



University of Tehran Press

Environmental

*Hazards*

Management



Iranian Hazardology Association  
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

## The extreme drought frequency and characteristics under SSP scenarios in Mashhad Plain

Mahbobe Rashidi Ghane<sup>1</sup> | Sadroddin Motevalli<sup>2\*</sup> | Gholam Reza Janbaz Ghobadi<sup>3</sup>  
| Mansoureh Kouhi<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Geography, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran. Email: [m.rashedy210@gmail.com](mailto:m.rashedy210@gmail.com)
2. Corresponding Author, Assoc. Prof., Department of Geography, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran. Email: [sadr\\_m1970@yahoo.com](mailto:sadr_m1970@yahoo.com)
3. Assoc. Prof., Department of Geography, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran. Email: [gghoadi@yahoo.com](mailto:gghoadi@yahoo.com)
4. Asst. Prof., Climate Research Institute (CRI), Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences (RIMAS), Mashhad, Iran. Email: [ma.kouhi@stu.um.ac.ir](mailto:ma.kouhi@stu.um.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Article

**Article History:**  
Received 10 July 2024  
Revised 30 August 2024  
Accepted 01 September 2024  
Published 10 September 2024

**Keywords:**  
*Copula,*  
*Drought,*  
*Mashhad,*  
*SSP scenarios.*

### ABSTRACT

Drought has significant economic and social consequences, particularly in arid and semi-arid regions. The Mashhad Plain has recently experienced moderate to severe droughts, resulting in substantial damage to the agriculture and water sectors. This study aims to project changes in the characteristics of extreme droughts (SPI6 <-1) using outputs from the MRI-ESM2-0 model under two SSP scenarios. Additionally, the study investigated drought events through bivariate frequency analyses of drought duration and severity, based on SPI6 and the copula concept. Precipitation downscaling was performed using two methods: linear scaling (LS) and distribution mapping (DM). The LS method demonstrated superior downscaling capability based on statistical criteria. Projections for the near future (2026-2050) indicated an increase in precipitation under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, with a statistically significant increase under SSP5-8.5. A decrease in drought frequency was observed under the SSP5-8.5 scenario based on SPI6-DM. Assessing future changes in characteristics of drought derived from the SPI6-LS series suggested an increase in drought frequency under the SSP5-8.5 scenario. Univariate return period analysis using the LS method indicated that, under the SSP1-2.6 scenario, drought events would remain unchanged compared to the baseline period. Conversely, under the SSP1-2.6 scenario (DM method), increased values of duration and severity were projected. Joint frequency analysis results suggested that under the SSP1-2.6 scenario, seasonal joint return periods of severity and duration would be shorter than the baseline, indicating an increased risk of drought hazards in the region under study. The application of these research results will contribute to improved future planning in the water and agriculture sectors for this area.

**Cite this article:** Rashidi Ghane, M.; Motevalli, S.; Janbaz Ghobadi, Gh. R. & Kouhi, M. (2024). The extreme drought frequency and characteristics under SSP scenarios in Mashhad Plain. *Environmental Hazards Management*, 11 (2), 85-102. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.380699.837>



© Mahbobe Rashidi Ghane, Sadroddin Motevalli, Gholam Reza Janbaz Ghobadi, Mansoureh Kouhi.  
**Publisher:** University of Tehran Press.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.380699.837>

### 1. Introduction

Studying future droughts is crucial for mitigating risks, enhancing resilience, and ensuring sustainable development in the face of changing climate conditions. The general circulation models (AOGCMs) are the most important tool for projecting future climate change. The aim of this paper is to assess changes in drought characteristics based on the standardized precipitation index (SPI) and analyze

bivariate frequency analysis of drought using copula functions at the Mashhad for the period 2026-2050.

## 2. Materials and Methods

For this study, monthly precipitation during 1989–2014 of Mashhad synoptic station was used. The historical and future MRI-ESM2-0 model output was downloaded from the Copernicus Climate Data Store (CDS).

First, the precipitation time series was qualified using the RHtestsV4 package in the R software environment. CMhyd (Climate Model Data for Hydrologic Modeling) is software that has been used to extract and bias-correct data obtained from the selected global climate model using two statistical methods, e.g., linear scaling (LS) and distribution mapping (DM).

Hydrological phenomena like drought are often multidimensional and hence require the joint modeling of several random variables. Copula functions have become a popular multivariate modeling tool in many fields where multivariate dependence is of interest. Elliptical and Archimedean copulas are the most popular families that have been used to multivariate drought frequency analysis. In the univariate setting, the return period is generally defined as:

$$T_x = \frac{E(L)}{1-P} = \frac{E(L)}{1-F_x(x_p)} \quad (1)$$

where,  $T$  is the return period with a single variable,  $X$  (duration ( $D$ ) or severity ( $S$ )), greater or equal to a certain value,  $F_X(\cdot)$  are percentiles of CDF with  $X$ , and  $E(T)$  is the expected inter-arrival time of sequential droughts within the study period. The seasonal and conjunctive return periods are calculated as follows (Shiau, 2006):

$$T_{D \cap S} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{DS}(d, s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (2)$$

$$T_{D \cup S} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \text{ or } S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_{DS}(d, s)} = \frac{E(L)}{1 - C(F_D(d), F_S(s))} \quad (3)$$

where  $T_{D \cap S}$  denotes the seasonal joint return period for  $D \geq d$  and  $S \geq s$ ;  $T_{D \cup S}$  denotes the conjunctive joint return period for  $D \geq d$  or  $S \geq s$ .

## 3. Results

Based on the statistical criteria, the LS method demonstrated better downscaling capability. According to projections for the near future (2026-2050), an increase in precipitation was found under SSP126 and SSP585 scenarios, with a statistically significant increase under the SSP585 scenario. A decrease in drought frequency was obtained in SPI6-DM time series. Examination of changes in severity, duration, and frequency extracted from the SPI6-LS series showed that drought frequency would increase under the SSP585 scenario. In SPI6-DM, despite a decrease in drought frequency, more severe conditions in terms of severity and duration were projected compared to the baseline period, particularly under the SSP1-2.6 scenario. In univariate return period analysis of SPI-LS, results indicated that with probabilities equal to the baseline period, under the SSP1-2.6 scenario, drought events would remain unchanged, while under the SSP5-8.5 scenario, they would have less severity and duration compared to the baseline.

## 4. Discussion

As climate change alters precipitation patterns, studying future droughts helps identify regions that may become more vulnerable. This knowledge is vital for developing adaptive strategies to cope with changing climate conditions. The results of bivariate frequency analyses could be used in water resources management plans, risk analysis, and probabilistic scheduling.



## فراوانی و ویژگی‌های خشکسالی‌های فرین دشت مشهد تحت سناریوهای SSP

محبوبه رشیدی قانع<sup>۱</sup> | صدرالدین متولی<sup>۲\*</sup> | غلامرضا جانباز قبادی<sup>۳</sup> | منصوره کوهی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران، رایانامه: [m.rashedy210@gmail.com](mailto:m.rashedy210@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران، رایانامه: [sadr\\_m1970@yahoo.com](mailto:sadr_m1970@yahoo.com)
۳. دانشیار، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران، رایانامه: [gghoadi@yahoo.com](mailto:gghoadi@yahoo.com)
۴. استادیار، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران، رایانامه: [ma.kouhi@stu.um.ac.ir](mailto:ma.kouhi@stu.um.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دشت مشهد در سال‌های اخیر شاهد رخداد خشکسالی‌های متوسط تا شدید بوده که خسارات فراوانی در بخش کشاورزی و آب در پی داشته است. هدف این پژوهش، پیش‌نگری ویژگی‌های خشکسالی‌های فرین ( $SPI6 < -1$ ) با استفاده از برون‌داد مدل MRI-ESM2-0، تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-5.8 و تحلیل فراوانی توأم شدت و مدت با کاربرد توابع مفصل است. تصحیح اربیبی برون‌داد این مدل با استفاده از دو روش نسبت‌گیری خطی و نگاشت توزیع انجام گرفت. براساس پیش‌نگری‌ها، برای آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، افزایش بارش برای این منطقه انتظار می‌رود. افزایش فراوانی خشکسالی‌های فرین تحت سناریوی SSP5-5.8 در سری SPI6 محاسبه شده با بارش ریزمقیاس شده با روش LS به‌دست آمد. شرایط وخیم‌تر از نظر شدت و مدت این مخاطره نسبت به دوره پایه، تحت سناریوی SSP1-2.6 با روش DM مشاهده شد. در بررسی و تحلیل فراوانی توأم با استفاده از مفصل نتایج نشان داد که تحت سناریوی SSP1-2.6، خشکسالی‌ها به‌ازای دوره‌های بازگشت معین، دارای شدت و مدت بیشتری نسبت به دوره پایه خواهند بود که نشان از افزایش ریسک این مخاطره دارد. با توجه به شرایط بحرانی کنونی این دشت، به‌کارگیری چنین نتایجی در برنامه‌ریزی‌های آبی در بخش‌های آب و کشاورزی، سبب افزایش تاب‌آوری این دشت نسبت به شرایط آبی اقلیم خواهد شد.

#### نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

#### کلیدواژه:

مشهد،

خشکسالی،

مفصل،

سناریوهای SSP.

استناد: رشیدی قانع، محبوبه؛ متولی، صدرالدین؛ جانباز قبادی، غلامرضا و کوهی، منصوره (۱۴۰۳). فراوانی و ویژگی‌های خشکسالی‌های فرین دشت مشهد تحت سناریوهای SSP. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۱ (۲)، ۸۵-۱۰۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.380699.837>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© محبوبه رشیدی قانع، صدرالدین متولی، غلامرضا جانباز قبادی، منصوره کوهی

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.380699.837>



## ۱. مقدمه

تغییر اقلیم از مهم‌ترین چالش‌های سده بیست‌ویکم است که با شاخص‌هایی چون افزایش دمای سطحی کره زمین، بالا آمدن سطح آب دریاها و کاهش سطح برف و یخ‌های قطب شمال و جنوب آشکارسازی شده است. بررسی‌ها نشان داده که به دلیل تغییر اقلیم ناشی از واداشتهای طبیعی یا فعالیت‌های انسانی، تغییراتی در احتمال وقوع یا شدت رویدادهای فرین (حدی) اقلیمی رخ داده است [۲۴-۲۶]. تشدید چرخه جهانی هیدرولوژیکی ناشی از افزایش دما، سبب تغییر الگوهای بارش در مقیاس منطقه‌ای و در نتیجه تغییر فراوانی، شدت و مدت رویدادهای فرین اقلیمی مانند سیل و خشکسالی شده است [۱۳]. در بحث تغییر اقلیم دو راهکار کلی وجود دارد: سازگاری با تغییر اقلیم و تخفیف (تعدیل) پیامدهای آن [۲۵]. یکی از حوزه‌های مهم در زمینه اتخاذ تصمیمات مناسب در سازگاری با اثرهای تغییر اقلیم و رویدادهای فرین اقلیمی ناشی از آن مانند خشکسالی، بررسی رفتار این مخاطره از نظر فراوانی، شدت و مدت طی دوره‌های آتی و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی در بخش‌های مختلف براساس آن است. خشکسالی پدیده‌ای موقتی و نوعی نابهنجاری موقت در بارش است که در بیشتر نواحی اقلیمی جهان از مناطق پرباران گرفته تا مناطق بسیار کم‌باران رخ می‌دهد. این مخاطره در چهار طبقه هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی دسته‌بندی می‌شود [۴۸]. در ایران، به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های تجدیدپذیر و آب‌های زیرزمینی و کاهش بارش، افزایش بارش‌های غیر مؤثر و تداوم خشکسالی در سال‌های اخیر، سدسازی‌های همسایگان ایران و کاهش حقایقه‌ها، کمبود آب به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی کشور تبدیل شده است که ممکن است در سال‌های آینده تحت شرایط تغییر اقلیم، به بحران‌های دیگری در ابعاد اجتماعی (مهاجرت‌های اقلیمی)، اقتصادی، سیاسی، منطقه‌ای و زیست‌محیطی بینجامد. دشت مشهد نیز در سال‌های اخیر (۱۴۰۲) شاهد رخداد خشکسالی‌های متوسط تا شدید بوده است. این مخاطره دارای تبعات زیادی بوده و بیشترین تأثیر را بر بعد اقتصادی جوامع روستایی گذاشته است [۱۱]؛ به طوری که در نتیجه خشکسالی طی سال‌های ۸۵-۱۳۷۵ سه روستای شهرستان شاندیز به طور کامل تخلیه شد و سطح زیر کشت باغ‌ها تا ۶۴/۹ درصد کاهش یافت [۷]. رشد شهرنشینی، توسعه اقتصادی و حضور زائران (سالانه بیش از ۲۰ میلیون)، حفر چاه‌های غیرمجاز و برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که این دشت با چالش‌های گسترده‌ای در منابع آب در دسترس در حال حاضر و به ویژه در آینده روبه‌رو خواهد بود. از این‌رو بررسی و پیش‌نگری<sup>۲</sup> تغییرات در ویژگی‌های خشکسالی در این دشت، با هدف کاهش خطرهای زیان‌ها در بخش‌های کشاورزی، آب و ...، از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی اثرهای تغییر اقلیم بر ویژگی‌های خشکسالی‌های فرین (شدت، مدت و فراوانی) در دشت مشهد طی دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ بوده است. برای این کار، از برون‌داد به‌روزترین مدل‌های اقلیمی (CMIP6) تحت دو سناریوی خوشبینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) استفاده شد و تحلیل فراوانی توأم آن با کاربرد توابع مفصل انجام گرفت. سوالات پژوهش به صورت زیر در نظر گرفته و ساختار پژوهش بر مبنای آن تنظیم شد:

- میزان توانمندی مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شبیه‌سازی بارش در ایستگاه مشهد طی دوره پایه چگونه است؟
- براساس پیش‌نگری مدل منتخب CMIP6، وضعیت خشکسالی و ویژگی‌های آن (شدت، مدت، فراوانی و دوره‌های بازگشت) در دشت مشهد در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) طبق دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه SSPs چگونه خواهد بود؟

## ۲. پیشینه پژوهش

اقلیم سامانه بسیار عظیمی است که خود از اندرکنش و تعامل میان چند زیرسامانه دیگر (هواسپهر، آب‌سپهر، یخ‌سپهر، سنگ‌سپهر و زیست‌سپهر) پدید می‌آید. مدل اقلیمی ارائه ریاضی از فرایندهای فیزیکی است که تعیین‌کننده اقلیم هستند. مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس (AOGCM)<sup>۳</sup>، معتبرترین ابزار به‌منظور ارائه پیش‌نگری‌هایی از متغیرهای اقلیمی هستند که از سال ۱۹۹۵

1. Extreme  
2. Projection  
3. Atmosphere-Ocean General Circulation Models

در قالب پروژه ارزیابی متقابل مدل‌های جفت‌شده (CMIP) در دسترس جامعه علمی قرار گرفته‌اند. پیش‌نگری‌های این مدل‌ها برای دوره آتی (۲۰۱۵-۲۱۰۰) براساس واداشت گازهای گلخانه‌ای و آتروسول‌ها است [۱۹]. در تهیه گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، از فاز ششم برونداد مدل‌های CMIP که تحت سناریوهای جدید با نام «خط سیرهای مشترک اجتماعی-اقتصادی» یا SSPs اجرا شده‌اند استفاده شد [۲۴]. این سناریوها شامل مؤلفه‌های اجتماعی-اقتصادی مانند رشد جمعیت، شرایط محیط زیستی، میزان توسعه فناوریانه، نحوه رقابت‌های منطقه‌ای و چالش‌های امنیتی هستند [۳۵].

در بررسی‌ها با استفاده از مدل‌های CMIP6، تحقیقات متعددی بر توانمندی بیشتر مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و دما نسبت به نسل قبلی یعنی CMIP5 تأکید دارند [۲۲،۲۳،۴۱]. برای مثال زمانی و همکاران در شمال و شمال غرب کشور عملکرد دو پروژه CMIP5 و CMIP6 را در پیش‌نگری میانگین بارش در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۷ ارزیابی کردند و نشان دادند که عملکرد مدل‌های CMIP6 بهتر از مدل‌های CMIP5 است [۵۱]. بررسی‌های دیگر نیز نشان داده است که این مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش از توانمندی زیادی برخوردارند [۲۲،۲۳،۴۵]. تا کنون پژوهش‌هایی در زمینه تغییرات شدت خشکسالی با استفاده از نمایه‌های مختلف این مخاطره تحت سناریوهای SSPs انجام گرفته است، [۴۶،۴۷]؛ اما خشکسالی پدیده پیچیده‌ای است و از طرفی تحلیل‌های تک‌متغیره، از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردارند [۱۴]. از این رو به‌منظور ارزیابی جامع این پدیده و با توجه به وابستگی بین این ویژگی‌ها، استخراج توزیع توأم ویژگی‌های آن ضرورت دارد. با توجه به مشکلات توزیع‌های دو متغیره مانند استنتاج‌های پیچیده ریاضی برای برازش پارامترهای به‌دست‌آمده از داده‌ها و لحاظ نکردن وابستگی بین متغیرها [۳۷] می‌توان از توابع مفصل<sup>۳</sup> [۴۰] استفاده کرد. چراکه این توابع، افزون بر آنکه امکان تحلیل توأم دو متغیره (یا بالاتر) را فراهم می‌آورند، ساختار و میزان وابستگی بین متغیرها را نیز در محاسبات دخالت می‌دهند. در این زمینه، شریستا و همکاران [۳۸] با استفاده از برونداد هفت مدل CMIP6 برای سه ناحیه هند، به کمک نمایه پالم، وضعیت آتی این مخاطره را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۴۴)، چند خشکسالی شدید تا حد بعد از دهه ۲۰۳۰ رخ خواهد داد. این خشکسالی‌ها دست کم ۲۰ تا ۳۰ ماه به طول خواهد انجامید. اوکولا و همکاران با استفاده از سه مدل آرشیو در CMIP6 تحت دو سناریوی SSP4.5 و SSP8.5 نشان دادند که فراوانی و مدت این مخاطره تا بیش از ۴۵ درصد در جهان افزایش می‌یابد [۴۳]. سو و همکاران با استفاده از چهار مدل اقلیمی CMIP6 و هفت سناریوی SSP-RCP، تغییرات احتمالی خشکسالی‌ها را در چین با نمایه SPEI بررسی کردند و دریافته‌اند که توانمندی مدل‌های CMIP6 از مدل‌های CMIP5 بیشتر است که دلیل آن، ارائه بهتر فرایندهای فیزیکی در این مدل‌هاست. نتایج نشان داد که برای دوره آتی، رویدادهای خشکسالی فراوان‌تر، شدیدتر و طولانی‌تر خواهد شد [۴۶]. سافارتد و همکاران وضعیت خشکسالی را با استفاده از هجده مدل آرشیو در CMIP6 تحت دو سناریوی SSP5-5.8 و SSP245 در جنوب شرق آسیا بررسی کردند و نتیجه گرفتند که طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۵، خشکسالی‌ها با مدت بیشتر، سختی بیشتر و شدیدتر تحت سناریوی SSP5-5.8 و فراوانی بیشتر تحت سناریوی SSP1-2.6 رخ خواهند داد [۴۲]. یوسفی و همکاران وضعیت خشکسالی و بارش در ایران را با استفاده از برونداد مدل‌های CMIP6 پیش‌نگری کردند. نتایج نشان داد که انتظار می‌رود یک خشکسالی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، با شدت و مدت کمتری تحت سناریوهای SSP585 و SSP126 رخ دهد [۵۰]. بهزادی و همکاران در پژوهش خود وضعیت خشکسالی در ایران را با استفاده از سه مدل آرشیو شامل CMIP6 -IPSL، CanESM5 GFDL-ESM4، and SSP5-5.8 و SSP1-2.6 با کاربرد دو نمایه SPI و SPEI بررسی کردند. در این پژوهش، برای تحلیل فراوانی توأم این مخاطره از توابع مفصل استفاده شد. براساس نتایج، خشکسالی‌های شدید برای کشور به‌ویژه برای شرق و مرکز ایران پیش‌نگری شد [۱۵]. محمدی و حجازی‌زاده نیز در پژوهش خود با استفاده از سناریوهای SSP نشان دادند که تهران در آینده مستعد خشکسالی‌های بسیار شدید است [۹]. عسکری و همکاران در حوضه آبریز گرگانرود با استفاده از هشت مدل CMIP6 برای دو دوره ۲۰۵۴-۲۰۲۴ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ نشان دادند که تحت سناریوی SSP2-4.5، شرایط خشکسالی منطقه در دهه‌های آتی در محدوده‌های نزدیک به نرمال یا ترسالی خواهد بود. این وضعیت در دوره آینده نزدیک تحت سناریو SSP5-8.5 نیز ادامه خواهد

1. Coupled Model Intercomparison Project

2. The Shared Socioeconomic Pathways scenarios

3. Copula

داشت [۵]. کوهی و پاکدامن نیز با استفاده از توابع مفصل توانمندی مدل‌های CMIP5 را در تحلیل توأم شدت و مدت خشکسالی بررسی کردند [۸].

جمع‌بندی پیشینه تحقیقات در زمینه بررسی و ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم بر ویژگی‌های مخاطره خشکسالی براساس مدل‌های CMIP6 نشان داد که برای دشت مشهد، پژوهشی با استفاده از توابع مفصل انجام نگرفته است. از آنجا که تجزیه و تحلیل احتمالی وقایع خشکسالی و به‌ویژه دوره‌های بازگشت آن، در مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب سیستم‌های منابع آب نقش مهمی دارد، در این پژوهش تلاش شد میزان تغییرات ویژگی‌های این مخاطره و تحلیل فراوانی توأم شدت و مدت آن تحت جدیدترین سناریوهای انتشار اقلیم ارزیابی و ارائه شود.

### ۳. محدوده و روش‌شناسی پژوهش

#### ۳.۱. محدوده پژوهش

داده‌های بارش ماهانه (میلی‌متر) طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ برای ایستگاه مشهد (واقع در ۳۶/۲۹ درجه عرض جغرافیایی و ۵۹/۶۰ درجه طول جغرافیایی) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد و همگنی آن با استفاده از بسته نرم‌افزاری RHtestsV4 [۴۴] در محیط R انجام گرفت. مدل منتخب از سری CMIP6، مدل MRI-ESM2-0 بود که در مؤسسه پژوهش‌های هواشناسی ژاپن بنیان نهاده شده و دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ کیلومتر است. برونداد متغیر بارش این مدل، طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۹) و دوره آتی (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تحت دو سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5 از پایگاه داده کوپرنیک<sup>۱</sup> مرکز پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (ECMWF)<sup>۲</sup> بارگذاری شد. در ادامه در متن مقاله، از نام خلاصه‌شده مدل یعنی MRI استفاده خواهد شد.

#### ۳.۲. روش پژوهش

این تحقیق از حیث هدف، کاربردی و از حیث ماهیت توصیفی-تحلیلی است و به روش میدانی انجام گرفته است.

#### ۳.۲.۱. ریزمقیاس‌گردانی

فرایند ریزمقیاس‌گردانی و تصحیح اریبی با استفاده از نرم‌افزار CMhyd<sup>۳</sup> و با دو روش نسبت‌گیری خطی (LS)<sup>۴</sup> و نگاشت توزیع (DM)<sup>۵</sup> انجام گرفت. این نرم‌افزار برای تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی در ایستگاه‌های مستقر در یک حوضه آبریز استفاده می‌شود [۳۴]. روش نسبت‌گیری خطی یک ضریب اصلاح‌شده ثابت به‌دست‌آمده از اختلاف بین شبیه‌سازی مدل و مقادیر مشاهداتی برای هر ماه را به‌کار می‌برد. بارش با ضرب یک عبارت اصلاح می‌شود (با فرض ثابت ماندن ضرایب و فاکتورهای اصلاحی اعمال‌شده در شرایط فعلی داده‌ها و شرایط آینده).

$$P_{hst,m,d}^{cor} = P_{hst,m,d} \times \left[ \frac{\mu(P_{obs,m,Q})}{\mu(P_{hst,m,Q})} \right] \quad (1)$$

روش نگاشت توزیع، بر مبنای این فرض است که هر دو متغیر اقلیمی مدل و مشاهداتی از یک توزیع فراوانی خاص پیروی می‌کنند [۲]. در این روش، تصحیح اریبی به کمک تابع توزیع تجمعی (CDF)<sup>۶</sup> مقادیر شبیه‌سازی‌شده، مطابق با تابع توزیع مشاهداتی صورت می‌گیرد. بنابراین یک تابع توزیع انتقال ایجاد شده که تغییر در توزیع وقوع بارش را نشان می‌دهد، مانند تابع توزیع گامای نمایی برای اصلاح اریبی‌های داده‌های بارش. در ادامه در متن مقاله، عنوان دو روش ریزمقیاس‌گردانی به‌صورت خلاصه‌شده LS و DM به‌کار خواهد رفت.

1. Copernicus
2. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
3. The Climate Model data for the hydrologic modelling
4. linear scaling
5. Distribution Mapping
6. Cumulative Distribution Function

### ۳.۲.۳. محاسبه نمایه خشکسالی

برای محاسبه خشکسالی هواشناسی، از نمایه بارش استاندارد شده (SPI)<sup>۱</sup> استفاده شد [۳۱]. محاسبه این نمایه شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما (PDF) بر سری زمانی درازمدت بارش برای هر ماه است. در محاسبه این نمایه، پارامترهای تابع چگالی احتمال گاما در هر مقیاس زمانی دلخواه (مانند ۳، ۶، ۱۲، ۴۸ ماهه) و برای هر ماه از سال برآورد می‌شود. پارامترهای محاسبه شده برای پیدا کردن احتمال تجمعی بارش برای مقیاس زمانی دلخواه به کار می‌روند. در گام بعدی، توزیع گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد (Z) یا همان نمایه خشکسالی (با میانگین صفر و واریانس یک) تبدیل می‌شود. به طور کلی، بزرگی اثرهای این مخاطره به زمان شروع کمبود بارش، شدت این کمبود و مدت رویداد بستگی دارد. مدت عبارت است از طول مدت زمانی که در آن مقادیر نمایه کمتر از آستانه انتخابی است. شدت، به صورت مقدار تجمعی نمایه (S) طی مدت این مخاطره محاسبه می‌شود. زمان مورد انتظار بین شروع دو رخداد یا L، میانگین فاصله بین شروع یک رویداد تا آغاز رویداد بعدی است [۴۸]. در این مقاله، از مقادیر  $SPI < -1$  به منظور استخراج ویژگی‌های خشکسالی‌های فرین استفاده شد.

### ۳.۲.۳. تحلیل فراوانی دومتغیره

کلمه مفصل اولین بار توسط اسکالر [۴۰] به کار رفت که از کلمه لاتین «به هم پیوستن» گرفته شده است. مفصل‌ها تابع‌هایی هستند که تابع‌های توزیع یک‌متغیره را به فرم تابع‌های توزیع چندمتغیره پیوند می‌دهند. شی یا [۳۷] نخستین بار از این ابزار برای بررسی توأم متغیرهای مدت و سختی خشکسالی استفاده کرد.

### ۳.۲.۴. قضیه اسکالر

اسکالر نشان داد که برای هر تابع توزیع n بعدی، F می‌تواند به صورت رابطه ۲ باشد:

$$F(x_1, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)) \quad (2)$$

$F_1$  تا  $F_n$  توابع توزیع کناری هستند. اگر توابع پیوسته باشند، یک تابع مفصل به نام C وجود دارد، به طوری که (رابطه ۳):

$$C(u_1, \dots, u_n) = F(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_n^{-1}(u_n)), \quad 0 \leq u_1, \dots, u_n \leq 1 \quad (3)$$

که در این رابطه  $(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_n^{-1}(u_n))$  تابع توزیع در مقابل تابع کناری است.

به عبارت دیگر فرض کنید H یک تابع توزیع توأم با توزیع‌های کناری  $F(x)$  و  $F(y)$  باشد، در این صورت تابع مفصل مانند C موجود دارد، به طوری که برای هر x و y، توابع توزیع توأم و کناری با رابطه ۴ به هم مرتبط می‌شوند:

$$F(x) = u, \quad F(y) = v \rightarrow H(x, y) = C(F(x), F(y)) \quad (4)$$

$F(x)$  و  $F(y)$  توابع توزیع کناری هستند که اگر پیوسته باشند، آنگاه تابع مفصل C یکتاست (رابطه ۵):

$$C(u, v) = H(F^{-1}(u), F^{-1}(v)), \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (5)$$

در این رابطه، u و v توابع کناری  $F(x)$  و  $F(y)$  هستند [۲۷].

### ۳.۲.۵. انتخاب مفصل

با توجه به وجود خانواده‌های مختلف مفصل (مانند ارشمیدسی و بیضوی)، باید بهترین مفصل انتخاب شود. مراحل انتخاب مفصل شامل ۱- ارزیابی ساختار وابستگی و شدت وابستگی؛ ۲- ارزیابی وابستگی‌های دمی؛ ۳- برازش توزیع‌های حاشیه‌ای و پارامتر وابستگی؛ ۴- آزمون‌های نیکویی برازش است.

ضریب وابستگی اسپیرمن، یکی از اندازه‌های وابستگی رایج در آمار است که میزان وابستگی بین دو متغیر تصادفی را نشان می‌دهد. بردار تصادفی  $(X, Y)$  را که دارای توزیع H و مفصل متناظر C است در نظر بگیرید. ضریب اسپیرمن از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

1. The Standardized Precipitation Index

$$\rho = 12 \int_0^1 \int_0^1 uv dC(u, v) - 3 \quad (۶)$$

که متوسط تفاوت بین مفصل C و مفصل استقلال را اندازه گیری می کند. ضریب وابستگی کندال نیز وابستگی بین دو متغیر تصادفی را اندازه می گیرد که از رابطه ۷ به دست می آید:

$$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u, v) dC(u, v) - 1 \quad (۷)$$

اندازه های وابستگی دمی بالا و پایین ( $\lambda_U$  و  $\lambda_L$ )، وابستگی بین متغیرهای تصادفی را در گوشه یک چهارم بالایی سمت راست مربع I2 و در گوشه یک چهارم پایین سمت چپ آن بررسی می کنند. این اندازه ها توسط سی بویا [۳۹] معرفی شده است و شکل متداول و امروزی آنها را می توان در کتاب نلسن [۳۲] یافت.

### ۳.۲.۶. روش برآورد پارامتر مفصل

به طور کلی برآورد پارامترهای مفصل به دو روش پارامتری و نیمه پارامتری انجام می گیرد. روش پارامتری مانند روش برآوردگر بیشینه درست‌نمایی (MLE) و روش نیمه پارامتری مانند برآوردگر بیشینه درست‌نمایی توانیده (PML) هستند. روش اخیر تعدیل یافته روش رایج بیشینه درست‌نمایی است که در آن، توزیع های کناری تجربی به جای توزیع های حاشیه ای پارامتری به کار می روند [۲۱، ۳۲].

### ۳.۲.۷. آزمون نیکویی برازش

در این پژوهش، بهترین توزیع کناری بر مبنای آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) [۲۹]، آزمون آندرسون-دارلینگ [۳۶]، معیار اطلاعاتی آکائیک (AIC) [۱۲] انتخاب شد. آماره آزمون K-S یعنی D، بیشترین فاصله بین توزیع تجربی و CDF توزیع پارامتری را اندازه می گیرد. در گام اول، مناسب بودن یک توزیع توسط آزمون K-S تأیید شد. در ادامه، برتری این توزیع نسبت به بقیه توزیع های جایگزین، توسط آزمون AIC ارزیابی شد. به منظور انتخاب مفصل برتر، از آماره کرامر-ون میسر استفاده شد. این آزمون، شامل مقایسه فاصله بر مبنای رتبه بین مفصل تجربی  $C_n(\cdot)$  و مفصل های خانواده پارامتری برآورد شده  $C\theta(\cdot)$  است. آماره آزمون فاصله کرامر-ون میسر از رابطه ۸ به دست می آید.

$$S_n = \sum_{i=1}^n \left\{ C_n \left( \frac{R_i}{n+1}, \frac{S_i}{n+1} \right) - C_{\theta_n} \left( \frac{R_i}{n+1}, \frac{S_i}{n+1} \right) \right\}^2 \quad (۸)$$

در این رابطه،  $S_n$  آماره کرامر-ون میسر،  $C_n$ : مفصل تجربی (یک برآورد کننده ناپارامتری از یک مفصل نامعلوم از نمونه به حجم n) که به صورت رابطه ۹ محاسبه می شود:

$$C_n(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I \left( \frac{R_i}{n+1} \leq u, \frac{S_i}{n+1} \leq v \right) \quad u, v \in [0, 1] \quad (۹)$$

در بین گروهی از مفصل ها، مفصل دارای بزرگترین مقدار احتمال (و کوچکترین  $S_n$ ) انتخاب می شود.

### ۳.۲.۸. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی توانمندی روش های ریزمقیاس گردانی در برآورد مقادیر بارش، از شاخص های ارزیابی شامل ضریب همبستگی پیرسون (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۳</sup>، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSC)<sup>۴</sup>، میانگین مطلق خطا (MAE)<sup>۵</sup> استفاده شد.

1. Maximum-Likelihood Estimation
2. Pseudo-maximum-likelihood
3. Root Mean Square Error
4. Nash-Suttclif Coefficiency
5. Mean Absolute Error



### ۳.۲.۹. دوره‌های بازگشت تک‌متغیره

در تحلیل تک‌متغیره، دوره بازگشت با رابطه ۱۰ تعریف می‌شود [۱۶].

$$T_X = \frac{E(L)}{1-P} = \frac{E(L)}{1-F_X(x_p)} \quad (10)$$

در این رابطه، P مقدار تابع توزیع هر آستانه مدنظر  $(x_p)$ ، TX برای وقایع  $X \geq x$  متوسط فاصله زمانی بین رخداد  $X \geq x$  است. E(L)، فاصله مورد انتظار بین دو شروع خشکسالی است [۱۷،۳۷]. برای بررسی دوره بازگشت وقایع در حالت توأم، می‌توان از دوره بازگشت توأم در دو حالت «و» و «یا» استفاده کرد (رابطه‌های ۱۱ و ۱۲).

$$T_{D \cap S} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{DS}(d,s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (11)$$

$$T_{D \cup S} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \text{ or } S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_{DS}(d,s)} = \frac{E(L)}{1 - C(F_D(d), F_S(s))} \quad (12)$$

در این روابط S: شدت خشکسالی، D: مدت خشکسالی، E(L): فاصله مورد انتظار بین دو شروع خشکسالی،  $T_{D \cap S}$ : نشان‌دهنده دوره بازگشت توأم برای  $D \geq d$  و  $S \geq s$ ؛  $T_{D \cup S}$ : نشان‌دهنده دوره بازگشت توأم برای  $D \geq d$  یا  $S \geq s$  است.

## ۴. یافته‌های پژوهش

### ۴.۱. ارزیابی مدل منتخب و ریزمقیاس‌گردانی آماری

سری زمانی روزانه بارش برحسب میلی‌متر برای ایستگاه مشهد از فایل‌های با فرمت NETCDF مدل MRI برای دو دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۹) و آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استخراج شد. در ادامه سه سری روزانه بارش (دوره پایه و دوره آینده تحت دو سناریو) با استفاده از دو روش LS و DM تا سطح ایستگاه ریزمقیاس و مقادیر حاصل با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. نتایج آماره‌های اعتبارسنجی بارش برای دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به مقدار آماره‌های محاسبه‌شده، روش LS دارای عملکرد بهتری در ریزمقیاس‌گردانی این متغیر نسبت به روش DM در ایستگاه مشهد است.

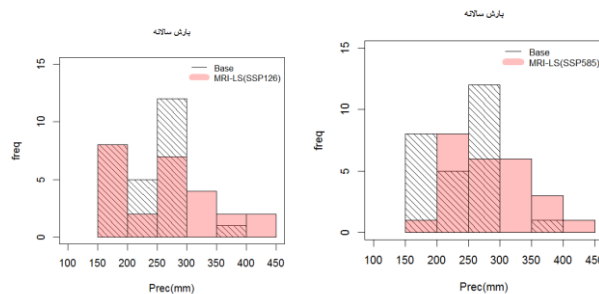
جدول ۱. مقدار آماره‌های اعتبارسنجی مدل MRI در شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه مشهد طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ (نگارندگان، ۱۴۰۳)

بارش (میلی‌متر)		متغیر
DM	LS	آماره ارزیابی
۱۷/۳	۱۳/۴	MAE
۲۷/۴	۲۰/۲	RMSE
-۰/۲۸	-۰/۲۹	NSE
۰/۴۷	۰/۵۹	r

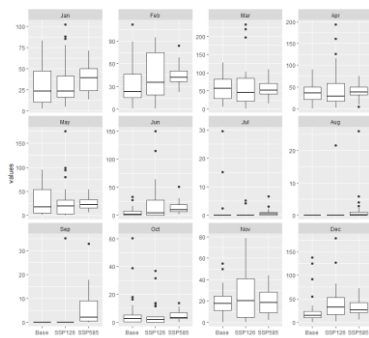
### ۴.۲. پیش‌نگری متغیر بارش

به‌منظور ارائه سناریوهای آتی بارش، با استفاده از آزمون‌های آماری و نمودارهای جعبه‌ای میزان تغییرات بارش در مقیاس ماهانه و سالانه، برای دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) نسبت به دوره پایه در چهار وضعیت (دو سناریو و دو روش ریزمقیاس‌گردانی) به‌دست آمد. نتایج نشان داد که طی دوره آینده نزدیک، بارش سالانه ریزمقیاس‌شده با روش LS به میزان ۸/۷ درصد تحت سناریوی خوشبینانه و ۱۶/۳ درصد تحت سناریوی بدبینانه افزایش می‌یابد. آزمون t نشان داد که میزان افزایش بارش تحت سناریوی SSP1-2.6 در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیست ( $P = \text{value} = ۰/۰۱$ )، اما میزان افزایش بارش تحت سناریوی مقابل، نسبت به دوره پایه افزایش معنی‌داری را نشان داد ( $P - \text{value} = ۰/۲۷$ ). مقادیر بارش سالانه ریزمقیاس‌شده با روش DM برای دوره آینده نزدیک، افزایش معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد تحت دو سناریو نشان داد. در شکل ۱ چگونگی تغییر طبقات بارش

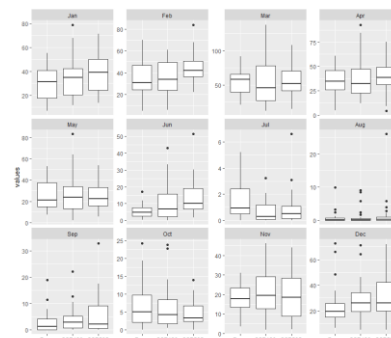
سالانه پیش‌نگری شده طی دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۱ (روش LS) تحت دو سناریوی SSP با استفاده از بافت‌نگار<sup>۱</sup> نسبت به دوره پایه مدل آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فراوانی مجموع بارش سالانه در طبقه ۲۰۰ میلی‌متر تا ۳۰۰ میلی‌متر کاهش یافت و در عوض رخداد بارش سالانه در طبقه ۴۵۰ میلی‌متر برای ایستگاه مشهد پیش‌نگری شد. تحت سناریوی SSP5-5.8، انتقال طبقات بارش مشاهده شد که نشان‌دهنده تغییر میانگین بارش (افزایش) است. بنابراین با روش LS، برای دوره آتی انتظار می‌رود بارش سالانه مشهد تحت SSP1-2.6 و SSP5-5.8 به ترتیب در ۸ درصد و ۱ درصد از سال‌ها به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر برسد.



شکل ۱. بافت‌نگار بارش سالانه پیش‌نگری شده (رنگی) در مقایسه با مقادیر پایه تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-5.8 برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ با روش LS (نگارندگان، ۱۴۰۳)



شکل ۳. نمودار جعبه‌ای بارش ماهانه (میلی‌متر) ریزمقیاس شده به روش DM برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۹) و دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ تحت دو سناریو (نگارندگان، ۱۴۰۳)



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای بارش ماهانه (میلی‌متر) ریزمقیاس شده به روش LS برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۹) و دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ تحت دو سناریو (نگارندگان، ۱۴۰۳)

بررسی تغییرات ماهانه بارش ریزمقیاس شده با روش LS (شکل‌های ۲ و ۳) نشان داد که افزایش بارش تحت سناریوی SSP5-5.8 در ماه‌های ژانویه، ژوئن و دسامبر معنی‌دار خواهد بود، در حالی که با روش DM، ماه‌های ژانویه، فوریه، سپتامبر و اکتبر تحت سناریوی SSP5-5.8 دارای تغییر معنی‌دار با دوره پایه هستند.

### ۳.۴. تحلیل فراوانی خشکسالی

با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه مشهد و ریزمقیاس شده مدل MRI با دو روش LS و DM برای دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ نمایه SPI در مقیاس زمانی شش ماه محاسبه شد. آستانه تعیین رویدادهای فرین، ۱- در نظر گرفته شد. در دوره پایه، هجده رخداد خشکسالی با آستانه  $SPI < -1$  استخراج شد. میانگین شدت و مدت این رویدادها به ترتیب ۱/۳ و ۲/۶ ماه به دست آمد. در این دوره، طولانی‌ترین رویداد به مدت ۱۰ ماه (دسامبر ۱۹۹۹ تا سپتامبر ۲۰۰۰) با شدت ۶/۱ رخ داده است. میانگین فاصله بین دو رویداد (L)، ۱۳/۶ ماه به دست آمد. مقایسه فراوانی، شدت و مدت رویدادهای مشاهده‌ای با مقادیر محاسبه شده با برونداد مدل

MRI (جدول ۲) طی دوره پایه نشان داد که ویژگی‌های رویدادهای SPI6-LS (روش ریزمقیاس LS) از نظر تعداد، شدت و مدت مشابه مقادیر مشاهداتی بود.

برای دوره آتی نیز مقادیر شدت، مدت و L از سری SPI6-LS و SPI6-DM تحت دو سناریوی منتخب استخراج و با مقادیر دوره پایه مقایسه شد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، برای نمایه SPI6-LS، تحت سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6، ویژگی‌های به‌دست‌آمده تفاوتی با دوره پایه ندارد (به‌جز کاهش L). تحت همین سناریو و با روش DM، کاهش در فراوانی و افزایش بیشینه شدت، میانگین مدت و شدت و L به‌دست آمد. تحت سناریوی مقابل (SSP5-5.8) با روش LS، فراوانی خشکسالی افزایش، ویژگی‌های دیگر کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که با روش DM فراوانی و L کاهش، بیشینه و میانگین شدت و مدت افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن چهار وضعیت (دو سناریو و دو روش ریزمقیاس‌گردانی)، می‌توان گفت طی دوره آتی، با احتمال ۲۵ درصد فراوانی خشکسالی افزایش خواهد یافت (با روش LS و تحت سناریوی بدبینانه). در وضعیت‌های دیگر SPI6-DM تحت دو سناریو (به‌ویژه سناریوی SSP1-2.6) به‌رغم کاهش فراوانی خشکسالی، شرایط وخیم‌تر از نظر شدت و مدت این مخاطره نسبت به دوره پایه به‌دست آمد.

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های SPI6 محاسبه‌شده با برنوداد مدل MRI ریزمقیاس‌شده با دور روش LS و DM با مقادیر مشاهداتی ایستگاه مشهد طی دوره پایه و دوره آینده نزدیک (نگارندگان، ۱۴۰۳)

ویژگی‌ها	دوره پایه		آینده نزدیک					
			DM			LS		
	DM	LS	SSP5-5.8	% تغییر	SSP1-2.6	% تغییر	SSP5-5.8	% تغییر
تعداد رخداد	۱۶	۲۲	۱۶	۳۷	۱۶	-۲۷	۲۲	۰
بیشینه شدت	۶/۱	۴/۵	۶/۳	-۲۴	۶/۳	۴۰	۴/۶	۳
بیشینه مدت	۹	۸	۸	-۲۲	۷	۰	۷	-۱۱
میانگین شدت	۱/۴	۱	۱/۴	-۲۹	۱/۳	۳۰	۱	۰
میانگین مدت	۳	۲/۱	۳	-۲۷	۳	۴۲	۲/۲	۰
L (ماه)	۱۶/۱	۱۱/۷	۱۴/۵	-۹	۱۱/۲	-۳۰	۱۱/۲	-۹

#### ۴.۳.۱. برآورد دوره‌های بازگشت تک‌متغیره و دو متغیره

##### ۴.۳.۱.۱. تحلیل فراوانی تک‌متغیره

با هدف تحلیل فراوانی شدت و مدت این مخاطره، ابتدا توزیع‌های مناسب برای مقادیر شدت و مدت با استفاده از آزمون‌های آماری و نمودارهای مربوط تعیین و سپس با استفاده از رابطه ۹، دوره‌های بازگشت تک‌متغیره محاسبه شد. با توجه به نمودارهای احتمال-احتمال (pp) و نمودار چندک-چندک (Q-Q) و همچنین مقدار آماره آزمون‌های نیکویی برازش، توزیع گاما و نمایی به‌ترتیب برای تحلیل فراوانی شدت و مدت به‌کار رفت که در پژوهش‌های دیگر مانند لی و همکاران [۳۰] و چن و همکاران [۱۷] نیز انتخاب شده است. در ادامه به‌منظور بررسی توانمندی مدل MRI در برآورد دوره‌های بازگشت تک‌متغیره، مقادیر این دو متغیر برای سری‌های SPI6 محاسبه‌شده با بارش مشاهداتی و مدل MRI به‌ازای دوره‌های بازگشت تک‌متغیره ۲، ۵، ۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله محاسبه شد. مقادیر دوره‌های بازگشت متغیر مدت مستخرج از سری SPI6-LS کاملاً مشابه دوره مشاهداتی به‌دست آمد، اما برای سری SPI6-DM، مقادیر مدت و شدت به‌ازای دوره‌های بازگشت کم برآورد شده است. برای شدت نیز باز هم روش LS برآورد بهتری (به‌جز کم‌برآورد در دوره‌های بازگشت بزرگ‌تر) نسبت به روش DM (کم‌برآورد در همه دوره‌های بازگشت منتخب) ارائه داد.

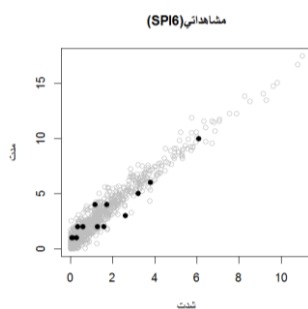
##### ۴.۳.۱.۲. تحلیل فراوانی دو متغیره

اولین گام در ساخت مفصل، بررسی ساختار و شدت وابستگی دو متغیر شدت و مدت است. بدین منظور، میزان وابستگی متغیرهای شدت و مدت استخراج‌شده از سری‌های SPI6 دوره مشاهداتی، پایه مدل و تحت دو سناریو برای دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۶) با استفاده از ضرایب وابستگی رتبه‌ای کندال و اسپیرمن بررسی شد. برای مثال، مقدار ضریب وابستگی کندال برای مقادیر

شدت و مدت مستخرج از سری SPI6 دوره مشاهداتی به میزان ۰/۸۴ به دست آمد (جدول ۳). با استفاده از آزمون نیکویی برازش از بین چندین مفصل ارشمیدسی و بیضوی، مفصل کلیتون انتخاب شد. از نظر مقایسه بصری نیز همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، داده های مشاهداتی شدت و مدت در ابر داده تولید شده توسط مفصل کلیتون قرار گرفته اند که نشان از انتخاب مفصل مناسب دارد.

جدول ۳. پارامترها و آماره نیکویی برازش توزیع های دومتغیره بر مبنای مفصل برای دوره پایه مشاهداتی (نگارندگان، ۱۴۰۳)

نمایه	$\tau$	p-value	$\rho_s$	p-value	مفصل	$\theta$	آزمون Cv-M	
							آماره	p-value
مشاهداتی SPI6	۰/۸۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۵	<۰/۰۰۰۱	Clayton (90)	۷/۲۳	۰/۰۵	۰/۳۱



شکل ۴. مقادیر مشاهداتی شدت و مدت مستخرج از SPI6 در مقابل ابر داده تولید شده توسط مفصل کلیتون (نگارندگان، ۱۴۰۳)

در ادامه مراحل بالا برای مقادیر شدت و مدت مستخرج از سری های SPI6 محاسبه شده با داده های بارش ریزمقیاس شده مدل MRI به دو روش LS و DM برای دوره پایه و دوره آتی (تحت دو سناریو) انجام گرفت و پارامترهای دو توزیع گاما و نمایی محاسبه و مفصل های مناسب انتخاب شد که نتایج در جدول ۴ درج شده است.

جدول ۴. مفصل های منتخب به همراه پارامتر مربوط و پارامترهای توزیع های کناری شدت و مدت (نگارندگان، ۱۴۰۳)

نمایه	$\tau$	مفصل	$\theta$	شدت	مدت	L
SPI6-LS	۰/۶	کلیتون (۹۰ درجه)	۲/۹۷	Shap=0.90 Rate=0.60	Rate=0.33	۱/۳
SPI6-DM	۰/۶	کلیتون (۹۰ درجه)	۲/۹۷	Shap=1.7 Rate=0.78	Rate=0.45	۰/۹۸
SPI6-LS	۰/۶۱	گامیل	۲/۵	Shap=0.74 Rate=0.74	Rate=0.45	۰/۹۳
SPI6-DM	۰/۶۳	کلیتون (۹۰ درجه)	۳/۴	Shap=0.76 Rate=0.72	Rate=0.43	۰/۹۵
SPI6-LS	۰/۷۶	گامیل	۴/۱۹	Shap=0.70 Rate=0.50	Rate=0.33	۱/۲
SPI6-DM	۰/۷۴	جو	۶/۶	Shap=0.81 Rate=0.58	Rate=0.33	۱/۲

مقایسه نتایج به دست آمده برای دوره پایه با دوره آتی نشان داد که در بحث دوره بازگشت تک متغیره با روش LS، تحت دو سناریوی SSP، مدت به ازای دوره های بازگشت منتخب در جدول ۵ کاهش خواهد یافت. با روش ریزمقیاس گردانی LS، کاهش در مقادیر مدت به ازای دوره های بازگشت تعیین شده تحت دو سناریو به دست آمد. کاهش مقادیر شدت تحت سناریوی SSP5-5.8 و تغییر نکردن این متغیر تحت سناریوی SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه مشاهده شد که بدین معناست که با احتمال های برابر با دوره پایه، رویدادهای SPI6 تحت سناریوی بدبینانه (SSP5-5.8) از شدت و مدت کمتری نسبت به دوره پایه برخوردار خواهند بود. این امر احتمالاً به افزایش بارش پیش نگرسی شده تحت سناریوی SSP5-5.8 برمی گردد. تحت سناریوی SSP1-2.6 و با روش ریزمقیاس گردانی DM، افزایش مقدار مدت و شدت این مخاطره و تحت سناریوی مقابل، افزایش مقادیر شدت به ازای

دوره‌های بازگشت مندرج در جدول ۵ به‌دست آمد. به‌عبارت دیگر، با روش DM تحت دو سناریو، مقادیر بیشتری از شدت (بزرگ‌تر تحت سناریوی SSP1-2.6) به‌ازای دوره‌های بازگشت منتخب نسبت به دوره‌ی پایه قابل انتظار است.

جدول ۵. مقدار مدت به‌ازای دوره‌های بازگشت مختلف تحت سناریوهای منتخب طی دوره‌ی آتی (نگارندگان، ۱۴۰۳)

دوره‌ی بازگشت						روش ریزمقیاس	پایه/سناریو	ویژگی	
۱۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۱۰	۵	۲				
۲۶/۵	۲۳/۸	۱۷/۶	۸/۸	۶/۱	۲/۶	-	مشاهداتی	مدت	
۲۶/۴	۲۳/۸	۱۷/۶	۸/۸	۶/۱	۲/۶	LS	پایه		
۱۶/۴	۱۴/۷	۱۰/۹	۵/۴	۳/۸	۱/۶	DM			
۲۱	۱۸/۹	۱۴	۷	۴/۹	۲/۱	LS	SSP1-2.6		
۲۰/۷	۱۸/۶	۱۳/۸	۶/۹	۴/۸	۲	DM	SSP5-5.8		
۱۵	۱۳/۵	۱۰	۵	۳/۵	۱/۵	LS			
۱۵/۷	۱۴/۲	۱۰/۵	۵/۲	۳/۶	۱/۵	DM	مشاهداتی		
۱۲/۱	۱۰/۷	۷/۶	۳/۳	۲/۱	۰/۷	-			
۱۰/۷	۹/۶	۷	۳/۴	۲/۳	۰/۹	LS	پایه		
۶/۴	۵/۷	۴/۱	۲	۱/۳	۰/۵	DM			
۱۰/۹	۹/۷	۷/۱	۳/۳	۲/۲	۰/۹	LS	SSP1-2.6		شدت
۱۲	۱۰/۶	۷/۶	۳/۴	۲/۲	۰/۸	DM			
۸/۳	۷/۴	۵/۴	۲/۴	۱/۶	۰/۶	LS	SSP5-5.8		
۸/۶	۷/۷	۵/۵	۲/۶	۱/۷	۰/۶	DM			

در بحث دوره‌های بازگشت توأم، شدیدترین رویداد SPI6-LS طی دوره‌ی پایه‌ی مدل MRI، دارای شدت ۶/۱ و مدت ۹ ماه بوده است که براساس محاسبات مبنی بر رابطه‌های ۱۰ و ۱۱، دارای دوره‌ی بازگشت توأم در حالت «و» ۷۰ سال و در حالت «یا» ۲۵/۵ سال است. بنابر مقادیر مشاهداتی، دوره‌ی بازگشت این رویداد در حالت توأم «و» ۶۳ و در حالت «یا» ۲۴ سال به‌دست آمد؛ یعنی SPI6-LS در برآورد دوره‌های بازگشت توأم مشابه داده‌های مشاهداتی عمل کرده است. چنین رویدادی در دوره‌ی آینده نزدیک و تحت سناریوی SSP5-5.8 دارای دوره‌ی بازگشت توأم حالت «و» برابر ۱۷۵  $(T(fut.)_{D \geq 9 \text{ and } S \geq 6.1} = 175 > T(base)_{D \geq 9 \text{ or } S \geq 6.1} = 52 > T(base)_{D \geq 9 \text{ and } S \geq 6.1} = 70)$  و برای حالت «یا» معادل ۵۲ سال خواهد بود  $(T(fut.)_{D \geq 9 \text{ or } S \geq 6.1} = 25.5 > T(base)_{D \geq 9 \text{ and } S \geq 6.1} = 70)$ ؛ بنابراین رخداد این‌چنینی طی دوره‌های آتی تحت این سناریو از احتمال کمتری برخوردار است. همین رویداد برای SPI6-LS تحت سناریوی SSP1-2.6 دوره‌ی بازگشت توأم حالت «و» برابر ۵۰  $(T(fut.)_{D \geq 9 \text{ and } S \geq 6.1} = 50 < T(base)_{D \geq 9 \text{ and } S \geq 6.1} = 70)$  و برای حالت «یا» معادل ۲۳ سال  $(T(fut.)_{D \geq 9 \text{ or } S \geq 6.1} = 23 < T(base)_{D \geq 9 \text{ or } S \geq 6.1} = 25.5)$  به‌دست آمد که نشان می‌دهد تحت این سناریو، چنین رویدادی در هر دو حالت «و» و «یا» از احتمال وقوع بیشتری نسبت به دوره‌ی پایه برخوردار است. بیشینه‌ی شدت و مدت این مخاطره در SPI6-DM در دوره‌ی پایه به‌ترتیب ۴/۵ و ۸ ماه است که دارای دوره‌ی بازگشت توأم حالت «و» و «یا» به‌ترتیب ۳۶ و ۱۰/۳ سال (براساس SPI6 مشاهداتی به‌ترتیب ۴۰ و ۱۲ سال) است. تحت سناریوی SSP1-2.6، دوره‌های بازگشت مذکور به‌ترتیب ۲۴ و ۱۶/۵ به‌دست آمد که نشان می‌دهد چنین رویدادی در دوره‌ی آتی دارای احتمال بزرگ‌تری در حالت «و» نسبت به دوره‌ی پایه است  $(T(fut.)_{D \geq 8 \text{ and } S \geq 4.5} = 24 < T(base)_{D \geq 8 \text{ and } S \geq 4.5} = 36)$ . این رویداد تحت سناریوی SSP5-5.8 دارای دوره‌ی بازگشت توأم حالت «و» ۳۵ و حالت «یا» ۲۹/۳  $(T(fut.)_{D \geq 8 \text{ or } S \geq 4.5} = 29.3 > T(base)_{D \geq 8 \text{ and } S \geq 4.5} = 10.3)$  به‌دست آمد. از این‌رو در این سناریو، رویدادهای خشکسالی با شدت و مدت معین در حالت توأم «یا» احتمال رخداد کمتری نسبت به دوره‌ی پایه دارند. در کل می‌توان نتیجه گرفت که با روش DM، تحت سناریوی SSP1-2.6، دوره‌های بازگشت توأم مقادیر معین شدت و مدت در حالت «و» نسبت به دوره‌ی پایه کاهش خواهد یافت که نشان‌دهنده‌ی افزایش ریسک این مخاطره خواهد بود.

## 5. بحث

در این مقاله با استفاده از دو روش ریزمقیاس‌گردانی آماری، داده‌های بارش ماهانه (میلی‌متر) مدل MRI از آرشیو مدل‌های CMIP6 طی دوره پایه و تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه SSP برای دوره آینده نزدیک ریزمقیاس شد و توانمندی این دو روش آماری در تصحیح اریبی بارش مدل بررسی شد. در ادامه، سری‌های زمانی نمایه SPI در مقیاس شش‌ماهه با سری بارش ماهانه ریزمقیاس‌شده با دو روش LS و DM محاسبه و توانمندی مدل MRI در برآورد ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت و فراوانی) تحلیل شد. نتایج نشان داد که روش LS از توانمندی بهتری در ریزمقیاس‌گردانی بارش و برآورد ویژگی‌های خشکسالی برای این ایستگاه برخوردار است. بررسی میزان بارش در چهار وضعیت مورد بررسی (یک مدل، دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-5.8 با دو روش ریزمقیاس‌گردانی LS و DM) برای دوره آینده نزدیک (2050-2026) با درصدهایی متفاوت (بیشتر تحت سناریوی SSP5-5.8) افزایش نشان داد. با توجه به افزایش دمای پیش‌نگری‌شده، پژوهش‌ها نیز نشان داده که افزایش هر 1 درجه سانتی‌گراد دمای جهانی سبب افزایش بخار آب جو تا حدود 7 درصد بر مبنای رابطه کلایوس-کلاپیرون و افزایش بارش تا حدود 2 درصد طی دوره آتی خواهد شد [50، 20، 13]. در حوضه قره‌قوم نیز انصاری و همکاران [1] نشان دادند که برای دوره 2039-2022، بارش بین 5 تا -5 درصد متغیر خواهد بود که با نتیجه این پژوهش همخوانی ندارد. بهزادی و همکاران [3] افزایش و کاهش مقدار سالانه بارش ایران را به ترتیب 62 و 9 میلی‌متر گزارش دادند. عطایی و همکاران [6] براساس روش BCSD نشان دادند که بارش مشهد برای دوره 2050-2021 افزایش خواهد یافت. زرین و رودباری [52] نیز افزایش روزهای همراه با بارش سنگین تحت سناریوهای SSP370 و SSP5-5.8 را در حوضه قره‌قوم گزارش دادند که همسو با نتایج این پژوهش است. اگرچه بارش در این ایستگاه احتمالاً افزایش خواهد یافت، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش میانگین بارش‌های سنگین و دوره‌های خشک طولانی‌مدت همزمان رخ می‌دهد [18] و اثر مثبت افزایش بارش خنثی خواهد شد. بررسی ویژگی‌های خشکسالی نشان داد که در این ایستگاه، فراوانی خشکسالی تحت سناریوی SSP5-5.8 افزایش می‌یابد که این یافته با نتایج وانگ و همکاران [45] با تحلیل ویژگی‌های جهانی این مخاطره تحت SSPs همخوانی دارد. تحلیل فراوانی تک‌متغیره نشان داد که تنها با روش DM برای دوره آتی تحت دو سناریو، مقادیر بیشتری از شدت به‌ویژه تحت سناریوی SSP1-2.6 به‌ازای دوره‌های بازگشت منتخب نسبت به دوره پایه قابل انتظار است. در این مقاله از توابع مفصل بیضوی و ارشمیدسی به‌منظور تحلیل فراوانی توأم شدت و مدت برای دوره پایه و دوره آتی استفاده شد. در پژوهش‌های مشابه، بهزادی و همکاران (2024) [15] نیز از سه مفصل کلیتون، فرانک و گامبل برای بررسی دوره‌های بازگشت توأم برای ایران تحت سناریوهای SSPs استفاده کردند. لی و همکاران [30] از مفصل فرانک به‌منظور بررسی احتمال توأم شدت و مدت استفاده کردند. گی و همکاران [20] نیز در پژوهش خود از مفصل‌های فرانک، کلایتون و گامبل برای تحلیل فراوانی توأم این مخاطره در مناطق مختلف چین استفاده کردند. در بحث دوره‌های بازگشت توأم، نتایج نشان داد که بیش از روش ریزمقیاس‌گردانی، این که شرایطی اقلیم آتی توسط کدام سناریو تعیین شوند تأثیر بیشتری در تحلیل فراوانی این مخاطره دارد. به‌طوری که تحت سناریوی SSP1-2.6 به‌ازای دوره‌های بازگشت یکسان، شدت و مدت رخدادهای توأم در حالت «و» افزایش می‌یابد. اما تحت سناریوی مقابل (سناریوی بدبینانه)، دوره بازگشت در حالت «و» نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که به‌معنای کاهش ریسک خشکسالی تحت این سناریو است. براساس نتایج بهزادی و همکاران [15] ایران با خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تری در آینده روبه‌رو خواهد شد. برای ایستگاه تهران طی دوره آتی، شدت بیشتر خشکسالی تحت سناریوی بدبینانه نسبت به سناریوی خوشبینانه و افزایش فراوانی فرین‌های خشکسالی تحت سناریوی خوشبینانه در تهران توسط زرین و صالح‌آبادی [4] گزارش شده است. نتایج این مقاله از نظر افزایش فراوانی این مخاطره همسو با پژوهش‌های بررسی‌شده است. در کل نتایج نشان‌دهنده شرایط وخیم‌تر خشکسالی با روش DM تحت سناریوی SSP1-2.6 است.

## 6. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به‌منظور لحاظ عدم قطعیت از دو روش ریزمقیاس‌گردانی و دو سناریو با هدف ارائه سناریوهای آتی ویژگی‌های

خشکسالی استفاده شد. در پاسخ به سؤال پژوهش درباره بررسی میزان توانمندی مدل منتخب در شبیه‌سازی بارش نتایج نشان داد که این مدل بسته به روش ریزمقیاس‌گردانی از توانمندی متفاوتی در شبیه‌سازی بارش برخوردار است، به طوری که روش LS نسبت به روش DM عملکرد بهتری نشان داد. همچنین در پاسخ به اینکه براساس پیش‌نگری مدل منتخب CMIP6، وضعیت خشکسالی و ویژگی‌های آن (شدت، مدت، فراوانی و دوره‌های بازگشت) در دشت مشهد در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) طبق دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه SSPs چگونه خواهد بود؟ نتایج نشان داد که در کل شرایط وخیم‌تر خشکسالی تحت سناریوی SSP1-2.6 از نظر شدت و مدت و از نظر فراوانی تحت سناریوی SSP5-5.8 قابل انتظار است. بررسی‌ها نشان داده است که خشکسالی از رایج‌ترین مخاطرات اقلیمی برای دشت مشهد است و این منطقه آسیب‌پذیری زیادی در برابر آن دارد. از آنجا که الگوی توسعه باید براساس پتانسیل وقوع مخاطرات طراحی شود [۸]، چشم‌انداز ارائه‌شده از این رویداد برای دوره‌های آتی ضرورت دارد و می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مرتبط با آب در بخش آب و کشاورزی راهگشا باشد.

## ۷. پیشنهادها

برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود که از دیگر مدل‌های اقلیمی آرشیو در CMIP6 و بقیه روش‌های ریزمقیاس‌گردانی دینامیکی (RegCM4.1) و آماری مانند SDSM و LARS-WG به‌منظور کاهش عدم قطعیت استفاده شود. به‌منظور بررسی توزیع مکانی خشکسالی پیشنهاد می‌شود که از داده‌های شبکه‌ای ریزمقیاس‌شده دما و بارش مدل‌های CMIP6 که به‌تازگی (۲۰۲۲-۲۰۲۳) در اختیار جامعه علمی قرار گرفته است استفاده شود. از جمله راهکارهای کاربردی پیشنهادی در زمینه سازگاری با این مخاطره در دوره‌های آتی می‌توان به اجرای طرح‌های آبخیزداری، توسعه الگوی کشت کم‌آب‌طلب و غیرمثمر و طرح‌های بازچرخانی آب در این دشت اشاره کرد.

## تقدیر و تشکر

این پژوهش مستخرج از رساله دکتری است که با حمایت گروه جغرافیای دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور تهیه شده است. بدین وسیله از آنها تشکر می‌شود.

## منابع

- [۱] انصاری مهابادی، ثمین؛ دهبان، حسین؛ زارعیان، محمدجواد؛ و فرخ‌نیا، اشکان (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده براساس برونداد مدل‌های CMIP6. *پژوهش آب/ایران*، ۱۶(۱)، (پیاپی ۴۴)، ۱۱-۲۴.
- [۲] بابائیان، ایمان؛ مدیریان، راهله؛ خزانه‌داری، لیلی؛ کریمیان، مریم؛ کوزه‌گران، سعیده؛ کوهی، منصوره؛ فلامرزی، یاشار؛ و ملبوسی، شراره (۱۴۰۲). چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس‌های آماری برونداد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHYD. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۲)، ۴۳۱-۴۴۹. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436.
- [۳] بهزادی، فرهاد؛ جوادی، سامان؛ یوسفی، حسین؛ مریدی، علی؛ و هاشمی شاهدانی، سیدمهدی (۱۴۰۱). تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از برونداد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت شهرکرد). *اکوهیدرولوژی*، ۹(۲)، ۴۱۹-۴۳۶.
- [۴] زرین، آ. صالح‌آبادی، ن. (۱۳۹۸). پیش‌آگاهی مخاطره خشکسالی در تهران براساس برونداد مدل‌های CMIP6، ششمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران، آبان ۱۳۹۸.
- [۵] عسگری، الهه؛ نوروزی‌نظر، محمدصادق؛ باعقیده، محمد؛ و انتظاری، علیرضا (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده حوضه آبخیز گرگانرود تحت مدل‌های CMIP6. *پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی*، ۴(۱۴)، ۲۷-۴۲. doi: 10.30488/ccr.2023.397170.1134
- [۶] عطایی، هوشمند؛ کوهی، منصوره؛ مدیریان، راهله؛ و بذرافشان، بهاره (۱۴۰۰). تغییرات پیش‌نگری‌شده در دما و بارش حوضه کشف‌رود برمبنای روش‌های مقیاس‌های دینامیکی و آماری. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۰(۳۰)، ۱۸۳-۲۰۲. doi: 10.22111/jneh.2021.37827.1777
- [۷] قنبرزاده، هادی؛ و بهنیافر، ابوالفضل (۱۳۸۸). پیامدهای اقتصادی خشکسالی‌های دوره ۸۵-۱۳۷۵ بر نواحی روستایی دهستان شاندریز شهرستان مشهد، *مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی (چشم‌انداز جغرافیایی)*، ۴(۹)، ۱۳۹-۱۶۴.
- [۸] کوهی، منصوره؛ و پاکدامن، مرتضی (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP5 در تحلیل فراوانی دومتغیره مفصل‌مبنای ویژگی‌های خشکسالی در بخش جنوبی حوضه آبریز کارون. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۸(۱)، ۱۵۳-۱۷۲. doi: 10.22059/jesphys.2022.326320.1007333
- [۹] محمدی، نیلوفر؛ و حجازی‌زاده، زهرا (۱۴۰۳). اثرات تغییر اقلیم بر افزایش ریسک مخاطره خشکسالی در تهران با بهره‌گیری از سناریوهای CMIP6. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)، ۱۳۳-۱۴۸. doi: 10.22098/mmws.2023.12563.1252
- [۱۰] مقیمی، ابراهیم (۱۴۰۳). رویکرد جدید به مخاطرات محیطی و توسعه پایدار در ایران. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱(۱)، ۷۳-۸۴. doi: 10.22059/jhsci.2024.378814.830.۸۴
- [۱۱] نگهبان، سعید؛ مکرم؛ مرضیه؛ و مرادی‌زاده کرمانی، ریحانه (۱۴۰۳). تحلیل اثرهای مخاطره خشکسالی بر جوامع روستاهای پیرامون دریاچه مهارلو، *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱(۱)، ۱-۱۳. doi: 10.22059/jhsci.2024.374378.823
- [12] Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6), 716-723.
- [13] Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G.-K., & Rogelj, J. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 14 I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; *Technical Summary*; 2021. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-1/> (accessed on 15 August 2022).
- [14] Ayantobo, O. O., Li, Y., & Song, S. (2019). Multivariate drought frequency analysis using four-variate symmetric and asymmetric Archimedean copula functions. *Water Resources Management*, 33, 103-127.
- [15] Behzadi, F., Yousefi, H., Javadi, S., Moridi, A., Shahedany, S. M. H., & Neshat, A. (2022). Meteorological drought duration-severity and climate change impact in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3), 1297-1315.
- [16] Bonaccorso, B., Cancelliere, A., & Rossi, G. (2003) An analytical formulation of return period of drought severity. *Stochastic Environmental Research Risk*, 17 (3), 157-174.
- [17] Chen, L., Singh, V.P., Guo, S., Mishra, A.K., & Guo, J. (2013) Drought analysis using copulas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18 (7), 797-808.
- [18] Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4, 301-312.



- [19] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- [20] Ge, Y., Cai, X., Zhu, T., & Ringler, C. (2016) Drought frequency change: An assessment in northern India palins, *Agricultural Water Management*, 176, 111-121.
- [21] Genest, C., Rémillard, B., D., & Beaudoin (2009) Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study, Insurance: *Mathematics and Economics*, 44, 199-213.
- [22] Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Boschhat, G., ...& Lyu, K. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *Earth's Future*, 8(5), e2019EF001469.
- [23] Ha, K. J., Moon, S., Timmermann, A., & Kim, D. (2020). Future changes of summer monsoon characteristics and evaporative demand over Asia in CMIP6 simulations. *Geophysical Research Letters*, 47(8), e2020GL087492.
- [24] IPCC, (2001). Climate Change: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to The Third Assessment report to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, N.Y., U.S.A., 881pp.
- [25] IPCC, (2007). Climate Change: The physical science basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller H.L. (Eds), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- [26] IPCC, (2013). Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- [27] Joe, H. (1997) *Multivariate Models and Dependence Concepts*, Chapman & Hall, London. 399 pp.
- [28] Karim, R., Tan, G., Ayugi, B., Babaousmail, H., & Liu, F. (2020). Evaluation of Historical CMIP6 Model Simulations of Seasonal Mean Temperature over Pakistan during 1970–2014. *Atmosphere*, 11(9), 1005.
- [29] Kolmogorov, A. N. (2018) Sulla Determinazione Empirica di una Legge di Distribuzione, *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, 4, pp.83-91.
- [30] Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P., & Yang, Z. L. (2020). Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *Journal of Hydrometeorology*, 21(7), 1513-1530.
- [31] McKee, T.B., Doeskin, N.J. and Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales, In: *Proceedings of: the 8th Conference on Applied Climatology*, January 17-22, Anaheim, California, pp. 179-184.
- [32] Nelsen, R.B. (2007) *An introduction to copulas* (3th ed.). New York: Springer.
- [33] Piani, C., Haerter, J. O., & Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and applied climatology*, 99, 187-192.
- [34] Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. G. (2016). CMhyd user manual. Doc. Prep. Simulated Clim. *Change Data Hydrol. Impact Study*, 1413.
- [35] Riahi K., Rao Sh., Krey V., Cho Ch., and et al., 2011, RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, 109: 33-57.
- [36] Scholz, F. W., Stephens, M. A. (1987) K-sample Anderson-Darling tests, *Journal of the American Statistical Association*, 82(399), 918– 924.
- [37] Shiau, J.T. (2006) Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, 20, 795–815.
- [38] Shrestha, A., Rahaman, M. M., Kalra, A., Jogineedi, R., & Maheshwari, P. (2020). Climatological drought forecasting using bias corrected CMIP6 climate data: A case study for India. *Forecasting*, 2(2), 59-84.
- [39] Sibuya, M. (1960) Bivariate extreme statistics. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics (Tokyo)* 11, 195–210.
- [40] Sklar, A. (1959) *Distribution functions of n Dimensions and Margins*, Publications of the Institute of Statistics of the University of Paris 8, 229-231. (In French)
- [41] Su, B., Huang, J., Mondal, S. K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., ... & Li, A. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250, 105375.
- [42] Supharatid, S., & Nafung, J. (2021). Projected drought conditions by CMIP6 multimodel ensemble over Southeast Asia. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3330-3354.
- [43] Ukkola, A. M., De Kauwe, M. G., Roderick, M. L., Abramowitz, G., & Pitman, A. J. (2020). Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087820.
- [44] Wang, X. L., & Feng, Y. (2013). RHtestsV4 user manual. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, *Science and Technology Branch, Environment Canada*, 28, 780.

- [45] Wang, X., Yang, J., Xiong, J., Shen, G., Yong, Z., Sun, H., ... & Cui, X. (2022). Investigating the impact of the spatiotemporal bias correction of precipitation in CMIP6 Climate Models on drought assessments. *Remote Sensing*, 14(23), 6172.
- [46] Xu, L., Yu, W., Yang, S., & Zhang, T. (2024). Concurrent drought and heatwave events over the Asian monsoon region: insights from a statistically downscaling CMIP6 dataset. *Environmental Research Letters*, 19(3), 034044.
- [47] Xu, Y., Zhang, X., Hao, Z., Hao, F., & Li, C. (2021). Projections of future meteorological droughts in China under CMIP6 from a three-dimensional perspective. *Agricultural Water Management*, 252, 106849.
- [48] Yevjevich, V. (1967) *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts*, Hydrology paper, Colorado State University.
- [49] Yong, Z., Xiong, J., Wang, Z., Cheng, W., Yang, J., & Pang, Q. (2021). Relationship of extreme precipitation, surface air temperature, and dew point temperature across the Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 165, 1-22.
- [50] Yousefi, H., Ahani, A., Moridi, A., & Razavi, S. (2024). The future of droughts in Iran according to CMIP6 projections. *Hydrological Sciences Journal*, 69(7), 951-970.
- [51] Zamani, Y., Hashemi Monfared, S. A., Azhdari Moghaddam, M., & Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1613-1623.
- [52] Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 643-660.