Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 3, Fall 2026, p. 1-19

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir/?lang=en

EXTENDED ABSTRACT

Prediction of the impact of climate change on river discharge using copula functions (Case study: Siminehrood River Basin, Iran)

F. Sharifan[1], Y. Ramezani[2*], M. Amirabadizadeh[3] and C. De Michele[4]

1- Ph.D. Graduate, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
2- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. (y.ramezani@birjand.ac.ir).*
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
4- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 12 April 2025
Revised: 22 June 2025
Accepted: 2 July 2025
Available online: 7 November 2026

Keywords:
Clayton, Conditional density, Downscaling, Sixth Assessment Report on Climate Change.

TO CITE THIS ARTICLE:

Sharifan, F., Ramezani, Y., Amirabadizadeh, M., & De Michele, C. 2026. 'Prediction of the impact of climate change on river discharge using copula functions (Case study: Siminehrood River Basin, Iran)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(3), pp. 1–19. doi: 10.22055/jise.2025.49381.2157.

Abstract

In this study, copula-based simulation and predicting were conducted to investigate changes in the discharge of the Siminehrood River under the influence of climate change during the baseline period (1988–2018) and the future period (2031–2050). Daily precipitation data for 2031–2050 were obtained from 26 CMIP6 climate models under three scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5. The simulated and predicted precipitation data were then input into copula functions to estimate simulated and predicted river discharge. The 26 climate models used in the study were evaluated using the statistical metrics R^2, NSE, RMSE, and CRM. Based on these metrics, the models were ranked and weighted, then used to predict precipitation for the future period. The climate-model results indicated that precipitation in May, June, July, August, November, and December will decrease under all three scenarios compared with observed precipitation. Annual precipitation in the future period is also predicted to decline under all three scenarios relative to the observed annual precipitation during the baseline period. After confirming the correlation between the precipitation–river discharge and estimating their marginal distributions, the Clayton copula was selected as the best-performing copula based on the NSE, RMSE, and BIAS evaluation criteria. River discharge was then simulated and predicted using copula functions. The predictions indicate that monthly discharge changes will fluctuate. Annual discharge in the future period is predicted to be 14.9, 12, and 11.2 m^3/s under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, respectively, indicating a decline in the Siminehrood River's annual discharge under all three scenarios.

Introduction

Climate change is any change in climate over time, which can be caused by natural changes or human activities. Recently, awareness of climate change has become important due to the negative socio-economic consequences and financial damages associated with climate conditions. Most hydrological phenomena are usually described by two or more dependent variables. A review of the literature shows that multivariate distribution functions are widely used to model two or more hydrological dependent variables and their dependence structure (Salvadori and De Mickele., 2007). For this reason, copula functions were used in hydrological analysis (Xiao et al., 2008), which is the most up-to-date mathematical tool for evaluating multivariate problems. The aim of

the present study is to develop a copula-based probabilistic model to analyze the effect of climate change on precipitation and river discharge in the Siminehrood River Basin. The innovation of this research is the use of the Sixth Assessment Report on Climate Change and the use of 26 climate models to estimate precipitation, as well as the use of Archimedean copula functions, extreme-value, FGM, and Plackett in predicting and probabilistically simulating the effect of climate change on precipitation parameters and river discharge in the Siminehrood River Basin.

Methodology

The Siminehrood River Basin is located in the northwest of the Iran and in West Azerbaijan Province. In this basin, a rain gauge station based on entropy theory was selected for precipitation and a hydrometric station for river discharge data (Nazeri Tahroudi et al., 2019). Precipitation data (mm) and river discharge data (m^3/s) were used in the statistical period 1988-2018. The future statistical period is also considered from 2031 to 2050.

The Dashband Bukan hydrometric station is one of the oldest and most complete stations in the region, which is why it was selected as the hydrometric station that represents the entire basin discharge (Nazeri Tahroudi et al., 2019). The Bukan Dashband rain gauge station was selected using entropy theory as a rain gauge station that represents the total precipitation values of the basin (Nazeri Tahroudi et al., 2019). 26 GCM models that have the desired features such as historical precipitation data and scenarios were used. The LARS WG 7.0 model was used to downscale the GCM models. The EasyFit5.6 model was used to estimate the statistical distributions of precipitation and river discharge parameters. Copula functions and their conditional densities were used to simulate and predict river discharge. Copula functions have no limitations compared to multivariate methods and are the most widely used method in hydrology**.**

Results and Discusion

Evaluation of GCM models

The study of GCM models showed that the MIROC6 model has the best performance in simulating precipitation and the E3SM-1-0 model has poor performance compared to other models. The results showed that precipitation changes in different months will be fluctuating. The most precipitation will occur in the winter and spring seasons. Also, annual precipitation in the future period will decrease compared to the annual measured precipitation in all three SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios.

Dependence structure and marginal distribution

The requirement for using copula functions is the existence of a correlation between the pair of parameters. The correlation between precipitation and river discharge was obtained using the Kendall's tau coefficient and it was determined that there is a good correlation between them. Using the EasyFit model, Lognormal and Gamma distribution functions were obtained for precipitation and river discharge parameters, respectively.

Simulation using copula functions

The evaluation criteria of NSE, RMSE and BIAS were used to evaluate the copula functions and select the best copula function from 10 copula functions. Table (1) shows the results of the evaluation of the copula functions. According to this table, the Clayton copula was selected as the best copula function with the best and highest evaluation criteria. After selecting the best copula function, the marginal distribution function proportional to the parameters and the dependence parameter of the copula function were simulated using the 2-D Clayton conditional density structure. For simulation, the values of NSE and R^2 on the daily scale were 0.61 and 0.62, respectively, and on the monthly scale were 0.62 and 0.63, which indicate good performance in simulating river discharge using the Clayton copula. The RMSE evaluation criteria on the daily and monthly scales were 13.18 and 13.9 m^3/s, respectively, which indicate the correct selection of the Clayton copula for simulating river discharge.

Table 1- Results of goodness-of-fit test of copula functions for precipitation (mm) and river discharge (m^3/s)

Evaluation Criteria	AMH	Clayton	Frank	Galambos	GH	Plackett	FGM	GB	A12	Joe
NSE	0.82	0.9	0.53	0.82	0.8	0.84	0.7	0.58	0.82	0.85
RMSE	0.12	0.09	0.19	0.12	0.12	0.11	0.13	0.18	0.12	0.1
BIAS	0.11	0.08	0.18	0.11	0.12	0.1	0.13	0.17	0.11	0.1
Teta	0.99	2.17	-0.91	0.73	1.4	5.23	1	0.1	1	2.08

The results of the Siminehrood River discharge prediction under the three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 on two daily and monthly scales are given in Figures (1) and (2), respectively. According to these figures, the changes in river discharge in different months will be fluctuating and in some months it will decrease and in some it will increase. On an annual scale in the future period, in all three scenarios under study, it will decrease compared to the measured river discharge. The greatest reduction in river discharge will occur in the pessimistic scenario (SSP5-8.5) and the least reduction in river discharge will occur in the optimistic scenario (SSP1-2.6).

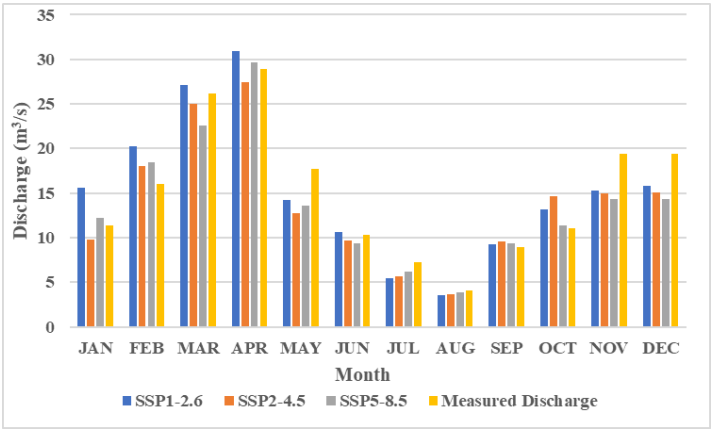

Fig.1 - Prediction of Siminehrood River discharge (m^3/s) under the three scenarios on a monthly scale

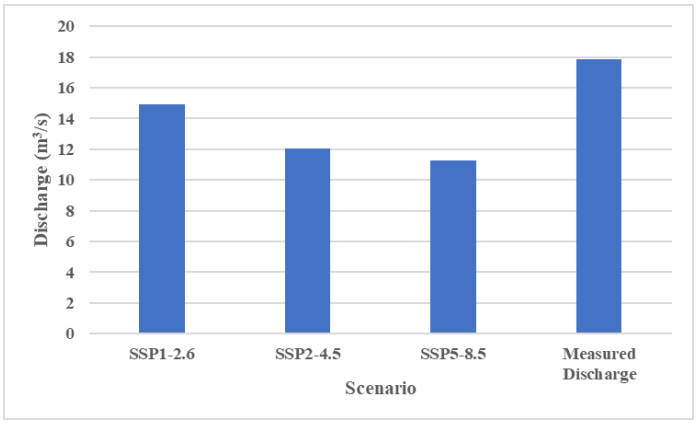

Fig. 2 - Prediction of Siminehrood River discharge (m^3/s) under the three scenarios on an annual scale

Conclusion

In general, the precipitation and river discharge in the Siminehrood River Basin is predicted to increase in some months of the year and decrease in others under the three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. However, overall, these two parameters will decrease under all three scenarios for the annual scale. This significant decrease in annual river discharge causes problems in Lake Urmia, which requires more attention to the problems of this lake. Basic planning for the

future of water resources of a basin requires the assessment and examination of all aspects affecting water resources, including population changes, land use changes and exploitation, along with climatic variables. Therefore, these studies are proposed as a research topic to predict the future status of water resources in the Siminehrood River Basin.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors used generative AI and AI-assisted technologies, including ChatGPT, to edit the English language in the manuscript.

Authors' contribution

First Author: Fahime Sharifan: Data curation, Methodology, Software, Formal Analysis, Writing – Original Draft.
Second Author: Yousef Ramezani: Conceptualization, Methodology, Formal Analysis, Writing – Review & Editing, Supervision, Funding acquisition.
Third Author: Mahdi Amirabadizadeh: Methodology, Formal Analysis, Writing – Review & Editing.
Fourth Author: Carlo De Michele, Methodology, Formal Analysis, Writing – Review & Editing.

Acknowledgments

The authors would like to thank Iran's Meteorological Organization (IRIMO) for providing the data.

References

1- Salvadori, G., & De Michele, C. 2007. On the use of copulas in hydrology: theory and practice. *Journal of Hydrologic Engineering*, *12*(4), 369-380. Doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:4(369)

2- Xiao, Y., Guo, S., Liu, P., & Fang, B. 2008. A new design flood hydrograph method based on bivariate joint distribution. *IAHS-AISH publication*, 75-82. Doi: 10.1007/978-981-13-0574-0_1

3- Nazeri Tahroudi, M., Khashei Siuki, A., & Ramezani, Y. 2019. Redesigning and monitoring groundwater quality and quantity networks by using the entropy theory. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*, 1-17. Doi: 10.1007/s10661-019-7370-y

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۳، پاییز ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۹-۱

پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر دبی رودخانه با استفاده از توابع مفصل (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود)

فهیمه شریفان[۱]، یوسف رمضانی[۲*]، مهدی امیرآبادی‌زاده[۳] و کارلو دی میکله[۴]

۱- دانش‌آموخته دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، ایران.

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

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، ایران .

۴- استاد، گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه پلی تکنیک میلان، میلان، ایتالیا.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۱۶

چکیده

در تحقیق حاضر، به‌منظور بررسی تغییرات دبی رودخانه سیمینه‌رود تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۸۸) و دوره آتی (۲۰۳۱-۲۰۵۰) شبیه‌سازی و پیش‌بینی مبتنی بر توابع مفصل صورت گرفت. با استفاده از ۲۶ مدل اقلیمی گزارش ششم، داده‌های بارش به‌صورت روزانه تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۳۱ استخراج گردید و در نهایت داده‌های بارش شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده برای برآورد دبی شبیه‌سازی و دبی پیش‌بینی شده به توابع مفصل وارد گردیدند. ۲۶ مدل اقلیمی مورد استفاده در پژوهش با استفاده از آماره های R^2، NSE، RMSE و CRM مورد ارزیابی قرار گرفتند و با توجه به این آماره‌ها، مدل‌ها رتبه‌بندی و وزن‌دهی شدند و برای پیش‌بینی بارش در دوره آینده استفاده شدند. نتایج مدل‌های اقلیمی نشان داد که در ماه‌های می، ژوئن، جولای، آگوست، نوامبر و دسامبر مقدار بارش در هر سه سناریو نسبت به بارش اندازه‌گیری‌شده کاهش خواهد داشت. همچنین، میزان بارش سالانه در دوره آینده در هر سه سناریو نسبت به میزان بارش سالانه اندازه‌گیری شده دوره پایه کاهش خواهد داشت. پس از تأیید وجود همبستگی بین جفت پارامتر بارش- دبی رودخانه و برآورد توزیع حاشیه‌ای پارامترهای مذکور، مفصل کلایتون به‌عنوان مفصل برتر با استفاده از معیارهای ارزیابی NSE، RMSE و BIAS انتخاب گردید. پس از انتخاب مفصل برتر، دبی رودخانه با استفاده از توابع مفصل شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردید. نتایج پیش‌بینی حاکی از آن است که تغییرات دبی در ماه‌های مختلف به‌صورت نوسانی خواهد بود. مقدار دبی سالانه برای دوره آینده، تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب برابر با ۱۴/۹، ۱۲ و ۱۱/۲ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی شده است که کاهش سالانه دبی رودخانه سیمینه‌رود تحت هر سه سناریو را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: چگالی شرطی، ریز مقیاس‌نمایی، کلایتون، گزارش ششم.

مقدمه

تغییر اقلیم به هر نوع دگرگونی در آب و هوا در طول زمان گفته می‌شود که دلایل آن می‌تواند تغییرات طبیعی و فعالیت‌های انسانی باشد. اخیراً آگاهی از تغییرات آب و هوا به‌دلیل پیامدهای منفی اقتصادی- اجتماعی و آسیب‌های مالی مرتبط با شرایط آب و هوایی اهمیت یافته است. تخمین زده می‌شود که به‌دلیل تغییرات آب و هوایی، سطح دریاها تا سال ۲۱۰۰ بین ۸۸ تا ۸۹ سانتی‌متر افزایش می‌یابد و به دنبال آن سیل و سایر پدیده‌ها مانند تغییر در ساختار اقیانوس‌ها، تغییر در الگوی گردش عمومی جو، جنگل‌زدایی، مراتع و سایر موارد در فهرست قرار خواهند گرفت (Purkey et al., 2008). در نهایت این امر منجر به گسترش پدیده بیابان‌زایی می‌شود. برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع مختلف در آینده، مدل‌های شبیه‌سازی گردش عمومی (GCM) ایجاد شده است که می‌توانند پارامترهای آب و هوایی را در یک دوره زمانی طولانی، از طریق چارچوب اتخاذ شده توسط IPCC، طرح‌ریزی کنند (Dibike and Coulibaly, 2005; Kilsby et al., 2007).

مدل‌های گردش عمومی سه‌بعدی جو-اقیانوس قابل اعتمادترین ابزار برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آینده هستند. با توجه به وابستگی اثرات تغییر آب و هوا به نتایج مدل‌های اقلیمی Chen et al. (2019)، دقت بیشتر باعث می‌شود تا پیش‌بینی‌های قابل اعتمادتری در دوره‌های آتی با استفاده از مدل‌های آب و هوایی ارائه‌شده در ششمین گزارش تغییر اقلیم به‌دست آید (Eyring et al., 2016; Stouffer, 2017). سناریوهای گزارش ششم، به شکل تلفیقی از خط سیرهای

DOI: 10.22055/jise.2025.49381.2157

اجتماعی–اقتصادی (SSP) (توسعه پایدار SSP1، توسعه مبتنی بر سیاست میانی SSP2، رقابت‌پذیری منطقه‌ای SSP3، نابرابری SSP4 و توسعه سوخت‌های فسیلی SSP5) و خط سیرهای غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطح واداشت متفاوت) هستند؛ به‌طوری‌که فرصتی را برای تجزیه و تحلیل بازخورد بین تغییرات آب و هوا و عوامل اقتصادی–اجتماعی مانند رشد جمعیت جهان، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری فراهم می‌کنند. مطالعه‌های زیادی در راستای اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی انجام شده است.

Sen Roy (2009)، به بررسی مکانی بارندگی‌های فرین ساعتی در هند پرداخت. او مشاهدات فرین بارش ساعتی طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۲ را برای فصول زمستان، تابستان‌های خشک و تابستان‌های مرطوب هند بررسی کرد. نتایج حاکی از آن است که در نواحی مرتفع هیمالایا به‌خصوص در شمال غربی و دامنه هیمالایا (از جنوب تا حوضه ایندو –گنگ (Indo-Gangetic))، بارش‌های سنگین افزایش می‌یابد. روند منفی در زمستان، برای فصول خشک و مرطوب تابستان روند مثبت است. در خط ساحل غربی، بارش‌ها کاهش می‌یابند، درحالی‌که در بخش شمالی ساحل، روند افزایشی بارش فرین مشاهده شده است.

Hsu et al., (2007)، به ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی منطقه پینگ‌تنگ (Pingtung) تایوان پرداختند. در این بررسی از یک مدل هیدرولوژیکی که پایه‌ی آن اطلاعات زمین‌شناسی، هیدرولوژیک و ژئوشیمی بود استفاده شده است و با به‌کار بستن یک رگرسیون خطی مدل بارش برای ۲۰ سال آینده، به این نتیجه رسیدند که سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر تغییر اقلیم به تدریج کاهش خواهد یافت. Lambert et al (2011) به بررسی دمای کشور ایران تحت سناریوی RCP6.2 و RCP5.4 در دوره ۲۰۶۵–۲۰۴۶ میلادی و انتهای قرن ۲۱ پرداختند. نتایج نشان داد که تحت سناریوی RCP6.2، دمای کشور ایران در دوره‌های ۱۹۸۶–۲۰۰۵ و ۲۰۶۵–۲۰۴۶ میلادی و انتهای قرن ۲۱ به میزان ۱/۵ تا ۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره ۲۰۰۵– ۱۹۸۶ افزایش خواهد یافت. در سناریوی RCP5.4 بیش از سناریوی RCP6.2 افزایش دما مشاهده شد به‌گونه‌ای که در دوره میانی و دوره انتهایی قرن ۲۱ افزایش دمای کشور بین °C ۲ تا ۳ نسبت به دوره ۲۰۰۵–۱۹۸۶می‌باشد. Nie et al. (2012)، به بررسی تغییرات زمانی و فضایی دما و بارش‌های حدی در منطقه جوانگژی (Guangxi) چین پرداختند. نتایج حاکی از این است که در فصل زمستان بیشترین تغییرات در دما وجود دارد و مربوط به دماهای کمینه است و روند بارش‌های بیشینه افزایشی است. Droogers et al. (2012)، در بررسی تغییر اقلیم بر منابع آب تجدیدپذیر و رواناب در مناطق خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) به این نتیجه رسیدند که منابع آب تجدیدپذیر در منطقه در افق ۲۰۵۰ در حدود ۱۲ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین شبیه‌سازی رواناب در مناطق نشان داد که رواناب به‌طورکلی در حال کاهش است که این کاهش در مناطق غربی ایران بیشتر خواهد بود و به دنبال آن کاهش تغذیه آب زیرزمینی در این مناطق اتفاق خواهد افتاد.

اغلب پدیده‌های هیدرولوژیکی معمولاً توسط دو یا چند متغیر وابسته توصیف می‌شوند. بررسی منابع نشان‌دهنده این است که توابع توزیع چند متغیره به‌طور وسیعی برای مدل‌سازی دو یا چند متغیر وابسته هیدرولوژیکی و ساختار وابستگی آن‌ها استفاده می‌شود (Salvadori and De Mickele., 2007). در سال‌های گذشته، روش‌های چند متغیره در مطالعه‌های هیدرولوژیکی زیست‌محیطی معرفی شده است. در گذشته، متداول‌ترین توابع توزیع تجمعی (CDF) چند متغیره توابع گاوسی بودند، ولی این توابع دارای محدودیت هستند که توزیع‌های حاشیه‌ای باید نرمال باشند. سپس، توزیع‌های دو متغیره با توزیع‌های حاشیه‌ای غیر نرمال، مانند توزیع دو متغیره نمایی Favre et al. (2002)، توزیع دو متغیره گاما Yue et al. (2001) و توزیع دو متغیره مقادیر حدی Adamson et al. (1999) ارائه شدند.

Favre et al., (2004) به‌طور مختصر به معایب این نوع توزیع‌ها اشاره کردند: (۱): از یک خانواده بودن توزیع‌های حاشیه‌ای (۲): روشن و آشکار نبودن برای حالت بیش از دو متغیر و (۳): استفاده از پارامترهای توزیع‌های حاشیه‌ای برای مدل‌سازی وابستگی میان متغیرهای تصادفی. برای جبران این محدودیت‌ها، توابع مفصل در تحلیل هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت که بروزترین ابزار ریاضی برای ارزیابی مسائل چند متغیره است (Xiao et al., 2008).

Lazoglou و Anagnostopoulou (2019) به بررسی توزیع توأم دما و بارش با استفاده از توابع مفصل در مدیترانه پرداختند. در این پژوهش از دو خانواده مفصل که شامل مفصل‌های ارشمیدوسی و بیضوی هست استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که مفصل فرانک به‌عنوان بهترین مفصل برای توصیف توزیع توأم دما در اکثر ایستگاه‌ها و برای بارندگی بهترین مفصل تابع مفصل گامبل انتخاب گردید. Zhang و Singh (2007) در ارزیابی چند متغیره رویدادهای بارش حدی از عملکرد چهار تابع مفصل ارشمیدسی علی– میخائیل– حق، فرانک، گامبل–هوگارد و کوک– جانسون (Cook–Johnson) استفاده نمودند. در این پژوهش از داده‌های بارش ساعتی در یک دوره ۴۲ ساله سه ایستگاه باران‌سنجی حوضه آبریز رودخانه آمیت (Amite) واقع در ایالت لوئیزیانا (Louisiana State) استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که در ایستگاه لیبرتی (Liberty) برای متغیرهای شدت– عمق بارش مفصل علی– میخائیل– حق، برای متغیرهای شدت– مدت بارش مفصل گامبل–هوگارد و برای عمق– مدت بارش تابع مفصل فرانک به‌عنوان بهترین مفصل انتخاب شدند. برای متغیرهای شدت– عمق، شدت– مدت و عمق– مدت بارش در دو ایستگاه کلینتون (Clinton) و اسپرینگ (Denham springs) به‌ترتیب مفصل‌های علی– میخائیل– حق، فرانک و فرانک به‌عنوان مفصل

برتر انتخاب شدند. Evin و Favre (2008) ساختار وابستگی مقادیر عمق و مدت بارش‌های بلژیک و آمریکا را مورد بررسی قرار دادند و میزان وابستگی دو متغیر مذکور را با استفاده از روش خوشه‌بندی نیمان- اسکات (Neyman-Scott) محاسبه نموده و سپس با استفاده از تابع مفصل مکعبی (Cubic Copula)، توزیع توأم را تولید نموده و احتمالات شرطی را برای حالت‌های مختلف عمق و مدت بارش به‌دست آوردند.

Haberlandt و Radtke (2013) به مدل‌سازی ساختار وابستگی مشخصه‌های بارش (شامل عمق و مدت) حوضه آبریز بد (Bode River Basin) (در آلمان) با استفاده از تابع مفصل فرانک برای دو فصل خشک و مرطوب پرداختند و نتایج حاصل شده برای توسعه یک مدل تلفیقی احتمالاتی برای تحلیل فراوانی سیلاب استفاده نمودند. AghaKouchak et al. (2010) به شبیه‌سازی همبستگی مکانی بارش با استفاده از توابع مفصل بیضوی پرداختند. نتایج نشان داد که تابع مفصل t در مقایسه با مفصل گاوسی عملکرد برتری برای شبیه‌سازی بارش جدی دارد. Zhang et al. (2011) برای ارزیابی جریان‌های کمینه و بیشینه هفت روزه حوضه آبریز رودخانه پرل (Pearl) در چین از توابع مفصل استفاده نمودند. نتایج حاکی از آن است احتمال خشک‌سالی یا سیل شدید در این حوضه، به‌علت اثرات ترکیبی جریان‌های کمینه و بیشینه دو شاخه غربی و شمالی، ناچیز است. Lee و Salas (2011) به شبیه‌سازی جریان تصادفی رودخانه نیل با استفاده از توابع مفصل پرداختند. در این پژوهش توابع پارامتری و ناپارامتریک به داده‌ها برازش داده شد و ساختار وابستگی داده‌ها با توابع مفصل مدل‌سازی گردید. نتایج نشان داد که مزایای استفاده از این توابع مفصل نسبت به روش‌های مدل‌سازی معروف بیشتر است. Salarijazi et al. (2013) به تحلیل فراوانی سیلاب دو متغیره با استفاده از توابع مفصل پرداختند. در این پژوهش از سه مفصل کوک- جانسون، علی-میخائیل-حق و گامبل-هوگارد برای مدل‌سازی ریاضی دو متغیره سیلاب استفاده شد و مفصل گامبل-هوگارد به‌عنوان مفصل برتر انتخاب گردید. Sobkowiak et al. (2020) به تحلیل و ارزیابی جریان رودخانه در بالادست حوضه آبریز ایندس (Indus) واقع در پاکستان با استفاده از توابع مفصل پرداختند. در این پژوهش برای ارزیابی همبستگی از ضریب پیرسون استفاده شده است. نتایج نشان داد که تابع مفصل گامبل بهترین عملکرد را برای ارزیابی وابستگی توأم جریان رودخانه داشته است. Nazeri Tahroudi et al. (2022) به بررسی دو متغیره کمبود بارش و کمبود دبی جریان رودخانه با استفاده از توابع مفصل در حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود پرداختند. همبستگی بین دو متغیر مورد نظر را با استفاده از ضریب تائوکندال برآورد کردند. نتایج نشان داد که تابع مفصل کلایتون بهترین عملکرد را برای تولید توزیع توأم متغیرهای موردنظر دارد.

هدف از مطالعه حاضر، توسعه یک مدل احتمالاتی مبتنی بر مفصل برای تحلیل اثر تغییر اقلیم بر بارش و دبی رودخانه حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود می‌باشد. نوآوری این تحقیق، استفاده از گزارش ششم تغییر اقلیم و استفاده از ۲۶ مدل اقلیمی برای برآورد بارش می‌باشد و همچنین استفاده از توابع مفصل ارشمیدسی، مقادیر حدی، FGM و پلاکت در پیش‌بینی و شبیه‌سازی احتمالاتی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای بارش و دبی رودخانه حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود در شمال غرب کشور و در استان آذربایجان غربی قرار دارد. این حوضه دارای مختصات جغرافیایی طول ۴۶/۱۰ و عرض ۳۶/۳۹ می‌باشد. رودخانه سیمینه‌رود از ارتفاعات کردستان (ابراهیم جلال نیستان و کپری) سرچشمه می‌گیرد. طول و مساحت حوضه این رودخانه به‌ترتیب برابر ۲۰۰ کیلومتر و ۲۰۹۰ کیلومترمربع است. حجم آب تجدیدپذیر و خروجی از حوضه آبریز سیمینه‌رود به‌ترتیب برابر با ۵۵ و ۳۶ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. موقعیت حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود در شکل (۱) نشان داده شده است.

در این تحقیق از داده‌های روزانه بارندگی و دبی رودخانه سیمینه‌رود استفاده شد. در حوضه مورد نظر، یک ایستگاه باران‌سنجی براساس تئوری آنتروپی برای بارندگی و یک ایستگاه هیدرومتری برای مقادیر دبی رودخانه انتخاب شد (Nazeri Tahroudi et al., 2019). از داده‌های بارندگی (میلی‌متر) و داده‌های دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) در دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۱۸ استفاده شده است. همچنین دوره آماری آتی از سال ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ در نظر گرفته شده است.

ایستگاه هیدرومتری داشبند بوکان یکی از قدیمی‌ترین و کامل‌ترین ایستگاه‌های موجود در منطقه است. به‌همین دلیل به‌عنوان ایستگاه هیدرومتری که معرف دبی کل حوضه باشد انتخاب گردید. ایستگاه باران‌سنجی داشبند بوکان با استفاده از تئوری آنتروپی، به‌عنوان ایستگاه باران‌سنجی که معرف مقادیر بارش کل حوضه باشد انتخاب گردید (Nazeri Tahroudi et al., 2019). مشخصات آماری پارامترهای مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است.

DOI: 10.22055/jise.2025.49381.2157

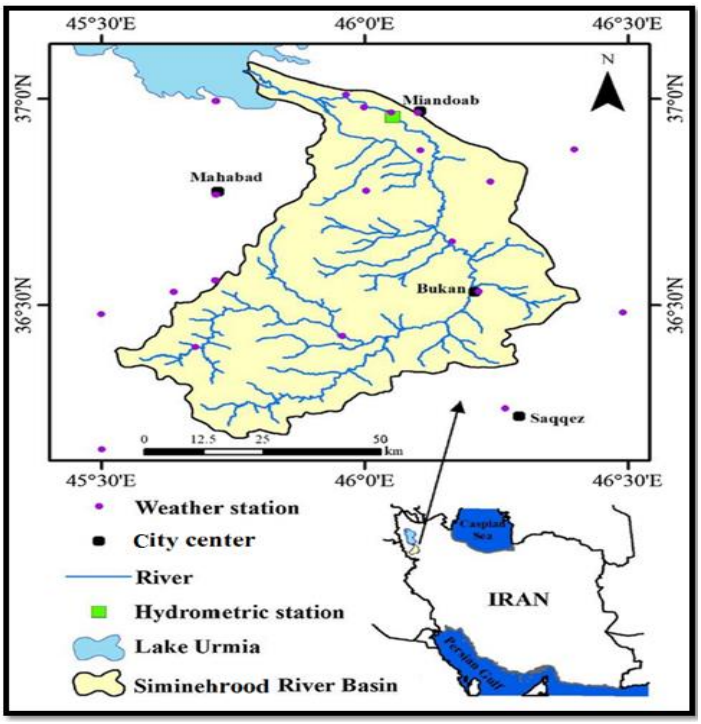

Fig. 1- Geographical location of the Siminehrood River Basin

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده در مقیاس سالانه

Table 1- Statistical characteristics of the used data on an annual scale

Hydrometric Station	Rain Gauge Station	Average Precipitation (mm)	Average River Discharge (m^3/s)	Standard Deviation of Precipitation (mm)	Standard Deviation of River Discharge (m^3/s)
Dashban Bukan	Dashband Bukan	296.1	17.85	20.3	18.84

مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوها

در این تحقیق به‌منظور بررسی تغییرات بارش، از مدل‌های گردش عمومی جو گزارش ششم تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 که به‌ترتیب انتشار کم گازهای گلخانه‌ای، انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای و انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای می‌باشد استفاده شده است. و هم‌چنین از ۲۶ مدل GCM که ویژگی‌های مورد نظر از قبیل داده‌های تاریخی بارش و سناریوها را دارا باشند استفاده شده است. در این مطالعه، از چندین روش برای ریز مقیاس‌نمایی داده‌های بارش مدل‌های GCM، از جمله BCSD (Bias Correction and Spatial Disaggregation)، SDSM (Statistical Downscaling Model)، و مدل LARS WG 7.0 استفاده شد. با توجه به غیر قابل قبول بودن معیارهای ارزیابی برای BCSD و SDSM، مدل LARS WG 7.0 برای ریز مقیاس‌نمایی انتخاب شد. این مدل در مطالعه‌های مختلفی برای ریز مقیاس‌نمایی خروجی GCM در حوضه دریاچه ارومیه استفاده شده است (Jani et al., 2023; Saatloo et al., 2020; Rahmani and Zarghami, 2015; Heydari Tasheh Kabood et al., 2020). پس از ریز مقیاس‌نمایی مدل‌ها برای انتخاب مدل‌های برتر از معیارهای ارزیابی ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب مجموع باقی‌مانده (CRM) استفاده شد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i-\bar{o}_i)(p_i-p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(o_i-\bar{o}_i)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(p_i-\acute{p}_i)^2}}\right] \quad (۱)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}|o_i-p_i|^2}{\sum_{i=1}^{n}|o_i-\bar{o}_i|^2} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(p_i-o_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} o_i \sum_{i=1}^{n} p_i}{\sum_{i=1}^{n} o_i} \quad (۴)$$

در روابط بالا $\overline{p_i}$ و $\overline{O_i}$ به‌ترتیب بیانگر میانگین ماهانه بارش پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در ماه i ام است و n هم نشان‌دهندهٔ تعداد کل ماه‌های مورد بررسی؛ یعنی ۱۲ است.

بهینه‌ترین جواب برای مدل‌ها هنگامی ایجاد خواهد شد که RMSE و CRM به سمت صفر و R^2 و NSE به سمت یک میل کنند.

با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی برای ۲۶ مدل، مدل‌ها رتبه‌بندی شدند و با استفاده از رابطه (۵) به هریک از مدل‌ها وزنی تعلق گرفت. در این رابطه، R_i رتبه‌ی هر مدل در شاخص ارزیابی و W_i وزن هر مدل می‌باشد (Chen et al., 2011).

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{n} R_i} \qquad (۵)$$

پس از محاسبه وزن‌ها، هر یک از وزن‌ها در مدل‌های مختلف، تحت سناریوهای موردنظر ضرب شد و سپس مجموع گرفته شد و این مجموع به دست آمده برای هر یک از سناریوها، به عنوان یک سری داده برای ورودی به بخش مفصل می‌باشد.

انتخاب توزیع‌های حاشیه‌ای

در این بخش با استفاده از مدل EasyFit5.6 به برآورد توزیع‌های آماری پارامترهای بارش و دبی رودخانه پرداخته شد. پس از برازش توزیع‌های آماری بر روی پارامترهای موردنظر، به نیکویی برازش توزیع‌ها با استفاده از آزمون‌های کلموگروف- اسمیرنف (Kolmogorov–Smirnov) و اندرسون- دارلینگ (Anderson-Darling) پرداخته شد. اگر در سطح پنج درصد از این آزمون‌ها، نتایج معنی‌دار باشند آن توزیع برای پارامترهای موردنظر، مورد تأیید خواهد بود (Nazeri Tahroudi et al., 2019).

توابع مفصل

توابع مفصل توابعی هستند که توزیع حاشیه‌ای متغیرهای مختلف را ترکیب کرده و توزیع چند متغیره را تولید می‌کنند. تابع توزیع تجمعی احتمال چند متغیره، بر حسب توابع توزیع حاشیه‌ای تک متغیره و یک تابع مفصل بیان می‌شود. یک تابع مفصل چند متغیره همان تابع تجمعی توأم متغیرهای تصادفی یکنواخت استاندارد است. مفصل دو متغیره به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$C: [0,1]^2 \to [0,1] \qquad (۶)$$

که می‌بایست شروط زیر را دارا باشد.

$$C(u,0) = C(0,v) = 0\ , C(1,v) = v\ , C(u,1) = u \qquad (۷)$$

ب) $u_1, u_2, v_1, v_2 \in [0,1]$ و $u_2 \geq v_2$ و $u_1 \geq v_1$ اگر

$$C(u_1,u_2) + C(v_1,v_2) - C(u_1,u_2) - C(v_1,v_2) \geq 0 \qquad (۸)$$

Sklar (1959) بیان کرد که هر تابع توزیع n بعدی F به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F(x_1, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), \dots, (F_n(x_n)) \qquad (۹)$$

که در آن $F_1,\dots, F_n$ توابع توزیع چند متغیره می‌باشند. اگر $F_1,\dots, F_n$ پیوسته باشند تابع مفصل C یکتا است و به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$(u_1, \dots, u_n) = F\left(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_n^{-1}(u_n)\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن چندک F_{k-1} به‌صورت $F_{k-1} = \inf\{x \in R | F_k(x) \geq u_k)\}$ تعریف می‌شود. همچنین می‌توان بیان کرد اگر C تابع مفصل باشد و $F_1, \dots, F_n$ توابع توزیع تک متغیره باشند، تابع F یک تابع توزیع n بعدی با حاشیه‌های $F_1, \dots, F_n$ می‌باشد. مفصل‌ها به دسته‌های مختلفی مانند ارشمیدسی، بیضوی و مقادیر حدی تقسیم می‌شوند که هر یک از این دسته‌ها، مفصل‌های مختلفی را شامل می‌شود.

برای موارد دو متغیره، دو متغیر تصادفی همبسته X و Y به‌ترتیب به‌صورت توابع $f_x(x; a_1, a_2, \dots, a_p)$ و $f_y(y; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ توزیع شده‌اند که $a_1, a_2, \dots, a_p$ پارامترهای $f_x(x)$ و $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ پارامترهای $f_y(y)$ هستند. تعداد پارامترها را نوع توزیع‌های حاشیه‌ای تعیین می‌کند.

برای n جفت مشاهده مستقل، تابع لگاریتم درست‌نمایی برای X و Y یعنی $lnL_x(x; a_1, a_2, \dots, a_p)$ و $lnL_y(y; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ به‌صورت جداگانه به‌منظور تخمین پارامترها، بیشینه می‌شوند.

$a_1, a_2, \dots, a_p$ و $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ پارامترهای تخمین زده می‌باشند. تابع لگاریتم درست‌نمایی (Log Likelihood) تابع چگالی احتمال توأم توابع $f_{XY}(x, y)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &\ln L(x, y; \hat{a_1}, \hat{a_2}, \dots, \hat{a_p}, \hat{\lambda_1}, \hat{\lambda_2}, \dots, \hat{\lambda}, \theta) \\ &= \ln L_c(x, y; F_X(x), F_Y(y), \theta) + \\ &\ln L_X(\ln L(x; \hat{a_1}, \hat{a_2}, \dots, \hat{a_p}) + \\ &ln\ L_Y(y; \hat{\lambda_1}, \hat{\lambda_2}, \dots, \hat{\lambda_r}) \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

DOI: 10.22055/jise.2025.49381.2157

که در رابطه (۱۱)، تابع لگاریتم درست‌نمایی تابع چگالی مفصل lnL_c می‌باشد. با قرار دادن مقادیر تخمین زده شده برای $a_1, a_2, \dots, a_p$ و $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ در رابطه (۱۱)، تابع لگاریتم درست‌نمایی lnL برای برآورد پارامتر مفصل تخمینی $\widehat{\theta}$، بیشینه می‌گردد.

در این تحقیق، از ۱۰ تابع مفصل مختلف برای ایجاد توزیع دو متغیره به جفت پارامترهای مورد نظر، برازش داده شد که در جدول (۲) آورده شده‌اند. لازمه استفاده از توابع مفصل، وجود همبستگی بین جفت پارامترهای موردنظر است. به همین منظور، برای برآورد همبستگی پارامترهای موردنظر از آماره تائوکندال استفاده گردید. از این آماره رابطه (۱۲) در تمامی مطالعه‌های توابع مفصل استفاده می‌شود (De Michele and Salvadori., 2003; Czado., 2010; Ramezani et al., 2019).

$$\tau = \left(\frac{N}{2}\right) \sum_{i<j} sign\left[\left(x_{i_}x_j\right)\left(y_{i_}y_j\right)\right] \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲)، N تعداد داده‌ها، ()sign تابع علامت و x و y مقادیر جفت پارامترهای موردنظر می‌باشد.

برای انتخاب مفصل برتر، پارامتر تابع مفصل با روش IFM به‌دست آمد و سپس با مقایسه نتایج هر کدام از مفصل‌ها با نتایج حاصل از مفصل تجربی، مفصل برتر معرفی می‌گردد.

برای یک مفصل دو بعدی توأم، مفصل تجربی داده‌های اندازه‌گیری شده (u_i, v_i) به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C_e(u_i, v_i) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I\left(\frac{Q_i}{n+1} \le u_i, \frac{P_i}{n+1} \le v_i\right) \qquad (۱۳)$$

که در این رابطه، C_e مفصل تجربی، n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده و $I(A)$ پارامتر شاخص (Indicator variable) عبارت منطقی A است. چنانچه عبارت A درست باشد مقدار یک و اگر نادرست باشد مقدار صفر را اختیار می کند. Q_i و P_i رتبه داده اندازه‌گیری شده i ام مربوط به جفت مفصل‌های مورد نظر می‌باشد.

جدول۲- توابع مفصل استفاده شده در این تحقیق (De Oliveira Peres et al., 2020)

Table 2 - Copula functions used in this research (De Oliveira Peres et al., 2020)

Family	C(u,v)	The domain of θ
Ali-Mikhail-Haq (AMH)	$\frac{uv}{1-\theta(1-u)(1-v)}$	$-1 \le \theta \le 1$
Clayton	$(u^{-\theta}+v^{-\theta}-1)^{-1/\theta}$	$\theta \ge 0$
Frank	$-\frac{1}{\theta}\ln\left[1+\frac{\left(e^{-\theta u}-1\right)\left(e^{-\theta v}-1\right)}{e^{-\theta}-1}\right]$	$\theta \ne 0$
Galambos	$uv\exp\{[(-lnu)^{-\theta}+(-lnv)^{-\theta}]^{-\frac{1}{\theta}}\}$	$\theta \ge 0$
Gumbel-Hougaard (GH)	$\exp\{-[(-lnu)^{\theta}+(-lnv)^{\theta}]^{\frac{1}{\theta}}\}$	$\theta \ge 1$
Plackett	$\exp\{-[(-lnu)^{\theta}+(-lnv)^{\theta}]^{1/\theta}\}$	$\theta \ge 0$
Farlie-Gumbel-Morgenstern (FGM)	$\frac{1}{2}\frac{1}{\theta-1}\{1+(\theta-1)(u+v)-[(1+(\theta-1)(u+v))^2-4\theta(\theta-1)uv]^{\frac{1}{2}}\}$	$-1 \le \theta \le 1$
Gumbel-Barnett (GB)	$uv\,exp\{-\theta(logu)(logv)\}$	$0 < \theta \le 1$
A12	$\frac{1}{1+[(\frac{1}{u}-1)^{\theta}+(\frac{1}{v}-1)^{\theta}]^{1/\theta}}$	$\theta \ge 1$
Joe	$1-[(1-u)^{\theta}+(1-v)^{\theta}-(1-u)^{\theta}(1-v)^{\theta}]^{1/\theta}$	$\theta > 1$

نیکویی برازش مفصل‌ها

در این تحقیق برای انتخاب برترین تابع مفصل از معیارهای ارزیابی ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و BIAS استفاده شده است.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)}{i=n1} \quad (۱۴)$$

که $\overline{p_i}$ و $\overline{O_i}$ به ترتیب میانگین پارامتر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در ماه i ام را نشان می‌دهد و n هم تعداد داده‌های موجود در هر پارامتر می‌باشد. بهترین نتیجه برای انتخاب توابع مفصل هنگامی ایجاد خواهد شد که BIAS به سمت صفر میل کند.

چگالی شرطی توابع مفصل

پس از انتخاب تابع مفصل و ساختار آن، به‌منظور برآورد دبی جریان رودخانه از چگالی شرطی تابع مفصل استفاده شده است که در رابطه زیر آورده شده است.

$$c(u_2|u_1) = \frac{\partial^2 C(u_1,u_2)}{\partial u_1 \partial u_2} \quad (۱۵)$$

که در رابطه بالا u_1 بارش و u_2 دبی رودخانه می‌باشد.

شبیه‌سازی مبتنی بر ساختار جفت مفصل

برای مفصل d متغیره:

$$u_d = C^{-1}_{d|d-1,\dots,1}(w_d|u_{d-1},\dots,u_1) \quad (۱۶)$$

برای محاسبه تابع توزیع شرطی در رابطه (۱۶)، ($C^{-1}_{d|d-1,\dots,1}$) به ساختار جفت مفصل احتیاج است که برای تابع توزیع شرطی یک عبارت تکراری از توابع h را ارائه دهد (Czado, 2010).

تابع h برای یک مفصل دو بعدی با پارامتر مفصل θ_{ij} به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$h_{i|j} = \left(u_i|u_j;\theta_{ij}\right):\frac{\partial}{\partial u_j}C_{ij}(u_i,u_j;\theta_{ij}) \quad (۱۷)$$

$$h_{j|i} = \left(u_j|u_i;\theta_{ij}\right):\frac{\partial}{\partial u_i}C_{ij}(u_i,u_j;\theta_{ij}) \quad (۱۸)$$

برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی، ابتدا نمودار چگالی شرطی c(u,v) برای یکی از پارامترهای موردنظر رسم می‌گردد. در این پژوهش شبیه‌سازی مقادیر دبی رودخانه تحت تأثیر مقادیر بارش موردنظر است. پس برای هر مقدار بارش، نمودار u که مربوط به دبی رودخانه می‌باشد رسم می‌گردد. سپس بیشترین مقدار c(u,v) در هر نمودار انتخاب می‌شود و مقادیر مربوطه آن روی محور x محاسبه می‌گردد. بیشترین مقادیر در نمودارهای رسم شده، همان مقادیر دبی رودخانه می‌باشند که تحت تأثیر مقادیر بارش قرار گرفته‌اند (Nazeri Tahroudi., 2021a, 2021b).

نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های GCM

ارزیابی عملکرد ۲۶ مدل اقلیمی برای شبیه‌سازی بارش در حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود، از طریق مقایسه بارش دوره تاریخی مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه داشبند بوکان محاسبه گردید. به‌منظور برآورد عملکرد مدل‌ها از معیارهای ارزیابی NSE، RMSE، R^2 و CRM استفاده شده است که نتایج آن‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

با توجه به جدول (۳)، مدل MIROC6 از عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بارش و مدل E3SM-1-0 از عملکرد ضعیفی نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار است که با نتایج تحقیق Li et al. (2022) هم‌خوانی دارد.

برای کاهش خطا، از روش وزن‌دهی استفاده شده است که نتایج وزن‌دهی مدل‌ها در جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود مدلی که عملکرد بهتری داشته است وزن بالاتری به خود اختصاص داده است. از بین ۲۶ مدل، شش مدل MIROC6، INM-CM5-0، FGOALS-G3، KACE-1-0-G، BCC-CSM2-MR و INM-CM4-8، وزنی به خود اختصاص دادند که در داده‌های آن‌ها اثر می‌گذارد و قابل صرف‌نظر نیست و ۲۰ مدل باقی‌مانده به علت داشتن وزنی پایین و تقریباً برابر صفر، از آن‌ها صرف‌نظر شد. از ضرب این وزن‌ها در داده‌های این مدل‌ها و محاسبه مجموع آن‌ها، یک سری داده برای هر یک از سناریوها به‌دست آمد که به‌منظور ورودی به بخش مفصل استفاده گردید.

با استفاده از سری داده‌های به‌دست آمده برای هر یک از سناریوها و بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه داشبند بوکان، میانگین بارش سالانه و ماهانه در دوره آتی (۲۰۳۱-۲۰۵۰) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با میانگین بارش سالانه و ماهانه اندازه‌گیری شده در دوره پایه مقایسه گردید که نمودارهای میانگین ماهانه و سالانه به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است.

DOI: 10.22055/jise.2025.49381.2157

جدول ۳- عملکرد مدل‌های CMIP6 جهت شبیه‌سازی بارش در دورهٔ پایه در ایستگاه سینوپتیک داشبند بوکان

Table 3- Performance of CMIP6 models for simulating precipitation during the baseline period at the Dashband Bukan synoptic station

Model	CRM	NSE	RMSE (mm)	R^2	Final rank	Sum of ranks
MIROC6	0.1	0.82	8.72	0.86	1	8
INM-CM5-0	-0.12	0.65	12.18	0.73	2	15
FGOALS-G3	-0.61	0.43	17.81	0.9	3	29
KACE-1-0-G	0.11	0.47	17.62	0.4	4	30
BCC-CSM2-MR	0.26	0.37	18.51	0.6	5	31
INM-CM4-8	0.34	0.33	19.31	0.75	6	32
CESM2	0.25	0.18	18.48	0.5	7	35
CMCC-ESM2	0.27	-0.05	21.16	0.51	8	46
MPI-ESM-1-2-HAM	0.45	0.17	18.43	0.42	9	48
E3SM-2-0	0.41	-0.35	24.02	0.74	10	49
MPI-ESM1-2-LR	0.21	-0.21	22.78	0.47	11	50
GISS-E2-1-G	-0.75	0.18	18.67	0.5	12	52
KIOST-ESM	-0.84	0.12	19.4	0.55	13	55
MCM-UA-1-0	-0.82	0.1	19.04	0.43	14	61
CAMS-CSM1-0	0.12	-0.51	25.42	0.21	15	62
GFDL-ESM4	0.51	-1.6	32.77	0.88	16	63
NESM3	0.09	-0.58	25.98	0.2	17	64
MPI-ESM1-2-HR	0.3	-1.02	29.35	0.45	18	66
ACCESS-ESM1-5	0.54	-1.96	35.00	0.89	19	67
MRI-ESM2-0	0.51	-1.85	34.33	0.64	20	71
ACCESS-CM2	0.38	-1.11	29.52	0.34	21	74
NorESM2-LM	-1.38	-0.23	22.51	0.28	22	75
CIESM	-16	-1.44	32.26	0.71	23	76
CanESM5	-2.8	-0.58	25.54	0.36	24	81
IPSL-CM6A-LR	0.55	-4.37	47.10	0.52	25	82
E3SM-1-0	0.56	-2.98	41.22	0.5	26	84

جدول٤- وزن‌های ٦ مدل اقلیمی

Table 4- The weights of 6 climate models

Model	INM-CM4-8	BCC-CSM2-MR	KACE-1-0-G	FGOALS-G3	INM-CM5-0	MIROC6
Weight	0.03	0.10	0.15	0.15	0.25	0.31

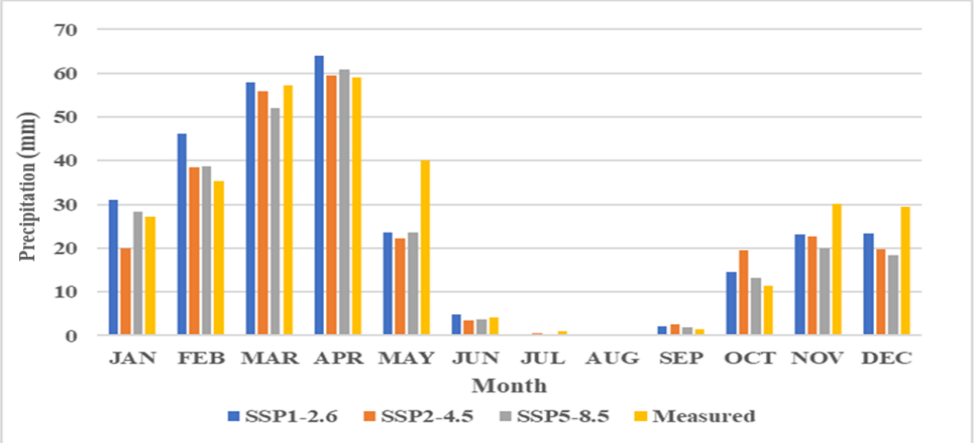

Fig. 2- Comparison of mean monthly precipitation during the future and baseline periods under the three scenarios

شکل۲- مقایسه میانگین بارش ماهانه در دوره آتی و دوره پایه تحت سه سناریوی مورد بررسی

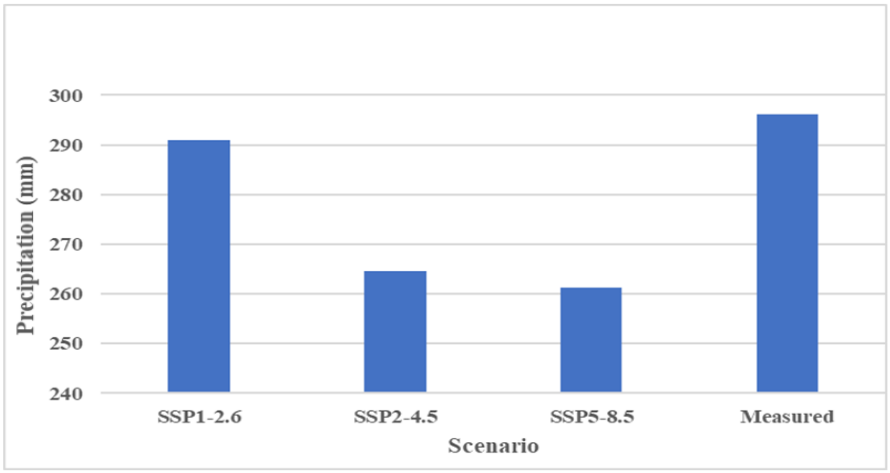

Fig. 3- Comparison of mean annual precipitation during the future and baseline periods under the three scenarios

شکل۳- مقایسه میانگین بارش سالانه در دوره آتی و دوره پایه تحت سه سناریو مورد بررسی

با توجه به شکل (۲) می‌توان گفت تغییرات بارش در ماه‌های مختلف به‌صورت نوسانی خواهد بود و در بعضی از ماه‌ها کاهشی و در برخی از روند افزایشی برخوردار است. در ماه می (بهار)، ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست (تابستان)، ماه نوامبر (پاییز) و ماه دسامبر (زمستان) مقدار بارش در هر سه سناریو نسبت به بارش اندازه‌گیری شده، کاهش خواهد داشت. با توجه به شکل (۲)، بیشترین بارش‌ها در فصول زمستان و بهار رخ داده است یعنی بارش‌های پاییزه در فصول زمستان و بهار باریده خواهند شد که این جابه‌جایی فصول به‌دلیل وجود تغییر اقلیم در حوضه مورد مطالعه خواهد بود. با توجه به شکل (۳)، بارش سالانه در دوره آینده در هر سه سناریو نسبت به بارش اندازه‌گیری شده سالانه کاهش خواهد داشت. بیشترین کاهش بارش در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) و کمترین کاهش بارش در سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) اتفاق خواهد افتاد که با نتایج پژوهش Ansari et al. (2022) هم‌خوانی دارد. مقدار بارش سالانه برای دوره آتی برای سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب برابر است با ۲۹۰/۹، ۲۶۴/۶ و ۲۶۱/۳ میلی‌متر پیش‌بینی شده است که این مقدار برای بارش اندازه‌گیری شده برابر با ۲۹۶/۱ میلی‌متر محاسبه شده است.

ساختار وابستگی و توزیع حاشیه‌ای

همبستگی بین پارامترهای بارش و دبی رودخانه سیمینه‌رود با استفاده از ضریب تائوکندال به‌دست آمد و مشخص گردید که بین این جفت پارامتر، همبستگی خوبی وجود دارد. همبستگی بین جفت پارامتر مذکور برابر با ۰/۴۳ به‌دست آمد. در مطالعه‌های مختلفی مقادیر همبستگی بیش از ۰/۴ برای اجرای یک مدل مبتنی بر مفصل پذیرفته شده است. (De Michele and Salvadori, 2003; Khashei Siuki et al., 2021; Nazeri Tahroudi et al., 2022; Dastourani and Nazeri Tahroudi, 2022).

پس از بررسی و تأیید وجود همبستگی بین پارامترهای بارش و دبی رودخانه، تابع توزیع حاشیه‌ای متناسب با پارامترها مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از مدل EasyFit، توابع توزیع Lognormal و Gamma به‌ترتیب برای پارامترهای بارش و دبی رودخانه به دست آمد.

انتخاب بهترین مفصل و برآورد پارامتر مفصل

پس از تأیید وجود همبستگی بین جفت پارامتر موردنظر و تعیین توابع توزیع حاشیه‌ای متناسب با پارامترهای بارش و دبی رودخانه، بهترین تابع مفصل از بین ۱۰ مفصل موردنظر انتخاب گردید و پارامتر وابستگی تابع مفصل با استفاده از روش IFM، تخمین زده شد. از معیارهای ارزیابی NSE، RMSE و BIAS برای ارزیابی توابع مفصل و انتخاب بهترین تابع مفصل استفاده شد. در جدول (۵)، نتایج نیکویی برازش ۱۰ تابع مفصل برای جفت پارامتر موردنظر آورده شده است. مفصل کلایتون، سطح وابستگی مثبت و منفی را توصیف می‌کند و همچنین با توجه به جدول (۵)، مفصل کلایتون با داشتن بهترین و بالاترین معیارهای ارزیابی به‌عنوان بهترین تابع مفصل انتخاب گردید و پارامتر وابستگی تابع مفصل برای مفصل کلایتون برابر با ۲/۱۷ به‌دست آمد.

شبیه‌سازی با استفاده از توابع مفصل

به‌منظور شبیه‌سازی مقادیر دبی رودخانه متناظر با بارش ایستگاه هواشناسی داشبند بوکان در حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود، از شبیه‌سازی مبتنی بر مفصل استفاده گردید. پس از انتخاب بهترین تابع مفصل، تابع توزیع حاشیه‌ای متناسب با پارامترها و پارامتر وابستگی تابع مفصل با استفاده از ساختار چگالی شرطی مفصل دوبعدی کلایتون شبیه‌سازی صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی دبی رودخانه سیمینه‌رود به‌صورت روزانه و ماهانه به‌ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) آورده شده است.

DOI: 10.22055/jise.2025.49381.2157

جدول ۵- نتایج آزمون نیکویی برازش توابع مفصل برای بارش (میلی‌متر) و دبی رودخانه (مترمکعب بر ثانیه)

Table 5- Results of goodness-of-fit test of copula functions for precipitation (mm) and river discharge (m^3/s)

Evaluation Criteria	AMH	Clayton	Frank	Galambos	GH	Plackett	FGM	GB	A12	Joe
NSE	0.82	0.9	0.53	0.82	0.8	0.84	0.7	0.58	0.82	0.85
RMSE	0.12	0.09	0.19	0.12	0.12	0.11	0.13	0.18	0.12	0.1
BIAS	0.11	0.08	0.18	0.11	0.12	0.1	0.13	0.17	0.11	0.1
Teta	0.99	2.17	-0.91	0.73	1.4	5.23	1	0.1	1	2.08

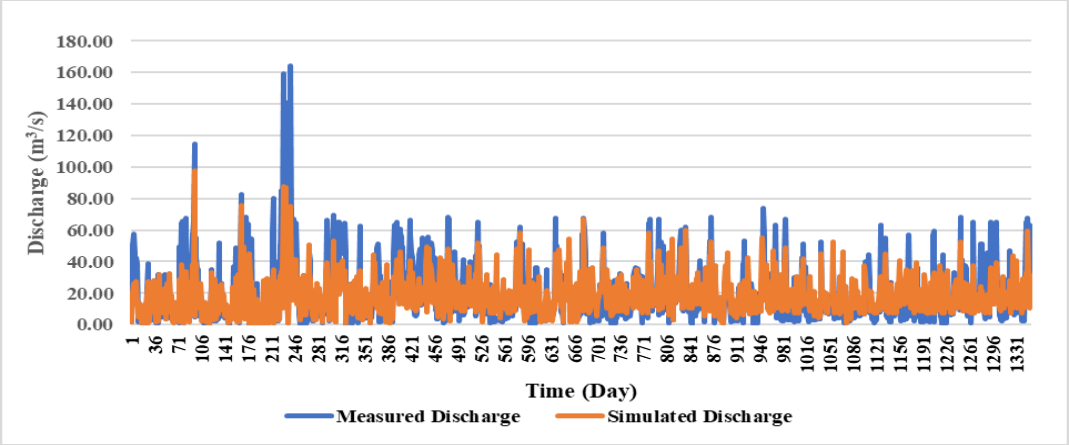

Fig. 4- Simulation of daily river discharge (m^3/s) using 2-D Clayton copula

شکل٤- شبیه‌سازی مقادیر دبی رودخانه روزانه (مترمکعب بر ثانیه) با استفاده از مفصل دوبعدی کلایتون

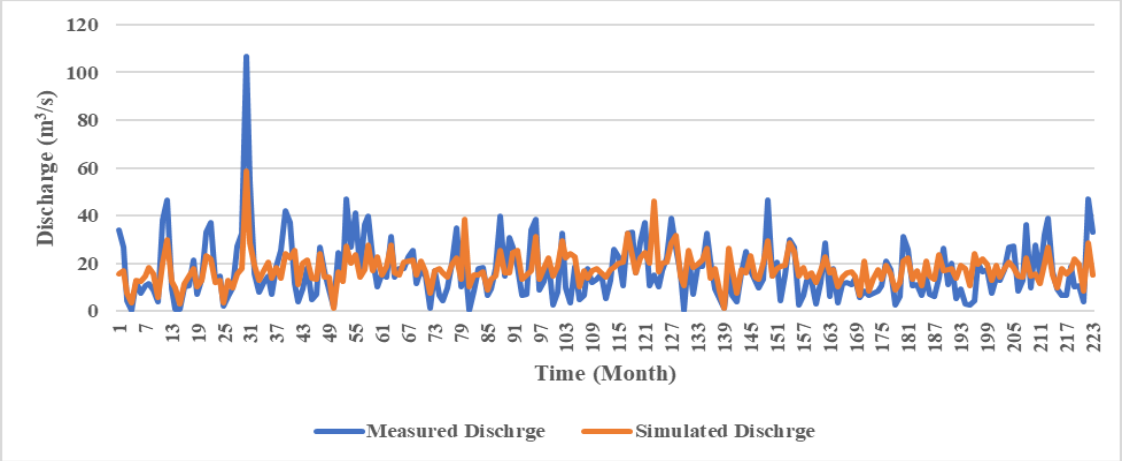

Fig. 5- Simulation of monthly river discharge (m^3/s) using 2-D Clayton copula

شکل۵- شبیه‌سازی مقادیر دبی رودخانه ماهانه (مترمکعب بر ثانیه) با استفاده از مفصل دو بعدی کلایتون

با توجه به شکل‌های (۴) و (۵)، مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و دبی شبیه‌سازی شده در دو مقیاس روزانه و ماهانه از پراکندگی و همبستگی مناسبی برخوردار هستند. برای برآورد معیارهای خطا و کارایی مفصل کلایتون در شبیه‌سازی دبی رودخانه سیمینه‌رود، از معیارهای ارزیابی NSE، RMSE و R^2 استفاده گردید. نتایج معیارهای ارزیابی در دو مقیاس روزانه و ماهانه در جدول (۶) آورده شده است.

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌گردد مقدار NSE و R^2 در مقیاس روزانه به‌ترتیب برابر با ۰/۶۱ و ۰/۶۲ و در مقیاس ماهانه برابر با ۰/۶۲ و ۰/۶۳ به‌دست آمد که در محدوده قابل‌قبول هستند و بیانگر کارایی خوب در شبیه‌سازی دبی با استفاده از مفصل کلایتون هستند.

معیار ارزیابی RMSE در مقیاس روزانه و ماهانه به‌ترتیب برابر با ۱۳/۱۸ و ۹/۱۳ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده است که با توجه به دامنه تغییرات مقادیر دبی رودخانه، رقومی قابل‌قبول هستند و

نشان‌دهنده انتخاب درست مفصل کلایتون برای شبیه‌سازی دبی رودخانه می‌باشند.

پیش‌بینی دبی رودخانه مبتنی بر مفصل

با توجه به اینکه در این پژوهش دبی رودخانه و بارش به‌ترتیب پارامترهای مستقل و وابسته هستند، به ازای بارش‌های مختلف، نمودار دبی رودخانه با استفاده از توابع چگالی شرطی مفصلی رسم می‌شود. در نهایت بیشینه نمودارها به‌عنوان مقادیر شبیه‌سازی انتخاب می‌گردند. پس از استخراج نتایج مدل، بهترین رابطه‌ای که بین بارش و نتایج استخراجی مدل برازش داده شود به‌عنوان رابطه شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در این رابطه که بین بارش (متغیر وابسته) و دبی استخراجی از مدل می‌باشد با جایگذاری بارشی که در قسمت تغییر اقلیم برای دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ به‌دست‌آمده است به‌جای بارش دوره پایه، دبی رودخانه برای دوره آینده به‌دست خواهد آمد. نتایج دبی رودخانه سیمینه‌رود برای سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دو مقیاس روزانه و ماهانه به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است.

جدول٦- بررسی کارایی مفصل کلایتون در شبیه‌سازی دبی رودخانه سیمینه‌رود (مترمکعب بر ثانیه) در مقیاس‌های روزانه و ماهانه

Table 6- Evaluation of the efficiency of Clayton copula in simulating the river discharge of the Siminehrood River (m^3/s) on daily and monthly scales

Time	R^2	RMSE (m^3/s)	NSE
Daily	0.62	13.18	0.61
Monthly	0.63	9.13	0.62

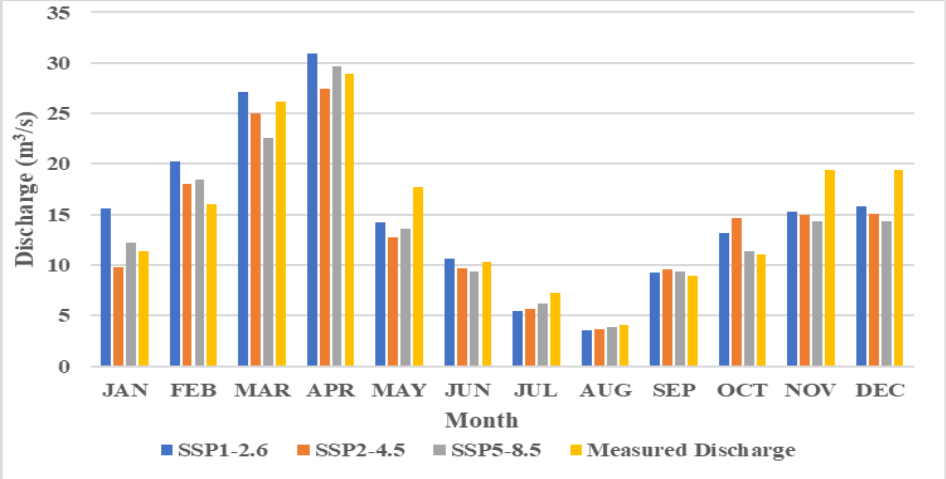

Fig. 6- Prediction of Siminehrood River discharge (m^3/s) under the three scenarios on a monthly scale

شکل٦- پیش‌بینی دبی رودخانه سیمینه‌رود (متر مکعب بر ثانیه) تحت سه سناریوی مورد بررسی در مقیاس ماهانه

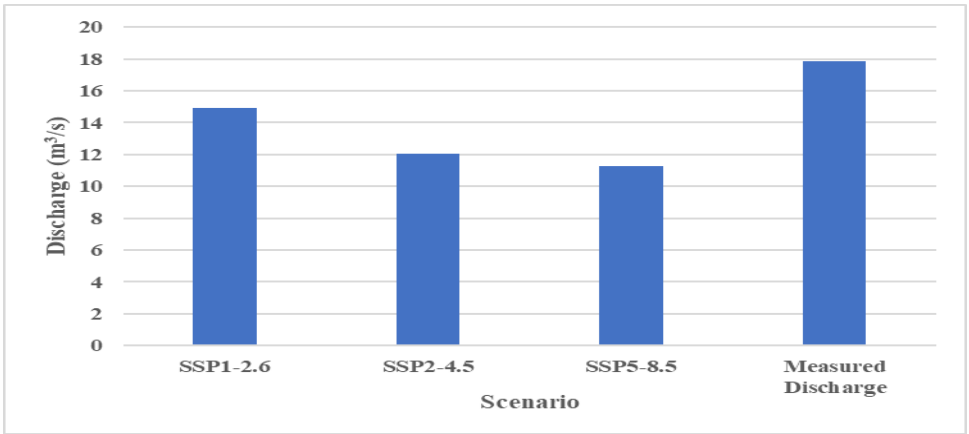

Fig. 7- Prediction of Siminehrood River discharge (m^3/s) under the three scenarios on an annual scale

شکل٧- پیش‌بینی دبی رودخانه سیمینه‌رود (متر مکعب بر ثانیه) تحت سه سناریوی مورد بررسی در مقیاس سالانه

DOI: 10.22055/jise.2025.49381.2157

با توجه به شکل (۶) می‌توان گفت تغییرات دبی در ماه‌های مختلف به‌صورت نوسانی خواهد بود و در بعضی از ماه‌ها کاهشی و در برخی از روند افزایشی برخوردار است. در ماه می، ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست (تابستان)، ماه نوامبر و ماه دسامبر مقدار دبی پیش‌بینی شده در دوره آتی در هر سه سناریو نسبت به دبی اندازه‌گیری شده، کاهش خواهد یافت. تقریباً در فصل تابستان مقدار دبی برای هر سه سناریو مورد بررسی کاهش خواهد داشت. همچنین بیشترین دبی در فصول زمستان و بهار پیش‌بینی شده است.

با توجه به شکل (۷)، دبی رودخانه در مقیاس سالانه در دوره آینده در هر سه سناریو مورد بررسی نسبت به دبی اندازه‌گیری شده، کاهش خواهد داشت. بیشترین کاهش دبی در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) و کمترین کاهش دبی در سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) اتفاق خواهد افتاد. مقدار دبی سالانه برای دوره آینده از سال ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰، تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب برابر با ۱۴/۹، ۱۲ و ۱۱/۲ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی شده است درحالی‌که مقدار دبی اندازه‌گیری‌شده برای دوره پایه برابر با ۱۷/۸۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. کاهش در بارش و دبی رودخانه سیمینه‌رود در دوره آینده با نتایج پژوهش Abghari et al. (2023) هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج سناریوهای اقلیمی بارش و سری زمانی دبی پیش‌بینی شده مبتنی بر توابع مفصل نشان می‌دهد که متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژی حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود در دوره آینده از تغییرات چشم‌گیری برخوردار خواهند بود. همان‌طور که انتظار می‌رود تغییرات دبی رودخانه سیمینه‌رود از تغییرات بارش در حوضه تبعیت می‌کند که این نشان‌دهنده کارایی خوب و مناسب توابع مفصل در پیش‌بینی و شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی است. همچنین سایر نتایج نشان داد که ادغام مدل‌های پیش‌بینی‌کننده متغیرهای اقلیمی مانند LARS WG با توابع مفصل می‌تواند اطلاعات مفیدی از وضعیت آینده هیدرو اقلیم حوضه در اختیار مدیران قرار دهد که مبنای برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب باشد. به‌طورکلی میزان بارش و دبی رودخانه در حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در برخی از ماه‌های سال افزایشی و در برخی دیگر کاهشی پیش‌بینی شده است. ولی در مجموع این دو پارامتر تحت هر سه سناریوی موردنظر برای مقیاس سالانه، کاهش خواهند داشت. به‌طوری که بارش سالانه تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب ۵/۱، ۳۱/۵ و ۳۴/۸ میلی‌متر کاهش خواهد داشت. همچنین این کاهش در بارش باعث کاهش در دبی رودخانه سالانه به میزان ۶/۶–۲/۹ مترمکعب بر ثانیه خواهد شد. این کاهش چشم‌گیر در دبی سالانه، باعث بروز مشکلاتی در دریاچه ارومیه می‌گردد که این امر خواهان توجه بیشتر به مشکلات این دریاچه می‌شود. بارش‌ها اکثراً در فصول زمستان و بهار اتفاق خواهند افتاد و به‌تبع آن، دبی هم در این فصول افزایش خواهند داشت که این به‌دلیل تغییر در الگوی بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم خواهد بود. برنامه‌ریزی اساسی برای آینده منابع آب یک حوضه مستلزم ارزیابی و بررسی تمامی جنبه‌های مؤثر بر منابع آب از جمله تغییرات جمعیت، تغییرات کاربری و بهره‌برداری اراضی، همراه با متغیرهای اقلیمی می‌باشد. لذا این مطالعه‌های به‌عنوان یک موضوع پژوهش برای پیش‌بینی وضعیت آینده منابع آب حوضه آبریز رودخانه سیمینه‌رود پیشنهاد می‌گردد. مزایای استفاده از توابع مفصل برای تولید توزیع‌های توأم، انعطاف‌پذیری در انتخاب توزیع حاشیه‌ای و ساختار وابستگی مورد نظر، تعمیم به بیش از دو متغیر و تحلیل توزیع حاشیه‌ای و ساختار وابستگی به صورت جداگانه است، در حالی که معایب آن پیچیدگی محاسبات (به ویژه در ابعاد بالاتر از دو) و نیاز به همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: فهیمه شریفان، پیش‌پردازش داده‌ها، روش‌شناسی، توسعه و به‌کارگیری نرم افزار، تجزیه و تحلیل نتایج، نگارش پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم: یوسف رمضانی، ایده، روش‌شناسی، تجزیه و تحلیل نتایج، بازبینی و ویرایش مقاله، راهبری، تأمین مالی.

نویسنده سوم: مهدی امیرآبادی‌زاده، روش‌شناسی، تجزیه و تحلیل نتایج، بازبینی و ویرایش مقاله.

نویسنده چهارم: کارلو دی میکله، روش‌شناسی، تجزیه و تحلیل نتایج، بازبینی و ویرایش مقاله.

سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور (IRIMO) برای ارائه داده‌ها کمال تشکر و سپاس را دارند.

References

1- Abghari, H., & Erfanian, M. 2023. Quantifying the Effects of Climate Change on Simineh River Discharge in Lake Urmia Basin. *International Journal of New Findings in Engineering, Science and Technology*, *1*(1), 15-25. Doi: 10.61150/ijonfest.2023010102

2- Adamson, P.T., Metcalfe, A.V. and Parmentier, B., 1999. Bivariate extreme value distributions: an application of the Gibbs sampler to the analysis of floods. *Water Resources Research*, *35*(9), pp.2825-2832.Doi :10.1029/1999WR900152

3- AghaKouchak, A., Bárdossy, A., & Habib, E. 2010. Conditional simulation of remotely sensed rainfall data using a non-Gaussian v-transformed copula. *Advances in Water Resources*, *33*(6), 624-634. Doi: 10.1016/j.advwatres.2010.02.010

4- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., & Farokhnia, A. 2022. Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Researches Journal*, *16*(1), 11-24. (In Persian). Doi: 10.22034/iwrj.2022.11204

5- Chen, W., Jiang. Z., & Li, L. 2011. Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*. 24(17): 4741-4756. Doi: 10.1175/2011JCLI4102.1

6- Chen, L., Guo, S., Chen, L. and Guo, S., 2019. Copula-based flood frequency analysis. *Copulas and its Application in Hydrology and Water Resources*, pp.39-71. Doi: 10.1007/978-981-13-0574-0_3

7- Czado, C., 2010, May. Pair-copula constructions of multivariate copulas. In *Copula Theory and Its Applications: Proceedings of the Workshop Held in Warsaw, 25-26 September 2009* (pp. 93-109). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.. Doi: 10.1007/978-3-642-12465-5_4

8- Dastourani, M., & Nazeri Tahroudi, M. 2022. Toward coupling of groundwater drawdown and pumping time in a constant discharge. *Applied Water Science*, *12*(4), 74. Doi: 10.1007/s13201-022-01606-6

9- De Michele, C., & Salvadori, G. 2003. A generalized Pareto intensity-duration model of storm rainfall exploiting 2-copulas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D2). Doi: 10.1029/2002JD002534

10- De Oliveira Peres, M. V., Achcar, J. A., & Martinez, E. Z. 2020. Bivariate lifetime models in presence of cure fraction: a comparative study with many different copula functions. *Heliyon*, *6*(6). Doi: 10.1016/j.heliyon.2020

11- Dibike, Y.B. and Coulibaly, P., 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, *307*(1-4), pp.145-163. Doi: 10.1016/J.JHYDROL.2004.10.012

12- Droogers, P., Immerzeel, W.W., Terink, W., Hoogeveen, J., Bierkens, M.F.P., van Beek, L.P.H. and Negewo, B.D., 2012. Modeling water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, *9*(4).Doi: 10.5194/hess-16-3101-2012

13- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, *9*(5), pp.1937-1958.Doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016

14- Evin, G., & Favre, A. C. 2008. A new rainfall model based on the Neyman-Scott process using cubic copulas. *Water Resources Research*, *44*(3). Doi: 10.1029/2007WR006054

15- Favre, A.C., Musy, A. and Morgenthaler, S., 2002. Two-site modeling of rainfall based on the Neyman-Scott process. *Water Resources Research*, *38*(12), pp.43-1.Doi: 10.1029/2002WR001343

16- Favre, A.C., El Adlouni, S., Perreault, L., Thiémonge, N. and Bobée, B., 2004. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas. *Water Resources Research*, *40*(1).Doi: 10.1029/2003WR002456

17- Haberlandt, U., & Radtke, I. 2013. Derived flood frequency analysis using different model calibration strategies based on various types of rainfall-runoff data-a comparison. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, *10*(8). Doi:10.5194/hessd-10-10379-2013

18- Heydari Tasheh Kabood, S., Hosseini, S. A., & Heydari Tasheh Kabood, A. 2020. Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 329-339. Doi: 10.1007/s40808-019-00681-0.

19- Hsu, K.C., Wang, C.H., Chen, K.C., Chen, C.T. and Ma, K.W., 2007. Climate-induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeology Journal*, *15*, pp.903-913. Doi: 10.1007/s10040-006-0137-x

20- Jani, R., Khatibi, R., Sadeghfam, S., & Zarrinbal, E. 2023. Climate zoning under climate change scenarios in the basin of Lake Urmia and in vicinity basins. *Theoretical and Applied Climatology*, 152(1), 181-199. Doi: 10.1007/s00704-023-04380-w

21- Khashei-Siuki, A., Shahidi, A., Ramezani, Y., & Nazeri Tahroudi, M. 2021. Simulation of potential evapotranspiration values based on vine copula. *Meteorological Applications*, *28*(5), e2027. Doi: 10.1002/met.2027

22- Kilsby, C.G., Jones, P.D., Burton, A., Ford, A.C., Fowler, H.J., Harpham, C., James, P., Smith, A. and Wilby, R.L., 2007. A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modelling & Software*, *22*(12), pp.1705-1719. Doi: 10.1016/j.envsoft.2007.02.005

23- Lambert, F.H., Webb, M.J. and Joshi, M.M., 2011. The relationship between land–ocean surface temperature contrast and radiative forcing. *Journal of Climate*, *24*(13), pp.3239-3256.Doi: 10.1175/2011JCLI3893.1

24- Lazoglou, G. and Anagnostopoulou, C., 2019. Joint distribution of temperature and precipitation in the Mediterranean, using the Copula method. *Theoretical and Applied Climatology*, *135*, pp.1399-1411.Doi: 10.1007/s00704-018-2447-z

25- Lee, T., & Salas, J. D. 2011. Copula-based stochastic simulation of hydrological data applied to Nile River flows. *Hydrology Research*, *42*(4), 318-330. Doi:10.2166/nh.2011.085

26- Li, X., Fang, G., Wen, X., Xu, M., & Zhang, Y. 2022. Characteristics analysis of drought at multiple spatiotemporal scale and assessment of CMIP6 performance over the Huaihe River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *41*, 101103. Doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101103

27- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. 2022. Application of copula functions for bivariate analysis of rainfall and river flow deficiencies in the siminehrood River Basin, Iran. *Journal of Hydrologic Engineering*, *27*(11), 05022015. Doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002207

28- Nazeri Tahroudi, M., Khashei Siuki, A., & Ramezani, Y. 2019. Redesigning and monitoring groundwater quality and quantity networks by using the entropy theory. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*, 1-17. Doi: 10.1007/s10661-019-7370-y

29- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. 2021a. Flood routing via a copula-based approach. *Hydrology Research*, *52*(6), 1294-1308. Doi: 10.2166/nh.2021.008.

30- Nazeri Tahrudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. 2021b. Determination of optimum two-dimensional copula functions in analyzing groundwater changes using meta heuristic algorithms. *Irrigation Sciences and Engineering*, *44*(1), 93-109. (In Persian) Dor: 10.22055/jise.2020.31289.1882.

31- Nie, C., Li, H., Yang, L., Ye, B., Dai, E., Wu, S., Liu, Y. and Liao, Y., 2012. Spatial and temporal changes in extreme temperature and extreme precipitation in Guangxi. *Quaternary International*, *263*, pp.162-171.Doi: 10.1016/j.quaint.2012.02.029

32- Purkey, D.R., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M.W., Dale, L.L., Yates, D. and Dracup, J.A., 2008. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, *87*(Suppl 1), pp.109-122. Doi: 10.1007/s10584-007-9375-8

33- Rahmani, M. A., & Zarghami, M. 2015. The use of statistical weather generator, hybrid data driven and system dynamics models for water resources management under climate change. *Journal of Environmental Informatics*, 25(1), 23-35. Doi: 10.3808/jei.201400285

34- Ramezani, Y., Nazeri Tahroudi, M., & Ahmadi, F. 2019. Analyzing the droughts in Iran and its eastern neighboring countries using copula functions. IDŐJÁRÁS/QUARTERLY *Journal of the Hungarian Meteorological Service,* 123(4), 435-453. Doi:10.28974/idojaras.2019.4.2.

35- Saatloo, S. M. E., Siosemarde, M., Hosseini, S. A., & Rezaei, H. 2020. Variability assessment of simulated recharge resulted from precipitation using different GCMs, case study: west shore of Lake Urmia, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-17. Doi: 10.1007/s12517-020-05567-5.

36- Salarijazi, M., Akhond-Ali, A. M., Adib, A., & Daneshkhah, A. 2013. Bivariate Flood Frequency Analysis Using the Copula Functions. *Irrigation Science and Engineering*, *37*(4), 29-38. (In Persian) Dor: 20.1001.1.25885952.1393.37.4.3.7

37- Salvadori, G. and De Michele, C., 2007. On the use of copulas in hydrology: theory and practice. *Journal of Hydrologic Engineering*, *12*(4), pp.369-380.Doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:4(369).

38- Sklar, M. 1959. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges. *In Annales de l'ISUP* (Vol. 8, No. 3, pp. 229-231). Doi: 10.2139/ssrn.4198458

39- Sen Roy, S., 2009. A spatial analysis of extreme hourly precipitation patterns in India. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, *29*(3), pp.345-355.Doi: 10.1002/joc.1763

40- Sobkowiak, L., Perz, A., Wrzesiński, D., & Faiz, M. A. 2020. Estimation of the river flow synchronicity in the upper indus river basin using copula functions. *Sustainability*, *12*(12), 5122. Doi: 10.3390/su12125122

41- Stouffer, R.J., Eyring, V., Meehl, G.A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B. and Taylor, K.E., 2017. CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(1), pp.95-105.Doi: 10.1175/BAMS-D-15-00013.1

42- Xiao, Y., Guo, S., Liu, P. and Fang, B., 2008. A new design flood hydrograph method based on bivariate joint distribution. *IAHS-AISH publication*, pp.75-82.Doi: 10.1007/978-981-13-0574-0_1

43- Yue, S., Ouarda, T. B., & Bobée, B. (2001). A review of bivariate gamma distributions for hydrological application. *Journal of Hydrology*, *246*(1-4), 1-18. Doi: 1016/S0022-1694(01)00374-2

44- Zhang, L. and Singh, V.P., 2007. Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas. *Journal of Hydrology*, *332*(1-2), pp.93-109.Doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.033

45- Zhang, H., Huang, G. H., Wang, D., & Zhang, X. 2011. Uncertainty assessment of climate change impacts on the hydrology of small prairie wetlands. *Journal of Hydrology*, *396*(1-2), 94-103. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.10.037