



Development and Projection of a Composite Drought Index Using Copula Functions under Future Emission Scenarios: Application of CMIP6 Climate Models in the Minab Esteghlal Dam Watershed

Hojjatollah Keshavarz¹, Ommolbanin Bazrafshan^{*2}, Marzieh Shekari³, Hossein Zamani³

1- Ph.D. Student, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2- Professor, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

*Corresponding Author: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

Keywords:

Composite drought, Copula functions, Climate change, JDHMI index, Minab watershed.

Extended Abstract

Introduction

Composite droughts, characterized by simultaneous meteorological and hydrological deficits, present severe challenges to water resource management in arid and semi-arid regions. This study addresses the critical need to project drought characteristics under climate change by developing a comprehensive Joint Hydro-Meteorological Drought Index (JDHMI) using copula functions for the Minab Esteghlal Dam watershed in southern Iran.

Materials and Methods

The research utilized historical hydro-climatic data (1989–2020) and statistically downscaled outputs from the CanESM5 climate model under three SSP scenarios (SSP126, SSP370, and SSP585) for the period 2021–2040. Watershed runoff was simulated using the IHACRES rainfall–runoff model. P-12 and R-12 were calculated, and their dependence structure was modeled using copula functions to develop the JDHMI. Drought characteristics, including frequency, intensity, duration, and magnitude, were analyzed, and trend assessments were conducted using the Mann–Kendall test and Pettitt's change-point detection.

Received:

09 Oct 2025

Revised:

29 Oct 2025

Accepted:

15 Dec 2025

How to cite this article:

Keshavarz, H; Bazrafshan, O; Shekari, M; & Zamani, H. (2025). Development and Projection of a Composite Drought Index Using Copula Functions under Future Emission Scenarios: Application of CMIP6 Climate Models in the Minab Esteghlal Dam Watershed. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 4(13), 227-250. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.10226.1180>



Results and Discussion

The comprehensive analysis revealed several critical findings regarding drought behavior under climate change scenarios. The composite JDHMI demonstrated superior performance, exhibiting significantly reduced fluctuations and more stable drought identification compared with conventional univariate indices, thereby providing a more reliable tool for drought monitoring and management. Under future climate change scenarios, substantial alterations in drought patterns were projected, marked by a fundamental shift from the historical pattern of fewer but prolonged severe droughts—characterized by a maximum duration of 83 months during the historical period—toward more frequent but shorter drought events, with the SSP585 scenario projecting 13 distinct episodes. Furthermore, the study identified a concerning increase in drought magnitude across all future scenarios, with the maximum magnitude rising sharply to 1.79 under the high-emission SSP585 scenario, indicating a substantial intensification of drought conditions. This trend was compounded by a significant increase in the frequency of severe drought events under all future scenarios. Trend analysis revealed a strongly significant declining trend in JDHMI values, with Z-scores of -6.28 for the historical period and an even more pronounced -7.75 under the SSP370 scenario, confirming the progressive deterioration of hydro-meteorological conditions. Importantly, change-point analysis detected a notable regime shift around the year 2000, firmly establishing the onset of a multi-decadal drought period that continues to affect the region, thereby validating the temporal framework of what has been widely recognized in the scientific literature as the “millennium drought.”

Conclusion

This study demonstrates the superior capability of copula-based composite indices in monitoring composite droughts under climate change scenarios. The findings reveal a critical insight: despite some reduction in drought duration, the significant intensification of both drought magnitude and frequency underscores the growing vulnerability of water resource systems. The developed JDHMI framework provides a robust scientific foundation for establishing early warning systems for composite droughts, enabling proactive reservoir management and strategic water allocation, and supporting climate adaptation planning in water resources management. For future research, it is recommended to incorporate additional key variables, such as groundwater levels and soil moisture, and to employ multi-model ensemble approaches to reduce uncertainty. Collectively, these findings highlight the urgent need for adaptive management strategies to address the escalating challenges posed by composite drought events in a changing climate.



توسعه و پیش‌بینی شاخص خشکسالی مرکب با استفاده از توابع کاپولا تحت سناریوهای انتشار آینده: کاربرد مدل‌های اقلیمی CMIP6 در حوضه آبخیز سد استقلال میناب

حجت الله کشاورز^۱، ام‌البنین بذرافشان^{۲*}، مرضیه شکاری^۲، حسین زمانی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
- ۲- استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
- ۳- استادیار گروه آمار، دانشکده علوم، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

*نویسنده مسئول: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

چکیده

خشکسالی‌های مرکب که به طور همزمان هم سیستم هواشناسی و هم منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تهدیدی جدی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. این پژوهش با هدف مدل‌سازی خشکسالی‌ها تحت سناریوهای تغییر اقلیم آینده و با استفاده از توابع کاپولا انجام شد. در این مطالعه، از داده‌های تاریخی (۲۰۲۰-۱۹۸۹) و خروجی‌های ریزمقیاس‌شده مدل اقلیمی CanESM5 تحت سناریوهای SSP126، SSP370 و SSP585 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) استفاده گردید. رواناب حوضه با مدل IHACRES شبیه‌سازی شد. شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI-12) و هیدرولوژیکی (SRI-12) محاسبه و سپس با کمک توابع کاپولا با اتصال بارش و رواناب، شاخص ترکیبی خشکسالی هیدرو-هواشناسی توسعه داده شد و ویژگی‌های خشکسالی و روند آن در دوره‌های تاریخی و آینده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد، شاخص ترکیبی JDHMI در مقایسه با شاخص‌های تک‌متغیره، نوسانات کمتری داشت و تصویر پایدارتر و جامع‌تری از وضعیت خشکسالی ارائه کرد. تحت سناریوهای تغییر اقلیم، الگوی خشکسالی از حالت خشکسالی‌های کم‌تعداد اما طولانی و شدید به سمت خشکسالی‌های پرتعداد و کوتاه‌مدتر به ویژه در سناریوی SSP585 تغییر خواهد کرد. اگرچه میانگین تداوم و شدت در برخی سناریوها کاهش یافت، اما شاخص "بزرگی" خشکسالی که تلفیقی از شدت و تداوم است، در تمامی سناریوهای آینده افزایش نشان داد که حاکی از تشدید کلی محتوای خشکسالی است. همچنین، فراوانی خشکسالی‌های "شدید" تحت تمام سناریوها افزایش قابل توجهی یافت. تحلیل روند نیز کاهشی معنی‌دار و تشدیدشونده در شاخص JDHMI در آینده را تأیید کرد. این چارچوب می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تدوین سیستم‌های هشدار زودهنگام و مدیریت پایدار منابع آب در برابر تغییرات اقلیمی فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی:

خشکسالی مرکب، توابع کاپولا، تغییر اقلیم، شاخص JDHMI، حوضه میناب.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۱۷

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۹/۲۴

مقدمه

خشکسالی یک ناهنجاری آب‌وهوایی تکراری است که با شروع تدریجی، مدت زمان طولانی و اثرات گسترده مشخص می‌شود. این پدیده بسته به اجزای خاص چرخه آب که تحت تأثیر قرار می‌گیرند، به انواع هواشناسی، هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی قابل طبقه‌بندی است (Das et al., 2020; Amiri et al., 2024). علاوه بر این، خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به دلیل تعاملات پویا بین شرایط جوی، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی در چرخه هیدرولوژیکی، به‌طور نزدیکی با هم مرتبط هستند (Leng et al., 2015). در شرایط گرمایش جهانی، وقوع خشکسالی در تقریباً تمام مناطق آب‌وهوایی تشدید شده و به‌طور قابل توجهی ثبات اقتصادی، رفاه اجتماعی و اکوسیستم‌های طبیعی را تهدید می‌کند (Wang et al., 2019). بنابراین، تحلیل تکامل خشکسالی‌های مرکب هواشناسی و هیدرولوژیکی تحت تغییرات آب‌وهوایی برای بهبود قابلیت‌های پیش‌بینی خشکسالی، ارتقای تاب‌آوری و تلاش‌های کاهش خطر بلایا و تضمین امنیت اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی ضروری است (Tosan et al., 2024).

برای توصیف شدت خشکسالی، شاخص خشکسالی یک معیار مهم محسوب می‌شود. شاخص استاندارد شده بارش (SPI) تغییرات خشکسالی هواشناسی را در مقیاس‌های مکانی-زمانی چندگانه منعکس کرده و به‌طور گسترده مورد پذیرش قرار گرفته است. همچنین، شاخص استاندارد شده رواناب (SRI) معمولاً برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی به کار می‌رود و می‌توان آن را در چارچوب محاسباتی SPI محاسبه نمود (Shukla and Wood, 2008; Bazrafshan et al., 2025).

با توجه به پیامدهای گسترده پدیده تغییر اقلیم در دهه‌های آینده و ضرورت مدیریت بهینه سیستم‌های منابع آب از یک سو، و لزوم پیش‌بینی شرایط آتی برای تضمین پایداری بهره‌برداری نسل‌های آینده از سوی دیگر، کاربرد روش‌های پیش‌بینی منابع آب در سال‌های اخیر مورد تأکید فزاینده‌ای قرار گرفته است (Pourhaghverdi et al., 2023; Hajarian, 2025). در مواردی که هدف تنها شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه‌آبخیز باشد، مدل‌های مفهومی بارش-رواناب نظیر IHACRES به دلیل دارا بودن تعادل مناسب بین دقت نتایج، حجم عملیات محاسباتی و نیازمندی‌های داده‌ای، در مقایسه با سایر مدل‌ها از کاربرد گسترده‌تری برخوردار شده‌اند

(HafezParast and Mararbi, 2021). از جمله بخش‌های حیاتی متأثر از نوسانات اقلیمی، منابع آب و به‌ویژه پارامتر رواناب است که تاکنون مطالعات متعددی به بررسی آن پرداخته‌اند. در این راستا، مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب در سطوح مختلف، از مدل‌های مفهومی با ساختار ساده (مانند IHACRES) تا مدل‌های فیزیکی-توزیعی شده پیچیده (مانند SWAT)، به‌عنوان ابزارهایی مؤثر برای درک و پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در گذشته، تحقیقات قابل توجهی با استفاده از این شاخص‌ها به ارزیابی روابط بین سه نوع خشکسالی (هواشناسی و هیدرولوژیکی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، ژو و همکاران (Xu et al., 2022) همبستگی مثبت قوی بین SPI و SRI در حوضه رودخانه مروراید را تأیید کردند و معتقد بودند که خشکسالی هیدرولوژیکی تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی‌های دوره‌ای خشکسالی هواشناسی قرار دارد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2022) تغییرات مکانی-زمانی و قوانین انتشار خشکسالی‌های چندگانه در مناطق کوهستانی فلات چین را بررسی کردند. بوآکو و همکاران (Bevacqua et al., 2021) الگوهای مکانی-زمانی انتشار خشکسالی از هواشناسی به هیدرولوژیکی در برزیل را مطالعه نمودند. تأخیر خشکسالی کشاورزی نسبت به خشکسالی هواشناسی دارای تفاوت‌های فصلی قابل توجهی بود (Du et al., 2022). گرچه هر یک از این شاخص‌های خشکسالی اطلاعات مفیدی در مورد مشخصه‌های خشکسالی ارائه می‌دهند؛ اما به‌تنهایی قادر به نمایش وضعیت منطقه از نظر رخداد خشکسالی در مفهوم عام نیستند. بر این اساس توصیه شده است که برای مدیریت مؤثر ریسک خشکسالی در یک منطقه از شاخص‌های ترکیبی استفاده شود (Meimandi et al., 2024). شاخص‌های ترکیبی با استفاده از تکنیک‌های گوناگون آماری اقدام به ادغام شاخص‌های منفرد خشکسالی می‌کنند.

در این زمینه، کاربرد توابع کاپولا در تحلیل‌های چندمتغیره خشکسالی، به‌ویژه برای درک ارتباطات پیچیده بین شاخص‌های مختلف خشکسالی، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. از آنجا که خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی اغلب به‌صورت هم‌زمان رخ داده و اثرات یکدیگر را تشدید می‌کنند، مدل‌سازی وابستگی متقابل بین شاخص‌هایی مانند SPI و SRI بدون استفاده از ابزارهای آماری پیشرفته‌ای مانند کاپولا به‌دقت امکان‌پذیر نیست (Bazrafshan et al., 2021). کاپولا

CMIP6 تحت سناریوهای SSP برای پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی استفاده خواهد شد و رواناب حوضه با بهره‌گیری از مدل مفهومی IHACRES شبیه‌سازی می‌گردد. شاخص‌های استاندارد شده بارش (SPI) و رواناب (SRI) در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه و بر اساس آن‌ها یک شاخص ترکیبی خشکسالی با استفاده از توابع کاپولا توسعه داده خواهد شد. نوآوری اصلی این پژوهش، طراحی چارچوبی یکپارچه برای مدل‌سازی وابستگی بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی و ارزیابی کمی ریسک خشکسالی‌های مرکب در شرایط تغییر اقلیم است. برآورد احتمالات فردی و توأم خشکسالی‌های شدید تحت سناریوهای مختلف، انتظار می‌رود بینش دقیق‌تری از تغییرپذیری ریسک خشکسالی در آینده ارائه دهد. این چارچوب می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تدوین راهبردهای انطباقی و سیستم‌های هشدار زودهنگام خشکسالی در راستای مدیریت پایدار منابع آب فراهم کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز میناب با مساحت ۱/۰۵۱/۹۰۰ هکتار در جنوب شرق ایران، واقع در منطقه‌ای با اقلیم گرم و فراخشک، با میانگین بارش سالانه تنها ۱۹۲ میلی‌متر، در معرض پدیده خشکسالی قرار دارد. رودخانه میناب به عنوان شریان اصلی حیاتی منطقه، با میانگین دبی سالانه ۳۰/۸۲ مترمکعب بر ثانیه، نوسانات قابل توجهی را تجربه می‌کند به طوری که دبی آن از ۴۲۳ مترمکعب بر ثانیه در آذرماه تا ۱ مترمکعب بر ثانیه در مردادماه کاهش می‌یابد (Abbaszadeh et al., 2023). این نوسان شدید جریان، همراه با بارش کم و پراکنش نامنظم آن، منطقه را به طور مستعدی در برابر دوره‌های خشکسالی طولانی مدت قرار داده است. با توجه به وابستگی شدید فعالیت‌های کشاورزی و شرب منطقه به این منبع آبی، ارزیابی ریسک خشکسالی در این حوضه از اهمیت حیاتی برخوردار است.

با جداسازی ساختار وابستگی از توزیع‌های حاشیه‌ای، این امکان را فراهم می‌سازد تا روابط غیرخطی و اغلب نامتقارن بین متغیرهای خشکسالی را مدل‌سازی کرده و احتمال وقوع توأم رویدادهای حادی را کمی‌سازی کند. این قابلیت، ارزیابی دقیق‌تری از ریسک خشکسالی‌های مرکب را ممکن ساخته و مبنای علمی محکمی برای سیستم‌های هشدار زودهنگام یکپارچه و مدیریت بهینه منابع آب در شرایط عدم قطعیت ناشی از تغییر اقلیم فراهم می‌آورد (Azhdari et al., 2020). مطالعات اخیر به طور قطعی مؤثر بودن کاپولاها را در شناسایی ریسک خشکسالی تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، حسن و همکاران (Hassan et al., 2023) در شمال عراق، تحلیل فرکانس مبتنی بر کاپولای دو متغیره را برای خشکسالی‌های هیدرولوژیکی به کار بردند. وارول و همکاران (Varol et al., 2023) یک شاخص استاندارد شده خشکسالی چندمتغیره (MSDI) برای توصیف طول، شدت و تواتر خشکسالی در حوضه ساکاریای علیا در ترکیه توسعه دادند. در خاورمیانه، اژدری و همکاران (Azhdari et al., 2020) به معرفی شاخص هوا-هیدرولوژیکی در جنوب ایران پرداختند. شاخص حاضر به‌خوبی قادر بود سیگنال‌های ناشی از دو تیپ خشکسالی را هم‌زمان نمایش دهد. بذرافشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2023) مدل‌های کاپولای سه‌متغیره را برای بررسی نابرابری‌های ریسک خشکسالی در سراسر ایران تحت سناریوهای آب و هوایی RCP به کار بردند و تفاوت‌های چشمگیر منطقه‌ای را شناسایی کردند. میمند و همکاران (Meimandi et al., 2024) در دشت میناب با توسعه شاخص ترکیبی هوا-آب زیرزمینی نشان دادند که چگونه کاپولا امکان یکپارچه‌سازی هم‌زمان متغیرهای آب سطحی و زیرزمینی را برای ایجاد یک شاخص پایش جامع فراهم می‌کند. یافته‌های ایشان حاکی از دقت بالاتر این شاخص در شناسایی ویژگی‌های خشکسالی و همبستگی بهتر با عملکرد محصول در مقایسه با شاخص‌های مرسوم بود. کاربرد این مدل‌ها، اثربخشی آنها را به‌ویژه تحت سناریوهای مختلف آب و هوایی در شناسایی تغییرپذیری ریسک خشکسالی نشان داده است.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جامع ریسک خشکسالی‌های مرکب هواشناسی-هیدرولوژیکی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در حوضه آبخیز سد استقلال میناب طراحی گردیده است. برای دستیابی به این هدف، از خروجی‌های مدل‌های

جدول ۱. مشخصات متغیرهای هیدرولوژیکی و هواشناسی حوزه آبخیز سداستقلال میناب

Table 1. The characteristics of the hydrological and the meteorological variables in the Minab Esteghlal

| Dam watershed | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| متغیر Variables | میانگین Mean | انحراف معیار Standard deviation | میان Median | حداقل Minimum | حداکثر Maximum | چولگی Skewness | کشیدگی Kurt |
| رواناب (Runoff) | 30.82 | 61.44 | 11.84 | 1 | 423.26 | 4.37 | 21.39 |
| بارش (Precipitation) | 192 | 36.19 | 0.01 | 0 | 197.92 | 2.98 | 9.35 |
| دما (Temperature) | 27.50 | 6.10 | 27.85 | 15.75 | 36.50 | -0.21 | -1.40 |

از دقت مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 ، MAE و RMSE داده‌های خروجی مدل CanESM5 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.5 و SSP5-8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) ریزمقیاس‌نمایی شدند. این رویه امکان استفاده از خروجی‌های اقلیمی با وضوح مکانی و زمانی مناسب را در مدل‌سازی هیدرولوژیکی فراهم نمود.

مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG

مدل LARS-WG یک تولیدکننده داده‌های آب و هوایی مصنوعی است که می‌تواند داده‌های روزانه بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه و تابش را برای یک سایت خاص تولید کند. این مدل از فرایندهای تصادفی برای شبیه‌سازی داده‌های آب و هوایی استفاده می‌کند.

برای شبیه‌سازی بارش از یک فرایند زنجیره مارکوف استفاده می‌شود که در آن احتمالات شرطی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P(\text{wet}|\text{dry}) = \text{احتمال وقوع روز بارانی پس از روز خشک}$$

$$P(\text{wet}|\text{wet}) = \text{احتمال وقوع روز بارانی پس از روز بارانی}$$

مقادیر بارش روزانه با استفاده از توزیع نمایی تولید می‌شوند که تابع چگالی احتمال آن به صورت زیر است:

$$f(x) = \left(\frac{1}{\mu}\right) \times \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right) \text{ for } x \geq 0 \quad (1)$$

که در آن μ میانگین بارش در روزهای بارانی است.

برای شبیه‌سازی دما، از توزیع نرمال با در نظر گرفتن وابستگی به وضعیت بارندگی استفاده می‌شود:

$$T_{rainy} \sim N(\mu_r, \sigma_r^2) \quad (2)$$

$$T_{dry} \sim N(\mu_d, \sigma_d^2)$$

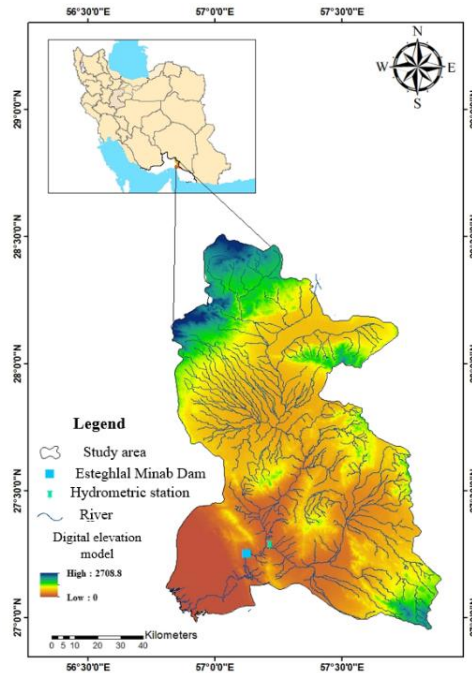
که در اینجا μ_r و μ_d به ترتیب میانگین دمای روزهای بارانی و خشک و σ_r و σ_d به ترتیب انحراف معیار دمای روزهای بارانی و خشک می‌باشند.

در مرحله واسنجی، مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی

در این پژوهش، از داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی شامل بارش روزانه، دمای متوسط روزانه و دبی جریان روزانه جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز میناب استفاده گردید. داده‌های مورد نیاز از ایستگاه هیدرومتری برنطین برای دوره آماری (۲۰۲۰-۱۹۸۹) استخراج شد. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم، از خروجی‌های مدل CanESM5 در چارچوب پروژه CMIP6 که از طریق پایگاه داده (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>) در دسترس است، استفاده شد. دما و بارش از سناریوهای اقلیمی شامل سه مسیر انتشار متفاوت: خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، میانه (SSP3-7.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) انتخاب گردیدند. این داده‌ها پس از ریزمقیاس‌نمایی آماری، به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفتند.

ریزمقیاس‌نمایی

با توجه به نیاز به کاهش شکاف مقیاس بین داده‌های مشاهداتی در مقیاس محلی و خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) در مقیاس بزرگ، فرایند ریزمقیاس‌نمایی آماری به عنوان یک گام ضروری در پژوهش حاضر انجام شد. برای این منظور از مدل مولد داده‌های اقلیمی LARS-WG (Rasco et al., 1991) نخستین بار توسط راسکو و همکاران (Semenov et al., 1998) توسعه یافت، استفاده گردید. این مدل قادر است داده‌های روزانه متغیرهای اقلیمی شامل بارش، کمینه و بیشینه دما و تابش خورشیدی را با حفظ ویژگی‌های آماری داده‌های مشاهداتی تولید نماید. پیش از اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، عملکرد مدل در بازتولید داده‌های اقلیمی دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۲۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۰ برای واسنجی و دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. پس از اطمینان



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. The location of the studied area

که در آن: $P(t)$: بارش روزانه، $\tau(s)$: تابع وابسته به دما (ضریب تبخیر-تعرق)، c : ضریب ظرفیت ذخیره رطوبت خاک، $s(t)$: شاخص رطوبتی روز قبل

۲. ماژول هیدرولوژیکی (Hydrograph Module)

خروجی این ماژول با استفاده از تابع تبدیل خطی زیر محاسبه می‌شود:

(۶)

$$Q(t) = \sum_{\{k=0\}^m} [a \times s(t-k)] - \sum_{\{j=1\}^n} [b_j \times Q(t-j)]$$

که در آن: $Q(t)$: رواناب شبیه‌سازی شده، a_k و b_j : پارامترهای مدل و m و n : مرتبه مدل

۳- مرحله کالیبراسیون: فرآیند کالیبراسیون مدل IHACRES با پیش‌پردازش داده‌های بارش، دما و رواناب و بررسی کیفیت، کامل‌بودن و همگنی آن‌ها آغاز می‌شود. در مرحله بعد، شاخص رطوبت خاک با در نظر گرفتن توابع وابسته به دما برای تبخیر-تعرق محاسبه می‌گردد. سپس پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی و کمینه‌سازی اختلاف بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی برآورد می‌شوند. در نهایت، صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های مستقل دوره اعتبارسنجی و ارزیابی

تاریخی کالیبره می‌شود و در مرحله صحت‌سنجی از شاخص‌های R^2 ، RMSE و MAE استفاده می‌شود. در مرحله تولید سناریوهای آینده، فاکتورهای تغییر به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (P_{future} - P_{hist})_{GCM} \\ \Delta T &= (T_{future} - T_{hist})_{GCM} \end{aligned} \quad (۳)$$

سپس این فاکتورهای تغییر بر پارامترهای مدل اعمال می‌شوند:

$$\begin{aligned} P_{new} &= P_{obs} \times (1 + \Delta P) \\ T_{new} &= T_{obs} + \Delta T \end{aligned} \quad (۴)$$

مدل بارش و رواناب IHACRES

مدل IHACRES (شناسایی سامانه‌های هیدرولوژیکی واحد هیدروگراف و بارش-رواناب) یک مدل مفهومی با ساختار فشرده است که برای شبیه‌سازی رواناب روزانه با استفاده از داده‌های بارش و دما طراحی شده است. روش‌شناسی این مدل مبتنی بر دو ماژول اصلی زیر است (Pourhaghverdi et al., 2023):

۱. ماژول رطوبتی (Soil Moisture Module)

این ماژول با استفاده از معادله زیر شاخص رطوبتی $s(t)$ را محاسبه می‌کند:

$$s(t) = \frac{[P(t) + (1 - \tau(s)) \times s(t-1)]}{c} \quad (۵)$$

نیازی نیست از توزیع خاصی تبعیت کنند. توابع کاپولا قادر به تشریح تغییرات همبستگی متغیرها در بخش‌های مختلف توزیع احتمال چندمتغیره بوده که این خصوصیت در سایر روش‌ها مشاهده نمی‌شود. کاپولا اتصال‌دهنده توابع توزیع حاشیه‌ای P متغیر تصادفی $(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_p(x_p))$ و تابع توزیع توأم آن‌ها $F(x_1, x_2, \dots, x_p)$ است، به گونه‌ای که با داشتن یک تابع توزیع توأم مجموعه توابع حاشیه‌ای احتمالی تشکیل دهنده آن قابل ارزیابی می‌باشد و بالعکس (روابط ۵ و ۶).

$$C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_p(x_p)) = F(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (9)$$

که $F_1(X_1) = U_1, F_2(X_2) = U_2, F_p(X_p) = U_p$ بنابراین رابطه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(10)$$

$$C(u_1, u_2, \dots, u_p) = Pr(U_1 \leq u_1, U_2 \leq u_2, \dots, U_p \leq u_p)$$

مقادیر هر کدام از این متغیرها در بازه $[0, 1]$ قرار دارند؛ بنابراین هر جفت (U_i, U_j) تبدیل به یک نقطه $F(x)$ و $G(y)$ در مربعی با ابعاد $[0, 1] \times [0, 1]$ می‌شود از طرفی این جفت داده نیز به نوبه خود دارای مقداری در بازه $[0, 1]$ است که به عنوان توزیع توأم $H(x, y)$ می‌باشند.

کاپولا با جداسازی ساختار وابستگی بین متغیرها از توزیع‌های حاشیه‌ای آنها، هسته اصلی مدل‌سازی را تشکیل می‌دهد. این کار به ما اجازه می‌دهد تا به جای کاربرد ساده مقادیر SPI و SRI احتمال توأم وقوع بارش و رواناب را در قالب یک توزیع دوبعدی محاسبه کنیم. در نتیجه، شاخص ترکیبی نه تنها اطلاعات هر دو متغیر، بلکه ماهیت و شدت وابستگی متقابل آنها را نیز در خود منعکس می‌کند که منجر به ایجاد تصویری پایدارتر و جامع‌تر از خشکسالی مرکب می‌شود. در این پژوهش با توجه به اهداف تحلیلی و پیش‌بینی، از رویکرد پارامتریک برای مدل‌سازی کاپولا استفاده گردید. این انتخاب مبتنی بر مزایای کلیدی این روش از جمله قابلیت استنتاج کمی و اندازه‌گیری دقیق ساختار وابستگی بین متغیرها، کارایی محاسباتی بالا در محاسبه شاخص ترکیبی و احتمالات توأم، و توانایی برون‌یابی مناسب برای مدل‌سازی رفتار در نواحی دم توزیع و ارزیابی ریسک رویدادهای نادر صورت پذیرفت. همچنین رویکرد پارامتریک به دلیل رواج و پذیرش گسترده در ادبیات تخصصی مدل‌سازی هیدرو-اقلیمی به‌عنوان روشی استاندارد انتخاب شد (Azhdari et al., 2020).

معیارهای آماری انجام شده و تحلیل عدم قطعیت به منظور تعیین قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های مدل صورت می‌پذیرد.

شاخص تک‌متغیره هواشناسی و هیدرولوژیکی (SPI/SRI) و مشخصه‌های خشکسالی

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) که توسط مک‌کی و همکاران (McKe et al., 1993) معرفی شد و شاخص استاندارد شده رواناب (SRI) که توسط شوکلا و وود (Shukla and Wood, 2009) بر پایه روش‌شناسی SPI توسعه یافت، از جمله شاخص‌های پایه در پایش خشکسالی محسوب می‌شوند. مبانی محاسباتی این شاخص‌ها مبتنی بر برازش توزیع احتمالاتی مناسب بر داده‌های بارش یا رواناب، استخراج تابع توزیع تجمعی (CDF) و سپس تبدیل آن به متغیر نرمال استاندارد است. مقادیر مثبت این شاخص‌ها نشان‌دهنده شرایط مرطوب و مقادیر منفی بیانگر شرایط خشک نسبت به میانگین بلندمدت می‌باشد. بر این اساس، یک دوره خشکسالی یا تداوم خشکسالی (DD) زمانی آغاز می‌شود که مقدار شاخص به صورت پیوسته منفی شده و از آستانه معینی کمتر گردد و با مثبت شدن شاخص خاتمه می‌یابد. ویژگی‌های اصلی خشکسالی شامل سه پارامتر شدت، مدت و بزرگی از سری‌های زمانی SPI و SRI استخراج می‌گردد. این ویژگی‌ها به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$DS = \sum_{i=1}^n (x_i - x_i) \quad (7)$$

$$DM = \frac{DS}{DD} \quad (8)$$

توابع کاپولا

به طور کلی توابع کاپولا یک روش ریاضی (آماری) انعطاف‌پذیر است که مجموعه‌ای از توابع احتمال تجمعی حاشیه‌ای تک‌متغیره را به یکدیگر متصل و یک تابع احتمال تجمعی چندمتغیره را تولید می‌کند (Sklar, 1959). در حقیقت توابع کاپولا بر پایه ارتباط و وابستگی بین متغیرها استوار است. توابع کاپولا از یک طرف، تابع توزیع تجمعی چندمتغیره را به تابع توزیعی حاشیه‌ای یک‌بعدی آن‌ها متصل می‌کند و از طرف دیگر دارای حاشیه‌های یک‌بعدی یکنواخت در بازه $[0, 1]$ هستند. ویژگی مهم توابع کاپولا، ترکیب هر شکلی از توابع احتمال تجمعی حاشیه‌ای است. بدین ترتیب که برای ساخت یک تابع احتمال تجمعی چندمتغیره، توابع احتمال تجمعی حاشیه‌ای می‌تواند به طور جداگانه انتخاب شوند و

در واقع K_c همان CDF توأم $\{C_1, C_2\}$ است. همانند SRI مقدار $K_c > 0.5$ نشان‌دهنده شرایط مرطوب (JDI مثبت) و $K_c < 0.5$ نشان‌دهنده شرایط خشکی (JDI منفی) و $K_c = 0.5$ نشان‌دهنده شرایط نرمال ($JDI=0$) می‌باشد. از آنجایی که JDI مانند SRI روی یک مقیاس نرمال معکوس است؛ بنابراین طبقه‌بندی‌های خشکسالی بر اساس شاخص SRI می‌تواند برای شاخص JDI هم مورد استفاده قرار گیرد.

پیش از برازش کاپولا، می‌بایست توزیع‌های حاشیه‌ای (Marginal Distributions) برای هر متغیر به طور جداگانه برآورد شوند. انتخاب این توزیع‌ها (مانند نرمال، گامبل، گاما و غیره) معمولاً بر اساس تحلیل‌های آماری اولیه مانند نمودارهای Q-Q و آزمون‌های برازش بر روی داده‌های استاندارد شده به دامنه $[0, 1]$ انجام می‌پذیرد. پارامترهای توصیف‌کننده ساختار وابستگی در کاپولاها عمدتاً با استفاده از روش برآورد درست‌نمایی بیشینه (Maximum Likelihood Estimation - MLE) تخمین زده می‌شوند. در این روش، مقادیر پارامترها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که تابع درست‌نمایی (Likelihood) داده‌های مشاهده‌شده را بیشینه کنند. از آنجایی که یک کاپولای پارامتریک ممکن است برای هر مجموعه داده‌ای مناسب نباشد، فرایند انتخاب مدل بهینه ضروری است. این انتخاب معمولاً بر اساس معیارهای اطلاعاتی مانند معیار اطلاعات آکایک (AIC) و معیار اطلاعات بیزی (BIC) انجام می‌شود (Requena et al., 2016). مدلی که دارای کمترین مقادیر AIC و BIC باشد، به‌عنوان مدل برتر (تعدالی بین خوبی برازش و پیچیدگی مدل) انتخاب می‌گردد. در نهایت، برای اطمینان از کفایت مدل انتخابی، برازش کاپولا با استفاده از آزمون‌های آماری غیرپارامتریک مانند آزمون کرامر-ون میسس (Cramér-von Mises) با آماره S_n و آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) ارزیابی می‌شود (Azhdari et al., 2020). این آزمون‌ها انحراف توزیع برازش‌شده از توزیع تجربی داده‌ها را بررسی کرده و معیاری کمی برای رد یا تأیید مدل ارائه می‌کنند.

در نهایت برای تحلیل روند و تعیین زمان جهش در داده‌ها از آزمون روند من-کندال (Man, 1949; Kendall, 1979) و آزمون جهش پتیت (Pettie 1979) استفاده شد.

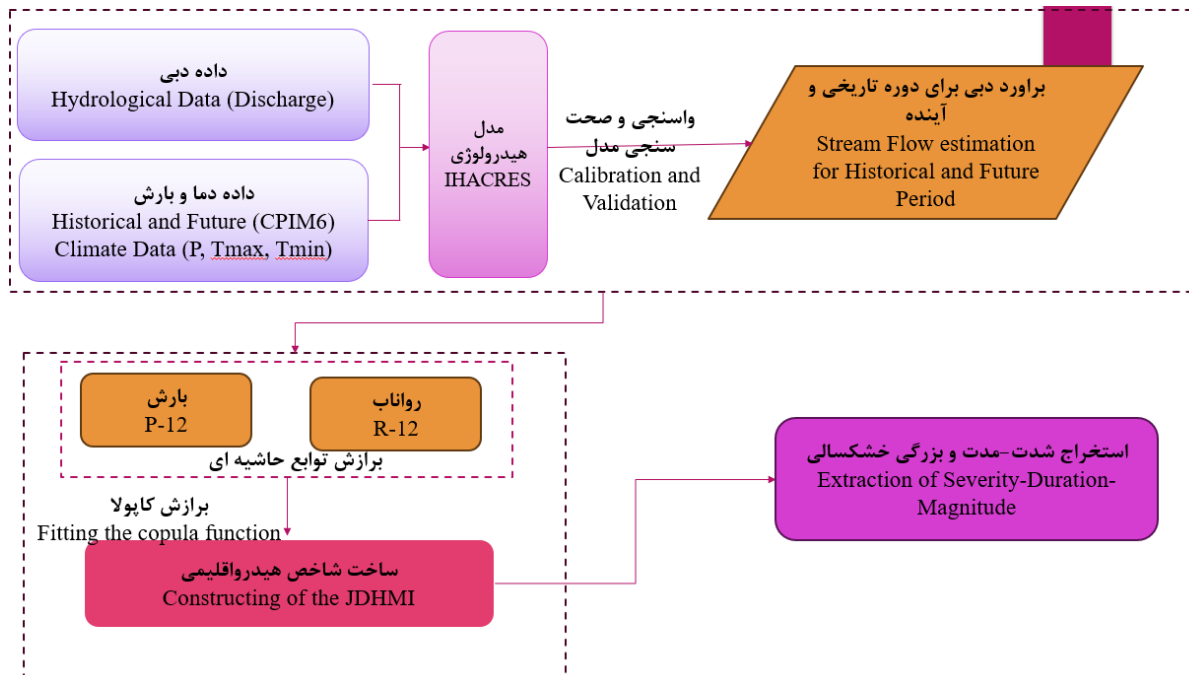
شاخص خشکسالی چندمتغیره JDHMI : Join Drought Hydro-meteorological Index

JDHMI یک شاخص چندبعدی کمبود آب مبتنی بر اصول احتمالات است. این شاخص نه تنها توانایی انعکاس آغاز رویدادهای خشکسالی و توصیف خشکسالی‌های بلندمدت را دارد؛ بلکه امکان ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را به‌صورت هم‌زمان میسر می‌سازد. یکی از فرایندهای جامع آماری ایجاد توزیع توأم چندگانه از طریق مفصل‌ها می‌باشد که بروی توابع توزیع حاشیه‌ای متغیرهای SPI و SRI در مقیاس زمانی موردنظر صورت می‌پذیرد. حاصل جمع مقادیر بارش طی ۱۲ ماه گذشته است. ازدری و همکاران (Azhdari et al., 2020) این شاخص را با استفاده از تابع توزیع مفصل‌ها مبتنی بر اصول احتمالات برای ارائه توصیف علمی از وضعیت کلی خشکسالی هیدرواقلمی بیان کردند.

شاخص خشکسالی هیدرو-هواشناسی ترکیبی (JDHMI) طی یک فرایند پیوسته چهارمرحله‌ای و بر مبنای اصول احتمالات و توابع کاپولا توسعه می‌یابد. در گام اول، حاشیه‌های بارش $(P-12)$ و رواناب $(R-12)$ به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شوند. در گام دوم، این مقادیر به توابع توزیع تجمعی (CDF) تبدیل شده و به متغیرهای یکنواخت $u_1 = F_1(R-12)$ و $u_2 = F_2(P-12)$ در بازه $[0, 1]$ تبدیل می‌گردند. در گام سوم که هسته اصلی تشکیل شاخص ترکیبی محسوب می‌شود، وابستگی بین دو متغیر از طریق توابع کاپولا مدل‌سازی شده و تابع توزیع تجمعی توأم $K_c = C(u_1, u_2)$ محاسبه می‌گردد. در نهایت و در گام چهارم (مطابق رابطه ۷)، احتمال توأم حاصل از کاپولا (K_c) از طریق تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد (Φ^{-1}) به شاخص نهایی JDHMI تبدیل می‌شود. نکته کلیدی این است که ماهیت ترکیبی شاخص در گام سوم و از طریق مدل‌سازی وابستگی با کاپولا شکل می‌گیرد، رابطه ۷ تنها نقش تبدیل مقیاس نهایی را ایفا می‌کند. همچنین برای مقایسه شاخص دومتغیره جدید، شاخص‌های تک‌متغیره SPI-12 و SRI-12 نیز برآورد شد.

$$JDHMI = \Phi^{-1} K_c \quad (11)$$

مقدار K_c که در بازه $[0, 1]$ قرار دارد، نشان‌دهنده احتمال توأم وقوع شرایط خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی است. تبدیل این مقدار به متغیر نرمال استاندارد از طریق Φ^{-1} باعث می‌شود شاخص نهایی در مقیاس استاندارد و قابل مقایسه با سایر شاخص‌های خشکسالی قرار گیرد.



شکل ۲. روندنمای تحقیق

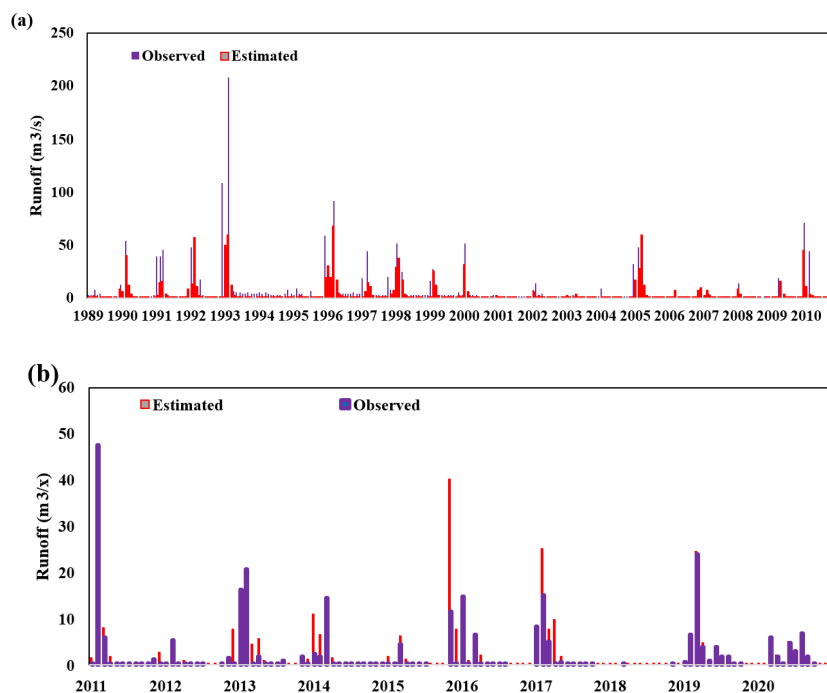
Fig 2. Flowchart of the methodology

گردید. پس از اطمینان از همگنی داده‌ها از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۰ برای دوره‌ی واسنجی و از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ برای دوره‌ی صحت‌سنجی انتخاب شد. شکل ۳ نتایج حاصل از دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل و جدول ۲ و ۳ نتایج حاصل از کالیبره کردن پارامترهای مدل را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

مدل‌سازی بارش - رواناب با نرم‌افزار IHACRES

داده‌های ورودی به مدل IHACRES شامل دبی ماهانه، بارش ماهانه و دمای میانگین از سال آبی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۰ می‌باشد. ایستگاه هیدرومتری برنطین میناب برای مدل‌سازی انتخاب



شکل ۳. دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دوره‌ی واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) با استفاده از مدل IHACRES

Fig 3. Observed and simulated discharge rates during calibration(a) and validation (b) periods using IHACRES

جدول ۲ آورده شده است. بر اساس جدول ارائه شده، نتایج مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHACRES برای دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۹ حاکی از عملکرد بسیار مطلوب مدل است. در مرحله واسنجی، ضریب تعیین $0/85$ و شاخص نش-ساتکلیف $0/79$ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت و تطابق بالا بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. خطای مربعات میانگین نیز $0/48$ محاسبه شد که تأیید دیگری بر دقت مدل در دوره آموزش است. در مرحله صحت‌سنجی که عملکرد مدل با داده‌های مستقل ارزیابی می‌شود، ضریب تعیین به مقدار بسیار خوب $0/83$ و شاخص نش-ساتکلیف حتی به $0/81$ بهبود یافته است.

ارزیابی نتایج شبیه‌سازی پیوسته جریان در مدل طبق معیارهای آماری می‌باشد. با توجه به ساختار مدل و ماهیت مسئله واسنجی، از الگوریتم بهینه‌سازی سراسری و مشتق‌ناپذیر الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شد. تابع هدف در این فرایند، کمینه‌سازی خطای مربعات میانگین (MSE) است که مقدار نهایی آن در دوره واسنجی $0/48$ به دست آمد. انتخاب این ترکیب الگوریتم ژنتیک و MSE منجر به دستیابی به عملکردی قوی و قابل اطمینان در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی شده است. برای تبدیل بارش مؤثر به رواناب (بخش خطی) نیاز به سه پارامتر α ، β و τ می‌باشد و α و β به ترتیب ثابت زمانی جریان سریع و ثابت زمانی جریان آهسته می‌باشد که مقدار آن‌ها در

جدول ۲. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی پیوسته جریان با کمک IHACRE

Table 2. Evaluation of continuous flow simulation results using IHACRES

| Parameter (پارامتر) | Value (مقدار) | Typical Bounds & Explanation (حدود معمول و توضیح) |
|---|---------------|---|
| α s – Slow flow decay constant (ثابت زمانی (جریان آهسته) | -0.58 | Usually negative because it represents the decay rate of slow flow. Typical range: $(-\infty, 0)$ |
| β s – Slow flow shape parameter (پارامتر (شکل‌دهی جریان آهسته) | 0.421 | Can be positive or negative. Typical range: $(-\infty, +\infty)$, often positive |
| β q – Quick flow shape parameter (پارامتر (شکل‌دهی جریان سریع) | -0.02 | Can be positive or negative. Typical range: $(-\infty, +\infty)$, often positive |
| τ s – Time constant of slow flow (ثابت (زمانی جریان آهسته) | 1.861 | Must be positive. Typical range: $(0, +\infty)$. Usually in hours or days |
| τ q – Time constant of quick flow (ثابت (زمانی جریان سریع) | 1.015 | Must be positive. Typical range: $(0, +\infty)$. Usually in hours or days |
| Vs – Volume or contribution of slow reservoir (حجم یا سهم مخزن آهسته) | -0.02 | Can be positive or negative. Typical range: $(-\infty, +\infty)$ |

جدول ۳. نتایج واسنجی مدل IHACRES در طول دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۹.

Table 3. The calibration results of IHACRES model during 1989-2010.

| شاخص | واسنجی (Calibration) | | | صحت‌سنجی (Validation) | | |
|-------------------|----------------------|------|----------------|-----------------------|------|----------------|
| | NSE | RMSE | R ² | NSE | RMSE | R ² |
| Index Coefficient | 0.79 | 0.48 | 0.85 | 0.81 | 0.52 | 0.83 |
| ضریب | | | | | | |

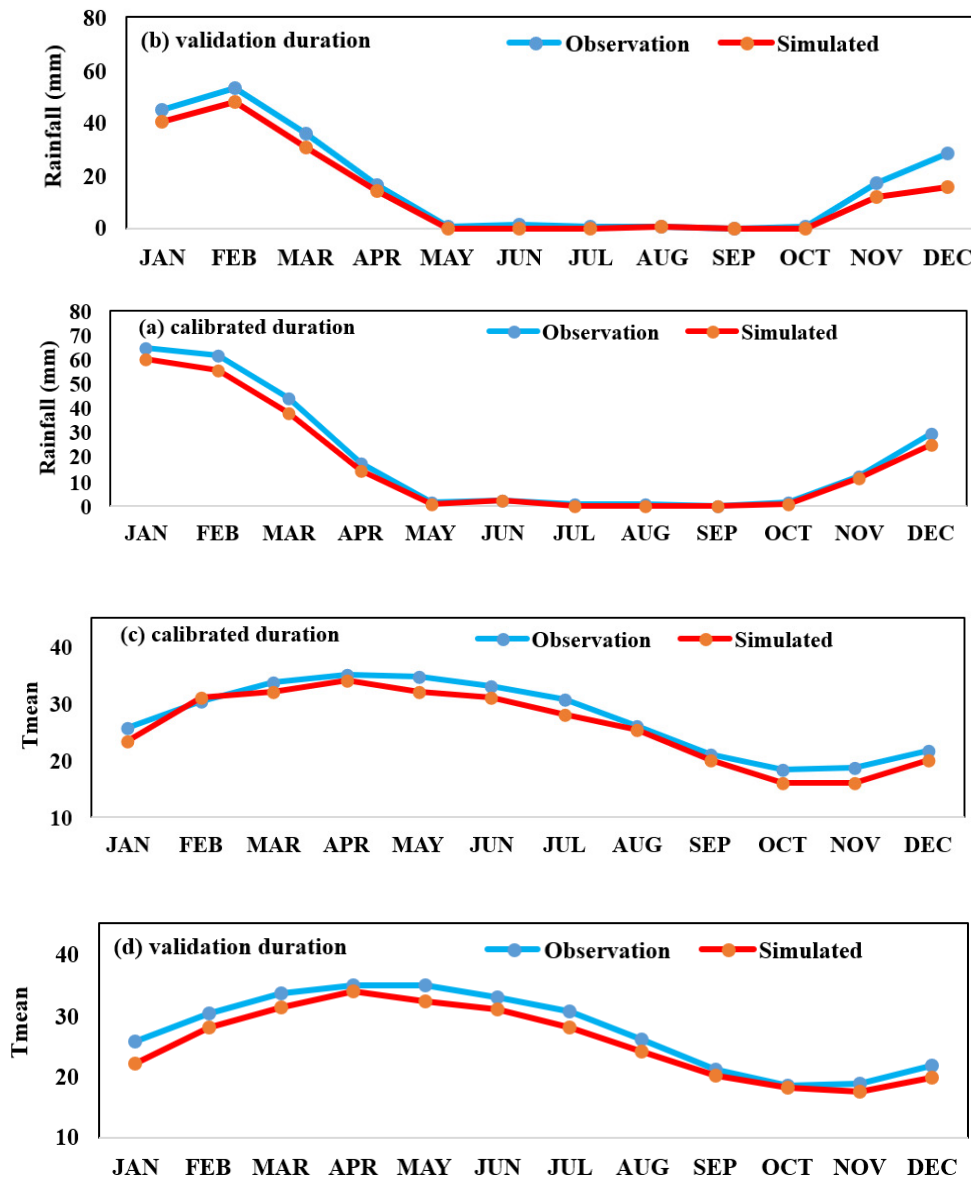
می‌باشند. نتایج مقادیر متوسط ماهانه بارش و دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه میناب توضیح و حدود معمول (Typical Bounds & Explanation) (NCEP) و مدل گردش عمومی جو (CanESM2) ارائه گردید (شکل ۴). نتایج ارزیابی مدل‌های NCEP و CanESM2 در مراحل

واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG در برآورد بارش و دما

نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها مبتنی بر آماره‌های مربوطه (جدول ۴)، بیانگر این است که NCEP و مدل تغییر اقلیم در برآورد میزان بارش دارای کارایی و دقت نسبتاً خوبی

پایداری، ضریب همبستگی ۰.۸۳ برای بارش و ۰.۸۳ برای دما را نشان داد. از سوی دیگر، مدل CanESM2 در دوره صحت‌سنجی (۱۹۸۵-۲۰۰۵) با ضریب همبستگی بالاتر ۰/۹۶ برای بارش و ۰/۹۱ برای دما و مقادیر خطای کمتر RMSE بارش: ۰/۰۹ و دما: ۱/۵۱، عملکرد برتری را نسبت به مدل NCEP کرد که حاکی از قابلیت اطمینان بیشتر این مدل در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی است.

واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که هر دو مدل در شبیه‌سازی پارامترهای بارش و دمای میانگین از دقت قابل قبولی برخوردارند. مدل NCEP در دوره واسنجی (۲۰۰۰-۱۹۸۵) برای بارش با ضریب همبستگی ۰/۸۳ و خطای RMSE برابر ۲/۸۹ و برای دما با ضریب همبستگی ۰/۸۳۱ و خطای RMSE معادل ۱.۸۷ عملکرد مطلوبی داشت. در مرحله صحت‌سنجی (۲۰۰۰-۲۰۰۵) نیز این مدل با حفظ



شکل ۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG: الف: دوره واسنجی بارش، ب: دوره صحت‌سنجی بارش، ث: دوره واسنجی دما، د: دوره صحت‌سنجی دما در ایستگاه برنطین

Fig 4. Calibration and validation of the LARS-WG model, a: Precipitation calibration period, b: Precipitation validation period, c: Temperature calibration period, d: Temperature validation period at the Berentin Station

جدول ۴. شاخص‌های ارزیابی مدل پیش‌بینی کننده NCEP و CanESM2 در مرحله واسنجی و صحت سنجی

Table 4. Evaluation indices of the NCEP and the CanESM2 predictor models in the calibration and validation stages

| میانگین خطای مطلق (MAE) | میانگین مربعات ریشه خطا (RMSE) | ضریب همبستگی (R ²) | متغیر (Variable) | مدل/دوره (Model/Durati on) | مدل‌سازی (Simulation) (n) |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0.83 | 2.89 | 0.4 | بارش (Rainfall) | NCEP | واسنجی (Calibratio) (n) |
| 0.831 | 1.87 | 0.57 | دما (Tmean) | ۲۰۰۰-۱۹۸۵ | |
| 0.83 | 1.67 | 1 | بارش (Rainfall) | NCEP | صحت‌سنجی (Validatio) (n) |
| 0.83 | 0.83 | 0.156 | دما (Tmean) | ۲۰۰۵-۲۰۰۰ | |
| 0.96 | 0.09 | 1.34 | بارش (Rainfall) | CANESM2 | صحت‌سنجی (Validatio) (n) |
| 0.91 | 1.51 | 0.38 | دما (Tmean) | 1985-2005 | |

تغییرات رواناب (شکل ۵ ث) عمدتاً از الگوی تغییرات بارش تبعیت می‌کند. در ماه‌هایی که کاهش بارش محسوس است (بویژه پاییز و زمستان)، رواناب نیز کاهش چشمگیری نشان می‌دهد. تنها در ماه سپتامبر تحت تمام سناریوها افزایش رواناب مشاهده می‌شود که همزمان با افزایش جزئی بارش در این ماه است. کاهش رواناب در ماه‌های نوامبر و دسامبر تحت سناریوی SSP3-7.5 بسیار قابل توجه است که با کاهش شدید بارش در این ماه‌ها همخوانی دارد. شکل ۶ تغییرات بارش و رواناب را در دوره‌ی آتی با سناریوهای مورد بررسی نشان می‌دهد.

این پدیده ناشی از پاسخ غیرخطی سیستم هیدرولوژیک به استرس‌های اقلیمی است. در سناریو SSP5-8.5، افزایش شدید دما منجر به خشکی شدید خاک و کاهش پوشش گیاهی می‌شود که دو پیامد کلیدی دارد: اولاً، ظرفیت نفوذپذیری خاک به طور محسوسی کاهش یافته و سهم بیشتری از بارش به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. ثانیاً، تبخیر-تعرق از سطح خشکیده خاک و پوشش گیاهی ضعیف شده به حداقل می‌رسد. این دو مکانیسم هم‌زمان باعث افزایش چشمگیر ضریب رواناب می‌شوند (Tchiguirinskaia et al., 2006). بنابراین در ماه سپتامبر، حتی با عدم افزایش معنادار بارش، به دلیل اشباع هیدرولوژیکی خاک از طریق رواناب سطحی و کاهش تبخیر-تعرق، رواناب به شدت افزایش می‌یابد. تفاوت رفتار سناریوها نیز ناشی از غالب شدن مکانیسم‌های

ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم دما، بارش و رواناب در دوره آتی

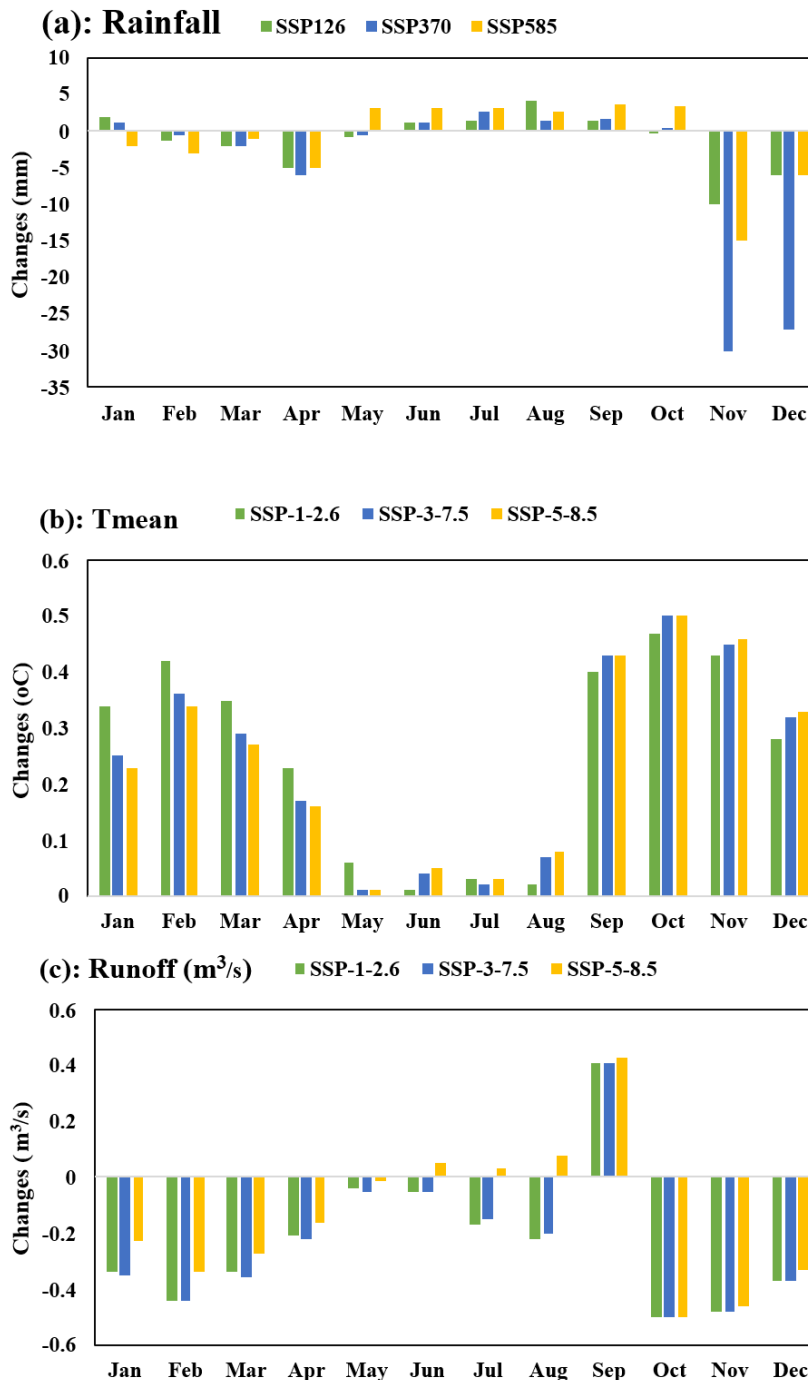
تأثیر تغییر اقلیم در سناریوهای مختلف بر متغیرهای بارش، دما و سپس با مدل‌سازی رواناب با مدل IHACRES در شکل ۵ نشان داده شده است. تحلیل داده‌های تغییرات بارش (شکل ۵ الف) نشان می‌دهد که در بیشتر ماه‌های سال تحت تمام سناریوها کاهش بارش رخ داده است. این کاهش در ماه‌های پاییز (بویژه نوامبر) و زمستان (دسامبر و ژانویه) بسیار محسوس است. در سناریوی SSP3-7.5، کاهش بارش در نوامبر به مقدار قابل توجه ۳۰- میلی‌متر می‌رسد که نشان‌دهنده تشدید شرایط خشکی در این ماه است.

در مقابل، در ماه‌های تابستان (ژوئن تا سپتامبر) افزایش بارش در تمام سناریوها مشاهده می‌شود که این افزایش در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سایر سناریوها بارزتر است. همچنین در بهار (آوریل و مه) کاهش بارش ادامه دارد، اگرچه این کاهش نسبت به ماه‌های پاییز کمتر است.

دمای هوا (شکل ۵ ب) در تمام ماه‌های سال تحت تمام سناریوها افزایش می‌یابد، اما الگوی افزایش در ماه‌های مختلف متفاوت است. بیشترین افزایش دما در ماه‌های سرد سال (اکتبر تا فوریه) و کمترین افزایش در ماه‌های گرم (مه تا آگوست) رخ می‌دهد. سناریوی SSP5-8.5 که نمایانگر مسیر انتشار گازهای گلخانه‌ای با سطوح بالاست، در اکثر ماه‌ها بیشترین افزایش دما را نشان می‌دهد.

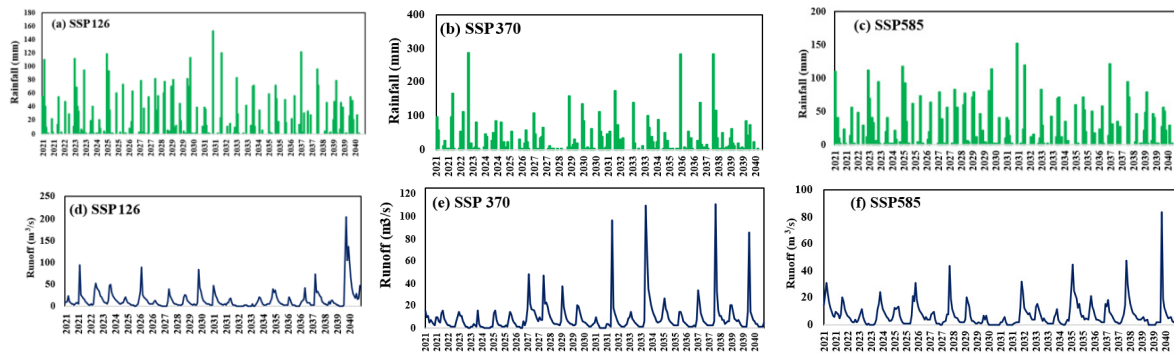
کاهش نفوذ و تبخیر-تعرق به عامل مسلط تبدیل می‌شود (Milly et al., 2005). این تغییر پارادایم باعث می‌شود در برخی ماه‌ها، افزایش راندمان تولید رواناب بر کاهش حجم بارش غلبه کند و منجر به افزایش خالص دبی شود.

مختلف در سطوح مختلف تغییر اقلیم است. در سناریوهای با انتشار پایین‌تر SSP-2.6 و SSP-3-7.5، کاهش بارش عامل مسلط در تعیین رواناب باقی می‌ماند. اما در سناریو بدبینانه (SSP-5-8.5)، افزایش دما از آستانه بحرانی عبور کرده و با ایجاد شرایط خشکسالی هیدرولوژیک طولانی‌مدت، مکانیسم



شکل ۵. نرخ تغییرات میانگین ماهانه بارش (الف)، دما (ب) و رواناب (ث) برای هر کدام از سناریوهای تغییر اقلیم در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در مقایسه با دوره پایه

Fig 5. Average monthly changes in rainfall (a), temperature (b), and runoff (c) for each of the scenarios in the future period of 2021-2040 compared to the base period.



شکل ۶. تغییرات بارش و رواناب (a: SSP126; b: SSP370; c: SSP585) و رواناب (d: SSP126; e: SSP370; f: SSP585) در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ تحت سناریوهای آینده

Fig 6. Changes in precipitation (a: SSP126; b: SSP370; c: SSP585) and runoff (d: SSP126; e: SSP370; f: SSP585) for the 2021-2040 period under the future scenarios.

از تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر ویژگی‌های آماری این متغیرها است. به‌طور کلی، این تحلیل گویای قابلیت بالای توابع آماری منتخب در شبیه‌سازی رفتار متغیرهای مورد مطالعه در شرایط اقلیمی گذشته و آینده می‌باشد.

بر اساس نتایج جدول ۶، توابع مفصل برازش‌شده بر روی متغیرهای بار و رواناب در مقیاس ۱۲ ماهه در دوره‌های مختلف، از نظر آماری برازش مناسبی داشته‌اند که این امر با مقادیر p -value محاسبه‌شده قابل استناد است. به‌طور مشخص، مقدار p -value در سناریو SSP585 که برابر ۰/۹۸ است، نشان می‌دهد که مفصل فرانک با پارامتر ۱/۵۸ به‌طور بسیار مطلوبی وابستگی بین این شاخص‌ها را مدل می‌کند. در مقابل، در سناریوهای SSP126 و SSP370 نیز به ترتیب از مفصل نرمال با پارامتر ۰/۱۱ و مفصل t با پارامتر ۰/۵۵ استفاده شده که اگرچه p -value کمتری (به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۱۴) دارند، در سطح قابل قبولی قرار می‌گیرند. در دوره تاریخی نیز مفصل گامبل با پارامتر ۱/۱۳ و p -value معادل ۰/۳۸۹ برازش خوبی را نشان می‌دهد. این نتایج به‌طور کلی حاکی از آن است که ساختار وابستگی بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی تحت سناریوهای مختلف تغییر کرده و انتخاب توابع مفصل متفاوت را طلبیده است که این موضوع به‌ویژه در سناریو SSP585 با برازش بسیار قوی مفصل فرانک به‌وضوح مشاهده می‌شود. شکل ۷، نمودار سه‌بعدی کاپولا را بر مقادیر بارش و رواناب نشان می‌دهد. براساس نتایج، در دوره تاریخی تابع کاپولای گامبل، در SSP126 تابع نرمال، در SSP370 تابع تی و در SSP585 تابع فرانک بهترین برازش را بر متغیرهای بارش و رواناب داشتند.

برازش توابع چگالی حاشیه‌ای و توابع مفصل بر متغیرهای بارش و رواناب در دوره تاریخی و آینده کاربرد معنادار توابع کاپولا منوط به وجود وابستگی بین متغیرهای مورد مطالعه است. به‌منظور تأیید این شرط اساسی، وابستگی بین متغیرهای بارش و رواناب در دوره پایه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، از ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال استفاده شد که معیاری مناسب برای سنجش وابستگی یکنواخت و غیرخطی بین متغیرها بوده و پایه ریاضی مستقیمی برای توابع کاپولا فراهم می‌کند. نتایج محاسبات، وجود یک وابستگی مثبت و معنی‌دار را بین بارش و رواناب با ضریب کندال تاو برابر با ۰/۸۷ در سطح اعتماد ۹۵٪ در دوره پایه نشان داد. این نتیجه، شرط لازم برای مدل‌سازی توأم این دو متغیر با استفاده از توابع کاپولا را برقرار می‌سازد.

جدول ۵، آزمون نکوئی برازش توابع حاشیه‌ای منتخب را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از برازش توابع توزیع، می‌توان دریافت که توابع گاما و توابع پیشرفته‌تری مانند توزیع تعمیم‌یافته ارزش حدی (GEV) و توزیع لوگ-گاما به‌خوبی قادر به مدل‌سازی متغیرهای هیدروکلیماتولوژی در دوره‌های تاریخی و سناریوهای آینده هستند. مقادیر p -value به‌دست‌آمده که عمدتاً بالاتر از ۰/۰۵ هستند، نشان از برازش مطلوب این توابع دارند. در سناریوهای مختلف آینده (SSP126، SSP370، SSP585)، توابع گاما همچنان نقش محوری در مدل‌سازی بارش و رواناب ایفا می‌کنند، درحالی که شاخص‌های خشکسالی تحت این سناریوها با تغییرات در پارامترهای توابع همراه بوده که احتمالاً بازتابی

جدول ۵. آزمون نکوئی برازش و پارامترهای توابع برازش شده بر متغیرهای مورد بررسی

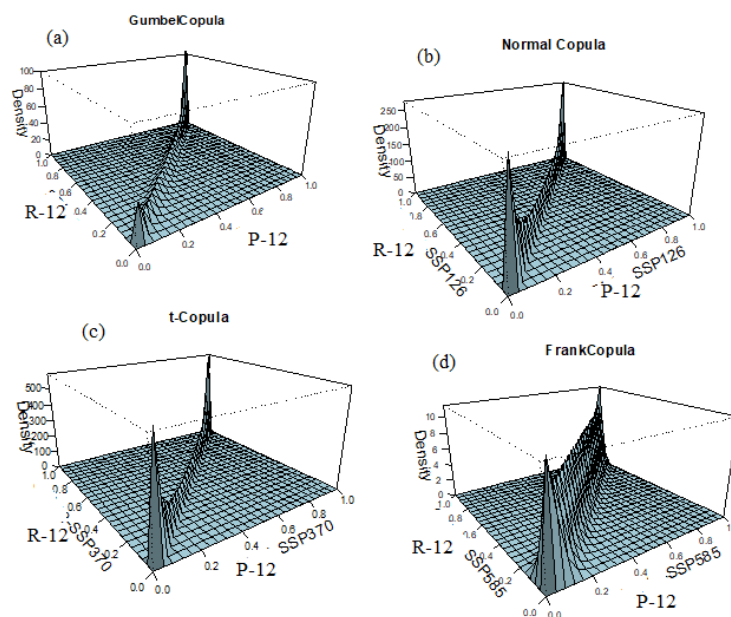
Table 5. Goodness of fit test and parameters of the distribution function on the studied variables

| دوره/سناریو Duration/Scenarios | متغیر (Variable) | تابع (Function) | پارامتر (Parameter) | K-S | P- value | AIC | BIC |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------|---|-------|-------------|--------|--------|
| تاریخی Historical | بارش (Rainfall) | Gamma | $\alpha=0.3625; \beta=0.85$ | 0.28 | 0.63 | 123.02 | 119.18 |
| | رواناب (Runoff) | Gamma | $\alpha=0.3819; \beta=0.06$ | 0.29 | 0.49 | 145.58 | 132.14 |
| SSP126 | بارش (Rainfall) | GEV | $\mu=0.239, \theta=13.2, \alpha=23.02$ | 0.077 | 0.39 | 129.65 | 121.08 |
| | رواناب (Runoff) | Log-Gamma (3) | $\mu=1.329, \theta=-3.34, \alpha=4.251$ | 0.069 | 0.589 | 149.25 | 141.20 |
| SSP370 | بارش (Rainfall) | Gamma | $\alpha=0.11; \beta=0.004$ | 0.05 | 0.19 | 128.69 | 121.12 |
| | رواناب (Runoff) | Gamma | $\alpha=0.81; \beta=0.07$ | 0.06 | 0.52 | 151.01 | 149.15 |
| SSP585 | بارش (Rainfall) | Gamma | $\alpha=0.47; \beta=0.01$ | 0.09 | 0.35 | 132.08 | 123.02 |
| | رواناب (Runoff) | Gamma | $\alpha=0.074; \beta=0.06$ | 0.08 | 0.24 | 142.14 | 139.90 |

جدول ۶. آزمون نکوئی برازش و پارامترهای توابع مفصل پارامتریک برازش شده بر متغیرهای مورد بررسی

Table 6. Goodness of fit test and parameters of copula function on studied variables

| متغیر (Variable) | دوره/سناریو Duration/Scenario | تابع (Function) | پارامتر (Parameter) | AIC | Sn | P- value |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------------|--------|------|-------------|
| بارش/رواناب ۱۲ P-12/R-12 | تاریخی Historical | Gumbel تکمیل | 1.13 | 236.2 | 0.06 | 0.389 |
| | سناریو SSP126 | نرمال Normal | 0.11 | 321.52 | 0.05 | 0.24 |
| | سناریو SSP370 | t تی کاپولا | 0.55 | 366.87 | 0.09 | 0.14 |
| | سناریو SSP585 | فرانک Frank | 1.58 | 389.23 | 0.03 | 0.98 |



شکل ۷. گراف نکوئی برازش کاپولا بر متغیرهای بارش و رواناب در سناریو تاریخی (الف)، SSP126 (ب)، SSP370 (ج)، و SSP585 (د)
 Fig 7. Copula goodness of fit graph for the precipitation and rainfall variables in the historical scenario (a), SSP126 (b), SSP370 (c), and SSP585 (d)

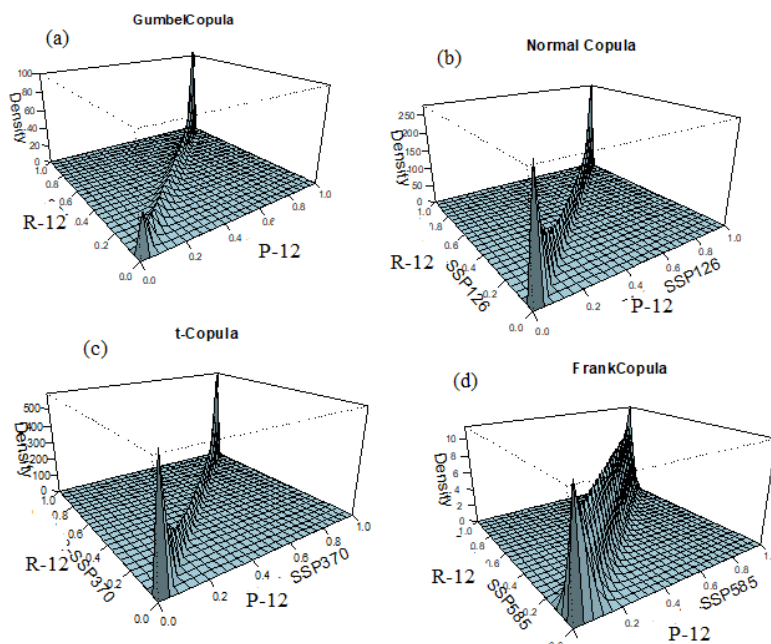
تحقیقات اژدری و همکاران (Azhdari et al., 2023) نشان داده که استفاده از کاپولا در ترکیب شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، دقت شناسایی خشکسالی‌های مرکب را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، وو و همکاران (Wu et al., 2021) تأکید کرده‌اند که این روش با ترکیب هوشمندانه چندین شاخص و حفظ ساختار وابستگی بین آن‌ها، از خطا در تخمین شدت و تداوم خشکسالی جلوگیری می‌کند. مطالعه پرواز و همکاران (Parvaz et al., 2025) نیز نشان داده که شاخص‌های ترکیبی مبتنی بر کاپولا در مقایسه با شاخص‌های تک‌بعدی مانند SPI یا SRI که ممکن است به دلیل در نظر نگرفتن هم‌زمان ابعاد مختلف خشکسالی، شرایط کاذب گزارش دهند، تصویر واقع‌بینانه‌تر و جامع‌تری از خطر خشکسالی ارائه می‌دهند. این مزایا از جمله پوشش هم‌زمان ابعاد مختلف خشکسالی، کاهش خطاهای شناسایی، و قابلیت اطمینان بیشتر در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، باعث شده که جامعه علمی این رویکرد را به دلیل جامعیت، دقت تحلیلی و سازگاری با شرایط غیرخطی سیستم‌های هیدرواقليمی به طور گسترده تأیید کند.

به همین ترتیب برای سناریوهای آینده نیز JDHMI از برازش شاخص‌های تک‌متغیره خشکسالی هواشناسی (SPI-12) و هیدرولوژیکی (SRI-12) به دست آمد و در شکل‌های ۷ (ب) تا (د) ارائه شده است.

مقایسه شاخص JDHMI در دوره تاریخی و سناریوهای آینده

شکل ۸-الف، تغییرات شاخص‌های خشکسالی تک‌متغیره (SRI-12 و SPI-12) و شاخص دومتغیره (JDHMI) را در دوره آماری مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص ترکیبی JDHMI که با استفاده از توابع کاپولا توسعه یافته، از نوسانات کم‌تری برخوردار است و روند تغییرات پایدارتری را نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره نشان می‌دهد. این پایداری ناشی از تلفیق هم‌زمان اطلاعات دو شاخص هواشناسی و هیدرولوژیکی است که سبب می‌شود اثرات ناگهانی و گذرا در یکی از متغیرها، تأثیر کم‌تری بر شاخص نهایی داشته باشد. همچنین، شاخص ترکیبی با در نظرگیری وابستگی بین متغیرها، قادر است خشکسالی‌های مرکب را که هم‌زمان هم در بارش و هم در جریان‌های سطحی رخ می‌دهند، با دقت و قابلیت اطمینان بیشتری شناسایی نماید. در نتیجه، این شاخص به عنوان ابزاری جامع‌تر و کارآمدتر برای پایش و مدیریت خشکسالی در شرایط عدم قطعیت و تغییرات محیطی توصیه می‌شود.

مطالعات متعدد نشان می‌دهند که شاخص‌های یکپارچه خشکسالی هیدرواقليمی مبتنی بر مدل‌های کاپولا، با مدل‌سازی کارآمد روابط غیرخطی و وابستگی‌های پیچیده بین متغیرهای مؤثر در خشکسالی، برتری قابل توجهی نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره سنتی دارند. به‌عنوان مثال،



شکل ۷. شاخص‌های SPI-12 و SRI-12 و JDHMI در سناریوهای الف: تاریخی؛ ب: SSP126؛ ث: SSP370 و SSP585
Fig 7. SPI-12, SRI-12, and JHDMI in historical (a), (b): SSP126, (c): SSP370 and (d): SSP585 scenarios

متغیرهای خشکسالی تحت سناریوهای تغییر اقلیم

جدول ۷ ویژگی‌های خشکسالی را در دوره تاریخی و سناریوهای آینده در حوضه سد استقلال میناب نشان می‌دهد. در دوره تاریخی، منطقه مورد مطالعه ۸ اپیزود خشکسالی را تجربه کرده است. این تعداد در سناریوهای آتی با تغییراتی همراه است، به طوری که در سناریوی SSP126 و SSP370 به ۵ اپیزود کاهش می‌یابد. این کاهش نشان‌دهنده تمرکز خشکسالی در دوره‌های مشخص است. با این حال، در بدبینانه‌ترین سناریو، یعنی SSP585، تعداد اپیزودهای خشکسالی به طور چشمگیری افزایش یافته و به ۱۳ دوره می‌رسد. در واقع افزایش تعداد دوره‌های خشکسالی سبب تمرکز کمتر شدت در زمان تداوم‌های کوتاه‌تر می‌شود.

از نظر شدت خشکسالی، میانگین شدت در دوره تاریخی ۱۸/۲۹ بوده است. این شاخص در سناریوی SSP126 با کاهش جزئی به ۱۷/۵۳ می‌رسد، اما در سناریوی SSP370 به میزان قابل توجهی افزایش یافته و به ۲۲/۱۲ می‌رسد. در مقابل، سناریوی SSP585 با میانگین شدت ۷/۰۱، کاهش محسوسی را نشان می‌دهد. با نگاه به حداکثر شدت، رقم ۷۱/۸۹ در دوره تاریخی بیانگر وقوع خشکسالی‌های بسیار شدید در گذشته است که این مقدار در تمامی سناریوهای آینده کاهش می‌یابد و در سناریوی (SSP370) به ۶۸ می‌رسد. مقایسه تداوم خشکسالی‌ها نشان می‌دهد که میانگین مدت خشکسالی در دوره تاریخی ۲۵ ماه بوده است. این مدت در سناریوهای SSP126 و SSP370 تقریباً مشابه با گذشته باقی می‌ماند (۲۶ و ۲۴/۸ ماه)، اما در سناریوی SSP585 به طور چشمگیری کاهش یافته و به ۸ ماه می‌رسد. این الگو در مورد حداکثر تداوم نیز صادق است؛ دوره تاریخی با یک خشکسالی ۸۳ ماهه (نزدیک به ۷ سال) مواجه بوده، در حالی که این مدت در سناریوهای آینده، به‌ویژه در SSP585 با ۱۸ ماه، بسیار کوتاه‌تر شده است.

شاخص بزرگی خشکسالی که حاصل تقسیم شدت بر تداوم است، در دوره تاریخی میانگینی برابر ۰/۴۴ داشته است. این شاخص در تمامی سناریوهای آینده افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش کلی محتوای خشکسالی است. این افزایش از ۰/۶۱ در SSP126 به ۰/۷۰ در SSP370 و ۰/۶۶ در SSP585 می‌رسد. نکته بسیار قابل توجه در مورد حداکثر بزرگی خشکسالی است که از ۰/۸۷ در دوره تاریخی، در سناریو SSP585 به ۱/۷۹ افزایش می‌یابد.

بر پایه یافته‌های این پژوهش، الگوی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه تحت تغییرات اقلیمی آینده، تغییرات محسوسی را تجربه خواهد کرد. مقایسه داده‌های دوره تاریخی با سناریوهای مختلف انتشار (SSP126، SSP370 و SSP585) نشان می‌دهد که اگرچه برخی از مشخصه‌های خشکسالی مانند میانگین تداوم و شدت در برخی سناریوها کاهش می‌یابد، اما شاخص‌های کلیدی حاکی از تشدید کلی تهدید خشکسالی هستند. مهم‌ترین تغییر، گذار از الگوی خشکسالی‌های تاریخی با تعداد کم اما بسیار طولانی و شدید (مانند خشکسالی با تداوم ۸۳ ماهه) به سمت الگویی با رویدادهای بیشتر و کوتاه‌مدت‌تر در آینده است. این تغییر به‌وضوح در سناریوی SSP585 مشهود است، جایی که تعداد اپیزودهای خشکسالی از ۸ به ۱۳ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش سختی خشکسالی از طریق افزایش شدت و کاهش زمان تداوم است. افزایش چشمگیر بزرگی خشکسالی (به‌عنوان تلفیقی از شدت و تداوم) در تمامی سناریوهای آینده نسبت به دوره تاریخی، به‌ویژه مقدار حداکثری ۱/۷۹ در SSP585، هشداردهنده است. این چنین تغییری در الگو می‌تواند فشار مضاعفی بر منابع آب، اکوسیستم‌ها و استراتژی‌های مدیریت خشکسالی وارد آورد که عمدتاً برای مقابله با خشکسالی‌های طولانی‌مدت طراحی شده‌اند.

مطالعات عباس‌زاده و همکاران (Abbaszadeh et al., 2023) نیز بر افزایش تناوب و شدت دوره‌های خشک در حوضه میناب تحت تأثیر تغییر اقلیم تأکید داشتند. هوانگ و همکاران (Huang et al., 2025) در بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در رودخانه زرد اذعان داشتند، شدت خشکسالی‌ها در آینده تحت تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت.

شکل ۸، تکرار یا فراوانی انواع خشکسالی‌ها را در دوره تاریخی (مشاهداتی) و تحت سه سناریوی تغییر اقلیم آینده نشان می‌دهد. براساس نتایج، در دوره مشاهداتی، بیشترین فراوانی در دسته MOD (شرایط خشکسالی ملایم) و دسته خشکسالی ملایم (MD) قرار دارد و فراوانی کم در دسته SD (خشکسالی شدید) و کمترین فراوانی در دسته ED (خشکسالی بسیار شدید) قرار دارد و با افزایش شدت خشکسالی، فراوانی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. بر اساس سناریوی SSP126، پیش‌بینی می‌شود فراوانی خشکسالی ملایم (MOD) حدود ۳۶ درصد کاهش یابد. در مقابل، خشکسالی شدید (SD) ۳۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۷. ویژگی‌های خشکسالی هیدرواقليمی در دوره تاریخی و آینده

Table 7. Characteristics of the hydro-meteorological drought during historical and future periods

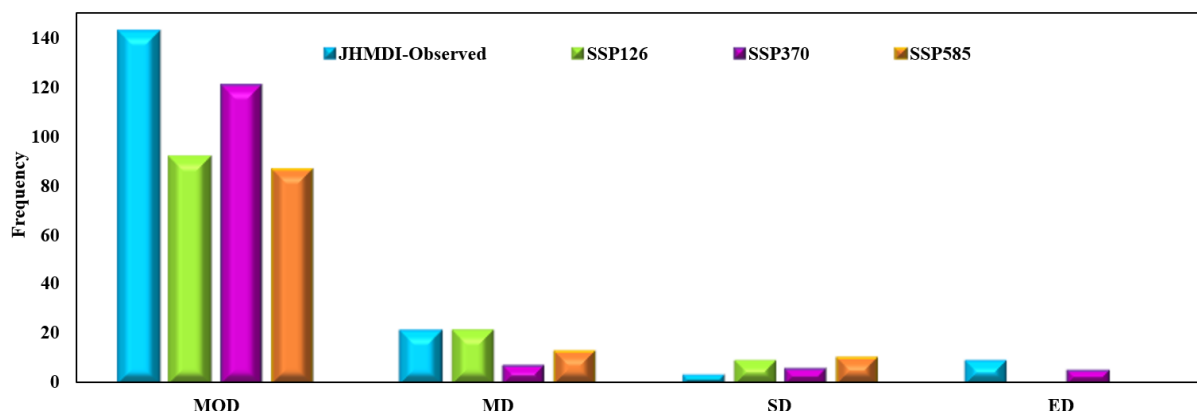
| SSP585 | SSP370 | SSP126 | تاریخی Historical | ویژگی Characteristics |
|--------|--------|--------|-------------------|------------------------------|
| 13 | 5 | 5 | 8 | Drought episode دوره خشکسالی |
| 7.01 | 22.12 | 17.53 | 18.29 | Mean S میانگین شدت خشکسالی |
| 8 | 24.8 | 26 | 25 | Mead D میانگین تداوم خشکسالی |
| 0.66 | 0.70 | 0.61 | 0.44 | Mean M میانگین بزرگی خشکسالی |
| 32.14 | 68.97 | 43.75 | 71.89 | Max S حداکثر شدت خشکسالی |
| 18 | 64 | 38 | 83 | Max D حداکثر تداوم خشکسالی |
| 1.79 | 1.08 | 1.15 | 0.87 | Max M حداکثر بزرگی خشکسالی |
| 0.16 | 0.97 | 6.07 | 0.16 | Min S حداقل شدت خشکسالی |
| 2.00 | 6.00 | 12.00 | 2.00 | Min D حداقل تداوم خشکسالی |
| 0.08 | 0.16 | 0.33 | 0.04 | Min M حداقل بزرگی خشکسالی |

سناریوهای با انتشار کمتر (SSP126) و بسیار بالا (SSP585)، پدیده خشکسالی بسیار شدید (ED) به‌طور کامل حذف می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در طبقه‌بندی شدت خشکسالی‌ها باشد. در مقابل، سناریوی میانه (SSP370) وضعیت بحرانی‌تری را برای خشکسالی بسیار شدید (ED) پیش‌بینی می‌کند که تا دو برابر افزایش می‌یابد. در مجموع، یافته‌ها هشدار می‌دهند که در آینده، حتی تحت خوش‌بینانه‌ترین سناریوها، منطقه مورد مطالعه با تهدید فزاینده‌ای از خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید مواجه خواهد بود. پلسیس و اسمیت (Plessis, and Smith, 2025) در جنوب آفریقا، دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 2025) در مالزی، پورحق وردی و همکاران (Pourhaghverdi et al., 2025) در جنوب ایران، محمدی و همکاران (۲۰۲۵) در خلیج فارس افزایش شدت خشکسالی در آینده را تحت سناریوهای انتشار تأیید می‌کنند.

نکته قابل توجه در این سناریو، حذف کامل پدیده خشکسالی بسیار شدید (ED) است که نشان از تغییر الگو به سمت وقوع کمتر خشکسالی‌های با شدت متوسط و خیلی شدید، اما افزایش چشمگیر خشکسالی‌های شدید دارد.

در سناریوی SSP370 (سناریوی میانه)، فراوانی خشکسالی ملایم (MOD) نسبت به دوره مشاهداتی ۴۶ درصد، خشکسالی متوسط (MD) ۶۶ درصد و خشکسالی خیلی شدید (ED) تا ۵۵ درصد کاهش و خشکسالی خیلی شدید تا دو برابر افزایش می‌یابد.

در سناریوی پرخطر SSP585 نیز کاهشی معادل ۵۴ درصد در خشکسالی ملایم (MOD) مشاهده می‌شود، درحالی‌که خشکسالی شدید (SD) ۱۸۰ درصد افزایش می‌یابد. مشابه سناریوی SSP126، در این سناریو نیز پدیده خشکسالی بسیار شدید (ED) کاملاً حذف می‌شود. به‌طور مشخص، در



شکل ۸. فراوانی خشکسالی هوا-هیدرولوژیکی در هر دسته کلاس توصیفی خشکسالی/ترسالی (MOD: خشکسالی ملایم؛ MD: خشکسالی متوسط؛ SD: خشکسالی شدید؛ ED: خشکسالی شدید) طی دوره تاریخی و سناریوهای اقلیمی مختلف

Fig 8. Frequency of the meteorological-hydrological drought in each descriptive drought category (MOD: Moderate Drought; MD: Mid Drought; SD: Severe Drought, ED: Extreme Drought) during the historical period and under different climate scenarios

متفاوت. سناریوی SSP370 با داشتن شدیدترین روند کاهش (۷/۷۵-) نسبت به دوره تاریخی، بحرانی‌ترین وضعیت را پیش‌بینی می‌کند، در حالی که سناریوی SSP126 با روند کاهش ۲.۷۱- کم‌شدت‌ترین روند را در بین سناریوهای آینده دارد. از نظر زمانی نیز نقطه جهش در سناریوهای آینده به طور متوسط به دهه ۲۰۳۰ منتقل شده است، به طوری که سناریوی SSP370 با جهش در ژوئن ۲۰۳۱ زودترین تغییر ناگهانی را تجربه خواهد کرد، در حالی که سناریوهای SSP126 و SSP585 جهش‌های نزدیک به هم در سال ۲۰۳۷ دارند. این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که سیستم اقلیمی منطقه در دهه‌های آینده نه تنها با تشدید روند خشکسالی هوا-هیدرولوژیکی ناشی از کمبود بارش- رواناب در حوضه، بلکه با تغییرات ناگهانی زودتری نسبت به دوره تاریخی روبرو خواهد شد که نیازمند اتخاذ راهبردهای مدیریتی پیش‌دستانه و برنامه‌ریزی تطبیقی برای کاهش پیامدهای منفی است.

روند خشکسالی هوا-هیدرولوژیکی تحت تغییر اقلیم
بر پایه نتایج جدول ۸، مقایسه روند و جهش شاخص JHMDI در سناریوهای آینده نسبت به دوره تاریخی نشان‌دهنده تغییرات چشمگیر و نگران‌کننده در سیستم هیدرو-اقلیمی منطقه است. در دوره تاریخی، شاخص JHMDI دارای روند کاهشی بسیار معنی‌دار با مقدار ۶.۲۸- بوده که نشان از تشدید تدریجی خشکسالی دارد، همچنین نقطه جهش آماری مشخص در ژانویه سال ۲۰۰۰ رخ داده است. به عقیده بسیاری از محققان نقطه عطف ورود به خشکسالی در ایران از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰ آغاز شده است (Pourhaghverdi et al., 2023; Javanmard et al., 2017; Bazrafshan et al., 2017; Bazrafshan et al., 2020). دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ نیز به‌عنوان دوره خشکسالی مستمر دهه‌ای معروف است (Doostan, 2015). در مقایسه با این دوره، همه سناریوهای آینده نیز روند کاهشی معنی‌داری را نشان می‌دهند، اما با شدت‌های

جدول ۸. روند تغییرات و جهش در JHMDI تحت سناریوهای اقلیمی

Table 8. Trend of changes and jump in JDHMI under the climatic scenarios

| آماره Statistics | تاریخی JHMDI-Historical | سناریو SSP126 | سناریو SSP370 | سناریو SSP585 |
|---------------------------|----------------------------|------------------|------------------|------------------|
| آماره کندال Z-Kendal | -6/28 ** | -2/71 ** | -7/75 ** | -3/403 ** |
| تست پتیت Pettit Test | 21328 ** | 6082 ** | 9010 ** | 4582 ** |
| تاریخ جهش Date of Jump | Jan 2000 | May 2037 | Jun 2031 | Feb 2037 |

*Significant in 95% level; ** Significant at 99% level

ابزاری پایدارتر و کارآمدتر برای پایش خشکسالی‌های مرکب اثبات شد و وابستگی متقابل بین کمبود بارش و رواناب را به‌خوبی نشان داد. نتایج این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که تغییر اقلیم، الگوی خشکسالی در حوضه آبخیز میناب را به شکل نگران‌کننده‌ای تغییر خواهد داد. درحالی‌که دوره تاریخی با خشکسالی‌های کمتر اما بسیار طولانی و شدید مشخص می‌شد، سناریوهای آینده به‌ویژه SSP585، گذار به سمت رویدادهای کوتاه‌مدت‌تر اما با تعدد بیشتر را نشان می‌دهند. نکته هشداردهنده، افزایش چشمگیر شاخص بزرگی خشکسالی (بیش از دوبرابر در SSP585) است که نشان‌دهنده تشدید کلی محتوای خشکسالی در آینده است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف توسعه شاخص هوا-هیدرولوژیکی در حوضه سد استقلال میناب توسعه‌یافته است. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های خشکسالی در حوضه آبخیز میناب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، تغییرات بحرانی را تجربه خواهد کرد. درحالی‌که دوره‌های تاریخی با خشکسالی‌های کمتر اما طولانی‌تر و شدیدتر مشخص می‌شد، سناریوهای آینده به‌ویژه مسیرهای انتشار بالایی مانند SSP585، گذار به سمت رویدادهای کوتاه‌مدت‌تر اما با تعدد بیشتر و افزایش کلی در بزرگی خشکسالی را پیش‌بینی می‌کنند. شاخص ترکیبی خشکسالی هیدرو-هواشناسی (JDHMI) که بر پایه توابع کاپولا توسعه یافت، در مقایسه با شاخص‌های تک‌متغیره،

- Study: Aleshtar Plain). *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(4), 71-86 (In Persia). <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6775.1043>
- Azhdari, Z., Bazrafshan, O., Shekari, M., & Zamani, H. (2020). Three-dimensional risk analysis of hydro-meteorological drought using multivariate nonlinear index: Z. Azhdari et al. *Theoretical & Applied Climatology*, 142(3). 1311-1327. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03365-3>
- Bazrafshan, O., Teimourri, F., Golami, H., Shekari, M., & Zamani, H. (2025). Application of the Vine Copula-Based Integrated Drought Index in Multivariate Risk Analysis. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(12), 97-120. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9917.1161>
- Bazrafshan, O., Mahmudzadeh, F., & Bazrafshan, J. (2017). Evaluation of temporal trends of the drought indices SPI and SPEI in the Southern Coast of Iran. *Desert Management*, 4(8), 54-69. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2017.24662>
- Bazrafshan, O., Shekari, M., Zamani, H., Dehghanpir, S., & Singh, V. P. (2021). Assessing hydrologic drought risk using multi-dimensional copulas: case study in Karkheh River basin. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 538.- 552. (In Persia) <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09870-6>
- Bazrafshan, O., Zamani, H., & Shekari, M. (2020). A copula-based index for drought analysis in arid and semi-arid regions of Iran. *Natural Resource Modeling*,
- تحلیل روند شاخص ترکیبی JDHMI وجود یک روند کاهشی بسیار معنی‌دار در دوره تاریخی و در SSP370 را تأیید کرد که تشدید مداوم خشکسالی‌های مرکب را نشان می‌دهد. نقطه جهش آماری در سال ۲۰۰۰، آغاز دوره خشکسالی چنددهه‌ای در منطقه را تأیید می‌کند.
- شاخص ترکیبی JDHMI توسعه‌یافته در این تحقیق، به‌طور عملی برای مدیریت حوزه‌های آبخیز قابل استفاده است. این کار به مدیران کمک می‌کند تا به‌جای اتکا بر یک شاخص (مثل بارش یا رواناب به‌تنهایی)، با در نظر گرفتن هم‌زمان هر دو بعد، وضعیت کلی خشکسالی را دقیق‌تر و سریع‌تر تشخیص داده و تصمیمات بهتری برای مدیریت بحران و تخصیص آب اتخاذ کنند. همچنین با توجه به یافته تحقیق مبنی بر تغییر الگوی خشکسالی (کوتاه‌تر اما پرتعدادتر شدن آن)، برنامه‌های جامع مدیریت منابع آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی، باید بازنگری شوند. این بازنگری باید بر توسعه و ترویج روش‌های کشاورزی سازگار با کم‌آبی، سیستم‌های آبیاری با کارایی بالا و کشت محصولات مقاوم به خشکی متمرکز باشد تا تاب‌آوری منطقه در برابر خشکسالی‌های مکرر آینده افزایش یابد.
- به‌منظور دستیابی به درک جامع‌تر و یکپارچه‌ای از پدیده خشکسالی و مدیریت پایدار منابع آب، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش با گنجاندن دو مؤلفه حیاتی دیگر یعنی شاخص خشکسالی کشاورزی مبتنی بر رطوبت خاک مانند SMI و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی مانند GRI در قالب یک شاخص ترکیبی جامع، گسترش یابد.

منابع

- Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Sardooi, E. R., & Jamshidi, S. (2023). Modeling future hydrological characteristics based on land use/land cover and climate changes using the SWAT model. *Water Resources Management*, 37(10), 4177-4194. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03545-6>
- Amiri, A., Baharvand, S., & Rad, M. (2024). Evaluation of Different Drought Indices to Find the Most Applicable Index (Case

- Du Plessis, J. A., & Smith, E. (2025). Methodology for Developing Severity-Duration-Frequency Curves for Drought Assessment in South Africa. *Hydrological Processes*, 39(6), e70185. <https://doi.org/10.1002/hyp.70185>
- Du, C., Chen, J., Nie, T., & Dai, C.L. (2022). Spatial-temporal changes in meteorological and agricultural droughts in Northeast China: Change patterns, response relationships and causes. *Natural Hazards* 110, 155–173. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04940-1>
- Hafezparast, M., & Marabi, S. (2021). Prediction of discharge using artificial neural network and IHACRES models due to climate change. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(3), 75-85. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.257941.1162>
- Hasan, I. F., Abdullah, R., A. A., & M. K., (2023). Bivariate Frequency Analysis of Hydrological Drought Using Copula: A Case Study of Northern Iraq. *Jordan Journal of Civil Engineering* 17 (3), 430–442. <https://doi.org/10.14525/jjce.v17i3.06>
- Hajarian, A. (2025). Meteorological Drought Risk Monitoring and Zoning Using Random Forest Model. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(1): 83-91. (In Persia). <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8551.1093>
- Huang, X., Yang, X., Wu, F., & Zhang, J. (2025). Future propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought in the Yellow River basin. *Journal of hydrology*, 649, 132443. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126902>
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Mozaffari, E., Azhdari, Z., & Shekari, M. (2023). Trivariate risk analysis of meteorological drought in Iran under climate change scenarios. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 135(6), 52. <https://doi.org/10.1007/s00703-023-00988-9>
- Bevacqua, A.G., Chaffe, P.L.B., Chagas, V.B.P., & AghaKouchak, A., (2021). Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. *Journal of Hydrology*. 603, 126-155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126902>
- Das, P. K., Das, R., Das, D. K., Midya, S. K., Bandyopadhyay, S., & Raj, U. (2020). Quantification of agricultural drought over Indian region: a multivariate phenology-based approach. *Natural Hazards*, 101(1), 255-274. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03872-6>
- Das, S., Das, J., & Umamahesh, N.V., (2022). A non-stationary based approach to understand the propagation of meteorological to agricultural droughts. *Water Resources Management* 37, 2483–2504. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03297-9>
- Dehghani, A., Mortazavizadeh, F., & Dehghani, A., (2025). Multi-model assessment of climate change impacts on drought characteristics. *Nathral Hazards* 121, 6069–6084. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07015-z>

- maximum entropy copula framework for arid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 450-468. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05675-w>
- Rasco P., Szeidl L., & Semenov M. (1991) A serial approach to local stochastic models. *Ecological modelling* 57(1-2):27-41. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(91\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90053-4)
- Requena, A. I., Flores, I., Mediero, L., & Garrote, L. (2016). Extension of observed flood series by combining a distributed hydro-meteorological model and a copula-based model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(5), 1363-1378. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1138-x>
- Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., & Richardson, C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate research*, 10(2), 95-107. <https://doi.org/10.3354/cr010095>
- Shukla, S. R., & Kamdem, D. P. (2009). Properties of laboratory made yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) laminated veneer lumber: effect of the adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(4), 397-405. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0333-1>
- Sklar, A. (1996). Random variables, distribution functions, and copulas: a personal look backward and forward. Lecture notes-monograph series, 1-14. <https://doi.org/10.1214/lnms/1215452606>
- Tchiguirinskaia, I., Thein, K. N. N., & Hubert, [org/10.1016/j.jhydrol.2024.132443](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132443)
- Kendall, M.G., & Stuart, A., (1976). The Advanced Theory of Statistics, Vol. I: Distribution Theory. Griffin, London.
- Leng, G., Tang, Q., & Rayburg, S. (2015). Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Global and Planetary Change*, 126, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.003>
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Meimandi, J. B., Bazrafshan, O., Esmailpour, Y., Zamani, H., & Shekari, M. (2024). Risk assessment of meteo-groundwater drought using copula approach in the arid region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(4), 1523-1540. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02641-8>
- Milly, P. C., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347-350. <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- Pourhaghverdi, F., Bazrafshan, O., Gholami, H., Shekari, M. and Zamani, H. (2023). Application of copula function in multivariate analysis of stream flow drought index (case study: Minab Esteghlal Dam Basin). *Journal of Arid Biome*, 13(1), 97-110. <http://doi.org/10.29252/aridbiom.2023.20698.1962>
- Pourhaghverdi, F., Pakdaman, Z., Bazrafshan, O., Shekari, M., & Zamani, H. (2025). Uncertainty quantification in drought severity-duration-frequency analysis: a

- Yang, F., Duan, X.W., Guo, Q.K., Lu, S.J., Hsu, K.L., (2022). The spatiotemporal variations and propagation of droughts in Plateau Mountains of China. *Science of The Total Environment*, 805, 150-175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150257>
- P. (Eds.). (2006). *Frontiers in flood research* (No. 305). IAHS/IHP-UNESCO.
- Tosan, M., Shamshirgaran, R., & Falaki, M. (2025). A review of participatory management's role in reducing vulnerability and enhancing resilience to climate change and drought (2006-2024). *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(4), 164-184. (In Persia). <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8565.1095>
- Varol, T., Atesoglu, A., Ozel, H. B., & Cetin, M., (2023). Copula-Based Multivariate Standardized Drought Index (MSDI) and Length, Severity, and Frequency of Hydrological Drought in the Upper Sakarya Basin, Turkey. *Natural Hazards* 116(3), 3669–3683. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05830-4>
- Wang, Y., Li, J., Zhang, T., & Wang, B. (2019). Changes in drought propagation under the regulation of reservoirs and water diversion. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1), 701-711. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02839-3>
- Wu, H., Su, X., Singh, V. P., Feng, K., & Niu, J. (2021). Agricultural drought prediction based on conditional distributions of vine copulas. *Water Resources Research*, 57(8), 21-39. <https://doi.org/10.1029/2021WR029562>
- Xu, Y., Zhang, X., Hao, Z.C., Hao, F.H., Li, C., (2022). Systematic assessment of the development and recovery characteristics of hydrological drought in a semi-arid area. *Science of The Total Environment*, 836, 155472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155472>