






## Future Drought Characteristics in Kashaf Roud basin under SSPs Scenarios

Rashidi Ghane, M.<sup>1</sup>  | Motevalli, S.<sup>2</sup>  | Janbaz Ghobadi, G.R.<sup>2</sup>  | Kouhi, M.<sup>3</sup>  

1. PhD. Student, Islamic Azad University, Nour Branch.
2. Associate Professor, Department of Geography, Islamic Azad University, Nour branch.
3. Member of Disasters and Climate Change Research Group - CRI (RIMAS).

**Corresponding Author E-mail:** [man\\_koohi@yahoo.com](mailto:man_koohi@yahoo.com)

(Received: 04 Aug 2024, Revised: 09 Nov 2024, Accepted: 23 Nov 2024, Published online: 23 Nov 2024)

### Abstract

In recent years, destructive droughts in the Khashaf roud basin have received increased attention due to their significant impacts. Therefore, assessing drought variations is critical to ensure water management, human health, agricultural activity, and social development. In this study, the Run Theory was used to investigate the drought characteristics in historical (1989–2014) and future (SSP126 and SSP585, 2026–2050) periods in this basin based on observations and model simulations from Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6 (CMIP6). The variations and risk analysis of drought characteristics based on SPEI6 were assessed by copula-based methods. In this thesis, first, the monthly temperature and precipitation data of meteorological station of Mashhad located in the Kashfroud basin for the years 1989 to 2014 were obtained from IRIMO and the quality control and homogeneity test of these data were performed. Screening of the AOGCMs of IPCC Sixth Report (CMIP6) models led to the selection of the MRI-ESM2-0 model. Bias correction was also done using two methods. Linear scaling (LS) and distribution mapping (DM) were performed by CMhyd model. Based on the statistical criteria used, the LS method for precipitation data and the DM method for temperature were more accurate. The projection of temperature and precipitation variables for this basin for the near future period showed that the minimum and maximum temperatures will increase compared to the base period during 2026–2050. The average annual changes of these two variables under the SSP126 scenario by DM method will be +1.4 and +1.8°C respectively and under the SSP585 scenario it will be +1.7 and +2°C. Results indicated that precipitation was projected to increase under SSP126 and SSP585 scenarios. The drought duration and severity are shown to decrease based on MRI model projections compared with historical periods. Drought return periods of two drought characteristics for each scenario were also assessed by using the copula-based joint distribution. Based on the joint analysis of duration and severity for SPEI, both the “or” and “and” return periods in the future indicated decrease risks. Under global warming, moderate to extreme drought events with short duration, low severity were shown to occur more frequently in the near future, especially under the SSP585 scenario. Considering the current critical situation of the Kashf Roud basin, the application of the results of such research will lead to the improvement of risk management and drought risk in the water and agriculture sectors, increasing the resilience of the Kashf Roud basin and improving future planning for the aforementioned sectors.

**Keywords:** Drought, Bias correction, Copula, CMIP6, Kashaf Roud

**Cite this article:** Rashidi Ghane, M., Motevalli, S., Janbaz Ghobadi, G. R., & Kouhi, M. (2024). Future Drought Characteristic in Kashaf Roud basin under SSPs Scenarios. Journal of the Nivar, 48(126-127), 169-191. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.471479.1302>

**E-mail:** (1) [m.rashedy210@gmail.com](mailto:m.rashedy210@gmail.com) (2) [sadr\\_m1970@yahoo.com](mailto:sadr_m1970@yahoo.com) | [gghoadi@yahoo.com](mailto:gghoadi@yahoo.com)



## ویژگی‌های آبی خشکسالی در حوضه کشف رود تحت سناریوهای SSPs

محبوبه رشیدی قانع<sup>۱</sup> | صدرالدین متولی<sup>۲</sup> | غلامرضا جانباغز قبادی<sup>۲</sup> | منصوره کوهی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، آب و هواشناسی، دانشگاه آزاد واحد نور، نور، ایران.

۲. دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران.

۳. استادیار، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [man\\_koochi@yahoo.com](mailto:man_koochi@yahoo.com)

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳)

### چکیده

در سال‌های اخیر، خشکسالی به دلیل صدمات جدی که به بخش‌های مختلف در حوضه کشف رود وارد کرده، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. لذا ارزیابی تغییرات خشکسالی برای اطمینان از مدیریت آب، سلامت انسان، فعالیت کشاورزی و توسعه اجتماعی-اقتصادی در این حوضه طی دوره آبی حیاتی است. در این پژوهش، از تئوری ران برای استخراج ویژگی‌های خشکسالی در دوره‌های تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۹) و آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بر اساس مشاهدات و شبیه‌سازی‌های مدل‌های پروژه ارزیابی متقابل مدل‌های جفت شده جو-اقیانوس (CMIP6) استفاده و تغییرات و تحلیل ریسک ویژگی‌های خشکسالی بر اساس SPEI6 با روش‌های مبتنی بر مفصل ارزیابی شد. بدین منظور، ابتدا داده‌های دما و بارش روزانه ایستگاه مشهد به عنوان نماینده حوضه کشف رود از IRIMO اخذ و آزمون کنترل کیفی و همگنی این داده‌ها انجام شد. مدل MRI-ESM2-0 انتخاب و تصحیح اریبی برنونداد آن با استفاده از دو روش ریزمقیاس‌گردانی آماری نسبت‌گیری خطی (LS) و نگاهشت توزیع (DM) انجام شد. بر اساس معیارهای آماری استفاده شده، روش LS برای داده‌های بارش و روش DM برای دما از توانمندی بهتری برخوردار بود. پیش‌نگری متغیرهای دما و بارش برای این حوضه برای دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) نشان داد که کمینه و بیشینه دما نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. میزان تغییرات میانگین سالانه این دو متغیر تحت سناریوی SSP126 به روش DM و LS به ترتیب  $+1/4^{\circ}\text{C}$  و  $+1/8^{\circ}\text{C}$  و تحت سناریوی SSP585 به میزان  $+1/7^{\circ}\text{C}$  و  $+2^{\circ}\text{C}$  خواهد بود. افزایش بارش تحت سناریوهای SSP126 و SSP585 بدست آمد. بررسی تغییرات ویژگی‌های خشکسالی با نمایه SPEI6 نشان داد از نظر فراوانی، این مخاطره تحت دو سناریو و با دو روش ریزمقیاس‌گردانی برای آینده نزدیک افزایش نشان می‌دهد. تحلیل فراوانی تک متغیره و دو متغیره با استفاده از توزیع‌ها و مفصل‌های منتخب نشان داد در دوره آبی، این حوضه با خشکسالی‌های خفیف‌تر از نظر شدت و مدت نسبت به دوره پایه روبرو خواهد بود. دوره بازگشت توام شدت-مدت این مخاطره برای هر سناریو نیز با استفاده از توابع مفصل ارزیابی شد. بر اساس تجزیه و تحلیل توام مدت و شدت SPEI6، هر دو دوره بازگشت فصلی "یا" و عطفی "و" در آینده نشان دهنده کاهش ریسک این مخاطره هستند بطوریکه خشکسالی متوسط تا شدید با مدت کوتاهتر و شدت کم‌تر اما با فراوانی بیشتری رخ می‌دهد (به‌ویژه تحت سناریوی SSP585). با توجه به شرایط بحرانی کنونی حوضه کشف رود، بکارگیری نتایج چنین تحقیقاتی منجر به بهبود مدیریت ریسک و خطر خشکسالی در بخش‌های آب و کشاورزی، افزایش تاب‌آوری حوضه کشف رود و بهبود برنامه‌ریزی‌های آبی بخش‌های مذکور خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** CMIP6، مفصل، تصحیح اریبی، کشف رود، خشکسالی

**استناد:** رشیدی قانع، محبوبه؛ متولی، صدرالدین؛ جانباغز قبادی، غلامرضا و کوهی، منصوره. (۱۴۰۳). ویژگی‌های آبی خشکسالی در حوضه کشف رود تحت سناریوهای SSPs.

مجله نیوار، ۴۸ (۱۲۶ - ۱۲۷)، ۱۶۹-۱۹۱. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.471479.1302>

رایانامه: (۱) [m.rashedy210@gmail.com](mailto:m.rashedy210@gmail.com) (۲) [sadr\\_m1970@yahoo.com](mailto:sadr_m1970@yahoo.com) | [gghoadi@yahoo.com](mailto:gghoadi@yahoo.com)

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.



DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.471479.1302>

## ۱. مقدمه

می‌تواند در سال‌های آبی تحت شرایط تغییر اقلیم، به بحران‌های دیگری در ابعاد اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، منطقه‌ای و زیست محیطی (از بین رفتن تالاب‌ها، توفان‌های گرد و غبار و ...) دامن زند.

حوضه کشف رود نیز از این شرایط مستثنی نبوده و در این سال‌ها شاهد رخداد خشکسالی‌های متوسط تا شدید بوده است. به عنوان مثال، در نتیجه بروز خشکسالی طی سال‌های ۱۳۷۵-۸۵، بیش از ۵۰٪ چشمه‌های دشت مشهد خشک شد و با کاهش یافتن سطح منابع آب سطحی و زیرزمینی، خسارات زیادی به بخش زراعت، باغداری و دامداری وارد آمد. از جمله خالی شدن سه روستای شهرستان شاندیز به طور کامل و کاهش سطح زیر باغات تا ۶۴/۹ درصد (قنبرزاده و بهنیاfer، ۱۳۸۸). در سال ۱۴۰۲ نیز شرق کشور با کاهش جدی بارش روبرو شد و ورودی برخی سدها از جمله سد دوستی به صفر رسید. سد کارده نیز با ۳۶ سال قدمت به دلیل خشکسالی و کاهش بارش با کاهش شدید آب رو به رو و موجودی مخزن ۲۶ میلیون متر مکعبی آن به ۵/۸ میلیون متر مکعب آب رسید (وزارت نیرو، آذر ۱۴۰۲). گسترش شهرنشینی، رشد جمعیت ساکن و زائران (سالانه بیش از ۲۰ میلیون)، وجود چاه‌های غیرمجاز و برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی و توسعه سریع اقتصادی در مشهد نشان می‌دهد که این دشت و حوضه کشف‌رود با چالش‌های گسترده‌ای در منابع آب قابل دسترس در حال حاضر و به ویژه در آینده مواجه خواهد شد. لزوم بررسی و پیش‌نگری<sup>۲</sup> تغییرات اقلیمی در این حوضه، جهت کاهش خطرات و زیان‌هایی در بخش‌های مذکور از اهمیت خاصی برخوردار است.

برای مقابله با اثرات ناشی از تغییر اقلیم دو راهکار کلی وجود دارد: سازگاری با تغییر اقلیم و تخفیف (تعدیل) اثرات ناشی از آن. طبق تعریف IPCC، سازگاری با تغییر اقلیم به معنای اقداماتی است که در جهت کنترل، مقابله و یا بهره‌گیری از اثرات قابل مشاهده و یا مورد انتظار ناشی از تغییر اقلیم انجام می‌شود. انجام اقدامات در زمینه سازگاری با تغییر اقلیم

تغییر اقلیم یکی از مهمترین چالش‌های قرن ۲۱م محسوب می‌شود. گرم شدن کره زمین، بالا آمدن سطح آب دریاها و ذوب برف و یخ‌های قطب شمال و جنوب از تبعات قابل مشاهده و غیر قابل انکار تغییر اقلیم است. هر کدام از این رخدادها بسته به محل وقوع و شدت آن می‌تواند منشا آثار مخربی در هر منطقه باشد. بررسی‌ها نشان داده است که تغییر اقلیم چه ناشی از واداشت‌های طبیعی و چه ناشی از فعالیت‌های انسانی، در هر دو حال، منجر به تغییراتی در احتمال وقوع و یا شدت رویدادهای حدی اقلیمی شده است (IPCC, 2013, 2021<sup>۱</sup>). افزایش دما در مقیاس جهانی منجر به تشدید چرخه‌ی جهانی هیدرولوژیکی شده، الگوهای بارش در مقیاس منطقه‌ای یا محلی تغییر یافته و در نتیجه رویدادهای حدی سیل و خشکسالی با فراوانی بیشتری رخ خواهند داد (IPCC, 2001). بنابراین، از اثرات قابل توجه تغییر اقلیم می‌توان به وقوع خشکسالی و کاهش سطح آبهای زیرزمینی و قابل دسترس و به تبع آن کاهش تولید محصولات کشاورزی و کمبود مواد غذایی و مشکلات اقتصادی و کاهش امنیت غذایی ناشی از آن، وقوع سیل و شیوع بیماری‌های واگیردار و تأثیر بر منابع انرژی اشاره کرد. دوره خشک یا خشکسالی در تقابل با خشکی که مشخصه دائمی اقلیم است و به نواحی با بارش کم محدود می‌شود، یک پدیده موقتی است که دارای خصوصیات کاملاً متفاوتی از خشکی است. خشکسالی، یک نابهنجاری موقت در بارش است که تقریباً در تمامی نواحی اقلیمی جهان از مناطق پربارش گرفته تا مناطق بسیار کم بارش رخ می‌دهد و در چهار دسته هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم بندی می‌شود (یوویجویچ ۱۹۶۷).

در ایران، کاهش بارش، افزایش بارش‌های غیر موثر و تداوم خشکسالی در سال‌های اخیر و از طرفی بهره برداری بی‌رویه از آب‌های تجدیدپذیر و آب‌های زیرزمینی، سدسازی‌های همسایگان ایران و کاهش حقایقه‌ها، اکنون آب را به بزرگترین چالش زیست محیطی کشور تبدیل کرده است. چالشی که

<sup>۲</sup> Projection<sup>۱</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

۲۰۲۰). برای ایران نیز زمانی و همکاران (۲۰۲۰) اقدام به ارزیابی عملکرد دو پروژه CMIP5 و CMIP6 در پیش‌نگری میانگین بارش در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی در شمال و شمال غرب کشور طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۷ نمودند. نتایج نشان داد در کل مدل‌های CMIP6 دارای عملکرد بهتری نسبت به CMIP5 بودند. بررسی این مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش نشان از توانمندی بالای آن در برآورد این متغیرها برای دوره پایه دارد (کریم و همکاران، ۲۰۲۰، ها و همکاران، ۲۰۲۰).

تا کنون مطالعاتی در رابطه با بررسی تغییرات شدت خشکسالی با استفاده از نمایه‌های مختلف این مخاطره تحت سناریوهای SSPs انجام شده است. به عنوان نمونه زرین و صالح‌نیا (۱۳۹۸) با استفاده از داده‌های CMIP6 اقدام به بررسی شدت و مدت خشکسالی برای دوره‌های آتی برای ایستگاه تهران نمودند. پیش‌آگاهی مخاطره خشکسالی با استفاده از چهار نمایه SPI<sup>۶</sup>، MCZI<sup>۷</sup>، ZSI<sup>۸</sup> و RAI<sup>۹</sup> نشان داد که خشکسالی تحت سناریوی بدبینانه نسبت به سناریوی خوش‌بینانه در سال‌های آینده شدت بیشتری خواهد یافت. همچنین فراوانی فرین‌های خشکسالی تحت سناریوی خوش‌بینانه در سال‌های آینده افزایش خواهد یافت. درحالی‌که طبق سناریوی بدبینانه، فراوانی رخدادها دارای نوسان خواهد بود. العرجانی و همکاران (۲۰۱۸) نیز به بررسی وضعیت خشکسالی عراق با استفاده از SPI تحت سناریوهای SSPs پرداختند. براساس سناریوی خوش‌بینانه در طی سال‌های آینده هیچ منطقه‌ای از کشور عراق با ناهنجاری منفی بارش و به دنبال آن با خشکسالی همراه نخواهد بود. در حالیکه براساس سناریو بدبینانه از دوره دوم (۲۰۴۰ - ۲۰۵۹) وقوع خشکسالی در نواری از غرب و شمال تا شرق عراق، شدت خواهد گرفت. بر اساس پیش‌نگری‌ها، نیمه جنوبی این کشور در تمام دوره‌ها با ترسالی روبه‌رو خواهد بود.

باعث کاهش حساسیت به تغییر اقلیم و تبعات آن می‌شود در حالیکه تخفیف اثرات ناشی از تغییر اقلیم، شدت و نرخ اثرات را کاهش می‌دهد (IPCC, 2007). یکی از این حوزه‌های مهم در بحث اتخاذ تصمیمات مناسب در سازگاری با اثرات تغییر اقلیم و تغییرات رویدادهای فرین اقلیمی مانند خشکسالی، دسترسی به سناریوهای آتی دما و بارش و بررسی رفتار این مخاطره است.

مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس 3(AOGCM)، معتبرترین ابزار به منظور ارزیابی پیش‌نگری‌هایی از متغیرهای اقلیمی در راستای اتخاذ تصمیمات لازم به منظور سازگاری با تغییر اقلیم و اثرات آن محسوب می‌شوند. این مدل‌ها برای دوره‌های آتی تا ۲۱۰۰ (برخی تا ۲۳۰۰) از سال ۱۹۹۵ در قالب پروژه ارزیابی متقابل مدل‌های جفت شده 4(CMIP) در دسترس جامعه علمی قرار گرفته‌اند. تابع اصلی این مدل‌ها، شناخت مولفه‌های فیزیکی و دینامیکی سامانه اقلیم (جو، اقیانوس، سطح زمین و یخ دریا) است و پیش‌نگری‌های این مدل‌ها بر اساس واداشت گازهای گلخانه‌ای و آتروسول‌ها می‌باشد (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶). گزارش ششم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم که در سال ۲۰۲۱ منتشر شد از فاز ششم برون‌داد مدل‌های CMIP که تحت سناریوهای جدید انتشار با نام "خط سیر مشترک اجتماعی-اقتصادی" یا 5SSPs اجرا شده‌اند، استفاده کرد (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). در این سناریوها، تلفیقی از سناریوهای اجتماعی-اقتصادی و سناریوهای واداشت تابشی نماینده غلظت گازهای گلخانه‌ای برای تحلیل بازخوردهای بین عوامل اجتماعی-اقتصادی مانند رشد جمعیت، توسعه و پیشرفت‌های فناورانه، اقتصادی و تغییر اقلیم استفاده شده است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۱).

در بررسی‌های انجام شده با استفاده از مدل‌های CMIP6، مطالعاتی متعددی بر توانمندی بیشتر مدل‌های CMIP6 بر نسل قبلی یعنی CMIP5 تاکید دارند مانند نیا و همکاران، (۲۰۲۰)، سو و همکاران (۲۰۲۱)، گروس و همکاران )

<sup>7</sup> Modified China Z Index

<sup>8</sup> Z-Score Index

<sup>9</sup> Rainfall Anomaly Index

<sup>3</sup> Atmosphere-Ocean General Circulation Model

<sup>4</sup> Coupled Model Intercomparison Project

<sup>5</sup> The Shared Socioeconomic Pathways scenarios (SSPs)

<sup>6</sup> Standardized Precipitation Index

برای دوره آینده نزدیک، ۲۰۴۰-۲۰۲۱، رویدادهای خشکسالی فراوان‌تر، شدیدتر و طولانی‌تر پیش‌نگری شد. اوکولا و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود با استفاده از ۳ مدل آرشیو در CMIP6 تحت دو سناریوی SSP4.5 و SSP8.5 نشان دادند فراوانی و مدت این مخاطره تا بیش از ۴۵٪ در سطح جهان افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، شریستا و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از برون‌داد ۷ مدل CMIP6 برای سه ناحیه هند، با استفاده از نمایه پالم، وضعیت آبی این مخاطره را بررسی کردند. نتایج نشان داد در آینده نزدیک (۲۰۴۴-۲۰۱۵)، چندین خشکسالی شدید تا حد بعد از دهه ۲۰۳۰ رخ خواهد داد. این خشکسالی‌ها حداقل ۲۰ تا ۳۰ ماه به طول خواهد انجامید. مسعود و همکاران (۲۰۱۵) نیز با استفاده از دو نمایه SPI و SPEI توزیع توام شدت-مدت این مخاطره را با استفاده از مفصل فرانک در حوضه رودخانه ساسکتچوان بدست آوردند و با انجام تحلیل‌های تک متغیره و دو متغیره، نقشه‌های ریسک این مخاطره را برای منطقه، ارایه دادند.

با توجه اثرات مخرب و گسترده در زمان خشکسالی در مناطق مختلف ایران و از جمله شرق ایران و از طرفی بحث تغییر اقلیم، مسئله پیش‌نگری این پدیده طی دوره‌های آبی تحت سناریوهای تغییر اقلیم، به عنوان ضرورتی برای بخش‌های مدیریتی و کاربردی و تعهدی ضروری برای سازمان‌های دست‌اندرکار، به منظور کاهش و تعدیل صدمات بالقوه ناشی از این پدیده، مطرح می‌باشد. لذا این پژوهش بر آنست که به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های مخاطره خشکسالی در حوضه کشف رود و رفتار احتمالاتی و تحلیل فراوانی ویژگی‌های این مخاطره به صورت تک متغیره و توام با استفاده از توابع مفصل پردازد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. موقعیت جغرافیایی و اقلیم منطقه

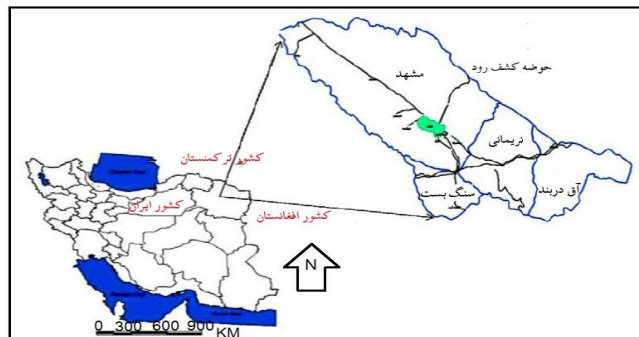
حوضه آبریز کشف رود بخشی از حوضه آبریز قره قوم است که شامل محدوده‌های مطالعاتی مشهد-چناران، سنگ بست،

اما از آنجایی که خشکسالی پدیده پیچیده‌ایست، به منظور ارزیابی جامعی از این پدیده، علاوه بر تحلیل جداگانه از توزیع مدت و شدت خشکسالی (و یا سایر ویژگی‌ها همانند توزیع مکانی)، با توجه به وابستگی موجود بین این ویژگی‌ها، نیاز به استخراج توزیع توام متغیرهای این مخاطره آن است. با توجه به مشکلات توزیع‌های دو متغیره، مانند استنتاجات پیچیده ریاضی برای برازش پارامترهای بدست آمده از داده‌ها و عدم لحاظ وابستگی موجود بین متغیرها (شی یا، ۲۰۰۶) می‌توان از توابع مفصل ۱۰ (اسکلار، ۱۹۵۹) استفاده کرد. چراکه این توابع، علاوه بر آنکه امکان تحلیل توام دو متغیره (یا بالاتر) را فراهم می‌آورند، ساختار و میزان وابستگی بین متغیرها را نیز در محاسبات دخالت می‌دهند.

در این ارتباط، بهزادی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود اقدام به بررسی وضعیت خشکسالی در ایران با استفاده از ۳ مدل آرشیو در CMIP6 شامل: CanESM5 GFDL-ESM4, and IPSL-CM6A-LR تحت دو سناریوی SSP126 و SSP585 با کاربرد دو نمایه SPI و SPEI نمودند. در این پژوهش، برای تحلیل فراوانی توام این مخاطره از توابع مفصل استفاده شد. بر اساس نتایج، خشکسالی‌های شدید برای کشور بویژه برای شرق و مرکز ایران پیش‌نگری شد. سافارتد و همکاران (۲۰۲۱) وضعیت خشکسالی را با استفاده از ۱۸ مدل آرشیو در CMIP6 تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585 در جنوب شرق آسیا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد شرایط خشک متوسط تا شدید طی دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۵) رخ خواهد داد و خشکسالی‌ها با مدت بیشتر، سختی بالاتر و شدیدتر تحت سناریوی SSP585 و فراوانی بیشتر تحت سناریوی SSP126 رخ خواهند داد. سو و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از ۴ مدل اقلیمی CMIP6 و هفت سناریوی SSP-RCP، تغییرات احتمالی خشکسالی‌ها را در کشور چین با نمایه SPEI مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد عملکرد مدل های CMIP6 از مدل های CMIP5 بالاتر بوده که این امر به دلیل ارایه بهتر فرآیندهای فیزیکی در این مدل‌ها می‌باشد.

نریمانی و آق دربند می‌باشد (شکل ۱). این حوضه یکی از مهمترین حوضه‌های آبریز در استان خراسان رضوی است که بین طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه واقع شده است. وسعت کل این حوضه در حدود  $1650 \text{ km}^2$  و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا در حدود  $1335 \text{ m}$  می‌باشد. میانگین بارش سالانه  $220 \text{ mm}$ ، میانگین دمای سالانه  $13/6^\circ \text{C}$  میانگین تبخیر-تعرق سالانه برابر با  $735 \text{ mm}$  و اقلیم منطقه خشک و سرد است (سیاری و همکاران، ۱۳۹۰).

شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه حوضه کشف رود (نگارنده، ۱۴۰۳)



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه حوضه کشف رود (نگارنده، ۱۴۰۳)

پژوهش‌های هواشناسی کشور ژاپن توسعه یافته و دارای قدرت تفکیک مکانی  $1/125^\circ \times 1/125^\circ$  می‌باشد (یوکیمتو و همکاران، ۲۰۱۹). برون داد دما و بارش مدل منتخب از پایگاه داده کوپرنیک<sup>۱۱</sup> که زیر نظر مرکز پیش بینی میان مدت وضع هوا یا ECMWF12 در زمینه‌ی تهیه و تجمیع داده‌های اقلیمی، مشاهداتی، ماهواره‌ای و ... فعالیت می‌کند جمع آوری شد. داده‌ها با فرمت netCDF13 هستند. در این مقاله، برون داد مدل منتخب در دو گروه داده تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۹) و آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تحت دو سناریوی خوشبینانه SSP126 و سناریوی بدبینانه SSP585 استخراج شد.

### ریز مقیاس گردانی

در این مطالعه، فرایند ریز مقیاس گردانی و تصحیح اریبی با استفاده از نرم افزار CMhyd14 و با دو روش نسبت گیری خطی 15 (LS) و نگاهت توزیع ۱۶ (DM) انجام شد. این نرم افزار برای تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی در ایستگاه‌های مستقر در یک حوضه آبریز استفاده می‌شود (هنریک و

### ۲-۲. داده‌های مشاهداتی و مدل

پس از تهیه سری زمانی متغیرهای دمای کمینه ( $^{\circ}\text{C}$ )، دمای بیشینه ( $^{\circ}\text{C}$ ) و بارش (mm) طی دوره مشاهداتی برای ایستگاه مشهد (واقع در  $36/29^\circ$  عرض جغرافیایی و  $59/36^\circ$  طول جغرافیایی) به عنوان نماینده حوضه کشف رود، آزمون‌های اولیه مربوط به کفایت اندازه داده‌ها، همگنی و تصادفی بودن داده‌ها انجام شد. بررسی همگنی و نیز همگن سازی سری‌های زمانی ماهانه ناهمگن دما، توسط بسته‌ی آماری RHtests- RHtestsV4 (ونگ، ۲۰۱۴) در محیط نرم افزار آماری R صورت گرفت.

داده‌های پیش‌نگری اقلیمی با اجرای مدل‌های AOGCMs تحت سناریوهای مسیر مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs) بدست می‌آیند. دوره تحت پوشش آن معمولاً ۲۰۱۵-۲۱۰۰ است. اما برخی از داده‌ها برای بازه ۲۱۰۰-۲۳۰۰ نیز در دسترس هستند. در این مطالعه از برون داد مدل MRI- ESM2-0 به منظور ارایه سناریوهای آتی خشکسالی در حوضه کشف رود استفاده شد. این مدل در موسسه

<sup>14</sup> Climate Model data for hydrologic modeling

<sup>15</sup> linear scaling

<sup>16</sup> cumulative distribution function

<sup>11</sup> Copernicus

<sup>12</sup> The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>13</sup> network Common Data Form

### نمایه خشکسالی SPEI<sup>۱۸</sup>

امروزه در تحقیقات مختلف نقش دما در خشکسالی تحت تاثیر روند گرمایش جهانی مورد تاکید قرار گرفته است (زرخ و همکاران، ۲۰۱۴). لذا در این پژوهش، از نمایه SPEI توسط وینست سرانو و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده استفاده شد. در این نمایه، با در نظر گرفتن تبخیر - تعرق پتانسیل (PET) (هارگریوز، ۱۹۸۵)، تفاوت بین بارش (P) و تبخیر - تعرق پتانسیل برای ماه  $i$ ، بیان بصورت رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (3)$$

در ادامه فرایند محاسبه این نمایه، مقادیر  $D$  در مقیاس‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه) از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad (4)$$

که  $k$  (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و  $n$  ماه مورد نظر در محاسبه می‌باشد. در ادامه با برآزش توزیع لجستیک لگاریتمی بر مقادیر  $D$  و تبدیل آن به مقادیر نرمال، مقدار شاخص SPEI استخراج می‌گردد. طبقه بندی این نمایه نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

همکاران، ۲۰۱۶). روش نسبت گیری خطی یک ضریب اصلاح شده ثابت بدست آمده از اختلاف بین شبیه‌سازی مدل و مقادیر مشاهداتی برای هر ماه را بکار می‌برد. بارش با ضرب یک عبارت و دما با اضافه شدن یک عبارت (به ترتیب رابطه ۱ و ۲) اصلاح می‌شود (با فرض ثابت ماندن ضرایب و فاکتورهای اصلاحی اعمال شده در شرایط فعلی داده‌ها و شرایط آینده).

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

$$T_{hst,m,d}^{cor} = T_{hst,m,d} + [\mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{hst,m})] \quad (2)$$

روش "نگاشت توزیع" (DM)، بر مبنای این فرض است که هر دو متغیر اقلیمی مدل و مشاهداتی از یک توزیع فراوانی خاص پیروی می‌کنند (پیانو و همکاران، ۲۰۱۰). در این روش، تصحیح اریبی به کمک تابع توزیع تجمعی ۱۷ مقادیر شبیه‌سازی شده، مطابق با تابع توزیع مشاهداتی صورت می‌گیرد. بنابراین یک تابع توزیع انتقال ایجاد شده که تغییر در توزیع وقوع بارش و دما را نشان می‌دهد مانند تابع توزیع گامای نمایی برای اصلاح اریبی‌های داده‌های بارش. از این دو روش در پژوهش‌های مرتبط استفاده شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴، ژو و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول ۱. طبقات مختلف نمایه خشکسالی SPEI (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳)

توصیف وضعیت	طبقات شاخص
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
وضعیت نرمال	-۰/۹۹ تا +۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از -۲

مفصل‌ها، تابع‌هایی هستند که تابع‌های توزیع یک متغیره را به فرم تابع‌های توزیع چند متغیره پیوند می‌دهند. اولین مقاله در مورد مفصل توسط شوایزر و ولف (۱۹۸۱) با عنوان

### تحلیل فراوانی دو متغیره

کلمه مفصل برای اولین بار توسط اسکالار (۱۹۵۹) به کار رفت که از کلمه لاتین «به هم پیوستن» گرفته شده است.

<sup>18</sup> The Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index

<sup>17</sup> cumulative distribution function: CDF

### انتخاب مفصل

با توجه به وجود خانواده‌های مختلف مفصل (ارشمیدسی، بیضوی و ...)، لازم است بهترین مفصل انتخاب شود. بدین منظور مراحل زیر طی می‌شود:

- ۱- ارزیابی ساختار وابستگی و شدت وابستگی،
- ۲- ارزیابی وابستگی های دمی،
- ۳- برازش توزیع های حاشیه ای و پارامتر وابستگی،
- ۴- آزمون های نیکویی برازش

### ضرایب وابستگی

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. در این صورت ضریب اسپیرمن از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\rho = 12 \int_0^1 \int_0^1 uv dC(u, v) - 3 \quad (9)$$

که متوسط تفاوت بین مفصل  $C$  و مفصل استقلال را اندازه گیری می‌کند.

### ضریب وابستگی کندال

ضریب وابستگی کندال نیز وابستگی بین دو متغیر تصادفی را اندازه می‌گیرد از رابطه ۱۰ بدست می‌آید:

$$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u, v) dC(u, v) - 1 \quad (10)$$

### ضرایب وابستگی دمی

اندازه های وابستگی دمی بالا و پایین  $(\lambda_U$  و  $\lambda_L)$ ، وابستگی بین متغیرهای تصادفی را در گوشه ی یک چهارم بالایی سمت راست مربع  $I^2$  و در گوشه یک چهارم پایینی سمت چپ آن بررسی می‌کنند این اندازه ها توسط سی بویا (۱۹۶۰) معرفی شده و شکل متداول و امروزی‌شان را می‌توان در کتاب نلسن (۲۰۰۷) یافت.

اگر  $(X, Y)$  یک بردار تصادفی با توزیع توام  $H(x, y)$  و توابع توزیع کناری  $F_1$  و  $F_2$  با مفصل متناظر  $C$  باشند در این صورت طبق رابطه ۱۱ و ۱۲:

«وابستگی بین متغیرهای تصادفی» منتشر شد. در سال ۱۹۹۷، جو و در سال ۱۹۹۹ نلسون، مفصل را گسترش بیشتری دادند. شی یا (۲۰۰۶) برای اولین بار از این ابزار برای بررسی توام متغیرهای مدت و سختی خشکسالی استفاده کرد. ایشان در قالب تحلیل دو متغیره، پنج نوع تابع مفصل دوبعدی را برای ساخت توزیع توام بین شدت و مدت خشکسالی بکار برد.

### قضیه اسکالر

اسکالر نشان داد که برای هر تابع توزیع  $n$  بعدی،  $F$  می‌تواند به صورت رابطه (۵) باشد:

$$F(x_1, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)) \quad (5)$$

$F_1$  تا  $F_n$  توابع توزیع کناری هستند. اگر توابع پیوسته باشند یک تابع مفصل به نام  $C$  وجود دارد بطوریکه طبق رابطه ۶:

$$C(u_1, \dots, u_n) = F(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_n^{-1}(u_n)), \quad 0 \leq u_1, \dots, u_n \leq 1 \quad (6)$$

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

به عبارتی دیگر، فرض کنید  $H$  یک تابع توزیع توام با توزیع های 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 توام و کناری با رابطه (۷) به هم مرتبط می‌شوند:

$$F(x) = u, F(y) = v \rightarrow H(x, y) = C(F(x), F(y)) \quad (7)$$

$F(x)$  و  $F(y)$  توابع توزیع کناری هستند که اگر پیوسته باشند، آنگاه تابع مفصل  $C$  یکتاست و به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود:

$$C(u, v) = H(F^{-1}(u), F^{-1}(v)), \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (8)$$

در این رابطه،  $u$  و  $v$  توابع کناری  $F(x)$  و  $F(y)$  می‌باشند (جو، ۱۹۹۷).

AIC مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این آزمون، تابعی با کوچکترین مقدار AIC به عنوان مناسب‌ترین تابع شناخته می‌شود.

به منظور انتخاب مفصل برتر و برای انجام نیکویی برآزش در این پژوهش، از آماره کرامر-ون میسر استفاده شده است. این آزمون، شامل مقایسه فاصله بر مبنای رتبه بین مفصل تجربی  $C_n(\cdot)$  و مفصل‌های خانواده‌ی پارامتری برآورد شده  $C\theta(\cdot)$  می‌باشد. آماره آزمون فاصله کرامر-ون میسر از رابطه‌ی (۱۳) بدست می‌آید.

(۱۳)

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

در این رابطه،  $S_n$  آماره کرامر-ون میسر،

$C_n$ : مفصل تجربی (یک برآورد کننده‌ی ناپارامتری از یک مفصل نامعلوم از نمونه به حجم  $n$ ) که به صورت رابطه ۱۴ محاسبه می‌گردد:

(۱۴)

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

$C_{\theta_n}$ : مفصل پارامتری تخمین زده شده برای اندازه نمونه  $n$  و پارامتری که قبلاً از داده‌های مشاهداتی برآورد شده است.

از آنجایی که فرض صفر بر این است که مفصل پارامتری بر داده‌ها برآزش دارد ( $H_0: C_n \in C_{\theta_n}$ ) مقدار احتمال بزرگتر از سطح معنی داری ( $\alpha$ ) به این معنی است که فرض صفر پذیرفته شده است. بنابراین در بین گروهی از مفصل‌ها، مفصل با بزرگترین مقدار احتمال (و کوچکترین  $S_n$ ) انتخاب می‌شود.

### معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی توانمندی روش‌های ریزمقیاس گردانی در برآورد مقادیر سه متغیر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش، از شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱۹</sup> ( $r$ )، مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۲۰</sup> (RMSE)، ضریب کارآیی نش-ساتکلیف<sup>۲۱</sup> (NSC)، میانگین مطلق خطا<sup>۲۲</sup> (MAE)

<sup>19</sup> Nash-Sutcliffe Coefficient

<sup>22</sup> Mean Absolute Error

(۱۱)

$$\lambda_L = \lim_{t \rightarrow 0^+} P(Y \leq F_2^{-1}(t) | X \leq F_1^{-1}(t)) \\ = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{C(t,t)}{t}$$

(۱۲)

$$\lambda_U = \lim_{t \rightarrow 1^-} P(Y > F_2^{-1}(t) | X > F_1^{-1}(t)) \\ = 2 - \lim_{t \rightarrow 1^-} \frac{1-C(t,t)}{1-t}$$

این اندازه‌ها در فاصله‌ی [۰، ۱] قرار دارند (مقدار صفر، عدم وجود وابستگی دمی و مقدار یک وابستگی دمی کامل).

### روش برآورد پارامتر مفصل

به طور کلی برآورد پارامترهای مفصل به دو روش پارامتری و نیمه پارامتری انجام می‌شود. روش‌های پارامتری شامل روش برآوردگر بیشینه درستمایی (MLE) و توابع استنباط کناری (IFM) می‌باشند. روش‌های نیمه پارامتری عبارتند از دو روش برآوردگر کمینه فاصله (MD) و برآوردگر بیشینه درست نمایی تاوانیده (PML). این روش، تعدیل یافته روش رایج بیشینه درست نمایی (MLE) می‌باشد که در آن، توزیع‌های کناری تجربی به جای توزیع‌های حاشیه‌ای پارامتری بکار می‌روند. در این پژوهش، از روش PML استفاده شده است (گنست و همکاران، ۲۰۰۹، جو، ۱۹۹۷).

### آزمون نیکویی برآزش

توزیع‌های کناری

بهترین توزیع کناری بر مبنای آزمون کلموگوروف-اسمیرنوف (K-S) (۱۹۹۳)، آزمون آندرسون-دارلینگ (شولز و استفان، ۱۹۸۷) و معیار اطلاعاتی آکائیک (AIC) (آکائیکه، ۱۹۷۴) انتخاب شد. آماره آزمون K-S یعنی  $D$ ، بیشترین فاصله بین توزیع تجربی و CDF توزیع پارامتری را اندازه می‌گیرد. آزمون K-S مناسب بودن برآزش یک توزیع خاص را بر مجموعه داده‌ها ارزیابی می‌کند و AIC قادر است بهترین جایگزین را از بین گروهی از توزیع‌ها پیدا کند. بنابراین، در گام اول، مناسب بودن یک توزیع باید توسط آزمون K-S مورد تایید قرار گیرد. اگر نیکویی توزیع خاصی توسط آزمون K-S مورد قبول واقع شود، در ادامه برتری این توزیع نسبت به سایر توزیع‌های جایگزین، توسط آزمون

<sup>19</sup> Pearson Correlation Coefficient

<sup>20</sup> Root Mean Square Error

KGE برای اولین بار توسط گوپتا و همکاران (۲۰۰۹) به کار رفت (معادله ۲۷). KGE به عنوان ترکیبی از ضریب همبستگی پیرسون، اریبی و تغییرپذیری تعریف می شود. محدوده KGE از  $-\infty$  تا یک است که در آن ۱ نشان دهنده بهترین برازش داده ها و ۰ نشان دهنده بدترین تناسب است، مقادیر بیشتر از ۰/۶ قابل قبول می باشد (تارک و همکاران، ۲۰۲۰).

(۱۹)

$$KGE = 1 - \sqrt{((r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2)}$$

در جایی که  $r$  مولفه همبستگی می باشد،  $\beta = \frac{\mu_r}{\mu_0}$  مولفه اریبی و  $\gamma = \frac{(\partial r \mu_r)}{(\partial \sigma \mu_r)}$  مولفه تغییرپذیری می باشد.  $\mu_0$  و  $\mu_r$  به ترتیب میانگین داده های ریزمقیاس ده و مشاهداتی و  $\partial r$  و  $\partial \sigma$  انحراف معیار داده های ریزمقیاس شده و دیدبانی می باشند.

### دوره های بازگشت تک متغیره

در تحلیل تک متغیره، دوره بازگشت عموماً با رابطه ی ۲۰ تعریف می شود (بانا کورسو و همکاران، ۲۰۰۳).

$$T_x = \frac{E(L)}{1-p} = \frac{E(L)}{1-F_x(x_p)} \quad (20)$$

که در این رابطه  $P$  مقدار تابع توزیع هر آستانه مد نظر ( $x_p$ ) می باشد.  $T_x$  برای وقایع  $X \geq x$  متوسط فاصله زمانی بین رخداد  $X \geq x$  می باشد. شن و شی یا (۲۰۰۱) و شی یا (۲۰۰۶)،  $E(L)$  را فاصله ی مورد انتظار بین دو شروع خشکسالی تعریف کردند که در پژوهش های زیادی از جمله در این مقاله نیز از این تعریف استفاده می شود مانند پژوهش گی و همکاران (۲۰۱۶) و چن و همکاران (۲۰۱۳).

### دوره بازگشت توام

برای بررسی دوره بازگشت وقایع در حالت توام، بنا بر نیاز طراحی، می توان از دوره بازگشت توام در دو حالت عطفی «و» و فصلی «یا» استفاده کرد (روابط ۲۱ و ۲۲).

(۲۱)

و ضریب کلینگ-گوپتا ( $KGE$ )<sup>۲۳</sup> استفاده شد. در جایی که  $n$  تعداد نمونه ها،  $O_i$  دمای مشاهداتی در ماه  $i$  ام،  $R_i$  دمای به دست آمده از داده های ریزمقیاس شده در ماه  $i$  ام و  $\bar{O}$  و  $\bar{R}$  مقادیر متوسط  $O_i$  و  $R_i$  در  $n$  سال باشند، آماره های ارزیابی به صورت زیر محاسبه می شوند.

آماره ی ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) به میزان همبستگی خطی بستگی دارد و دامنه آن بین  $-1$  تا  $1$  می باشد (رابطه ۱۵):

(۱۵)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(R_i - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}}$$

میانگین بزرگی خطا با MAE سنجیده می شود (رابطه ۱۶) و RMSE (رابطه ۱۷) نشان دهنده انحراف معیار داده های مرجع است. مقادیر بهینه این دو معیار صفر هستند که نشان دهنده ی تناسب کامل بین مجموعه داده های دیدبانی و بازتحلیل می باشد.

$$MAE = n^{(-1)} \sum_{i=1}^n |R_i - O_i| \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{(n^{(-1)} \sum_{i=1}^n (R_i - O_i)^2)} \quad (17)$$

ضریب کارایی نش-ساتکلیف برای مقایسه داده های ریزمقیاس شده با مقادیر مشاهداتی طبق رابطه (۱۸) به کار می رود.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

ضریب نش-ساتکلیف می تواند از  $-\infty$  تا  $1$  باشد. این ضریب مقادیر نسبی واریانس باقیمانده ها را نسبت به واریانس مقادیر دیدبانی دو متغیر تعیین می کند. اگر  $NS \leq 0/5$  شبیه سازی غیر قابل اعتماد است و اگر  $0/65 < NS < 0/5$  شبیه سازی قابل قبول و اگر  $0/75 < NS < 0/65$  شبیه سازی خوب و اگر  $NS < 0/75$  شبیه سازی خیلی خوب می باشد (پومن و همکاران، ۲۰۱۷).

<sup>23</sup> Kling-Gupta efficiency

سری زمانی ماهانه دمای کمینه و دمای بیشینه بر حسب درجه سلسیوس و بارش ماهانه بر حسب میلی متر از فایل‌های nc. برای دو دوره زمانی ۲۰۱۴-۱۹۸۹ و ۲۰۵۰-۲۰۲۶ از مدل MRI-ESM2-0 که در ادامه به طور خلاصه MRI ذکر می‌گردد، استخراج شد. سری‌های زمانی دوره پایه مدل با مقادیر مشاهداتی ایستگاه مورد قیاس قرار گرفت. نتایج آماره‌های اعتبارسنجی دو سری ماهانه‌ی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش برای ایستگاه مشهد برای دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ در جدول ۱ آورده شده است. اگرچه بر اساس آماره KGE، دو روش LS و DM عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی بارش ماهانه در ایستگاه مشهد نداشتند، اما بر اساس سایر آماره‌ها، روش LS نتایج بهتر و توانایی شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری را برای بارش نشان داد. اما برای داده‌های دمای بیشینه و کمینه با اختلاف کم در تمامی معیارهای ارزیابی، روش DM نتایج بهتری تولید کرد (جدول ۲).

$$T_{Dns} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{DS}(d,s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (22)$$

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

در این روابط:

S: شدت خشکسالی، D: مدت خشکسالی، E(L): فاصله‌ی مورد انتظار بین دو شروع خشکسالی،  $T_{Dns}$ : نشان دهنده‌ی دوره بازگشت توأم برای  $D \geq d$  و  $S \geq s$ ؛  $T_{DUS}$ : نشان دهنده‌ی دوره بازگشت توأم برای  $D \geq d$  یا  $S \geq s$  است.

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. ارزیابی مدل اقلیمی و ریزمقیاس گردانی

جدول ۲. نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی مدل MRI با مقادیر مشاهداتی طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ در ایستگاه مشهد

دمای کمینه (°C)		دمای بیشینه (°C)		بارش (mm)		متغیر
DM	LS	DM	LS	DM	LS	آماره ارزیابی
۱/۶	۱/۸	۲/۳	۲/۴	۱۷/۳	۱۳/۴	MAE
۲/۱	۲/۴	۳/۱	۳/۲	۲۷/۴	۲۰/۲	RMSE
۰/۱	۰/۱	۱/۴	۱/۴	۷/۶	۰/۲	PBIAS
۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۸۹	-۰/۲۸	۰/۲۹	NSE
۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۴۷	۰/۵۹	R
۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۴۴	۰/۵۵	KGE

سناریوی بدینانه SSP585 افزایش نشان می‌دهد. آزمون t نشان داد میزان افزایش بارش تحت سناریوی SSP126 در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیست ( $P\text{-value} = ۰/۰۱$ ) اما میزان افزایش بارش تحت سناریوی SSP585 نسبت به دوره پایه افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد ( $P\text{-value} = ۰/۲۷$ ). مقادیر بارش ماهانه ریزمقیاس شده با روش DM برای دوره آینده نزدیک، افزایش معنی‌داری را سطح اطمینان ۹۵ درصد تحت دو سناریو نشان می‌دهد. در شکل ۲ چگونگی تغییر طبقات بارش سالانه طی دوره ۲۰۵۱-۲۰۲۶ مدل MRI

#### ۳-۲. پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی

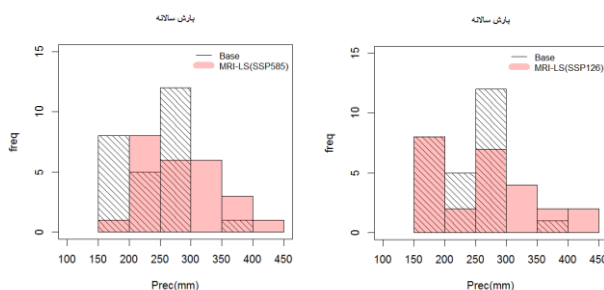
به منظور برآورد تغییرات دما و بارش طی دوره آبی (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، مقادیر ماهانه و سالانه این متغیر برای دوره پایه و تحت دو سناریوی خوشبینانه (SSP126) (توسعه پایدار) و بدبینانه (SSP585) (توسعه بر مبنای سوخت‌های فسیلی) برای مدل MRI-ESM2-0 استخراج و با استفاده از آزمون‌های آماری و نمودارهای جعبه‌ای، میزان تغییرات این سه متغیر برای دوره آینده نزدیک بدست آمد. همانطور که در جدول ۳ مشخص می‌شود طی دوره آینده نزدیک، بارش سالانه که با روش LS ریزمقیاس شده است به میزان ۸/۷٪ تحت سناریوی خوش بینانه SSP126 و ۱۶/۳٪ تحت

میانگین بارش (افزایش) است. بنابراین بر اساس هر دو سناریو با استفاده از روش LS، برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ برای مشهد می توان انتظار داشت مجموع بارش سالانه به ترتیب تحت سناریوی SSP126 و SSP585 در ۸٪ و ۱٪ از سال ها به بیش از ۴۰۰ میلی متر برسد.

(روش LS) تحت دو سناریوی SSP با استفاده از بافت نگار ۲۴ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود فراوانی بارش سالانه در طبقه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی متر کاهش یافته در عوض رخداد بارش سالانه در طبقه ۴۵۰ میلی متر برای ایستگاه مشهد پیش نگر می شده است. تحت سناریوی SSP585، در کل انتقال طبقات بارش مشاهده می شود که نشان دهنده تغییر

جدول ۳. مقدار و درصد تغییرات میانگین سالانه دما و بارش طی دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۴ (نگارنده، ۱۴۰۲)

تغییر دمای کمینه به °C	تغییر دمای بیشینه به °C	درصد تغییر میانگین بارش سالانه	بارش (mm)	دمای کمینه (°C)	دمای بیشینه (°C)	سناریوی SSP	روش ریزمقیاس	دوره آماری	
								۱۹۸۹-۲۰۱۴	۲۰۲۶-۲۰۵۰
۱/۷	۲	۸/۷	۲۴۲/۷	۸/۹	۲۲/۴	پایه	LS	۱۹۸۹-۲۰۱۴	دوره آماری
			۲۶۱/۵	۹	۲۲/۴	پایه	DM		
۱/۴	۱/۸	۲۱/۳	۲۶۳/۸	۱۰/۶	۲۴/۳	SSP126	LS	۲۰۲۶-۲۰۵۰	دوره آماری
			۳۱۷/۲	۱۰/۳	۲۴/۱	SSP126	DM		
۲	۲/۲	۱۶/۳	۲۸۲/۴	۱۰/۹	۲۴/۶	SSP858	LS		
۱/۷	۲	۲۴/۴	۳۲۵/۵	۱۰/۶	۲۴/۳	SSP858	DM		

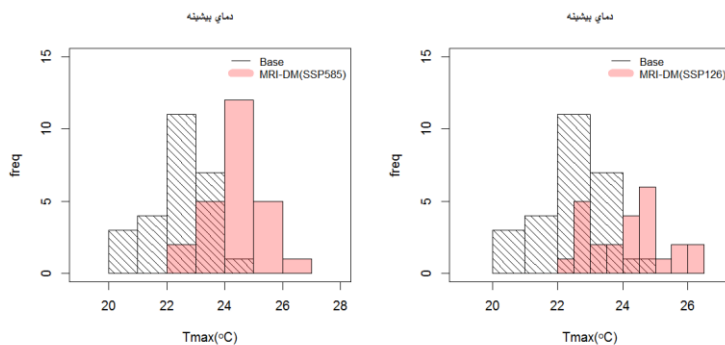


شکل ۲. بافت نگار بارش سالانه پیش نگر می شده (رنگی) تحت دو سناریوی SSP126 و SSP585 در مقایسه با مقادیر پایه برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ با روش LS (نگارنده، ۱۴۰۳)

پایه می باشد.

میزان تغییرات میانگین سالانه دمای کمینه و بیشینه تحت سناریوی SSP126 به روش DM به ترتیب ۱/۴+ و ۱/۸+ و تحت سناریوی SSP585 به میزان ۱/۷+ و ۲+ درجه سلسیوس خواهد بود. تفاوت میانگین دمای کمینه و بیشینه طی دو دوره پایه و آینده نزدیک تحت دو سناریو و با دو روش ریزمقیاس گردانی با آزمون t و در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بدست آمد (جدول ۳).

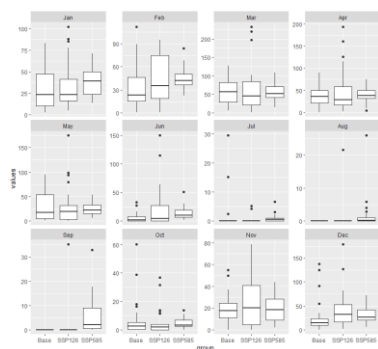
در روش DM، بازه بارش سالانه تحت سناریوی SSP126 بزرگتر بوده از ۱۱۳ تا ۷۹۸ میلی متر را شامل می شود (دوره پایه این مدل ۱۳۹ تا ۵۰۲ میلی متر). با این وجود فراوانی سال هایی با بارش کمتر از ۲۰۰ و بیش از ۵۰۰ میلی متر تحت این سناریو ۲۸ و ۱۲ درصد سال ها را به خود اختصاص داد. در صورتی که درصد فراوانی این طبقه در دوره پایه مدل ۲۴ و ۱ درصد بدست آمد. در سناریوی مقابل، افزایش میانگین بارش سالانه ناشی از افزایش فراوانی تمامی طبقات بارش بویژه طبقه ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی متر (۲۴٪ کل طبقات) در دوره



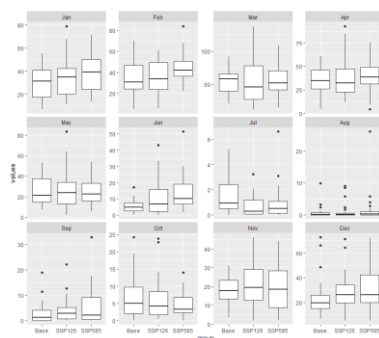
شکل ۳. بافت نگار دمای بیشینه سالانه (°C) پیش‌نگری شده (رنگی) تحت دو سناریوی SSP126 و SSP585 در مقایسه با مقادیر پایه برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ (نگارنده، ۱۴۰۳)

می‌باشند. بافت نگار دمای کمینه سالانه طی دو دوره پایه و آینده نزدیک تحت دو سناریو نیز نشان داد تحت دو سناریو، طبقات جدیدی برای دما کمینه نیز پیش‌نگری شده به طوری که برای دوره آبی، مقادیر جدید این متغیر در بازه  $10^{\circ}\text{C}$  تا  $11/5^{\circ}\text{C}$  تحت سناریوی SSP126 و بین  $10^{\circ}\text{C}$  -  $12^{\circ}\text{C}$  تحت سناریوی SSP585 قابل انتظار خواهد بود (شکل آورده نشده است).

در شکل ۳، بافت نگار دمای بیشینه سالانه طی دو دوره پایه و آینده نزدیک تحت دو سناریو نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تحت دو سناریو، طبقات جدیدی برای این متغیر پیش‌نگری شده است به طوری که برای دوره آینده نزدیک، رخداد وقوع دمای‌های بیشینه سالانه با مقدار  $25^{\circ}\text{C}$  تا  $26/5^{\circ}\text{C}$  تحت سناریوی SSP126 و بین  $25^{\circ}\text{C}$  تا  $27^{\circ}\text{C}$  تحت سناریوی SSP585 قابل انتظار است که خارج از بازه مقادیر دمای بیشینه سالانه دوره پایه



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای بارش ماهانه در دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۴) با دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ مدل MRI تحت دو سناریو (روش DM) (نگارنده، ۱۴۰۳)



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای بارش ماهانه در دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۱۴) با دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ مدل MRI تحت دو سناریو (روش LS) (نگارنده، ۱۴۰۳)

ژانویه، فوریه، سپتامبر و اکتبر تحت سناریوی SSP585 دارای تغییر معنی‌دار با دوره پایه هستند.

در شکل ۴ و ۵ مقایسه مقادیر بارش ماهانه تحت دو سناریوی منتخب با دوره پایه آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش بارش تحت سناریوی SSP585 در ماه‌های ژانویه، جون و دسامبر معنی‌دار و متفاوت از دوره پایه است. در داده‌های بارش ماهانه ریزمقیاس‌شده با روش DM ماه‌های

### ۳-۳. تحلیل خشکسالی و پیش‌نگری ویژگی‌های آن طی دوره آتی

#### ۳-۳-۱. دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴

با استفاده از داده‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه مشاهداتی ایستگاه مشهد و ریزمقیاس شده مدل MRI با دو روش LS و DM برای دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۴ (معادل دوره پایه برای مدل‌های CMIP6)، نمایه‌ی SPEI (مقیاس زمانی ۶ ماه) محاسبه شد. به منظور پایش خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک، SPI طولانی مدت (۶ و ۱۲ و ۲۴ ماهه) مناسب تر است. چانگ و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کردند شاخص SPI شش ماهه، ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی را برای مقیاس زمانی که به طور عمده بر تولیدات کشاورزی موثر است نشان می‌دهد. بر این اساس، در مطالعه حاضر، برای ارزیابی چشم انداز میان مدت تا دراز مدت از ویژگی‌های خشکسالی، مقیاس زمانی ۶ ماهه انتخاب شد. آستانه مقدار نمایه به منظور تعیین رویداد خشکسالی‌های متوسط تا شدید، ۱- در نظر گرفته شد و بر این اساس، ویژگی‌های خشکسالی از سری زمانی شش ماهه استخراج شد. بر اساس نمایه

SPEI6، تعداد ۱۳ رویداد خشکسالی با میانگین شدت ۱/۸ و میانگین مدت ۳/۸ طی این دوره بدست آمد که بالاترین شدت ۶/۸ به مدت ۱۲ ماه (اکتبر ۲۰۱۰ تا سپتامبر ۲۰۱۱) رخ داده است. میانگین فاصله بین خشکسالی‌ها (L)، ۱/۵ سال بدست آمد.

مقادیر شدت، مدت و فراوانی برآورده شده از سری‌های زمانی SPEI6 برای مدل MRI و دو روش ریزمقیاس برای دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۴ محاسبه شد. بر اساس سری زمانی شش ماهه SPEI طی دوره پایه مدل با روش DM، تعداد ۱۳ رویداد با میانگین شدت ۱/۶ و میانگین مدت ۴/۵ ماه طی این دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۴ رخ داده است. بررسی ویژگی‌های بدست آمده از چهار سری SPEI تحت دو سناریو و دو روش ریزمقیاس گردانی نشان داد فراوانی خشکسالی‌ها تحت دو سناریو و با دو روش ریزمقیاس گردانی افزایش (بیشتر تحت سناریوی SSP585) می‌یابد، اما سایر ویژگی‌ها نسبت به دوره پایه مدل کاهش می‌یابد. به دنبال افزایش تعداد رویدادها، میانگین فاصله بین دو رویداد خشکسالی کاهش یافته است (جدول ۴).

جدول ۴. ویژگی‌های SPEI-6 بر اساس پرونداد مدل MRI برای دوره پایه و دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) (نگارنده، ۱۴۰۲)

SSP585	DM		LS		دوره پایه		
	SSP126	SSP585	SSP126	SSP585	DM	LS	
۲۰	۱۵	۲۱	۱۸	۱۳	۱۱	تعداد رخداد خشکسالی	
۳/۷	۵/۴	۴/۱	۵/۱	۸/۲	۸/۶	بالاترین شدت	
۹	۹	۶	۹	۱۶	۱۶	طولانی ترین مدت	
۰/۸	۱/۱	۰/۹	۱	۱/۶	۲/۳	میانگین شدت	
۲/۳	۳/۵	۲/۱	۳/۲	۴/۵	۵/۶	میانگین مدت	
۱۱/۹	۱۶/۳	۱۲	۱۳/۳	۱۷/۷	۲۲/۲	L (ماه)	

زمانی SPEI6 دوره پایه، توزیع‌های مختلف برآزش داده شد و با استفاده از آزمون‌های نیکویی برآزش، توزیع‌های مناسب انتخاب شد. در شکل ۶، مقایسه‌ای بین CDF تجربی با چند توزیع رایج به ترتیب برای مدت خشکسالی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ویژگی‌های احتمالاتی توزیع نمایی شباهت زیادی با توزیع تجربی مدت خشکسالی دارد. نمودارهای احتمال-احتمال (pp) و نمودار چندک-چندک (Q-Q) نیز به منظور مشخص کردن این موضوع که

### ۳-۳-۲. تحلیل فراوانی و برآورد دوره‌های

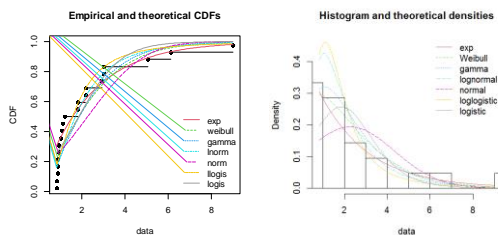
#### بازگشت تک و دو متغیر

#### ۳-۳-۱. تحلیل فراوانی تک متغیره

با هدف تحلیل فراوانی شدت و مدت خشکسالی، ابتدا توزیع‌های مناسب برای مقادیر شدت و مدت با استفاده از آزمون‌های آماری و نمودارهای مربوطه تعیین شد و سپس با استفاده از رابطه ۲۰ دوره‌های بازگشت تک متغیره محاسبه شد. در این راستا، بر مقادیر دو متغیر بدست آمده از سری

نمودار اگر روند خطی باشد می‌توان نتیجه گرفت داده‌ها از آن توزیع خاص پیروی می‌کنند.

آیا یک مجموعه داده مدت از توزیع خاصی پیروی می‌کنند یا نه، با استفاده از تابع توزیع تجمعی ترسیم شدند. در این دو



شکل ۶. نمودار مقایسه توزیع‌های متفاوت برازش یافته بر مدت خشکسالی (نگارنده ۱۴۰۳)

ریزمقیاس گردانی به ازای دوره‌های بازگشت تک متغیره ۲، ۵، ۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله و با استفاده از رابطه ۲۰ محاسبه شد. همانطور که در جدول ۵ مشخص می‌شود مقادیر دوره‌های بازگشت مختلف برای متغیر مدت در روش DM نزدیک‌تر به مقادیر دوره پایه مشاهداتی بوده اما با بزرگ‌تر شدن دوره بازگشت، مقادیر بزرگ‌تری به ازای دوره‌های بازگشت بدست آمده است. در جدول ۶ مقدار شدت به ازای دوره روش LS (جدول ۵). در جدول ۶ مقدار شدت به ازای دوره‌های بازگشت منتخب آورده شده است. روش ریزمقیاس گردانی DM مقادیر شدت را به ازای دوره‌های بازگشت متفاوت (به ویژه در دوره‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله) نزدیک‌تر به مقادیر مشاهداتی برآورد کرده است.

بر اساس آزمون‌های انجام شده، از آنجایی که بر اساس معیار اطلاعاتی آکائیک و آماره کرامر-ون-میسز، توزیع نمایی بر داده‌های مدت برازش مناسب دارد لذا این توزیع به عنوان توزیع احتمالی به منظور برآورد دوره‌های بازگشت تک متغیره مدت خشکسالی انتخاب شد. در مورد شدت خشکسالی نیز یکی از کمترین مقادیرها آماره کرامر-ون-میسز به توزیع گاما تعلق دارد. بر این اساس، از بین توزیع‌های مورد بررسی، توزیع منتخب برای شدت خشکسالی، گاما در نظر گرفته شد که در اکثر پژوهش‌ها (سانگ و یانگ، ۲۰۱۰، چن و همکاران، ۲۰۱۳)، نیز این توزیع انتخاب شده است. در ادامه، به منظور بررسی توانمندی مدل MRI در برآورد دوره‌های بازگشت تک متغیره، مقادیر این دو متغیر برای دوره پایه مشاهداتی (OBS) و این مدل با استفاده از دو روش

جدول ۵. مقدار مدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت مختلف طی دوره پایه

ریزمقیاس گردانی	دوره بازگشت					
	۲	۵	۱۰	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
OBS	۲/۶	۶/۱	۸/۹	۱۷/۷	۲۳/۸	۲۶/۵
LS	۳/۸	۹	۱۲/۹	۲۵/۸	۳۴/۸	۳۸/۷
DM	۳/۱	۷/۲	۱۰/۴	۲۰/۸	۲۸	۳۱/۲

جدول ۶. مقدار شدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت مختلف طی دوره پایه

ریزمقیاس گردانی	دوره بازگشت					
	۲	۵	۱۰	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
OBS	۰/۸	۲/۹	۴/۹	۱۲/۲	۱۷/۷	۲۰/۱
LS	۱	۳/۸	۶/۳	۱۵/۶	۲۲/۵	۲۵/۵
DM	۰/۷	۲/۷	۴/۵	۱۱	۱۵/۹	۱۸

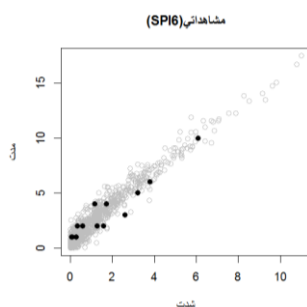
### ۳-۲-۲-۲. تحلیل فراوانی دو متغیره

اولین گام در ساخت مفصل، بررسی ساختار وابستگی متغیرها و انتخاب مرتبط‌ترین متغیرها می‌باشد. بدین منظور، شدت وابستگی متغیرهای استخراج شده از مرحله قبل (شدت و مدت) با استفاده از ضرایب وابستگی رتبه‌ای کندال و اسپیرمن مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ضریب وابستگی کندال برای مقادیر شدت و مدت مستخرج از سری SPEI6 محاسبه شده با مقادیر مشاهداتی دما و بارش طی دوره پایه به میزان ۰/۷۴ بدست آمد. بر اساس ضریب وابستگی و مقدار p-value بدست آمده، دو متغیر شدت و مدت سری SPEI6 مشاهداتی دارای شدت وابستگی بالا و معناداری بودند (جدول ۷). بنابراین در ادامه، این دو ویژگی برای ساخت

توزیع توام با استفاده از تابع مفصل بکار رفت. بهترین مفصل باید قادر باشد هم ساختار وابستگی و هم رفتار قسمت بالایی توزیع را به خوبی نشان دهد. با استفاده از آزمون نیکویی برازش، برای دوره پایه و برای سری مشاهداتی، مفصل جو از بین چندین مفصل ارشمیدسی که دارای کمترین مقدار آماره به آزمون کرامر ون میسر بود، برای انجام تحلیل فراوانی دو متغیره سری SPEI6 انتخاب شد. در شکل ۷، مقادیر شدت در مقابل مدت خشکسالی که توسط مفصل جو تولید شده است (۱۰۰۰ جفت) در مقایسه با مقادیر شدت و مدت SPEI6 مشاهداتی ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همپوشانی خوبی بین دو سری داده وجود دارد.

جدول ۷. پارامترها و آماره نیکویی برازش توزیع های دو متغیره بر مبنای مفصل برای دوره پایه مشاهداتی

نمایه	$\tau$	p-value	$\rho_s$	p-value	مفصل	$\theta$	آماره	آزمون Cv-M p-value
SPEI6	۰/۷۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۳	<۰/۰۰۰۱	Joe	۶/۸	۰/۰۴	۰/۶۷



شکل ۷. مقادیر مشاهداتی در مقابل ابر داده تولید شده توسط مفصل جو برای SPEI6 مشاهداتی (نگارنده ۱۴۰۲)

(ریزمقیاس شده با دو روش LS و DM) محاسبه و پارامترهای دو توزیع گاما و نمایی محاسبه و مفصل‌های مناسب انتخاب شد (جدول ۸).

در ادامه، مراحل فوق برای مقادیر شدت و مدت مستخرج از سری‌های SPEI شش ماهه محاسبه شده با داده‌های مدل MRI طی دوره پایه و دوره آینده نزدیک تحت دو سناریو

جدول ۸. پارامترهای توزیع شدت و مدت و مفصل‌های منتخب سری‌های زمانی SPEI6

L	مدت	شدت	$\theta$	مفصل	$\tau$	نمایه	
۱/۸	Rate=0.17	Shap=0.48 Rate=0.20	۲۶/۱۴	فرانک	۰/۸۶	SPEI6-LS	پایه
۱/۴	Rate=0.22	Shap=0.5 Rate=0.30	۶/۹	جو	۰/۷۵	SPEI6-DM	
۱/۱	Rate=0.30	Shap=0.44 Rate=0.42	۴/۰۴	گامبل	۰/۷۵	SPEI6-LS	
۱	Rate=0.28	Shap=0.79 Rate=0.74	۴/۱۸	گامبل	۰/۷۶	SPEI6-DM	SSP126
۱/۴	Rate=0.45	Shap=0.75 Rate=0.81	۳/۰۲	کلیتون (۹۰ درجه)	۰/۶۰	SPEI6-LS	
۰/۹۹	Rate=0.4	Shap=1/01 Rate=1.3	۳/۲۳	کلیتون (۹۰ درجه)	۰/۶۲	SPEI6-DM	SSP585

که برای دوره آبی تحت سناریوی SSP126 به میزان ۱/۷ (۱/۷) و تحت سناریوی مقابل ۱/۴ (۱/۱) بدست آمد. در هر دو روش ریزمقیاس‌گردانی، کاهش بیشتر تحت سناریوی SSP585 و در دوره‌های بازگشت بزرگتر مشاهده می‌شود. در جدول ۱۰، مقادیر مدت به ازای دوره‌های بازگشت منتخب تحت دو سناریو با دو روش ریزمقیاس آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همانند شدت خشکسالی، مدت این مخاطره طی دوره‌های آبی کاهش زیادی را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهند.

به منظور برآورد تغییرات دوره‌های بازگشت تک متغیره مقادیر شدت و مدت از دو سری زمانی SPEI6 تحت دو سناریو بدست آمد و با برازش توزیع‌های مناسب، دوره‌های بازگشت تک متغیره محاسبه شد. نتایج نشان داد تحت دو سناریوی SSP126 و SSP585 و با دو روش ریزمقیاس‌گردانی (جدول ۹)، شدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت برابر با دوره پایه تحت دو سناریو کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار شدت به ازای دوره بازگشت ۵ ساله دوره پایه با روش LS (DM) برابر ۳/۸ (۲/۷) می‌باشد

جدول ۹. مقدار شدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت مختلف تحت سناریوهای منتخب طی دوره آبی (نگارنده، ۱۴۰۲)

دوره بازگشت					روش	سناریو
۵۰۰	۱۰۰	۱۰	۵	۲	ریزمقیاس	
۱۰/۷	۷/۳	۲/۸	۱/۷	۰/۴	LS	SSP126
۷/۶	۵/۵	۲/۶	۱/۷	۰/۷	DM	
۶/۷	۴/۸	۲/۲	۱/۴	۰/۵	LS	SSP585
۴/۵	۳/۳	۱/۶	۱/۱	۰/۵	DM	

جدول ۱۰. مقدار مدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت مختلف تحت سناریوهای منتخب طی دوره آبی (نگارنده، ۱۴۰۲)

دوره بازگشت					روش	سناریو
۵۰۰	۱۰۰	۱۰	۵	۲	ریزمقیاس	
۲۰/۳	۱۵	۷/۵	۵/۲	۲/۲	LS	SSP126
۲۱/۹	۱۶/۲	۸/۱	۵/۶	۲/۴	DM	
۱۳/۶	۱۰/۱	۵	۳/۵	۱/۵	LS	SSP585
۱۴/۷	۱۰/۹	۵/۴	۳/۸	۱/۶	DM	

### ۳-۳-۳. تحلیل فراوانی توام شدت و مدت

#### خشکسالی

مقایسه دوره بازگشت دو متغیره‌ی مقادیر بیشینه شدت و مدت بر اساس نمایه SPEI6 تحت سناریو SSP126 باروش LS نشان داد رویدادی با شدت ۵/۱ و مدت ۹ ماه در دوره پایه دارای دوره بازگشت توام "و" ( $T_{\cap DS}$ ) به میزان ۱۲/۸ و "یا" به میزان ۸/۱ است. در حالیکه طی دوره آتی، دوره بازگشت توام آن در حالت "و" ۵۰ سال  $(T_{\cap DS}(fut.)_{D \geq 9 \text{ and } S \geq 5.1})$  و در حالت "یا"  $(T_{\cup DS}(fut.)_{D \geq 9 \text{ or } S \geq 5.1} = 10 > T_{\cup DS}(base)_{D \geq 9 \text{ and } S \geq 5.1} = 12.8)$  سال ۱۰  $(T_{\cup DS}(base)_{D \geq 9 \text{ or } S \geq 5.1} = 8.1)$  بدست آمد که نشان می‌دهد احتمال رخداد چنین رویدادی طی دوره پایه بیش از دوره آتی بوده است. در سناریوی مقابل نیز بالاترین مقدار بیشینه شدت و مدت محاسبه شده برای دوره آتی یعنی شدتی برابر ۴/۱ با مدتی برابر ۶ ماه در دوره پایه مدل (دوره آتی)، دارای دوره بازگشت توام در حالت عطفی "و" برابر ۹/۴ (۲۹) و در حالت فصلی "یا" برابر ۴/۹ (۱۲) سال است که نشان می‌دهد احتمال این رخدادها نیز طی دوره آتی نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت.

مقایسه دوره بازگشت دو متغیره‌ی مقادیر بیشینه شدت و مدت بر اساس نمایه SPEI6 تحت سناریو SSP126 باروش DM نشان داد رویدادی با شدت ۵/۵ و مدت ۹ در دوره پایه دارای دوره بازگشت توام "و" به میزان ۲۰ و "یا" به میزان ۱۰/۴ است. در حالیکه طی دوره آتی دوره بازگشت توام آن در حالت "و" ۵۰ سال و در حالت "یا" ۱۰ سال بدست آمد که نشان می‌دهد احتمال رخداد چنین رویدادی طی دوره پایه بیشتر از دوره آتی بوده است. در سناریوی مقابل نیز بالاترین مقدار بیشینه شدت و مدت محاسبه شده برای دوره آتی یعنی شدتی برابر ۶/۴ با مدتی برابر ۶ ماه در دوره پایه مدل (دوره آتی)، دارای دوره بازگشت توام در حالت "و" برابر ۱۷/۴ (۶۹)  $(T_{\cap DS}(fut.)_{D \geq 6 \text{ and } S \geq 6.4} = 69 > T_{\cap DS}(base)_{D \geq 6 \text{ and } S \geq 6.4} = 17.4)$  و در حالت "یا" برابر ۵/۷ (۱۳) سال  $(T_{\cup DS}(fut.)_{D \geq 6 \text{ or } S \geq 6.4} = 13 > T_{\cup DS}(base)_{D \geq 6 \text{ or } S \geq 6.4} = 5.7)$  است

که نشان می‌دهد احتمال این رخدادها نیز طی دوره آتی نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله تلاش شد تا با غربالگری اولیه مدل‌های CMIP6، مدلی با قدرت تفکیک مکانی مناسب که داده‌های دما و بارش را تحت دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه SSP شبیه‌سازی کرده، انتخاب شود. از آنجایی که قدرت تفکیک مکانی مدل‌های اقلیمی برای مطالعات مربوط به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بخش‌هایی چون آب و کشاورزی در یک حوضه پایین می‌باشد لذا در این مقاله، به منظور کاهش عدم قطعیت، از دو روش ریزمقیاس آماری (LS و DM) استفاده شد و توانمندی این دو روش در ایستگاه مشهد برای دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۴ در شبیه‌سازی سه متغیر ماهانه بارش (mm)، دمای کمینه (°C) و دمای بیشینه (°C) بررسی شد. در ادامه، سری‌های زمانی نمایه‌ی SPEI در مقیاس شش ماهه با دو روش ریزمقیاس گردانی مذکور محاسبه و توانمندی مدل با دو روش مذکور در برآورد ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت و فراوانی) تحلیل شد. بررسی خشکسالی طی دوره پایه بر اساس این نمایه نشان داد شدیدترین خشکسالی در ایستگاه مشهد طی دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۱۴ به ترتیب در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۱-۲۰۱۰ ثبت شده است. در همین راستا مطالعه پزشکی و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد از نظر هیدرولوژیکی سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ طی دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۱۴ خشک‌ترین سال‌ها در ایستگاه مشهد بوده است.

ارزیابی توانمندی مدل منتخب نشان داد این مدل در مقایسه با دما، از توانمندی کمتری در شبیه‌سازی بارش برخوردار است که این نتیجه در سایر مطالعات نیز بدست آمده است. در تمامی مطالعات انجام شده بر اساس مدل‌های CMIP6 (ژو و همکاران، ۲۰۲۱، فیروز و همکاران، ۱۴۰۱)، بر توانمندی مدل‌های این سری در شبیه‌سازی متغیر دما تأیید شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، روش LS برای بارش و روش DM برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه برای ایستگاه مشهد نتایج بهتری ارائه دادند. بررسی تغییرات سالانه و ماهانه

کرد. ایشان نشان دادند بارش سنگین در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده افزایش خواهد داشت. بیشینه افزایش روزهای همراه با بارش سنگین تحت سناریوهای SSP370 و SSP585 در حوضه قره‌قوم دیده شد. پزشکی و همکاران (۱۳۹۷)، طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۹ افزایش دبی را تحت سناریوی A2 نسبت به ۳۰ سال گذشته در ایستگاه مشهد پیش‌نگری کردند. عطایی و همکاران (۱۴۰۰) نیز بر اساس روش BCSA نشان دادند بارش مشهد برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ افزایش خواهد یافت که نتیجه این پژوهش نیز همسو با پژوهش‌های مذکور می‌باشد. از طرفی، هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) نیز در گزارش ششم خود خاطرنشان ساخته که افزایش هر ۱ درجه سلسیوس دما جهانی منجر به افزایش بخار آب جو تا حدود ۷٪ بر مبنای رابطه کلایوس-کلاپیرون خواهد شد و در پی آن بارش تا حدود ۲٪ طی دوره آبی افزایش خواهد یافت (آریز و همکاران، ۲۰۲۱، گی و همکاران، ۲۰۲۰، یانگ و همکاران، ۲۰۲۱). اگرچه برای بارش این حوضه افزایش پیش‌نگری شده است اما دای و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهش خود تاکید کردند که طی دوره‌های آبی، رخداد افزایش احتمال میانگین بارش‌های سنگین و دوره‌های خشک طولانی مدت به طور همزمان رخ خواهد داد.

بررسی ویژگی‌های خشکسالی نشان داد در این حوضه در چهار وضعیت (دو روش ریزمقیاس و دو سناریوی SSPs) فراوانی خشکسالی افزایش می‌یابد که این یافته با نتایج پژوهش زرین و صالح نیا (۱۳۹۸) مبنی بر افزایش فراوانی رویدادهای خشکسالی و نیز با یافته‌های وانگ و همکاران (۲۰۲۲) با تحلیل ویژگی‌های جهانی این مخاطره با بکارگیری مدل‌های CMIP6 بر اساس نمایه‌های SPI، SPEI و SRI همخوانی دارد. بر اساس نتایج بهزادی و همکاران (۲۰۲۴) که با استفاده از مدل‌های CMIP6 انجام شد ۴۱ تا ۵۷٪ مساحت ایران طی دوره‌های آبی با شرایط خشکسالی روبرو خواهد بود و خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تری رخ خواهد داد. سو و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند چین با خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر روبرو

دمای کمینه و بیشینه برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶ نسبت به دوره پایه نشان داد این دو متغیر تحت دو سناریو و با دو روش ریزمقیاس‌گردانی افزایش خواهند یافت. افزایش دمای متوسط در مناطق مورد مطالعه در جهان (ژو و همکاران، ۲۰۲۱) و ایران تحت سناریوهای SSPs گزارش شده است مانند پژوهش افشاری نیا و همکاران، (۱۴۰۲) برای کاشان، روشنی و حمیدی (۱۴۰۰) برای ایستگاه ساری، فیروز و همکاران (۱۴۰۱) برای حوضه دریاچه ارومیه. بهزادی و همکاران (۲۰۲۴) افزایش در دمای بیشینه و کمینه (بیشترین مقدار به ترتیب  $1/37^{\circ}\text{C}$  و  $1/55^{\circ}\text{C}$ ) را برای ایران تحت سناریوهای SSPs طی دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۲ پیش‌نگری کرده‌اند. انصاری و همکاران (۱۴۰۱) نیز افزایش ۰/۴-۰/۵ درجه سلسیوس را بر مبنای متوسط سناریوهای SSPs برای حوضه قره‌قوم بدست آوردند نتایج حاصل از دو متغیر دمای بیشینه و کمینه در این مقاله همسو با یافته‌های پژوهشگران فوق می‌باشد. بارش نیز در چهار وضعیت مورد بررسی (یک مدل، دو سناریوی SSP126 و SSP585 با دو روش ریزمقیاس‌گردانی LS و DM) برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) با درصدهایی متفاوت افزایش نشان داد. ژو و همکاران (۲۰۲۱) نیز در پژوهش خود نشان دادند بارش تحت سناریوهای SSP126 (۱۲٪) و SSP585 (۱۹/۵٪) برای چین برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۶۱ نسبت به دوره پایه اقلیمی ۱۹۷۱-۲۰۱۰ افزایش می‌یابد. پژوهش انصاری و همکاران (۱۴۰۱) برای قره‌قوم نشان داده است که بارش در این حوضه قره‌قوم بین ۵٪ تا ۵-٪ برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹ تغییر خواهد کرد که با نتیجه این تحقیق (افزایش حداقل ۸٪ و حداکثر ۲۴٪ و معنادار تحت سناریوی SSP585) همخوانی ندارد. بهزادی و همکاران (۲۰۲۴) مقادیر متفاوتی از افزایش و کاهش در میانگین بارش سالانه ایران برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۲ را با مدل‌های مورد استفاده CMIP6 و تحت سناریوهای SSPs گزارش داده‌اند که بیشترین افزایش و کاهش در مقدار سالانه آن به میزان به ترتیب ۶۲ و ۹ میلی‌متر گزارش شده است. در تایید نتیجه بدست آمده در این مقاله می‌توان به پژوهش زرین و رودباری (۲۰۲۱) نیز اشاره

خواهد بود. سافاراتد و نافینگ (۲۰۲۱) نشان دادند برای جنوب شرق آسیا تحت سناریوی SSP585 خشکسالی‌هایی با مدت بیشتر، سختی بالاتر و شدیدتر برای دوره ۲۰۴۴-۲۰۱۵ رخ خواهد داد اما فراوانی بیشتر تحت سناریوی SSP245 بدست آمد. زرین و صالح نیا (۱۳۹۸) نشان دادند برای ایستگاه تهران طی دوره آتی، خشکسالی تحت سناریوی بدبینانه نسبت به سناریوی خوش بینانه دارای شدت بالاتر خواهد بود اما فراوانی فرین‌های خشکسالی تحت سناریوی خوش بینانه در سال‌های آینده افزایش، در حالی که طبق سناریوی بدبینانه فراوانی این رخدادها دارای نوسان خواهد بود. نتایج حاصل از این مقاله از نظر افزایش فراوانی این مخاطره همسو با پژوهش‌های بررسی شده می‌باشد.

با توجه به وابستگی بالای ویژگی‌های مدت و شدت، تحلیل‌های چندمتغیره نسبت به تحلیل‌های تک متغیره، از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردارند (آیان توبو و همکاران، ۲۰۱۹). در این مقاله از توابع مفصل به منظور تحلیل فراوانی توام دو متغیر شدت و مدت (علاوه بر تحلیل فراوانی تک متغیره این دو ویژگی) برای دوره پایه و دوره آتی استفاده شد. از بین توابع توزیع مختلف و با انجام آزمون‌های نیکویی برازش، برای متغیر مدت و شدت به ترتیب توزیع نمایی و گاما انتخاب شد که بسیاری از پژوهش‌ها مانند لی و همکاران (۲۰۲۱) نیز برای این دو متغیر انتخاب و بکار گرفته‌اند. به منظور تحلیل فراوانی دو متغیره، مقادیر شدت و مدت مستخرج از سری زمانی SPEI6 دوره پایه و دوره آتی با آستانه  $SPEI < -1$  و تحت دو سناریو و با دو روش ریزمقیاس‌گردانی استخراج شد. برای ساخت توزیع توام شدت و مدت، از بین چندین مفصل خانواده‌ی بیضوی و ارشمیدسی، از جمله نرمال، فرانک، کلیتون و گامبل، با توجه به معیارهای آماری و نتیجه آزمون نیکویی برازش، مفصل‌های دارای کمترین مقدار آماره آزمون کرامرون میسر بودند انتخاب شدند. در مطالعات مشابه، مددکار و همکاران (۲۰۱۳) مفصل گامبل، شیا (۲۰۰۶) و میرعباسی (۲۰۱۲) مفصل گالاموس را به منظور ساخت توزیع توام شدت و مدت این مخاطره بکار بردند. ژو و همکاران (۲۰۱۵) مفصل

جو و مسعود و همکاران (۲۰۱۵) نیز از مفصل فرانک برای تحلیل فراوانی شدت و مدت این مخاطره با دو نمایه SPI و SPEI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه استفاده کردند. گی و همکاران (۲۰۱۶) در دشت‌های شمال هند از مفصل فرانک، کلیتون و برای مناطق شمالی‌تر از مفصل گامبل و لی و همکاران (۲۰۲۰) برای شدت و مدت مستخرج از سری زمانی SPI3 و SPI6 از مفصل فرانک به منظور بررسی احتمال توام این مخاطره استفاده کردند. بهزادی و همکاران (۲۰۲۴) نیز از سه مفصل کلیتون، فرانک و گامبل برای بررسی دوره‌های بازگشت توام برای ایران خوشه‌های مختلف ایران تحت سناریوهای SSPs استفاده کردند. نتایج نشان داد تحت دو سناریوی منتخب و با دو روش ریزمقیاس‌گردانی، دوره بازگشت تک متغیره و توام شدت و مدت خشکسالی نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. بنابراین احتمال رخداد توام یک رویداد معین (با شدت و مدت تعیین شده) نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت.

بررسی رخداد خشکسالی‌های متوسط تا شدید در حوضه کشف رود نشان داد طی دوره آماری موجود (۲۰۲۲-۱۹۵۱) تعداد ۵۵ رخداد با آستانه کمتر از ۱- اتفاق افتاده است. با توجه دوره آماری ۷۱ ساله تقریباً هر ۹ ماه این حوضه به طور میانگین با یک رویداد متوسط تا شدید این مخاطره روبرو بوده که نشان از آسیب‌پذیری بالای این حوضه نسبت به این پدیده دارد. با توجه به اینکه در این حوضه با توجه به اقلیم آن، خشکسالی یکی از رایج‌ترین مخاطرات اقلیمی محسوب می‌شود لذا ارایه چشم‌اندازی از آن برای دوره‌های آتی بسیار لازم و راهگشا در امر برنامه‌ریزی‌های مرتبط بویژه آب (تامین آب شهری) و کشاورزی خواهد بود.

## منابع

- انصاری مهابادی، ث.، دهبان، ح.، زارعیان، م. ج. و فرخ نیا، ا. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برونداد مدل های CMIP6. مجله پژوهش آب ایران، ۱۶(۱) (پیاپی ۴۴)، ۱۱-۲۴. SID.

- 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-i/> (accessed on 15 August 2022).
10. 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.
  11. Bonaccorso, B., Cancelliere, A., Rossi, G. (2003) An analytical formulation of return period of drought severity. *Stochastic Environmental Research Risk*, 17 (3), 157–174.
  12. Chang, J., Li, Y., Wang, Y., Yuan, M. 2016. Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 540:824-834.
  13. 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.
  14. Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4, 301-312.
  15. 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.
  16. Ge, Y., Cai, X., Zhu, T., Ringler, C. (2016) Drought frequency change: An assessment in northern India palins, *Agricultural Water Management*, 176, 111-121.
  17. 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.
  18. 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.
  19. Ha, K. J., Moon, S., Timmermann, A., & Kim, D. (2020). Future changes of summer monsoon characteristics and evaporative demand over Asia in CMIP6 simulations.
  ۲. بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، خزانه‌داری، لیلی، کریمی‌مان، مریم، کوزه‌گران، سعیده، کوهی، منصوره، فلامرزی، یاشار & ملبوسی، شراره. (1402). چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به کارگیری مقیاس کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. *مخبریک زمین و فضا*, 49(2), 431-449. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436
  ۳. بهزادی، ف.، جوادی، س.، یوسفی، ح.، مریدی، ع. و هاشمی شاهدانی، م. (۱۴۰۱). تعیین تاثیر تغییر اقلیم بر خشک سالی آب زیرزمینی با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت شهرکرد). *اکو‌هیدرولوژی*، ۲۹ (۲)، ۴۱۹-۴۳۶. SID. <https://sid.ir/paper/1060137/fa>
  ۴. پزشکی، آ.، اسماعیلی، ک.، فرید حسینی، ع. (۱۳۹۷). تاثیر خشک سالی بر روند تغییر و پیش بینی خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه آبریز موثر بر دبی مطالعه موردی (حوضه کشف رود)، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲(۲)
  ۵. زرین، آ.، صالح آبادی، ن. (۱۳۹۸). پیش آگاهی مخاطره خشکسالی در تهران بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6، ششمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران. آبان ۱۳۹۸.
  ۶. عطایی، ه.، کوهی، م.، مدیریان، ر.، بذرافشان، ب.، (۱۴۰۰). تغییرات پیش‌نگری شده در دما و بارش حوضه کشف رود بر مبنای روش‌های مقیاس-کاهی دینامیکی و آماری. *مخاطرات محیط طبیعی*, 10(30), 183-202. doi: 10.22111/jneh.2021.37827.1777
  ۷. کوهی، م.، ۱۳۹۶، تحلیل و بررسی خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از توابع مفصل، رساله دکتری، استاد راهنما: حسین ثنایی نژاد، استاد مشاور: محمد امینی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
  8. Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6), 716–723.
  9. Arias, P.; Bellouin, N.; Coppola, E.; Jones, R.; Krinner, G.; Marotzke, J.; Naik, V.; Palmer, M.; Plattner, G.-K.; Rogelj, J. *Climate Change 2021: The Physical Science*

- Climatology, January 17-22, Anaheim, California, pp. 179-184.
30. Nelsen, R.B. (2007) An introduction to copulas (3th ed.). New York: Springer.
  31. Nie, S., Fu, S., Cao, W., & Jia, X. (2020). Comparison of monthly air and land surface temperature extremes simulated using CMIP5 and CMIP6 versions of the Beijing Climate Center climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 487-502.
  32. 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.
  33. 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.
  34. Scholz, F. W., Stephens, M. A. (1987) K-sample Anderson-Darling tests, *Journal of the American Statistical Association*, 82(399), 918–924.
  35. Shiau, J.T. (2006) Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, 20, 795–815.
  36. Shiau, J.T., Shen, H.W. (2001) Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127 (1), 30-40.
  37. 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.
  38. Sibuya, M. (1960) Bivariate extreme statistics. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics (Tokyo)* 11, 195–210.
  39. 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)
  40. 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.
  41. 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.
  42. Tarek, M., Brissette, F., & Arsenault, R. (2021). Uncertainty of gridded precipitation and temperature reference datasets in climate Geophysical Research Letters, 47(8), e2020GL087492.
  20. Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature, *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
  21. 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.
  22. 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.
  23. 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.
  24. Joe, H. (1997) *Multivariate Models and Dependence Concepts*, Chapman & Hall, London. 399 pp.
  25. Karim, R., Tan, G., Ayugi, B., Babausmail, H., & Liu, F. (2020). Evaluation of Historical CMIP6 Model Simulations of Seasonal Mean Temperature over Pakistan during 1970–2014. *Atmosphere*, 11(9), 1005.
  26. Kolmogorov, A. N. (1933) Sulla Determinazione Empirica di una Legge di Distribuzione, *Giornale dell' Istituto Italiano degli Attuari*, 4, pp.83-91.
  27. 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.
  28. Masoud, M. B., Khaliq, M.N., Wheeler, H. S. (2015) Analysis of meteorological droughts for the Saskatchewan River Basin using univariate and bivariate approach. *Journal of Hydrology*, 522, 452-466.
  29. 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*

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. Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., ... & Adachi, Y. (2019). MRI MRI-ESM2. 0 model output prepared for CMIP6 CMIP.
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. Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526, 183-195.
53. 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.
54. Zhang, H., Chapman, S., Trancoso, R., Toombs, N., & Syktus, J. (2024). Assessing the impact of bias correction approaches on climate extremes and the climate change signal. *Meteorological Applications*, 31(3), e2204.
- change impact studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3331-3350.
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. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
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, 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.
47. Xu, Z., Han, Y., Tam, C. Y., Yang, Z. L., & Fu, C. (2021). Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). *Scientific Data*, 8(1), 293.
48. Yevjevich, V. (1967) An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, Hydrology paper, Colorado State University.