نظری موضوعات حدی چندمتغیره Salvadori et al (2007)؛ De Michele و Salvadori (2010).

Vaziri et al (2018) با استفاده از توابع مفصل به بررسی خصوصیات خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوضه آبریز تجن در دوره آماری 1974-2014 پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که توزیع آماری دومتغیره (مدت و شدت) می‌تواند برای تجزیه و تحلیل احتمال خشک‌سالی هیدرولوژیک در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. Hui-Mean et al (2019) نیز از توابع مفصل سه‌متغیره به بررسی همبستگی بین خصوصیات خشک‌سالی در مالزی استفاده نمودند. نتایج دوره بازگشت مشترک نشان داد که منطقه غربی شبه‌جزیره مالزی انتظار می‌رود در شرایط مختلف تکرار خشک‌سالی داشته باشد. هم‌چنین آن‌ها بیان داشتند که این نتایج قادر به توصیف هم‌زمان سه ویژگی خشک‌سالی است و در مقایسه با روش فعلی که از یک متغیر واحد استفاده می‌شود، مفیدتر است. بنابراین، توابع مفصل ابزار بسیار مفید و موثر برای تجزیه و تحلیل هیدرولوژیک چندمتغیره و شبیه‌سازی است.

با توجه به اطلاعات ارائه شده، لزوم استفاده از توابع مفصل بیش از پیش در تحلیل چندمتغیره پارامترهای مختلف احساس

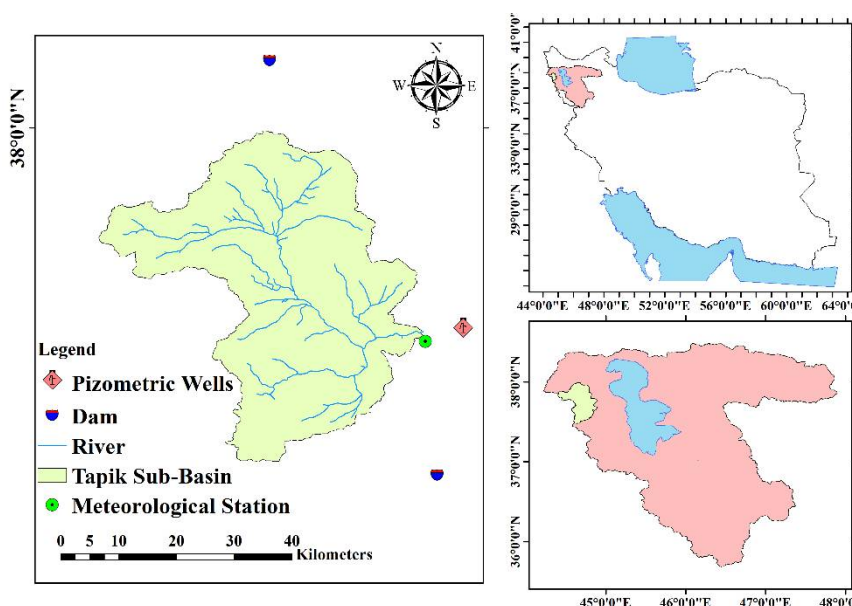


Fig. 1- Location of studied stations in Nazloochoi sub-basin
 شکل 1- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده زیر حوضه نازلوچای

$$\text{MIDL}P = \text{مقدار پارامتر مورد بررسی در 1 مهر 1382} + \dots + \text{مقدار پارامتر مورد بررسی در 1 مهر 1395} \quad (1)$$

تعداد سال‌های مورد بررسی

در سطح احتمال پنج درصد برآزش مدل‌ها توسط آزمون K-S مورد تایید واقع شود، توزیع احتمالاتی مورد نظر از نظر آماری قابل پذیرش است (Salvadori and De Michele, 2007).

توابع مفصل و تئوری اسکالر

مفصل‌ها یک شیوه انعطاف‌پذیر برای ایجاد توزیع‌های توأم آماری با توابع توزیع حاشیه‌ای متفاوت می‌باشند. مفصل‌ها توابع توزیع چندمتغیره هستند که حاشیه‌های یک‌بعدی آن‌ها بر بازه (یک و صفر) یکنواخت باشند. معرفی و ارایه مفصل به Sklar (1959) نسبت داده شده است که در یک تئوری توصیف می‌کند چگونه توابع توزیع تک‌متغیره می‌توانند به فرم توزیع‌های چندمتغیره ترکیب شوند. اسکالر نشان داد که برای متغیرهای تصادفی پیوسته d بعدی $\{X_1, \dots, X_d\}$ با CDF های حاشیه‌ای $u_j = F_{X_j}(x_j)$ که $j=1, \dots, d$ ، یک مفصل d بعدی یکتای C_{U_1, \dots, U_d} وجود دارد به طوریکه:

$$C_{U_1, \dots, U_d}(U_1, \dots, U_d) = H_{X_1, \dots, X_d}(X_1, \dots, X_d) \quad (3)$$

که در آن U_j ، ژامین حاشیه و H_{X_1, \dots, X_d} همان CDF توأم

برای هر پارامتر، 365 مقدار MIDLP استخراج شده و سپس این مقادیر از داده‌های متناظر خود کسر شده و سری جدید محاسبه می‌شود. با محاسبه مجموع متحرک این مقادیر، سیگنال‌های کمبود در مدت دوام‌های مختلف حاصل می‌شود.

انتخاب توزیع‌های حاشیه‌ای

در روش متداول برآورد دوره بازگشت مقادیر حدی، توزیع‌های آماری مختلف بر سری داده‌های مورد بررسی برآزش داده می‌شود. پس از برآزش توزیع‌های آماری روی سری داده‌ها، می‌بایست نکویی برآزش هر توزیع توسط آزمون کلمگروف - اسمیرنوف مورد بررسی قرار گیرد. در صورتی که در سطح معنی‌داری پنج درصد برآزش مدل‌ها توسط آزمون کلمگروف - اسمیرنوف مورد تایید واقع شود، توزیع احتمالاتی مورد نظر پذیرفته می‌شود. آماره آزمون کلمگروف - اسمیرنوف به شرح رابطه (2) تایید شد.

$$D_{\max} = \max\{|F(x_i) - G(x_i)|, |F(x_{i+1}) - G(x_i)|\} \quad i \leq n \leq n-1 \quad (2)$$

در رابطه فوق، D_{\max} میزان انحراف حداکثر بین CDF نظری $(F(x))$ و تجربی $(G(x))$ و n تعداد داده‌های مشاهداتی است. تابع CDF تجربی از رابطه ویبول تعیین شده است. در صورتی که

$f_{X,Y}(x,y)$ به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\begin{aligned} & Ln L(x,y;\hat{\alpha}_1,\hat{\alpha}_2,\dots,\hat{\alpha}_p,\hat{\gamma}_1,\hat{\gamma}_2,\dots,\hat{\gamma}_r,\theta) \\ & = Ln L_C(x,y;F_X(x),F_Y(y),\theta) + \\ & Ln L_X(x;\hat{\alpha}_1,\hat{\alpha}_2,\dots,\hat{\alpha}_p) \\ & + Ln L_Y(y;\hat{\gamma}_1,\hat{\gamma}_2,\dots,\hat{\gamma}_r) \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن $Ln L_C$ تابع لگاریتم درست‌نمایی تابع چگالی مفصل‌ها می‌باشند. با جاگذاری مقادیر تخمین زده شده برای $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_p$ و $\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \dots, \hat{\gamma}_r$ در معادله (5)، تابع لگاریتم درست‌نمایی $Ln L$ برای به دست آوردن پارامتر مفصل تخمینی $\hat{\theta}$ حداکثر می‌شود. برای انتخاب مناسب‌ترین مفصل، پارامتر تابع مفصل با روش مرسوم IFM و الگوریتم‌های فرابکار برآورد و مقایسه می‌گردد. در این خصوص، مفصل‌های عل-میخاییل-حق، کلایتون، فرانک، گالامبوس، گامبل هوگارت، پلاکت و فارلی-گامبل-مورگنستن مورد بررسی قرار گرفتند (Brunner et al. 2016).

برای مقایسه نتایج و ارایه مفصل بهینه از مفصل تجربی استفاده گردید. برای یک مورد توأم دوبعدی، مفصل تجربی داده‌های مشاهده شده (u_i, v_i) به شرح زیر است:

$$C_e(u_i, v_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I \left(\frac{Q_i}{n+1} \leq u_i, \frac{P_i}{n+1} \leq v_i \right) \quad (6)$$

که در رابطه بالا C_e برابر با مفصل تجربی، n تعداد مشاهدات و $I(A)$ پارامتر شاخص (Indicator variable) عبارت منطقی A است. چنانچه عبارت A صحیح باشد، مقدار یک و اگر نادرست باشد مقدار صفر را اختیار می‌کند. P_i و Q_i رتبه داده مشاهداتی i ام مربوط به حجم کمبود سطح و حجم کمبود بارش می‌باشد. تحلیل فراوانی دومتغیره در مورد دو متغیر تصادفی هم‌بسته به‌وسیله دوره بازگشت توأم تعریف می‌گردد. دوره‌های بازگشت توأم در دو حالت تعریف شده‌اند: دوره بازگشت توأمی که در آن مقدار مشاهده شده از X یا از Y تجاوز نموده باشد (یعنی، $X > x$ یا $Y > y$) که با T_{XY} نشان داده می‌شود و دوره بازگشت توأمی که در آن جفت مشاهده شده هم از X و هم از Y تجاوز نموده باشد (یعنی، $X > x$ و $Y > y$) که با T'_{XY} نشان داده می‌شود.

$\{X_1, \dots, X_d\}$ می‌باشد. چون برای متغیرهای تصادفی پیوسته تابع CDF حاشیه‌ها از صفر تا یک غیر کاهشی می‌باشند، می‌توان مفصل C_{U_1, \dots, U_D} را به‌عنوان تبدیل H_{X_1, \dots, X_D} از $[-\infty, \infty]^d$ به $[0, 1]^d$ در نظر گرفت. نتیجه این تبدیل این است که توزیع‌های حاشیه‌ای از H_{X_1, \dots, X_D} جدا می‌گردند و بنابراین، C_{U_1, \dots, U_D} تنها به ارتباط بین متغیرها مربوط می‌شوند و توصیف کاملی از ساختار وابستگی کلی ارایه می‌دهند (Mirabbasi et al. 2013). در این مطالعه از هفت تابع مفصل مختلف به شرح جدول (1) به منظور تحلیل دومتغیره کمبود بارش و سطح آب زیرزمینی استفاده گردید. برازش و انتخاب تابع مفصل در ابتدا به تعیین میزان وابستگی دو متغیر مورد بررسی بستگی دارد. در این مطالعه میزان وابستگی داده‌های مورد مطالعه با استفاده از روش کندال تاو (τ Kendall's) محاسبه گردید.

$$\tau = \left(\frac{N}{2} \right)^{-1} \sum_{i < j} \text{sign} \left[(x_i - x_j)(y_i - y_j) \right] \quad (4)$$

که در رابطه فوق، N تعداد داده‌ها، $\text{sign}()$ تابع علامت و x و y جفت داده‌های مشاهداتی برای مقادیر یاد شده می‌باشد. برای تخمین پارامتر وابستگی مفصل در این مطالعه از روش توابع منطقی برای حاشیه‌ها (Inference Functions for Margins -IFM) که متداول‌ترین روش برای تخمین پارامترهای مفصل می‌باشد، استفاده گردید (Joe, 1997). هم‌چنین سعی شد دقت الگوریتم‌های فرا-ابتکاری نیز در تخمین پارامترهای مفصل‌ها مورد بررسی و آزمون قرار گیرد. برای موارد دو متغیره، فرض شد دومتغیر تصادفی هم‌بسته X و Y به ترتیب به‌صورت توابع $f_X(x; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$ و $f_Y(y; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ توزیع شده‌اند که پارامترهای $f_X(x)$ و $f_Y(y)$ پارامترهای $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ و $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ هستند. تعداد واقعی پارامترها بستگی به نوع توزیع‌های حاشیه‌ای تک‌متغیره دارد. برای n جفت مشاهده مستقل، تابع لگاریتم درست‌نمایی برای X و Y یعنی $\ln L_X(x; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$ و $\ln L_Y(y; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ به‌طور مجزا جهت تخمین پارامترها حداکثر شدند. $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_p$ و $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_r$ پارامترهای تخمینی می‌باشند. تابع لگاریتم درست‌نمایی تابع چگالی احتمال توأم

جدول 1- توابع مفصل مورد بررسی در تحقیق حاضر (Nelsen, 2007)
Table 1- Used copula functions in the present study (Nelsen, 2007)

Copula family	C (u,v)	θ
Ali-Mikhail-Haq (AMH)	$\frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}$	$-1 \leq \theta \leq 1$
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\theta \geq 0$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\theta \neq 0$
Galambos	$uv \exp \left\{ \left[(-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta} \right]^{-\frac{1}{\theta}} \right\}$	$\theta \geq 0$
Gumbel-Hougaard (GH)	$\exp \left\{ - \left[(-\ln u)^{\theta} + (-\ln v)^{\theta} \right]^{\frac{1}{\theta}} \right\}$	$\theta \geq 1$
Plackett	$\exp \left\{ - \left[(-\ln u)^{\theta} + (-\ln v)^{\theta} \right]^{\frac{1}{\theta}} \right\}$	$\theta \geq 0$
Farlie-Gumbel-Morgenstern (FGM)	$\frac{1}{2} \frac{1}{\theta - 1} \left\{ 1 + (\theta - 1)(u + v) - \left[(1 + (\theta - 1)(u + v))^2 - 4\theta(\theta - 1)uv \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$	$-1 \leq \theta \leq 1$

$$T_{(X|Y)}(x|y) = \frac{1}{1 - C(u|v)} \quad (10)$$

$$C(u|v) = \frac{C(u,v)}{v} \quad (11)$$

که در رابطه فوق $C(u|v)$ وقایعی را بیان می‌کند که در آن‌ها $U \leq u$ به شرط این که $V \leq v$ و u و v توابع توزیع حاشیه‌ای می‌باشند (Mirabbasi et al. 2013). با در نظر گرفتن حد آستانه‌های شرطی مختلف و استفاده از توابع توزیع توأم شرطی مربوطه می‌توان به مجمع نقاطی با دوره بازگشت‌های یکسان دست یافت و بر اساس معیارهای مد نظر، یکی از این وقایع را به‌عنوان واقعه طراحی انتخاب نمود. در این تحقیق از الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌ساز ملخ، چند جهانی، ازدحام ذرات و نهنگ جهت مقایسه با الگوریتم IFM استفاده گردید. در ادامه به ارایه مختصری از این روش‌ها پرداخته می‌شود و شرح کامل این روش‌ها در منبع Zeynali و Pourreza Bilondi (2018) قابل مشاهده می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی الهام‌گرفته از طبیعت جان‌دار است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها از آن به‌عنوان یک روش عددی، جست‌وجوی مستقیم و تصادفی یاد کرد. این الگوریتم مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است. این الگوریتم روش‌های مختلفی از جمله روش مستقیم، غری مستقیم، باینری، جهشی، ارزشی و درختی برای کدینگ کردن، دارد (Zeynali and Pourreza Bilondi, 2018).

$$T_{xy} = \frac{1}{P(X > x \text{ or } Y > y)} = \frac{1}{1 - C(F_x(x), F_y(y))} \quad (7)$$

$$T'_{xy} = \frac{1}{P(X > x \text{ and } Y > y)} = \frac{1}{1 - F_x(x) - F_y(y) + C(F_x(x), F_y(y))} \quad (8)$$

دوره بازگشت شرطی در حالت دو متغیره

در حالت چندمتغیره، دوره بازگشت می‌تواند به‌صورت $T_{X < x} = \frac{1}{P(X < x)}$ بیان شود که x حد آستانه خطر برای یک واقعه X است. پس می‌توان رابطه مذکور را به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$T_{X < x} = \frac{1}{1 - P(X < x)} \quad (9)$$

حال برای تعیین دوره بازگشت‌های شرطی برحسب سال، برای وقایعی که حد آستانه‌های آن به‌طور شرطی بیان می‌شوند، نیز می‌توان توابع توزیع توأم شرطی را جایگزین $P(X < x)$ نمود. به‌طور مثال برای تعیین دوره بازگشت رخداد وقایع دومتغیره با $X < x$ به شرط این که $Y < y$ باشد، با استفاده از توابع مفصل حاکم بر متغیرها، می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود.

وجود دارد. جهان‌های چندگانه (Multiple Universes) می‌تواند با دیگر نظریه‌های چندجهانی بوده و یا حتی در تضاد با آن باشد. نظریه چندجهانی نیز نشان می‌دهد که ممکن است قوانین فیزیکی مختلفی در هر یک از جهان‌ها وجود داشته باشد (Mirjalili and Lewis, 2016).

الگوریتم نهنگ (Whale optimization algorithm)

نهنگ کوهان‌دار می‌تواند موقعیت شکار را تشخیص دهد و آن‌ها را محاصره نماید. از آن‌جا که موقعیت بهینه در فضای جست‌وجو قابل پیش‌بینی نیست، الگوریتم نهنگ فرض می‌کند که بهترین راه‌حلی که تاکنون به دست آمده، طعمه هدف یا نزدیک به بهینه است. بعد از این‌که بهترین عامل جست‌وجو (بهترین عضو جمعیت) تعریف شد، دیگر اعضای جمعیت سعی می‌کنند موقعیت خود را نسبت به بهترین عضو جمعیت به‌روزرسانی نمایند. این رفتار با معادله‌های (13) و (14) نشان داده می‌شود (Mirjalili and Lewis, 2016).

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (13)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (14)$$

که در آن t نشان‌دهنده تکرار حاضر، بردارهای A و C بردارهای ضرایب، \bar{X}^* بردار موقعیت بهترین راه‌حلی است که تاکنون به دست آمده، بردار X بردار موقعیت، $||$ مقدار مطلق را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اگر یک راه حل بهتر وجود داشته باشد \bar{X}^* بایستی در هر تکرار به‌روزرسانی شود (Zeynali and Pourreza Bilondi, 2018).

نتایج و بحث

نتایج استخراج داده‌های حجم کمبود

در این مطالعه سیگنال‌های کمبود با استفاده از رابطه (1) تا مدت دوام سی‌روزه استخراج گردید. دلیل انتخاب این مدت دوام، وجود کمبود بارش پیوسته سی‌روزه در داده‌های این ایستگاه بود. سری زمانی داده‌های کمبود سی‌روزه مقادیر بارش و سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به‌صورت شکل‌های (2) و (3) ارائه گردید.

نتایج استخراج مقادیر کمبود بارش در دوره آماری مورد بررسی نشان داد که بیشترین کمبود مقدار بارش در منطقه مورد مطالعه در مدت دوام پیوسته سی‌روزه برابر با 590 میلی‌متر و در سال 1386 اتفاق افتاده است. این بدین معنی است که در طی سی‌روز متوالی که بارش کمتر از حد نرمال در منطقه باشد، بیشترین مقدار کمبود پیوسته بارش مربوط به سال 1386 و با مقدار 590 میلی‌متر می‌باشد که به طور متوسط کاهش روزانه 19 میلی‌متر بارش در دوره‌ای با

الگوریتم ازدحام ذرات (Particle Swarm Algorithm)

الگوریتم ازدحام ذرات که به نام‌های دیگری از جمله الگوریتم پرندگان نیز شناخته می‌شود؛ مثل دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، یک جمعیت تصادفی از افراد ایجاد می‌کند. اساس الگوریتم ازدحام ذرات، این است که هرگونه کنش و واکنش در حرکت گروه تأثیر گذاشته و متعاقباً هر یک از اعضای مجموعه، می‌توانند از اکتشافات و مهارت‌های سایر اعضای گروه بهره‌مند گردند. تفاوت بین الگوریتم ازدحام ذرات و سایر الگوریتم‌های تکاملی در روشی است که از طریق آن جمعیت ایجادشده در فضای جست‌وجو حرکت می‌کنند. الگوریتم ازدحام ذرات از روش خاص خود، برای هدایت گروه استفاده می‌کند. شاید به‌صورت بهتر بتوان گفت که اساس کار الگوریتم ازدحام ذرات بر این اصل استوار است که هر لحظه هر جزء مکان خود را در فضای جست‌وجو با توجه به بهترین مکانی که تا کنون قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل مجموعه وجود دارد، تنظیم می‌کند. هم‌چنین حرکت گروه حاصل تلاش همه اعضا می‌باشد که سعی می‌نمایند در هنگام حرکت فاصله بهینه را با همسایگان خود حفظ نمایند (Zeynali and Pourreza Bilondi, 2018).

الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (Grasshopper Optimisation Algorithm)

ملخ‌ها حشراتی هستند که به‌عنوان آفت شناخته می‌شوند. آفتی که محصولات کشاورزی را از بین می‌برند. اگرچه این حشرات به‌طور معمول به صورت انفرادی دیده می‌شوند اما توانایی تشکیل اجتماعات عظیمی را نیز دارند و می‌توانند به صورت گروهی به حرکت درآمده و حتی از یک قاره به قاره دیگر نیز نقل مکان کنند. عمل جست‌وجو در الگوریتم بهینه‌ساز ملخ به صورت رابطه (12) مدل‌سازی شده است (Saremi et al. 2017).

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (12)$$

که در این رابطه X_i موقعیت ملخ نام، S_i تعامل اجتماعی، G_i نیروی جاذبه روی ملخ نام و A_i مسیر باد را نشان می‌دهد.

الگوریتم چندجهانی (Multi-Verse)

نظریه انفجار بزرگ می‌گوید که آغاز پیدایش جهان ما با یک انفجار بزرگ شروع شده است. بر طبق این نظریه، انفجار بزرگ منشأ همه چیز در این جهان است و هیچ چیز پیش از آن وجود نداشته است. نظریه چندجهانی یکی دیگر از نظریه‌های اخیر و شناخته شده بین فیزیک‌دانان است. در این نظریه اعتقاد بر این است که بیش از یک انفجار بزرگ وجود دارد و هر انفجار بزرگ باعث تولد یک جهان می‌شود. اصطلاح چندجهانی، مخالف جهان (Universe) است. این اصطلاح به این موضوع اشاره دارد که جهان‌های دیگری علاوه بر جهانی که ما در آن زندگی می‌کنیم

نتایج بررسی توزیع‌های آماری مورد بررسی (توزیع‌های حاشیه‌ای)

سیگنال‌های محاسبه‌شده با استفاده از تابع توزیع آماری مختلف مورد برازش قرار گرفته و براساس معیار کلموگروف-اسمیرنف، تابع توزیع متناسب با هر سیگنال انتخاب گردید. نتایج بررسی و برازش توزیع‌های آماری مختلف بر سیگنال‌های یادشده به شرح شکل (4) ارایه شد.

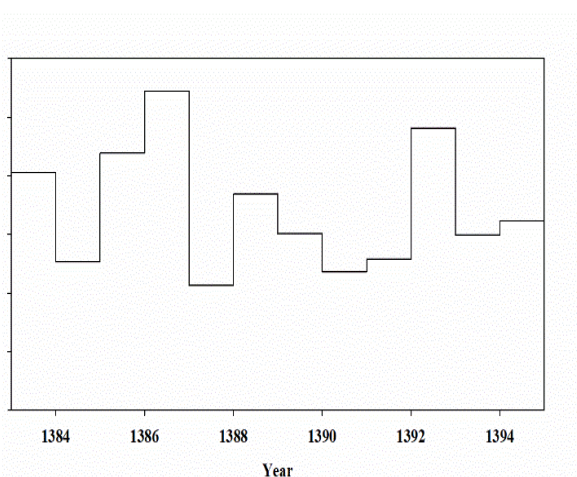


Fig. 3- Shortage values of groundwater level in 30 days time duration

شکل 3- مقادیر کمبود سطح آب زیرزمینی در مدت دوام سی روزه



Fig. 2- Shortage values of precipitation in 30 days time duration

شکل 2- مقادیر کمبود بارش در مدت دوام سی روزه

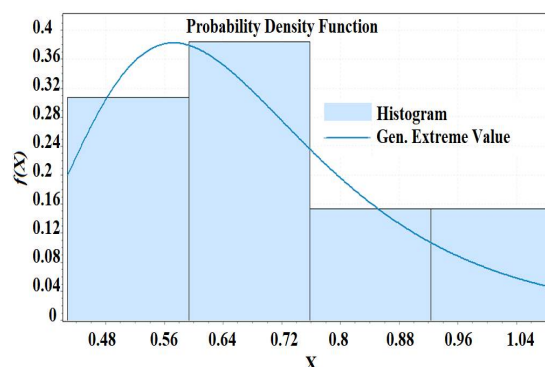
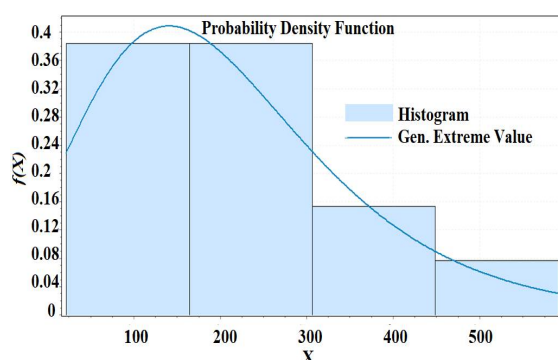


Fig. 3- Results of fitting the distribution functions in studied signatures (Left: Shortage precipitation signature, Right: Shortage groundwater level signature)

شکل 4- نتایج برازش توابع توزیع آماری بر سیگنال‌های موجود (چپ: سیگنال کمبود بارش، راست: سیگنال کاهش سطح آب زیرزمینی)

سطح آب زیرزمینی سی روزه
 $\mu=0.58269$ $\sigma=0.1714$ $k=0.03512$ می‌باشد. در نهایت با داشتن اطلاعات فوق، تخمین پارامترهای توابع مفصل مورد نظر با استفاده از روش IFM و الگوریتم‌های فراابتکاری مورد بررسی قرار

براساس آماره کلموگروف-اسمیرنف، توزیع تعمیم‌یافته مقادیر حدی (GEV) برای هر دو سیگنال مورد بررسی انتخاب گردید. پارامترهای توزیع GEV برای سیگنال کمبود بارش سی روزه $\mu=126.74$ $\sigma=124.75$ $k=0.05132$ و برای سیگنال کمبود

کلایتون، فرانک، گلامیوس و گامیل هوگارد شبیه به هم می‌باشد. با توجه به آماره نش-سانکلیف (ضریب کارایی مدل)، می‌توان دو مفصل گلامیوس و گامیل-هوگارد را به عنوان مفصل‌های برتر جهت تحلیل دوبعدی سیگنال‌های کمبود بارش و کمبود سطح آب زیرزمینی انتخاب کرد. در نهایت ادامه روند محاسبات با استفاده از مفصل گامیل-هوگارد صورت گرفت.

نتایج بررسی تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات Ahmadi et al. (2017) در بررسی پارامترهای مفصل دو بعدی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات هم‌خوانی ندارد. این نتایج می‌تواند به دلیل ماهیت داده‌های مورد بررسی باشد. برازش تابع مفصل منتخب بر سیگنال‌های مورد بررسی در ایستگاه مورد مطالعه در شکل (6) نشان داده شده است. وابستگی بین سیگنال‌های منابع آب مورد بررسی را می‌توان به خوبی در این شکل مشاهده کرد.

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که چگونه می‌توان با استفاده از احتمالات توام، دو سیگنال کمبود را در یک ایستگاه به صورت هم‌زمان تعیین نمود. این امر می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در ارتباط با رفتار احتمالاتی کمبود سطح آب زیرزمینی به منظور بهره‌برداری بهینه از آب‌های زیرزمینی در اختیار کاربران، کشاورزان و محققان قرار دهد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش کمبود بارش در منطقه، احتمال وقوع سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی نیز افزایش می‌یابد.

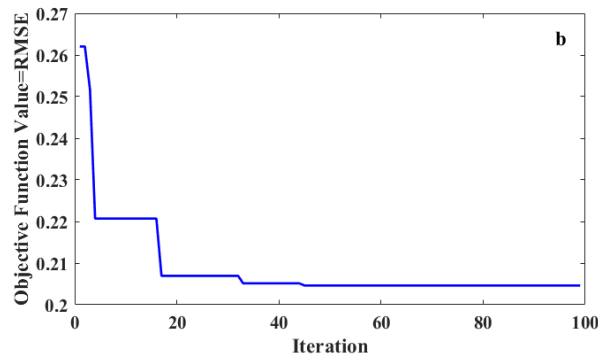
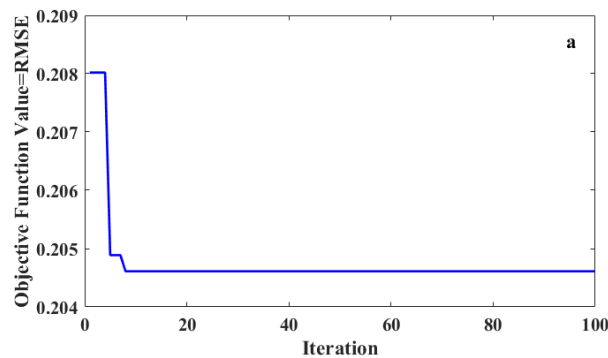
گرفت. لازم به ذکر است که در بررسی و ارزیابی دقت الگوریتم‌های فرا ابتکاری، از 100 تکرار با اعضای جمعیت 50 عضو استفاده گردید.

نتایج بررسی دقت الگوریتم‌های مورد بررسی

همان‌طور که ذکر گردید، در این مطالعه از الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، بهینه‌یاب ملخ (GOA)، چند جهانی (MVO)، ازدحام ذرات (PSO) و بهینه‌یاب نهنگ (WOA) استفاده گردید. تابع هدف در بررسی دقت الگوریتم‌های یاد شده، جذر میانگین مربعات خطا بین مقادیر برآوردی و مقادیر حاصل از مفصل تجربی می‌باشد. نتایج بررسی دقت الگوریتم‌های یاد شده به شرح شکل (5) و جدول (2) ارایه گردید. نتایج بررسی میزان خطای روش IFM در بررسی مفصل برتر نیز به شرح جدول (3) ارایه گردید.

نتایج بررسی عملکرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری در تخمین پارامترهای توابع مفصل نشان داد که الگوریتم‌های مورد بررسی حداکثر پس از 45 تکرار به حالت بهینه خود رسیده و کمترین میزان RMSE را ارایه می‌کنند. همچنین نتایج بررسی مقادیر خطا در برآورد پارامترهای مفصل‌های مورد مطالعه نشان داد که میزان خطای تمامی الگوریتم‌های مورد بررسی یکسان می‌باشد و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

در مورد نتایج بررسی دقت روش IFM در تعیین مفصل برتر نیز مطابق جدول (3) مشاهده می‌شود که دقت چهار مفصل



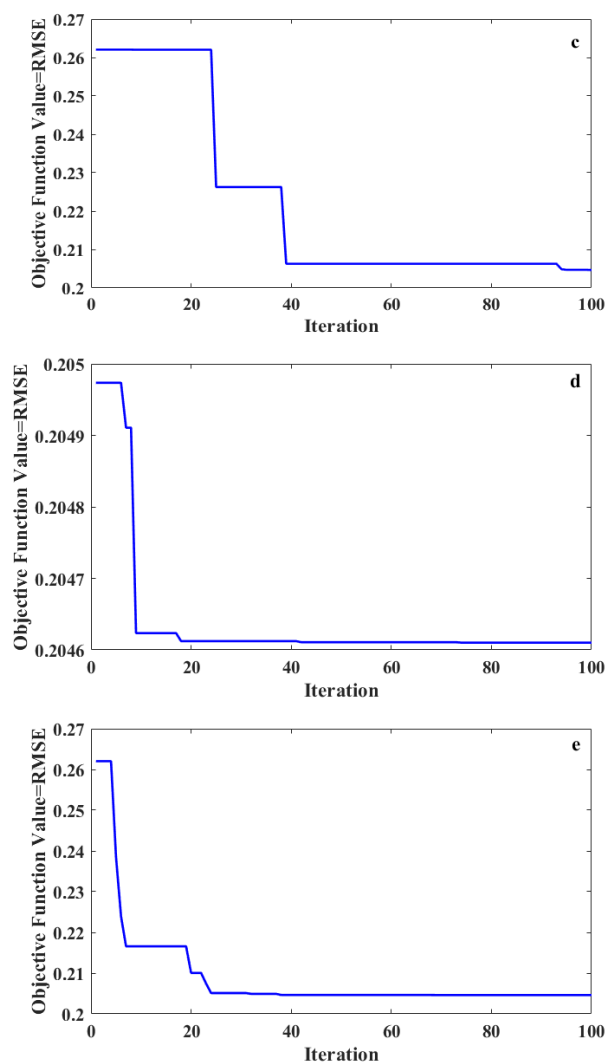


Fig. 5- Performance of different algorithms in determining the parameters of copula functions in 2D analysis of precipitation and groundwater level signatures (a:GA, b:GOA, c:MVO, d:PSO, e:WOA)
 شکل 5- عملکرد الگوریتم‌های مختلف در تعیین پارامترهای توابع مفصل دو بعدی سیگنال‌های کمبود بارش و سطح آب زیرزمینی (الف: GA، ب: GOA، ج: MVO، د: PSO، ه: WOA)

جدول 2- مقادیر تابع هدف الگوریتم‌های بهینه‌سازی در برآورد مقادیر پارامترهای توابع مفصل

Table 2- Objective function values of optimization algorithms in estimation of copula parameters

Algorithm	RMSE	Copula
GA	0.2045	AMH
GOA	0.2050	AMH
MVO	0.2051	AMH
PSO	0.2046	AMH
WOA	0.2052	AMH

جدول 3- نتایج بررسی دقت مفصل‌های مختلف با استفاده از روش IFM

Table 3- Results of evaluation different copula using IFM method

Copula	NS	RMSE	Parameter
Cly	0.90	0.088	7.35
AMH	0.71	0.15	1.00
FGM	0.33	0.24	-0.95
Fra	0.90	0.088	20.00
Gal	0.91	0.0884	5.07
GH	0.91	0.0883	5.78
Pla	0.84	0.12	19.99

آستانه کمتر باشند)، چنانچه مدت کمبود سیگنال بارش در مدت دوام پیوسته سی روزه در محل ایستگاه هواشناسی بین صفر تا 800 میلی‌متر (در صورتی که در مدت دوام سی روزه متوالی بارش در منطقه مورد مطالعه کمتر از حد آستانه سی روزه باشد) باشد، در دوره بازگشت‌های پنج تا 20 ساله، مقادیر کمبود سیگنال آب زیرزمینی بین صفر تا حدود 1/6 متر می‌باشد.

با مقایسه دو حالت "یا" و "و" می‌توان مشاهده کرد که در حالت "یا" احتمال وقوع به دلیل کاهش دوره بازگشت نسبت به حالت "و" بیشتر بوده و احتمال وقوع کمبود هم‌زمان دو سیگنال کمتر از حالت "یا" می‌باشد. این امر بدین مفهوم است که شانس وقوع دو واقعه به‌صورت هم‌زمان بسیار کمتر بوده و در نتیجه در دوره بازگشت‌های بزرگتری ممکن است رخ دهد (Yue and Rasmussen, 2002). این در حالی است که در تحلیل تک‌متغیره نمی‌توان چنین تحلیل جامعی را ارائه نمود. هم‌چنین این اطلاعات در تحلیل جامع وضعیت خشک‌سالی آب زیرزمینی و تخصیص منابع آب در محدوده دریاچه ارومیه می‌تواند بسیار سودمند باشد.

دوره بازگشت توام سیگنال‌های کمبود منابع آب در ایستگاه‌های مورد بررسی برای حالت "یا" ($X < x \text{ or } Y < y$) و حالت "و" ($X < x \text{ and } Y < y$) به‌ترتیب در شکل‌های (7) و (8) نشان داده شده است. با توجه به شکل (7) مشاهده می‌شود که با افزایش دوره بازگشت، میزان کمبود در هر دو سیگنال کاهش می‌یابد. در حالت بررسی "یا" یعنی حالتی که یکی از دو سیگنال دچار کمبود شود، چنانچه مدت کمبود سیگنال بارش در مدت دوام پیوسته سی‌روزه در محل ایستگاه هواشناسی بین صفر تا 250 میلی‌متر (در صورتی که در مدت دوام سی‌روزه متوالی بارش در منطقه مورد مطالعه کمتر از حد آستانه سی‌روزه باشد) باشد، در دوره بازگشت‌های دو تا نه ساله، مقادیر کمبود سیگنال آب زیرزمینی بین صفر تا حدود یک متر می‌باشد. در چنین حالتی (حالت رخداد کمبود یکی از سیگنال‌ها)، دوره بازگشت‌های دو تا نه ساله در منطقه رخ می‌دهد. از شکل (8) نیز می‌توان مشاهده کرد که در حالت "و" دوره بازگشت محاسباتی نسبت به حالت "یا" افزایش یافته است و دوره بازگشت‌های 5 تا 20 سال را شامل می‌شود. در حالت بررسی "و" یعنی حالتی که هر دو سیگنال دچار کمبود شود (از یک حد

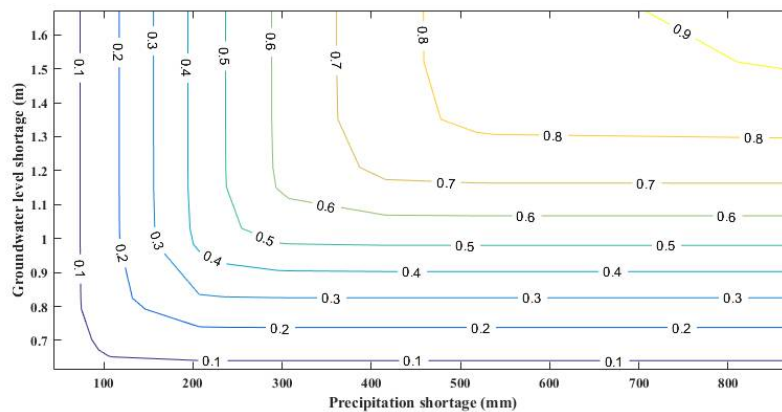


Fig. 6- Joint cumulative probability of precipitation and groundwater shortage signatures

شکل 6- احتمال تجمعی توام سیگنال‌های کمبود بارش و کمبود سطح آب زیرزمینی

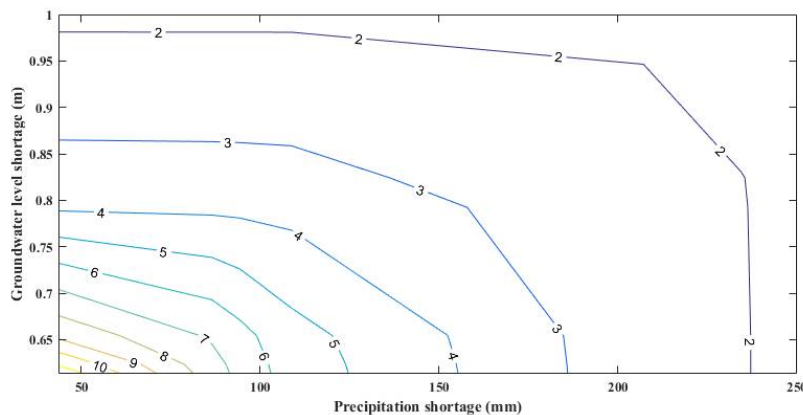


Fig. 7- Joint return period in "or" mode for the investigated signatures in the Nazloochai basin

شکل 7- دوره بازگشت توام در حالت "یا" برای سیگنال‌های مورد بررسی در حوضه نازلوچای

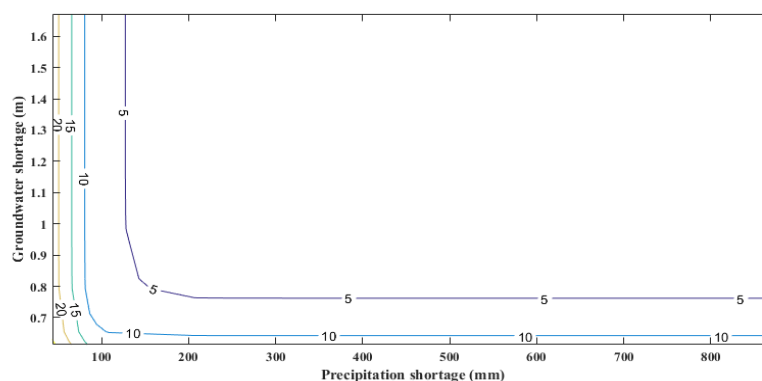


Fig. 8- Joint return period in "and" mode for the investigated signatures in the Nazloochoi basin
شکل 8- دوره بازگشت توأم در حالت "و" برای سیگنال‌های مورد بررسی در حوضه نازلوچای

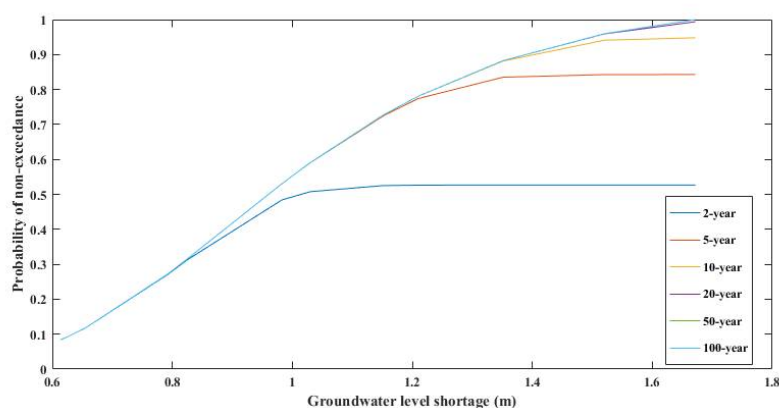


Fig. 9- Conditional probability of occurrence the shortage groundwater level signature taking into the shortage precipitation signature during 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years return periods
شکل 9- احتمال شرطی وقوع سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن سیگنال کمبود بارش در دوره بازگشت‌های 2، 5، 10، 20، 50 و 100 سال

مشاهده کرد که در دوره‌های بازگشت بیش از پنج سال، احتمال وقوع سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. در مدت دوام دو ساله که انتظار رخداد آن هر ساله دور از انتظار نیست، در شرایط کنونی و با در نظر گرفتن سیگنال کمبود بارش در منطقه، می‌توان مشاهده کرد که احتمال عدم وقوع سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی از 0/1 تا 0/5 متفاوت می‌باشد. یعنی احتمال 90 درصد برای رخداد سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی به اندازه 0/6 متر و احتمال 50 درصد برای رخداد سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی به اندازه یک متر و بیش از آن وجود دارد. در دوره‌های بازگشت بالاتر نیز با احتمال کمتری می‌توان مقادیر این سیگنال را تخمین زد. لازم به ذکر است که مطالب ارایه شده در شرایط موجود (سیگنال‌های کمبود پیوسته سی روزه) صادق می‌باشد.

نتایج نشان داد که با توجه به شرایط حاکم بر منطقه مورد مطالعه از نظر سیگنال کمبود بارش، انتظار کمبود سطح آب زیرزمینی 0/6 تا یک متر در منطقه مورد دور از انتظار نیست. با توجه به مطالعات مختلف در زمینه تغییرات آب و هوایی و توزیع و

پس از بررسی دوره بازگشت سیگنال‌های مورد بررسی در دو حالت یادشده، از توابع مفصل برای بیان ساختار وابستگی بین سیگنال‌های مورد بررسی به منظور محاسبه دوره‌های بازگشت توأم و شرطی استفاده شد. از آنجایی که هدف اصلی تحقیق حاضر پس از تخمین دقیق پارامترهای توابع مفصل، بررسی دوره بازگشت شرطی سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی متناسب با کمبود سیگنال بارش در منطقه مورد مطالعه بود، لذا به بررسی دوره بازگشت شرطی سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در مدت دوام‌های دو، پنج، ده، 20، 50 و 100 ساله پرداخته شد. منظور از دوره بازگشت شرطی، در واقع دوره بازگشت سیگنال کمبود آب زیرزمینی با توجه به تغییرات سیگنال کمبود بارش در منطقه می‌باشد. در نهایت با استفاده از توابع حاکم بر سیگنال‌های منابع آب در حوضه مورد بررسی، دوره بازگشت شرطی تعیین و به شرح شکل (9) ارایه گردید. محور y ها در این نمودار احتمال عدم وقوع سیگنال کمبود سطح آب زیرزمینی را در دوره آماری مورد بررسی نشان می‌دهد. با افزایش دوره بازگشت، احتمال عدم وقوع نیز افزایش می‌یابد و می‌توان

پارامتر توابع مفصل بود. روش IFM براساس مقادیر RMSE و NS مفصل گامبل-هوگارد را به عنوان مفصل برتر معرفی نمود. نتایج بررسی دقت روش‌های مختلف در تخمین پارامترهای مفصل نشان داد که روش IFM نسبت به بهترین الگوریتم مورد بررسی (GA) دقت تخمین پارامتر مفصل را حدود 131 درصد بهبود می‌بخشد. در نهایت با استفاده از مفصل گامبل-هوگارد و با پارامتر 5/78 مقادیر دوره بازگشت سیگنال‌های منابع آب مورد بررسی در دو حالت "و" و "یا" مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی دوره بازگشت سیگنال‌های مورد مطالعه نشان داد در حالت "و" دوره بازگشت سیگنال‌های مورد مطالعه افزایش می‌یابد و بدین معنی است که احتمال رخداد هم‌زمان دو سیگنال در منطقه مورد مطالعه نسبت به حالت "یا" افزایش می‌یابد. نتایج بررسی احتمال وقوع سیگنال‌های مورد بررسی در منطقه نشان داد که با افزایش سیگنال کمبود بارش احتمال افزایش سیگنال کمبود جریان نیز افزایش می‌یابد. به طوری که با احتمالات ده تا 90 درصد می‌توان مقادیر افزایشی سیگنال کمبود آب زیرزمینی ناشی از کمبود سیگنال بارش را برآورد نمود. در نهایت دوره بازگشت شرطی سیگنال‌های مورد بررسی در دوره آماری 95-1382 برآورد گردید. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر منطقه و سیگنال کمبود بارش پیوسته سی روز، با احتمال 90 تا 50 درصد به ترتیب سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بین 0/6 تا یک متر هر ساله کاهش خواهد داشت. البته این موضوع در دوره بازگشت دو ساله ذکر شده است که انتظار رخداد آن دور از انتظار نیست. این کاهش و حتی کمتر از آن نیز با توجه به تغییرات اقلیمی، تغییر شکل بارش‌ها و تغییر الگوی بارش‌ها به سمت حدی شدن می‌تواند خسارات زیادی را متوجه آبخوان کند.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول در دانشگاه بیرجند است، لذا نویسندگان مقاله از دانشگاه بیرجند نهایت تقدیر و تشکر را به عمل می‌آورند.

پراکندگی بارش‌ها در منطقه مورد مطالعه نظیر Khalili et al (2016)؛ Tahroudi et al (2019)؛ Nazeri Tahroudi et al (2019)؛ al (2019) جبران کسری آب زیرزمینی و افزایش سطح آب به دلیل وجود بارش‌های حدی و به هم خوردن ساختمان خاک بسیار سخت خواهد بود و این مسئله در محدوده دریاچه ارومیه که هر دو منبع آب زیرزمینی و سطحی موجود می‌باشد، در آینده مشکل‌ساز خواهد شد. لذا با توجه به شرایط موجود لزوم مدیریت منابع آب زیرزمینی بیش از پیش دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تحلیل فراوانی سیگنال‌های کمبود بارش و سطح آب زیرزمینی در دوره آماری 1382 تا 1395 صورت پذیرفت. جهت استخراج سیگنال‌های موجود از روش MIDLP استفاده گردید. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار افزایش سیگنال کمبود بارش در سال 1386 و کمترین مقدار سیگنال مربوط به سال‌های 89-1388 و 92-1391 بوده است. در پی آن بیشترین سیگنال کمبود سی روزی سطح آب زیرزمینی نیز مربوط به سال‌های 92-1390 بوده است. با بررسی توزیع‌های حاشیه‌ای، توزیع آماری GEV بر اساس آماره کلموگروف-اسمیرنوف انتخاب گردید. با انتخاب توزیع آماری و تأیید وجود همبستگی با استفاده از آماره کندال تائو، به بررسی مفصل‌های دو بعدی و روش‌های تخمین پارامترهای آن‌ها براساس روش IFM و الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته شد. نتایج بررسی الگوریتم‌های فراابتکاری در تخمین پارامتر توابع مفصل نشان داد که الگوریتم‌های مختلف مورد بررسی همگی بعد از حداکثر 45 تکرار به حالت بهینه خود می‌رسند. همچنین نتایج نشان داد که دقت تمامی الگوریتم‌های مورد بررسی در تخمین پارامتر توابع مفصل مختلف تقریباً یکسان بوده و تمامی الگوریتم‌های مورد بررسی، مفصل علی-میخائیل-حق را به عنوان مفصل برتر معرفی کردند. با این حال الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد بررسی از دقت بهتری برخوردار بود. نتایج بیانگر بهتر بودن دقت روش IFM در تخمین

References

- 1- Ahmadi, A., Radmanesh, F., Parham, G.A. and Mirabbasi, R., 2017. Comparison of conventional and intelligent methods in estimating copula function parameters for multivariate frequency analysis of low flows (Case study: Dez river basin), *ECO Hydrology*, 4(2), pp. 315-325 (In Persian).
- 2- Brunner, M.I., Seibert, J. and Favre, A.C., 2016. Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), pp. 819-33.
- 3- Cannon, A.J., 2010. A flexible nonlinear modelling framework for nonstationary generalized extreme value analysis in hydroclimatology. *Hydrological Processes*, 24, pp. 673-685.
- 4- Chen, L., Guo, S., Yan, B., Liu, P. and Fang, B., 2010. A new seasonal design flood method based on bivariate joint distribution of flood magnitude and date of occurrence, *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), pp. 1264-1280.
- 5- Chen, L., Singh, V.P., Guo, S. and Zhou, j., 2015. Copula-based method for multisite monthly and daily streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, 528, pp. 369-384

- 6- De Michele, C. and Salvadori, G., 2003. A generalized Pareto intensity duration model of storm rainfall exploiting 2-copulas, *Journal of Geophysical Research*, 108(2), pp. 1–11
- 7- De Michele, C., Salvadori, G., Passni, G. and Vezzoli, R., 2007. A multivariate model of sea storms using copulas, *Coastal Engineering*, 54(10), pp. 734–751
- 8- Du, T., Xiong, L., Xu, C.Y., Gippel, C.J., Guo, S. and Liu, P., 2015. Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change, *Journal of Hydrology*, 527, pp. 234–250
- 9- El Adlouni, S., Ouarda, T., Zhang, X., Roy, R. and Bobée, B., 2007. Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model, *Water Resources Research*, 43(3), pp. 1-13.
- 10- Favre, A.C., Adlouni, S., Perreault, L., Thiémonge, N. and Bobée, B., 2004. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas, *Water Resources Research*, 40(1), pp. 1-11.
- 11- Giraldo Osorio, J.D. and García Galiano, S.G., 2012. Non-stationary analysis of dry spells in monsoon season of Senegal River Basin using data from regional climate models (RCMs), *Journal of Hydrology*, 45, pp. 82–92.
- 12- Grimaldi, S. and Serinaldi, F., 2006a. Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis. *Advances in Water Resources*, 29(8), pp. 1155–1167
- 13- Grimaldi, S. and Serinaldi, F., 2006b. Design hyetographs analysis with 3-copula function, *Hydrological Sciences Journal*, 51(2), pp. 223–238
- 14- Hui-Mean, F., Yusof, F., Yusop Z. and Suhaila, J., 2019. Trivariate copula in drought analysis: a case study in peninsular Malaysia, *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1), pp. 657-671.
- 15- Jiang, C., Xiong, L., Xu, C.Y. and Guo, S., 2015. Bivariate frequency analysis of nonstationary low-flow series based on the time-varying copula, *Hydrological Processes*, 29(6), pp. 1521–1534.
- 16- Joe, H., 1997. *Multivariate models and multivariate dependence concepts*. CRC Press.
- 17- Kao, S.C. and Govindaraju, R. S. 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 380(1–2), pp. 121–134
- 18- Kao, S.C. and Govindaraju, R.S., 2007. A bivariate frequency analysis of extreme rainfall with implications for design. *Journal of Geophysical Research*, 112(13), 131-159
- 19- Keef, C., Svensson, C. and Tawn, J.A., 2009. Spatial dependence in extreme river flows and precipitation for Great Britain. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 378(3–4), pp. 240–252
- 20- Khalili, K., Tahoudi, M. N., Mirabbasi, R. and Ahmadi, F., 2016. Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(4), pp. 1205-21.
- 21- Kuhn, G., Khan, S., Ganguly, A.R., and Branstetter, M.L., 2007. Geospatial temporal dependence among weekly precipitation extremes with applications to observations and climate model simulations in South America, *Advances in Water Resources*, 30(12), pp. 2401–2423
- 22- Mirabbasi, R., Anagnostou, E.N., Fakheri-Fard, A., Dinpashoh, Y. and Eslamian, S., 2013. Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index, *Journal of Hydrology*, 492, pp. 35-48.
- 23- Mirjalili, S. and Lewis, A., 2016. The whale optimization algorithm, *Advances in Engineering Software*, 95, pp. 51-67.
- 24- Nazeri Tahroudi, M., Pourreza-Bilondi, M. and Ramezani, Y., 2019. Toward coupling hydrological and meteorological drought characteristics in Lake Urmia Basin, Iran, *Theoretical and Applied Climatology*.

- 25-Nelsen, R.B., 2007. An introduction to copulas. *Springer Science & Business Media*.
- 26-Renard, B. and Lang, M., 2007. Use of a Gaussian copula for multivariate extreme value analysis: some case studies in hydrology, *Advances in Water Resources*, 30(4), pp. 897–912
- 27-Salvadori, G. and De Michele, C., 2007. On the use of copulas in hydrology: theory and practice. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), pp. 369-80.
- 28-Salvadori, G. and De Michele, C., 2010. Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: a copula approach, *Water Resources Research*, 46(10), pp. 1-11.
- 29-Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N.T., Rosso, R., 2007. *Extremes in nature: an approach using copulas*. Springer, New York
- 30-Saremi, S., Mirjalili, S. and Lewis, A., 2017. Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application, *Advances in Engineering Software*, 105, pp. 30-47.
- 31-Serinaldi, F., Bonaccorso, B., Cancelliere, A. and Grimaldi, S., 2009. Probabilistic characterization of drought properties through copulas, *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(10–12), pp. 596–605.
- 32-Shiau, J.T., 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas, *Water Resource Manage*, 20(5), pp. 795–815.
- 33-Shiau, J.T., Wang, H. Y. and Tsai, C.T., 2006. Bivariate frequency analysis of floods using copulas, *Journal of the American Water Resources Association*, 42(6), pp. 1549–1564.
- 34-Singh, V.P., 2010. Meta-elliptical copulas for drought frequency analysis of periodic hydrologic data, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(3), pp. 425–444.
- 35-Sklar, M., 1959. *Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges*. Université Paris.
- 36-Tahroudi, M.N., Khalili, K., Ahmadi, F., Mirabbasi, R. and Jhajharia, D., 2019. Development and application of a new index for analyzing temperature concentration for Iran's climate, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(6), pp. 2693-2706.
- 37-Vaziri, H., Karami, H., Mousavi, S.F. and Hadiani, M., 2018. Analysis of hydrological drought characteristics using copula function approach, *Paddy and water environment*, 16(1), pp. 153-161.
- 38-Villarini, G., Serinaldi, F., Smith, J.A. and Krajewski, W.F., 2009. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century, *Water Resources Research*, 45, pp. 1-17.
- 39-Xiao, Y., Guo, S.L., Liu, P., Yan, B.W. and Chen, L., 2009. Design flood hydrograph based on multi-characteristic synthesis index method, *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(12), pp. 1359–1364.
- 40-Yue, S. and Rasmussen, P., 2002. Bivariate frequency analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application, *Hydrological Processes*, 16(14), pp. 2881-98.
- 41-Zeynali, M.J. and Pourreza Bilondi, M., 2018. *Matlab and its application in water resources*, Publication of University of Birjand, 345 Pp (In Persian).
- 42-Zhang, L. and Singh, V.P., 2006. Bivariate flood frequency analysis using the copula method, *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(2):150–164.
- 43-Zhang, L. and Singh, V.P., 2007a. Gumbel Hougard copula for trivariate rainfall frequency analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), pp. 409–419.
- 44-Zhang, L. and Singh, V.P., 2007b. Trivariate flood frequency analysis using the Gumbel-Hougard copula, *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), pp. 431–439.