

Forecasting of Drought in the Southern Part of the Aras River Basin based on the CMIP6 Multi-Model Output

Shahi, A.¹  | Salahi, B.²  

1. PhD of climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Professor of climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Corresponding Author E-mail: salahi@uma.ac.ir

(Received: 04 May 2025, Revise: 15 Jun 2025, Accepted: 29 Jul 2025, Published online: 23 Sep 2025)

Abstract

The aim of this paper is to forecast drought at several synoptic meteorological stations in the southern part of the Aras River basin in the next three decades. Data from the AOGCM model, including MPI-ESM1-2-HR, CMCC-CM2-SR5, and BCC-CSM2-MR, were used from the CMIP6 series of models under two scenarios, SSP2-4.5 (moderate) and SSP5-8.5 (pessimistic). The observation period and future period were considered as 1985-2014 and 2030-2059, respectively. The precipitation output was downscaled using CMHyd software. The efficiency of the models was evaluated by calculating the KGE statistical measure, and the Linear Scaling, Power transformation, and Distribution mapping Taylor diagram methods were used to select the appropriate downscaling method. In order to reduce uncertainty using the weighted averaging method (based on rank), the ensemble model was calculated. From the monthly precipitation data at the stations of the study area with a time step of 3 months (seasonal), the SPI index was calculated for the past and future time periods. Based on the values of the standard precipitation index, the drought zoning in the study area in the past and future periods was drawn in the geographic information system environment, according to the scenarios of this study, on a seasonal scale. Calculations showed that the ensemble model produced has a weaker performance than the best single model for each station, and the best model in all selected stations in the study area is the MPI model. The results showed that the maximum seasonal drought changes in the future period compared to the past will occur in the summer season at the two stations of Tabriz and Urmia and in the spring season at the Parsabad station, which in the pessimistic scenario, drought at the Urmia station will increase by 67 percent compared to the observation period. At the Tabriz station, drought will increase by 19 percent compared to the observation period in the medium scenario. At the Parsabad station, drought will increase by 89 percent compared to the base period in the medium scenario.

Keywords: Aras River Basin, CMIP6, CMHYD, Drought, Ensemble Model

Cite this article: Shahi,A. and Salahi,B. (2025). Forecasting of Drought in the Southern Part of the Aras River Basin based on the CMIP6 Multi-Model Output. Nivar, 49(130-131), 237-254. Doi: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.521168.1334>

E-mail: (1) Ali.shahi@uma.ac.ir



پیش‌نگری خشک‌سالی در بخش جنوبی حوضه آبریز رودخانه ارس بر پایه پرونداد چند مدلی CMIP6

علی شاهی^۱ | برومند صلاحی^۲ ✉

۱. دکترای آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
۲. استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

رایانامه نویسنده مسئول: salahi@uma.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱)

چکیده

هدف این مقاله، پیش‌نگری خشک‌سالی در چند ایستگاه هواشناسی همدیدی بخش جنوبی حوضه آبریز رودخانه ارس در سه دهه آتی است. از داده‌های مدل AOGCM شامل BCC-CSM2-MR, CMCC-CM2-SR5, MPI-ESM1-2-HR, SSP2-4.5 (متوسط) و SSP5-8.5 (بدبینانه) استفاده شد. دوره مشاهداتی و دوره آینده به ترتیب ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و ۲۰۳۰-۲۰۵۹ در نظر گرفته شدند. با استفاده از نرم‌افزار CMHyd، پرونداد بارش مقیاس‌کاهی شد. کارآیی مدل‌ها با محاسبه سنجه آماری KGE ارزیابی شد و برای انتخاب روش مناسب ریزمقیاس از روش‌های Linear Scaling, Power transformation و Distribution mapping نمودار تیلور استفاده شد. به منظور کاهش عدم قطعیت با روش میانگین‌گیری وزنی (مبتنی به رتبه)، مدل همادی محاسبه شد. از داده‌های ماهانه بارش در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه با گام زمانی ۳ ماهه (فصلی)، شاخص SPI برای دوره‌های زمانی گذشته و آینده محاسبه شد. بر اساس مقادیر شاخص بارش استاندارد، پهنه‌بندی خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه در دوره گذشته و آینده به تفکیک سناریوهای این پژوهش در مقیاس فصلی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی ترسیم شد. محاسبات نشان داد که مدل همادی تولید شده کارآیی ضعیف‌تری را نسبت به مدل منفرد برتر هر ایستگاه دارد و برترین مدل در همه ایستگاه‌های منتخب در منطقه مورد مطالعه مدل MPI است. نتایج نشان داد که بیشینه تغییرات خشک‌سالی فصلی در دوره آینده نسبت به گذشته در فصل تابستان در ۲ ایستگاه تبریز و ارومیه و فصل بهار در ایستگاه پارس‌آباد رخ خواهد داد که در سناریوی بدبینانه، در ایستگاه ارومیه خشک‌سالی در مقایسه با دوره مشاهداتی ۶۷ درصد افزایش خواهد داشت. در ایستگاه تبریز نیز در سناریوی متوسط، خشک‌سالی در مقایسه با دوره مشاهداتی ۱۹ درصد افزایش خواهد یافت. در ایستگاه پارس‌آباد در سناریو متوسط، خشک‌سالی با ۸۹ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبریز رودخانه ارس، خشک‌سالی، مدل همادی، CMIP6، CMHYD.

۱. مقدمه

فراوانی و شدت در طی سال‌های آینده سیر صعودی خواهد داشت (ژائی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰) (عبدالعلی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲). اگر بارش یک منطقه در دوره زمانی مشخصی از حد نرمال کمتر شود به عنوان خشک‌سالی هواشناسی مطرح می‌گردد. خشک‌سالی هواشناسی مسبب خشک‌سالی هیدرولوژی است و با کاهش رطوبت خاک و تخریب

خشک‌سالی از رخدادهای فرین اقلیم است. دانشمندان بر اساس تحقیقات متعدد در زمینه خشک‌سالی به این نتیجه رسیدند که این رخداد در مناطق مختلف جهان در حال افزایش است بنابراین با توجه به افزایش دما و کاهش بارش ناشی از تغییرات اقلیمی، رخدادهای خشک‌سالی از لحاظ

1. Zhai

استناد: مزیدی، احمد، دهقان، حمیده و طوفانی، کوپائی، هاجر. (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی و رابطه آن با دما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). نیوار، ۴۹ (۱۳۰-۱۳۱)، ۲۵۴-۲۳۷. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.521168.1334>

رایانامه: Ali.shahi@uma.ac.ir (۱)



همراه داشته است. تغییرات مشاهده شده در رویدادهای خشک‌سالی هواشناسی در طول ۱۹۸۱-۲۰۲۰ در رواندا واقع در شرق آفریقا پژوهشی است که توسط اوویمبازی^۶ و همکاران (۲۰۲۲) انجام شده است. به طور کلی نتایج آن‌ها نشان داد که در طول فصول بهار و پاییز رواندا بیشتر مستعد خشک‌سالی متوسط است تا خشک‌سالی شدید و خیلی شدید. مرسی^۷ و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه اقلیم‌شناسی شاخص خشک‌سالی SPEI با استفاده از مجموعه داده‌های مشاهداتی و شبکه‌بندی CRU در اتیوپی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که همبستگی‌های بسیار قوی ($R > 0.8$) بین مقادیر بارش CRU و مقادیر مشاهداتی وجود دارد. همچنین آن‌ها نشان دادند که شدت خشک‌سالی در سال‌های اخیر در اتیوپی افزایش یافته است.

زرین و همکاران (۱۴۰۱) پیش‌نگری خشک‌سالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست و یکم حوضه دریاچه ارومیه را با مدل‌های تصحیح‌شده اریبی CMIP6 تحت سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) طی دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۲۶ با استفاده از شاخص خشک‌سالی بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده هواشناسی (SPEI-1) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیش‌نگری خشک‌سالی با مدل‌های CMIP6 نشان از افزایش قابل توجه رخداد‌های خشک‌سالی عمدتاً در غرب و شمال حوضه برای دوره گرم سال دارد. شدت خشک‌سالی و درصد سال‌های کمتر از نرمال در آینده میانی (۲۰۷۵ - ۲۰۵۱) بیشتر از آینده دور (۲۱۰۰ - ۲۰۷۶) (به خصوص برای سناریو SSP5-8.5 در متوسط پهن‌های حوضه است. در تحقیقات رشیدی قانع و همکاران (۱۴۰۳) بررسی فراوانی و ویژگی‌های خشک‌سالی‌های فرین در دشت مشهد تحت سناریو SSP1-2.6 مدل MRI نشان داد که خشک‌سالی‌ها در دوره آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۶ از شدت و

محصولات کشاورزی می‌شود خشک‌سالی کشاورزی رخ می‌دهد (بول^۱ و همکاران، ۲۰۲۱) (زرین و داداشی رودباری، (۱۴۰۰). مدل‌های CMIP6، در مقایسه با مدل‌های قبلی دارای تکنولوژی بهتری هستند ولی هنوز هم مشکل عدم قطعیت در پیش‌نگری‌های اقلیمی برطرف نشده است. مدل همدادی، استفاده از مدل‌های دارای رتبه بالا و بر اساس وزن دهی است که نتایج بهتری نسبت به مدل‌های مستقل دارد (تگه^۲ و همکاران، ۲۰۲۰) (زرین و داداشی رودباری، (۱۴۰۰).

سونگ^۳ و همکاران (۲۰۲۱) (به نقل از عبدالعلی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲) با استفاده از مدل‌های NIMS-CMIP6 (KMA) پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در قرن ۲۱ را انجام دادند. ارزیابی برون‌داد مدل در دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) با داده‌های ایستگاهی، گویای دقت قابل قبول مدل‌ها بود و نشان داد که مدل‌های اقلیمی قابلیت اطمینان مناسبی دارند. نتایج پیش‌نگری نشان داد که دمای کره زمین ۲ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد و بارش به‌طور متوسط ۵ تا ۱۰ درصد در مقایسه با دوره مشاهداتی بیشتر خواهد شد؛ حجم یخ دریا در قطب‌ها کاهش خواهد یافت.

سامانتارای^۴ و همکاران (۲۰۲۲) (به نقل از عبدالعلی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲) با استفاده از مدل‌های CMIP6 به مطالعه تغییرات ویژگی‌های خشک‌سالی آینده نزدیک (۲۰۴۹-۲۰۲۰) و آینده دور ۲۰۹۹-۲۰۷۰ در هند پرداختند. نتایج نشان داد که تعداد رخداد‌های خشک‌سالی روند کاهشی معنی‌داری خواهد داشت اما شدت و مدت خشک‌سالی در آینده صعودی خواهد بود.

پیارالی^۵ و همکاران (۲۰۲۲) شاخص خشک‌سالی SPEI برای آسیای مرکزی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که رویدادهای خشک‌سالی ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ از خشک‌سالی‌های بزرگ منطقه مورد مطالعه بوده است که خسارات زیادی را نیز در بخش‌های مختلف کشاورزی منابع آب و صنایع به

5. Pyarali
6. Uwimbabazi
7. Morsy

1. Bowell
2. Tegegne
3. Sung
4. Samantaray

مدت بیشتری نسبت به دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ برخوردار خواهند بود.

آوند و همکاران (۱۴۰۳) به ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی زمان حال و پیش‌نگری آن در آینده در حوزه آبخیز تجن با استفاده از داده‌های گزارش پنجم در قالب دو سناریوی انتشار (خوش‌بینانه) RCP2.6 (بدبینانه) RCP8.5 نسبت به پیش‌بینی داده‌های اقلیم آینده در یک دوره ۲۷ ساله (۲۰۲۳-۲۰۵۰) در سه ایستگاه کردخیل، سلیمان تنگه و ریگ چشمه اقدام شد. نتایج نشان داد که وضعیت خشک‌سالی در برخی از سال‌های خشک‌سالی خیلی شدید و در برخی از سال‌ها فرا مرطوب خواهد بود که نشان دهنده وجود تغییرات اقلیمی در یک منطقه است. صلاحی و وطن‌پرست قلعه‌جوق (۱۴۰۳) مطالعه پایش خشک‌سالی کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه ارس با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی در دوره آماری ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ را انجام دادند. برای ارزیابی شرایط خشک‌سالی، از شاخص استاندارد بارندگی (SPI) حاصل از داده‌های بارش ۷ ایستگاه سینوپتیک به عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شرایط دمایی (TCI) و سلامت پوشش گیاهی (VHI) به عنوان متغیر مستقل استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص SPI بیش‌ترین همبستگی را با شاخص VCI دارد.

رضوانی اعتدالی و احمدی (۱۴۰۳) بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشک‌سالی با عملکرد ذرت با استفاده از روش جنگل تصادفی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین) را انجام دادند. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی در سناریوهای یک، سه و چهار در مرحله test با احتمال معنی‌داری به ترتیب ۹۵٪ (P-value=۰/۰) و ضریب تبیین بیش از ۰/۸ و مقدار اندک NRMSE تخمین مناسبی از عملکرد ذرت داشته است. رشیدی قانع و همکاران (۱۴۰۳) به مطالعه ویژگی‌های آبی خشک‌سالی در حوضه کشف رود تحت سناریوهای SSPs پرداختند. 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 4/1°C و 8/1°C+ و تحت سناریوی SSP585 به میزان 7/1°C+ و 2°C+ خواهد بود. افزایش بارش تحت سناریوهای SSP126 و SSP585 به دست آمد. بررسی تغییرات ویژگی‌های خشک‌سالی با نمایه SPEI6 نشان داد از نظر فراوانی، این مخاطره تحت دو سناریو و با دو روش ریزمقیاس گردانی برای آینده نزدیک افزایش نشان می‌دهد. اسدی و ثنائی نژاد (۱۴۰۴) به تحلیل مکانی بارش مشاهداتی استان فارس و پیش‌نگری آن با استفاده از برون‌داد مدل اقلیمی CanESM5 پرداختند. نتایج نشان داد که احتمال افزایش بارش سالانه استان فارس در همه سناریوها وجود دارد؛ به‌طوری‌که سناریوی SSP1-2.6 کم‌ترین افزایش و سناریوی SSP3-7.0 بیش‌ترین افزایش بارش نسبت به دوره پایه را پیش‌نگری کرده‌اند.

حوضه آبریز ارس دارای خاک حاصلخیز بوده و شرایط برای کشاورزی در منطقه مورد مطالعه مهیا است و مهم‌ترین موضوع، آب منطقه است که با توجه به رخدادهای حدی ناشی از تغییر اقلیم نظیر خشک‌سالی تحت تأثیر قرار گرفته و از آنجایی که یکی از مهم‌ترین درآمدها و اشتغال‌های ساکنین منطقه از راه کشاورزی است در نتیجه شرایط اقتصادی منطقه مورد مطالعه را دچار تنش کرده است. با توجه به موارد ذکر شده مطالعه خشک‌سالی حوضه آبریز ارس در کشور ایران در دوره‌های آتی حائز اهمیت است. مطالعه پیش از جهت مقیاس کاهی با نرم‌افزار CMHYD، استفاده از مدل‌های با قدرت تفکیک افقی بالا، محاسبه مدل همادی، ارزیابی بارش در مقیاس‌های زمانی فصلی برای هر کدام از ایستگاه‌ها دارای نوآوری است.

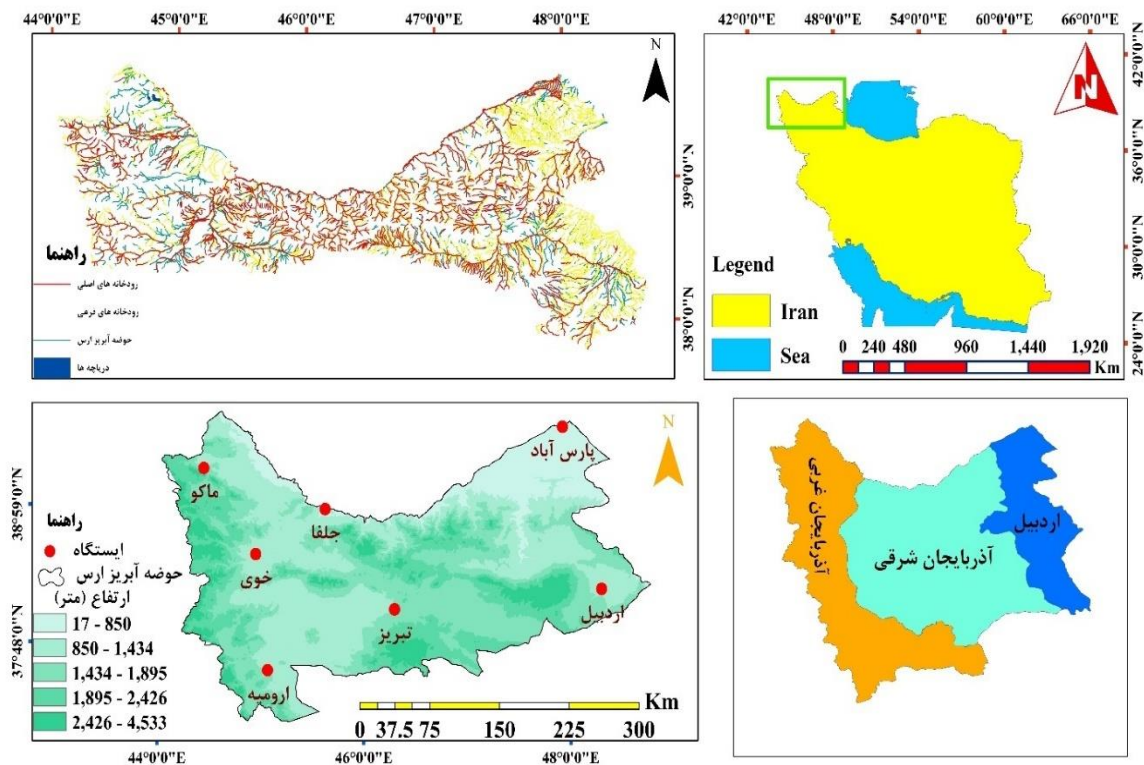
۲. مواد و روش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ارس از نظر جغرافیایی در محدوده‌ای بین ۴۴ درجه و ۱ دقیقه و ۴۲ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۴۲ دقیقه و ۳۳ ثانیه

مرتفع این حوضه است. این حوضه آبریز واقع در شمال غرب ایران از شمال به رودخانه مرزی ارس، از غرب به ترکیه، از جنوب و جنوب شرق به حوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه و سفیدرود و از شرق به حوضه آبریز تالش و مرداب انزلی محدود می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۹۰). حوضه آبریز ارس دارای طولانی‌ترین رود ایران است، بخشی از زیر حوضه آبریز غرب دریای خزر است. بخش جنوبی این حوضه در شمال غرب ایران در محور ارتباطی خاور دور با آسیای میانه در منطقه‌ای با موقعیت خاص و حساس واقع است که قسمت‌های شمالی استان‌های اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی را در بر می‌گیرد (کیانی سفیدان جدید، ۱۳۸۴) (شکل ۱).

طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه و ۱۰ ثانیه تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه و ۷ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. این حوضه به دلیل وسعت زیاد و تنوع آب و هوایی و به لحاظ هم‌مرز بودن با کشورهای همسایه و نیز قرار گرفتن در سه استان از اهمیت زیادی برخوردار است (حافظ پرست و همکاران، ۱۳۹۴). بخش جنوبی این رود متعلق به ایران است و مرتفع‌ترین نقطه در این بخش، قله سبلان می‌باشد که در ارتفاع ۴۸۱۱ متر از سطح دریا قرار دارد و پست‌ترین نقطه آن در ارتفاع چند متری و در محل خروجی رودخانه ارس در مرز ایران و جمهوری آذربایجان واقع شده است. بخش عمده‌ای از مساحت حوضه در مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای واقع شده است. سبلان، کوه‌های باغرو، قره‌داغ، قوشه‌داغ، میشو داغ، کیامکی داغ و اورین بزرگ از جمله کوه‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

بارش روزانه ۷ ایستگاه همدیدی واقع در شمال غرب ایران از سازمان هواشناسی کشور ایران www.irimo.ir اخذ گردید. برونداد مدل‌های گزارش ۶ از سایت <http://esgf->

۲-۲. داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش از دو گروه داده‌های مشاهداتی و مدل به صورت روزانه برای ۳ دهه استفاده شده است. داده‌های

مطالعه در ابتدا از بین مدل‌های سری CMIP6، آن دسته از مدل‌هایی که دارای داده‌هایی با دوره‌های مشترک تاریخی و پیش‌نگری بوده و تفکیک مکانی افقی بالا داشتند انتخاب شدند (جدول ۱).

node.llnl.gov/projects/cmip6/ برای دو دوره زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ (دوره تاریخی) و ۲۰۳۰-۲۰۵۹ (دوره آتی) بر اساس ۲ سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به عنوان سناریوهای به ترتیب متوسط و بدبینانه استخراج شد. در این

جدول ۱. مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	مدل	شرکت توسعه‌دهنده	کشور	قدرت تفکیک
۱	MPI-ESM1-2-HR	مرکز داده‌های اقلیمی آلمان	آلمان	۱۰۰ کیلومتر
۲	CMCC-CM2-SR5	مرکز اروپایی مدیران‌های ایتالیا	ایتالیا	۱۰۰ کیلومتر
۳	BCC-CSM2-MR	مرکز اقلیم پکن	چین	۱۰۰ کیلومتر

و همکاران، ۲۰۱۶) در دانشگاه پردو آمریکا در محیط پایتون توسعه داده شده است. CMHyd از هشت روش تصحیح اریبی طی فرایندی مجزا برای بارش و دما استفاده می‌کند. از بین هشت روش، پنج روش مختص بارش است. اجرای سریع و امکان انتخاب گزینه‌های مختلف از مزایای این نرم‌افزار است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۲). این نرم‌افزار نیازمند سه نوع داده، شامل داده دیده‌بانی، داده دوره گذشته مدل اقلیمی (هیستوریکال) و داده سناریو (آینده) مدل‌های اقلیمی است. فرایند مقیاس‌گذاری در پنج مرحله انجام می‌شود که به ترتیب عبارت‌اند از: ورود متغیرهای دیده‌بانی (به صورت متنی)، انتخاب روش تصحیح اریبی، ورود داده‌های مدل در دوره تاریخی و سناریو (به دو صورت متنی یا NetCDF^۴)، پردازش (شامل چک داده‌ها و اجرای مقیاس‌گذاری) و مرحله آخر (خروجی نتایج به دو شکل عددی و گراف) (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۰).

بعد از استخراج برون‌داد ۳ مدل منتخب، به منظور کاهش عدم قطعیت از ۳ روش (Power، Linear Scaling، Distribution Mapping و Transformation) برای کوچک‌مقیاس کردن در نرم‌افزار CMHyd استفاده شد. کار آیی هر یک از ۳ روش ریزمقیاس از طریق ترسیم نمودار تیلور مشخص شد. نمودار تیلور به طور هم‌زمان نمایه‌های اریبی، انحراف معیار و جذر میانگین مربعات را در نظر می‌گیرد (تیلور^۱، ۲۰۰۱). در این نمودار داده مشاهده شده به عنوان یک نقطه مرجع روی محور افقی مشخص می‌شود و بعد زاویه‌ای نشان‌دهنده همبستگی مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی است، انحراف استاندارد به شکل دایره‌های متحدالمرکز نسبت به مبدأ مختصات و مقادیر ریشه دوم میانگین مربعات خطا به صورت دایره متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع رسم می‌گردد.

۲-۲-۱. مقیاس‌گذاری

برون‌داد مدل‌های GCM به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن به طور مستقیم قابل استفاده نیستند برای رفع مشکل قدرت تفکیک مکانی کم از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌گردد (فلاح قالهری و همکاران، ۲۰۱۹). جهت مقیاس‌گذاری برون‌داد مدل‌های گردش کلی از نرم‌افزار CMHyd^۲ استفاده شد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی هیدرولوژی توسط (راجنز^۳

۲-۲-۲. ارزیابی عملکرد مدل‌ها

شبیه‌سازی‌های تاریخی برای ارزیابی دقت مدل‌ها مفید هستند. دوره‌های تاریخی مدل‌ها ابزار مهمی برای تعیین سازگاری و حساسیت مدل‌های اقلیمی نسبت به داده‌های مشاهداتی و کنترل عدم قطعیت این مدل‌ها می‌باشند (ایرینگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۶). برای صحت‌سنجی عملکرد

4. Network Common Data Form
5. Eyring

1. Taylor
2. Climate Model data for Hydrologic modeling
3. Rathjens

(۲)

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

در این رابطه R رتبه هر مدل، W وزن هر مدل و n تعداد مدل‌ها است.

۲-۲-۴. مدل همادی

مدل همادی^۴ در مقایسه با مدل‌های منفرد نتایج بهتری ارائه می‌دهد (یو و کانگ^۵، ۲۰۰۵). مدل همادی عدم قطعیت‌های مدل ساختاری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، پیش‌بینی‌های آینده را به‌طور منطقی نشان می‌دهد (جی^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). در این مرحله به‌منظور کاهش خطاهای به دست آمده اقدام به همادی سازی مدل‌های منفرد و تشکیل تنها یک سری داده که از مجموعه‌ای از مدل‌ها تشکیل شده است، برای هر کدام از ۷ ایستگاه همدید در منطقه مورد مطالعه گردید. برای این منظور پس از تعیین وزن هر مدل با توجه به میزان تأثیرگذاری آن، اقدام به میانگین‌گیری وزنی از داده‌های مدل‌ها شد.

بعد از تعیین مدل دارای اریبی پایین برای همه ایستگاه‌ها در منطقه مورد مطالعه، داده‌های روزانه بارش در دوره آتی و گذشته به ماهانه تبدیل شدند (به منظور محاسبه شاخص خشک‌سالی). از داده‌های ماهانه بارش در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه با گام زمانی ۳ ماهه (فصلی)، شاخص SPI برای دوره‌های زمانی گذشته و آینده محاسبه شد. بر اساس مقادیر شاخص بارش استاندارد پهنه‌بندی خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه در دوره گذشته و آینده به تفکیک سناریوهای این پژوهش به‌صورت مقیاس زمانی فصلی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی ترسیم شد. با توجه به مقادیر SPI در هر ایستگاه همدید در مقیاس فصلی، تغییرات خشک‌سالی و ترسالی در دوره آتی نسبت به دوره گذشته مقایسه شد.

مدل‌ها از سنجه‌های آماری استفاده می‌شود تا شباهت و تفاوت بین داده‌های دیده‌بانی ایستگاه هواشناسی و شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره تاریخی نشان داده شود (گوپتا^۱ و همکاران، ۲۰۰۹). برای تعیین دقت هر یک از ۳ مدل این تحقیق در ۷ ایستگاه شمال غرب ایران، پس از حذف اریبی، شاخص آماری KGE^2 (کلینگ - گوپتا) (معادله ۱) برای آن‌ها محاسبه شد. شاخص کلینگ - گوپتا یک شاخص ترکیبی بوده که قادر است چند شاخص آماری نظیر میانگین، انحراف معیار و همبستگی داده‌ها را با یکدیگر ترکیب کرده و دقت انتخاب مدل‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی دوره تاریخی را افزایش دهد. به عبارت دیگر، زمانی که از چند شاخص آماری به‌صورت مجزا در این زمینه استفاده شود، امکان تصمیم‌گیری نهایی بدون بهره‌گیری از شاخص KGE دشوار خواهد بود (کنوبن^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). در نهایت برآیند این آماره‌ها در ایستگاه‌های منطقه معیار ارزیابی قرار گرفت و از این طریق، رتبه ۳ مدل در هر کدام از ۷ ایستگاه تعیین شد.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2}$$

(۱)

در این رابطه O_i و S_i به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش هستند. μ میانگین و σ انحراف معیار و r ضریب همبستگی پیرسن است (زارعیان، ۱۴۰۱).

۲-۲-۳. وزن دهی مدل‌ها

با هدف کاهش عدم قطعیت در نتایج حاصل از مدل‌های CMIP6 این مدل‌ها بر مبنای دقت محاسبه شده در مرحله قبل، بر اساس معادله (۲) وزن دهی شدند (میانگین وزنی مبتنی بر رتبه). در این معادله، R_i رتبه هر مدل و W_i وزن هر مدل است (چن و همکاران، ۲۰۱۱).

4. Ensemble
5. Yoo & Kang
6. Ge

1. Gupta
2. Kling Gupta Efficiency
3. Knoben

جدول (۲) معیار شدت ترسالی و خشک‌سالی را نشان می‌دهد (آرخی و همکاران، ۱۴۰۱).

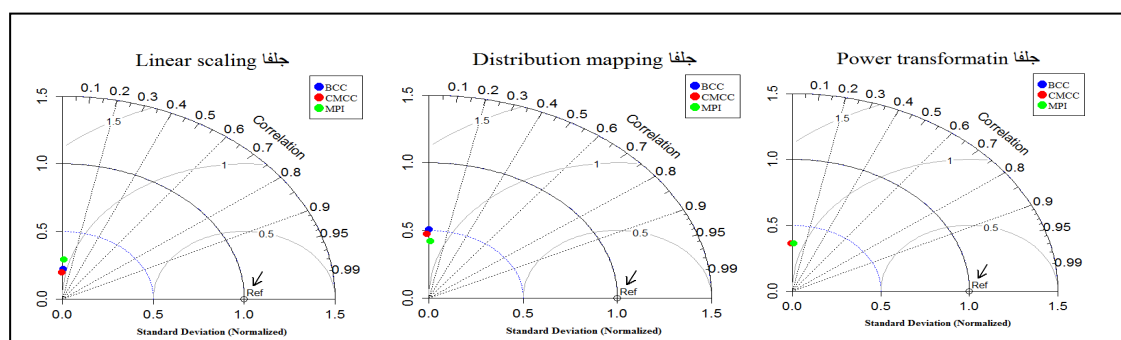
جدول ۲. رتبه‌بندی شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص SPI

نمایه SPI	شدت خشک‌سالی
کمتر از -۲	خشک‌سالی بسیار شدید
-۲ تا -۱/۵	خشک‌سالی شدید
-۱/۵ تا -۱	خشک‌سالی متوسط
-۱ تا ۱	نرمال
۱/۵ تا ۱	ترسالی متوسط
۲ تا ۱/۵	ترسالی شدید
بیشتر از ۲	ترسالی بسیار شدید

RMSE دارای محدوده ۱ است در صورتی که در ۲ روش دیگر این متغیر مقدار بزرگ‌تر از ۱ را دارد. در نمودارهای تیلور ایستگاه‌های منتخب، ضریب همبستگی مقدار بزرگی را نشان نداد، به عبارتی برخلاف همبستگی دما که عدد بزرگی را نشان می‌دهد در مورد بارش همواره همبستگی پایین است که ریشه در ماهیت متغیر بارش دارد که با عدم قطعیت بالایی همراه است (برای جلوگیری از حجم بالای مقاله از آوردن دیاگرام تیلور برای ایستگاه‌های دیگر منطقه مورد مطالعه خودداری شد).

۳. نتایج و بحث

با توجه به شکل (۲)، نمودار تیلور ایستگاه جلفا برای ۳ مدل در دوره پایه، بر اساس برون‌داد ۳ روش Linear Scaling، Distribution و Power Transformatin Mapping نشان داد که روش Linear Scaling از دقت بالا و خطای کمتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. در نمودارهای تیلور روش Linear Scaling متغیر انحراف استاندارد مقدار کمتر از ۰/۵ را دارد در صورتی که در ۲ روش دیگر این متغیر مقدار بزرگ‌تر از ۰/۵ را داراست، متغیر



شکل ۲. نمودار تیلور برای ۳ روش تصحیح اریبی در ایستگاه جلفا در دوره ۳۰ ساله (پایه)

انتخاب شد (جدول ۳) و ریزمقیاس برون‌داد خام مدل‌ها در این تحقیق با روش فوق در نرم‌افزار CMHyd انجام گردید.

بر اساس ارزیابی انجام گرفته توسط نمودار تیلور (شکل ۲)، از میان سه روش تصحیح بایاس، روش Linear Scaling

جدول ۳. فرمول مورد استفاده در روش‌های مقیاس‌کاهی نرم افزار CMHyd

نام روش	توضیح روش مقیاس‌کاهی	منبع
Linear Scaling	نسبت میانگین ماهانه مقادیر دیدبانی به تاریخی مدل در دوره یکسان به سری داده‌های شبیه‌سازی شده آینده ضرب می‌شود. این روش ترجیحاً برای مقیاس‌کاهی بارش، فشار بخار و تابش استفاده می‌شود.	مندز و همکاران، ۲۰۲۰

بعد از مقیاس‌کاهی، برون داد بارش ۷ ایستگاه هواشناسی همدیدی منتخب در این مطالعه در دوره تاریخی توسط ۳ مدل با روش KGE راستی آزمایی گردید و رتبه مدل‌ها به تفکیک ایستگاه همدیدی در منطقه مورد مطالعه تعیین شد (جدول ۴).

جدول ۴. صحت سنجی برون داد ۳ مدل توسط سنجه KGE در ۷ ایستگاه منتخب در دوره پایه ۳۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

نام ایستگاه	رتبه مدل‌ها بر اساس شاخص KGE		
	۱	۲	۳
اردبیل	MPI ۰/۰۲۹	CMCC ۰/۰۱۴	BCC -۰/۰۲۲
پارس‌آباد	MPI -۰/۰۰۷	CMCC -۰/۰۴۲	BCC -۰/۰۶۹
چلغا	MPI -۰/۰۰۲	BCC -۰/۰۴۲	CMCC -۰/۰۷۰۸
تبریز	MPI ۰/۰۶۳	CMCC ۰/۰۲۵	BCC ۰/۰۲۳
ارومیه	MPI ۰/۰۳۴	CMCC -۰/۰۳۲۴	BCC -۰/۰۴۶۵
خوی	MPI ۰/۰۱۱	BCC -۰/۰۰۲	CMCC -۰/۰۰۳
ماکو	MPI ۰/۰۴۱	BCC -۰/۰۳۱	CMCC -۰/۰۳۹

بر اساس رتبه مدل‌ها در هر ایستگاه و رابطه (۲) وزن هر مدل مشخص شد (جدول ۵).

جدول ۵. وزن مدل‌های GCM استفاده شده در تحقیق

رتبه مدل‌ها	اول	دوم	سوم
وزن مدل‌ها	۰/۵	۰/۳۴	۰/۱۶

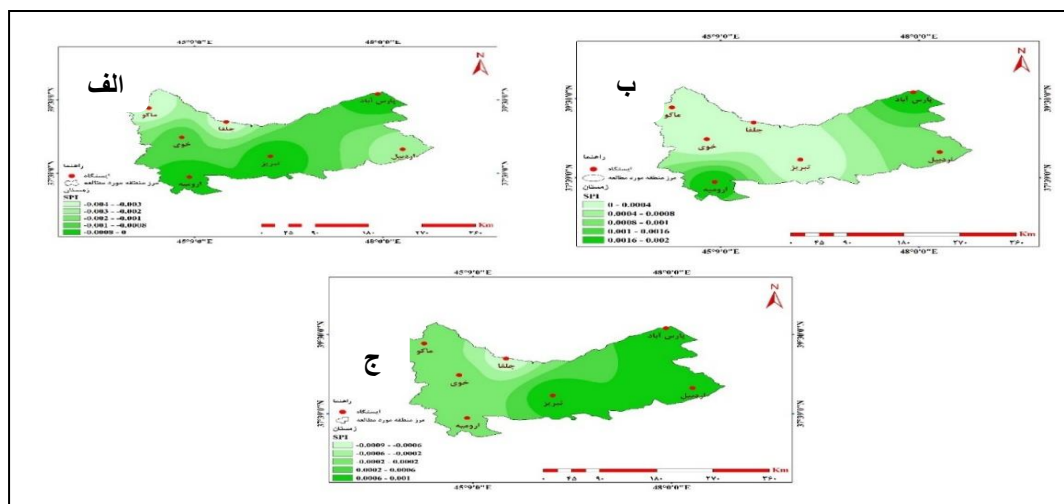
در جدول (۶) نتایج صحت سنجی مدل همادی و مدل برتر ۷ ایستگاه منتخب با سنجه KGE نشان داد که مدل برتر هر ایستگاه همدیدی نتایج بهتری را نسبت به مدل همادی در همه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه دارد. در همه ایستگاه‌های منتخب مدل برتر از بین ۳ مدل منتخب مدل MPI بود.

جدول ۶. مقایسه صحت سنجی مدل همادی و مدل برتر ۷ ایستگاه منتخب در منطقه مورد مطالعه

KGE		نام ایستگاه
مدل همادی	۱	
-۰/۰۵۸	MPI ۰/۰۲۹	اردبیل
-۰/۱۲	MPI -۰/۰۰۷	پارس آباد
-۰/۰۸۴	MPI -۰/۰۰۲	جلفا
-۰/۰۱۷	MPI ۰/۰۶۳	تبریز
-۰/۰۶۹	MPI ۰/۰۳۴	ارومیه
-۰/۰۷۵	MPI ۰/۰۱۱	خوی
-۰/۰۳۷	MPI ۰/۰۴۱	ماکو

خواهند کرد و نسبت به دوره پایه خشک سالی تشدید خواهد شد که در ایستگاه‌های تبریز و خوی شدیدتر خواهد بود. مقایسه نقشه‌های دوره گذشته و دوره آتی تحت سناریو بدبینانه (الف و ج)، نشان دهنده تقویت خشک سالی در بخش غربی و تضعیف خشک سالی در مناطق شرقی حوضه جنوبی رود ارس است.

بر اساس مطالعه انجام شده، مدل MPI محاسبه شده، ملاک ارزیابی تغییرات بارش در مقیاس زمانی فصلی برای دوره مشاهداتی با دوره آینده قرار گرفت. با توجه به شکل (۳) با مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی خشک سالی فصل زمستان منطقه مورد مطالعه در دوره مشاهداتی با دوره آتی تحت سناریو متوسط (الف و ب)، بخش‌های مرکزی خشک سالی را تجربه

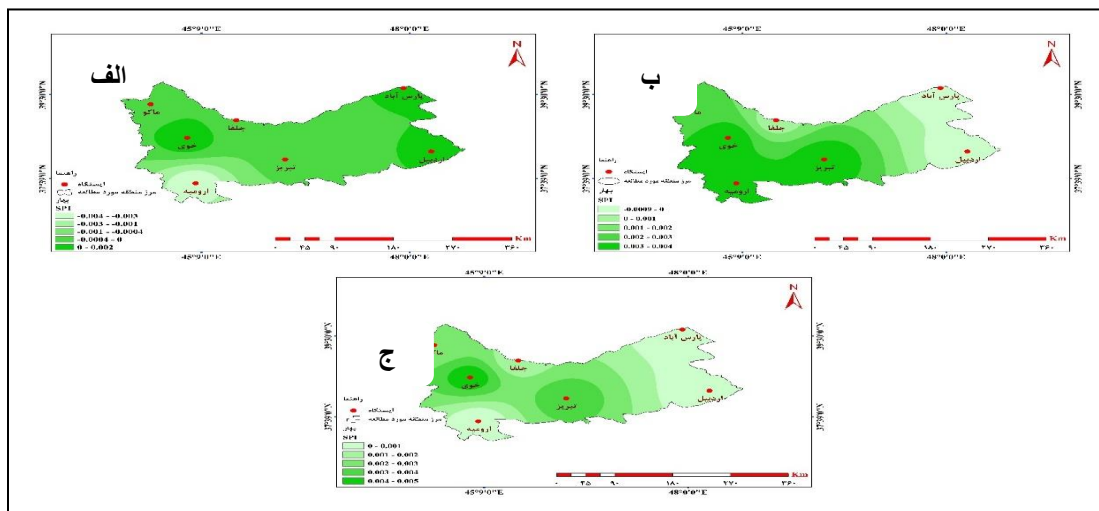


شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی خشک سالی فصل زمستان بخش جنوبی حوضه آبریز ارس بر اساس شاخص SPI: الف- دوره مشاهداتی. ب- دوره آتی تحت سناریو متوسط (SSP۲۴۵). ج- دوره آتی تحت سناریو بدبینانه (SSP۵۸۵)

اردبیل و پارس آباد شدت خشک سالی بیشینه خواهد بود. در قسمت‌های غربی منطقه مورد مطالعه تضعیف خشک سالی رخ خواهد داد و شرایط رطوبتی در ایستگاه ارومیه بهینه خواهد شد. مقایسه نقشه‌های دوره گذشته و دوره آتی تحت

بر اساس شکل (۴) مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی خشک سالی فصل بهار منطقه مورد مطالعه در دوره مشاهداتی با دوره آتی تحت سناریو متوسط (الف و ب)، در بخش‌های شرقی خشک سالی تقویت خواهد شد به طوری که در ایستگاه‌های

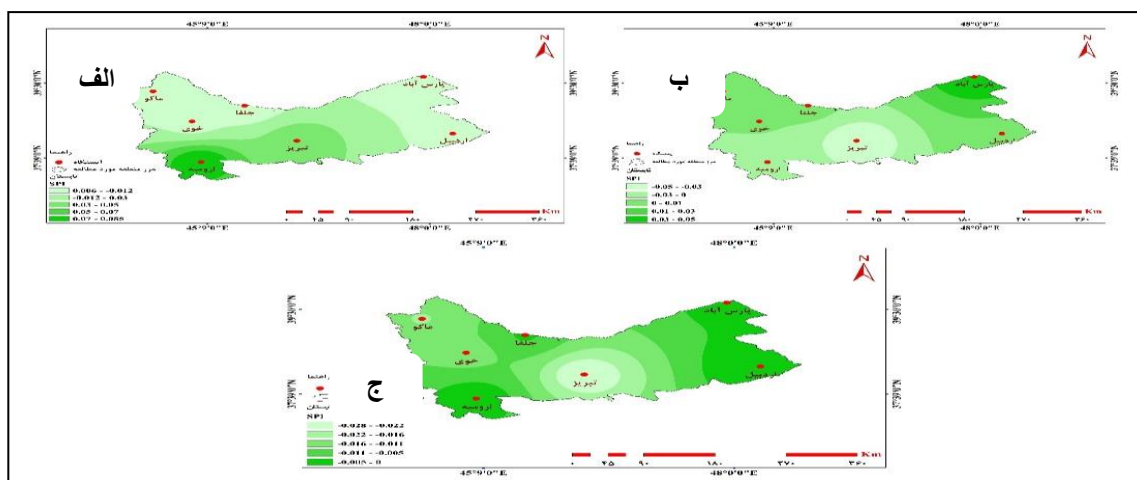
سناریو بدبینانه (الف و ج)، حاکی از تشدید خشک‌سالی در ایستگاه‌های اردبیل و پارس آباد برجسته‌تر است. مناطق شرقی حوضه جنوبی رود ارس است که در



شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی خشک‌سالی فصل بهار بخش جنوبی حوضه آبریز ارس بر اساس شاخص SPI: الف- دوره مشاهداتی. ب- دوره آبی تحت سناریو متوسط (585SSP). ج- دوره آبی تحت سناریو بدبینانه (245SSP).

ایستگاه تبریز خواهد بود. مقایسه نقشه‌های دوره گذشته و دوره آبی تحت سناریو بدبینانه در دوره ۳۰ ساله (الف و ج)، نشان از تضعیف خشک‌سالی در مناطق شرقی حوضه جنوبی رود ارس است که در ایستگاه‌های اردبیل و پارس آباد مشهود است در قسمت‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه بخصوص ایستگاه تبریز خشک‌سالی افزایش خواهد یافت.

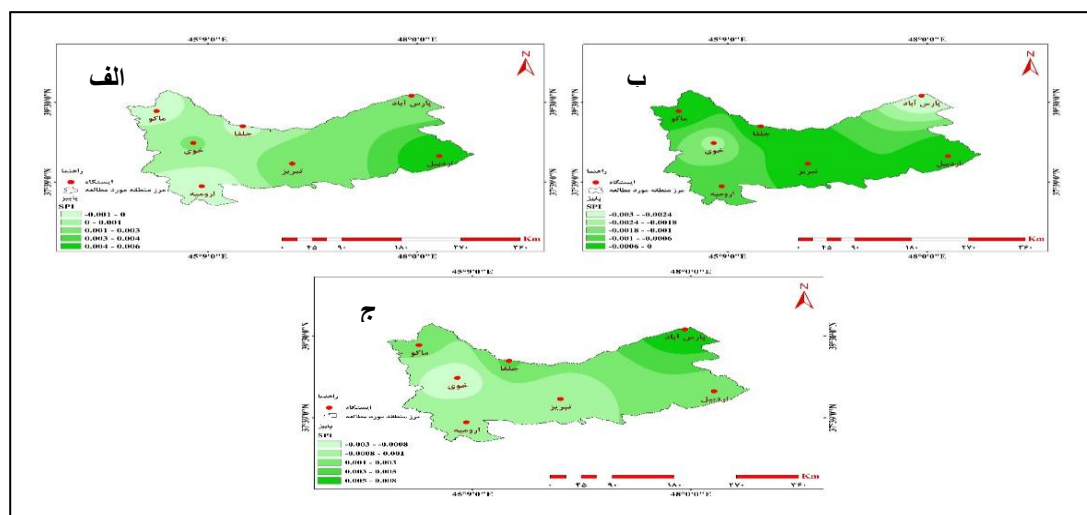
شکل (۵) مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی فصل تابستان منطقه مورد مطالعه در دوره مشاهداتی با دوره آبی تحت سناریو متوسط (الف و ب)، گویای بهبود خشک‌سالی در بخش‌های شرقی و غربی منطقه مورد مطالعه است به طوری که در ایستگاه پارس آباد بیشینه بهبود رطوبتی اتفاق خواهد افتاد. در قسمت‌های مرکزی و جنوبی تشدید خشک‌سالی رخ خواهد داد که حداکثر کاهش رطوبت در



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی خشک‌سالی فصل تابستان بخش جنوبی حوضه آبریز ارس بر اساس شاخص SPI: الف- دوره مشاهداتی. ب- دوره آبی تحت سناریو متوسط (SSP۵۸۵). ج- دوره آبی تحت سناریو بدبینانه (SSP۲۴۵).

مقایسه نقشه‌های دوره گذشته و دوره آتی تحت سناریو بدینانه در دوره ۳۰ ساله (الف و ج)، بیانگر این است که تفاوت فاحشی در خشک‌سالی ۲ دوره نخواهد بود و ایستگاه پارس‌آباد مرطوب‌تر و ایستگاه خوی خشک‌تر از دوره پایه خواهد شد.

شکل (۶) مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی فصل پاییز حوضه جنوبی رود ارس در دوره دیده‌بانی با دوره آینده تحت سناریو متوسط (الف و ب)، نشان داد که در کل منطقه مورد مطالعه خشک‌سالی کاهش خواهد یافت ولی در ایستگاه پارس‌آباد تقویت خشک‌سالی رؤیت خواهد شد.



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی خشک‌سالی فصل پاییز بخش جنوبی حوضه آبریز ارس بر اساس شاخص SPI: الف- دوره مشاهداتی. ب- دوره آتی تحت سناریو متوسط (SSP245). ج- دوره آتی تحت سناریو بدینانه (SSP585)

۲ سناریو خشک‌سالی نسبت به گذشته بهبود را نشان داد که در سناریو متوسط شرایط نسبتاً مناسب‌تر خواهد شد. در فصل تابستان در هر ۲ سناریو خشک‌سالی در آینده تشدید خواهد شد به طوری که در سناریو متوسط شدت خشک‌سالی بیشتر از سناریو بدینانه است. در فصل پاییز خشک‌سالی تغییرات برجسته‌ای را نشان نمی‌دهد (جدول ۷).

جدول‌های ۷ تا ۱۳ تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی (۲۰۱۹-۲۰۳۰) تحت سناریوهای متوسط (SSP245) و بدینانه (SSP585) در ۷ ایستگاه منتخب واقع در بخش جنوبی حوضه آبریز ارس نسبت به دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) را نشان می‌دهد. در ایستگاه همدیدی تبریز در فصل زمستان تغییری در ۲ سناریو نسبت به دوره گذشته رؤیت نشد. در فصل بهار در هر

جدول ۷. تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی تحت ۲ سناریو در ایستگاه تبریز نسبت به دوره پایه

تغییرات SPI (۲۰۵۹-۲۰۳۰)		تغییرات SPI مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۸۵)	فصل	ایستگاه
SSP585	SSP245			
۰	۰	۰	زمستان	تبریز
۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰	بهار	
-۰/۰۱۷	-۰/۰۵۱	۰/۰۴۳	تابستان	
۰/۰۰۲	۰	۰/۰۰۳	پاییز	

در ایستگاه همدیدی ارومیه در فصل زمستان در هر ۲ سناریو خشک‌سالی نسبت به دوره گذشته بهبود را نشان داد ولی چشمگیر نیست. در فصل بهار در هر ۲ سناریو خشک‌سالی نسبت به دوره گذشته بهبود را نشان داد. در فصل تابستان در

هر ۲ سناریو خشک‌سالی در آینده تشدید خواهد شد به طوری که در سناریو بدبینانه شدت خشک‌سالی بیشتر از سناریو متوسط است. در فصل پاییز خشک‌سالی تغییرات برجسته‌ای را نشان نمی‌دهد (جدول ۸).

جدول ۸. تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی تحت ۲ سناریو در ایستگاه ارومیه نسبت به دوره پایه

ایستگاه	فصل	تغییرات SPI (۲۰۵۹-۲۰۳۰)		SPI مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۸۵)
		SSP585	SSP245	
ارومیه	زمستان	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰
	بهار	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	-۰/۰۰۴
	تابستان	-۰/۰۲۸	۰/۰۲۱	۰/۰۸۵
	پاییز	۰	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱

در ایستگاه همدیدی اردبیل در فصل زمستان در هر ۲ سناریو نسبت به دوره گذشته خشک‌سالی بهبود را نشان داد. در فصل بهار در هر ۲ سناریو خشک‌سالی نسبت به گذشته تشدید را نشان داد که در سناریو متوسط خشک‌سالی شدیدتر خواهد

شد. در فصل تابستان در هر ۲ سناریو در آینده تغییرات زیادی مشاهده نخواهد شد. در فصل پاییز خشک‌سالی تغییرات برجسته‌ای را نشان نمی‌دهد (جدول ۹).

جدول ۹. تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی تحت ۲ سناریو در ایستگاه اردبیل نسبت به دوره پایه

ایستگاه	فصل	تغییرات SPI (۲۰۵۹-۲۰۳۰)		SPI مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۸۵)
		SSP585	SSP245	
اردبیل	زمستان	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۳
	بهار	۰	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
	تابستان	۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷
	پاییز	۰/۰۰۳	۰	۰/۰۰۶

در ایستگاه همدیدی خوی در فصل زمستان در سناریو متوسط شرایط رطوبتی نسبت به دوره گذشته بهتر خواهد شد ولی در سناریو بدبینانه تغییری مشاهده نشد. در فصل بهار در سناریو متوسط خشک‌سالی نسبت به گذشته بهبود را نشان داد ولی در سناریو بدبینانه شرایط نسبتاً رو به افزایش خشک‌سالی خواهد بود. در فصل تابستان در هر ۲ سناریو خشک‌سالی در

آینده تشدید خواهد شد به طوری که در سناریو متوسط شدت خشک‌سالی بیشتر از سناریو بدبینانه است. در فصل پاییز خشک‌سالی در سناریو متوسط افزایش و در سناریو بدبینانه کاهش را در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی تحت ۲ سناریو در ایستگاه خوی نسبت به دوره پایه

ایستگاه	فصل	تغییرات SPI (۲۰۵۹-۲۰۳۰)		SPI مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۸۵)
		SSP585	SSP245	
خوی	زمستان	-۰/۰۰۱	۰	-۰/۰۰۱
	بهار	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
	تابستان	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۸	۰/۰۰۱
	پاییز	۰/۰۰۴	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۲

متوسط ترسالی در آینده رخ خواهد داد به طوری که در سناریو متوسط شدت ترسالی از سناریو بدبینانه بیشتر است. در فصل پاییز خشک‌سالی در هر ۲ سناریو تقویت خشک‌سالی را نشان داد (جدول ۱۱).

در ایستگاه همدیدی پارس‌آباد در فصل زمستان تغییر چشمگیر در ۲ سناریو نسبت به دوره گذشته رؤیت نشد. در فصل بهار در هر ۲ سناریو خشک‌سالی نسبت به گذشته تشدید را نشان داد که در سناریو متوسط شدت افزایش خشک‌سالی بیشتر مشاهده شد. در فصل تابستان در سناریو

جدول ۱۱. تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی تحت ۲ سناریو در ایستگاه پارس‌آباد نسبت به دوره پایه

ایستگاه	فصل	تغییرات SPI (۲۰۳۰-۲۰۵۹)		SPI مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴)
		SSP245	SSP585	
پارس‌آباد	زمستان	۰/۰۰۲	۰	۰
	بهار	-۰/۰۸۸	۰	۰/۰۰۱
	تابستان	۰/۰۵۲	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۴
	پاییز	۰	۰	۰/۰۰۲

بهبود خواهد یافت ولی در سناریو بدبینانه خشک‌سالی تشدید خواهد شد. در فصل پاییز خشک‌سالی در سناریو میانه بهبود خشک‌سالی و در سناریو بدبینانه تشدید خشک‌سالی را نسبت به دوره گذشته نشان داد (جدول ۱۲).

در ایستگاه همدیدی ماکو در فصل زمستان در ۲ سناریو نسبت به دوره گذشته خشک‌سالی بهبود را نشان داد. در فصل بهار در هر ۲ سناریو خشک‌سالی نسبت به گذشته بهبود را نشان داد که در سناریو بدبینانه شرایط نسبتاً مناسب‌تر خواهد شد. در فصل تابستان در سناریو متوسط خشک‌سالی در آینده

جدول ۱۲. تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی تحت ۲ سناریو در ایستگاه ماکو نسبت به دوره پایه

ایستگاه	فصل	تغییرات SPI (۲۰۳۰-۲۰۵۹)		SPI مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴)
		SSP245	SSP585	
ماکو	زمستان	۰	۰	-۰/۰۰۴
	بهار	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰
	تابستان	۰	-۰/۰۱۳	-۰/۰۰۱
	پاییز	۰/۰۰۳	-۰/۰۰۳	۰

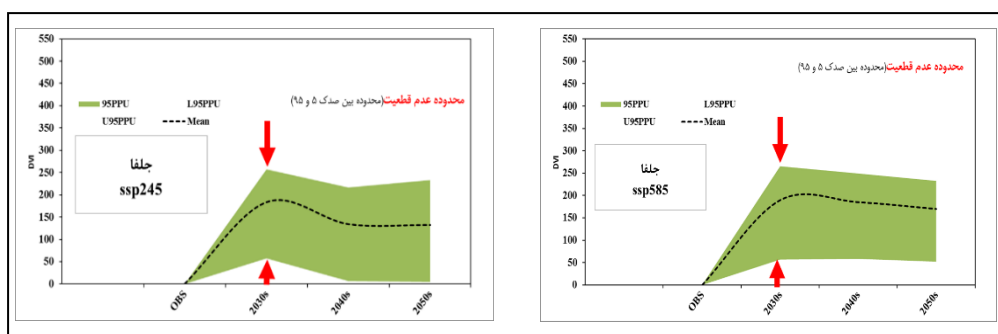
آینده کاهش خواهد داشت به طوری که در سناریو متوسط بهبود خشک‌سالی بیشتر از سناریو بدبینانه است. در فصل پاییز خشک‌سالی تغییرات برجسته‌ای را نشان نمی‌دهد (جدول ۱۳).

در ایستگاه همدیدی جلفا در فصل زمستان در هر ۲ سناریو نسبت به دوره گذشته خشک‌سالی بهبود را نشان داد. در فصل بهار در هر ۲ سناریو نسبت به گذشته تغییری در خشک‌سالی رؤیت نشد. در فصل تابستان در هر ۲ سناریو خشک‌سالی در

جدول ۱۳. تغییرات فصلی خشک‌سالی دوره آتی تحت ۲ سناریو در ایستگاه جلفا نسبت به دوره پایه

ایستگاه	فصل	تغییرات SPI (۲۰۳۰-۲۰۵۹)		SPI مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴)
		SSP245	SSP585	
جلفا	زمستان	۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۴
	بهار	۰	۰	۰
	تابستان	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۴	-۰/۰۰۶
	پاییز	۰	۰/۰۰۸	۰

افزایش دامنه عدم قطعیت از دهه ۲۰۴۰ تشدید شده است. نکته مهم در مقایسه نمودارهای دو سناریو وجود دارد، بهینه بودن نمودار عدم قطعیت سناریو بدبینانه نسبت به سناریو متوسط است که پهنای کم منحنی‌ها تأیید کننده این مطلب در ایستگاه جلفا است.



شکل ۷. نمودار عدم قطعیت برای ایستگاه جلفا در منطقه مورد مطالعه تحت ۲ سناریو متوسط و بدبینانه

Linear Scaling نشان داد که مدل همادی محاسبه شده به روش میانگین وزنی مبتنی به رتبه نسبت به مدل برتر ایستگاه‌های مورد مطالعه در پژوهش کارآیی ضعیف دارد. نتایج همچنین نشان داد که در بین ۳ مدل استفاده شده در ۷ ایستگاه منتخب در این تحقیق در همه ایستگاه‌ها مدل MPI مدل برتر بوده و اریبی کم‌تری نسبت به ۲ مدل BCC و CMCC را دارد. نتایج تغییرات فصلی خشک‌سالی محاسبه شده با گام زمانی فصلی با نمایه SPI حاکی از آن است که بیشینه تغییرات خشک‌سالی فصلی در دوره آینده نسبت به گذشته در فصل تابستان در ۲ ایستگاه تبریز و ارومیه و فصل بهار در ایستگاه پارس‌آباد رخ خواهد داد به طوری که در فصل تابستان در ایستگاه پارس‌آباد تحت سناریو متوسط، خشک‌سالی در مقایسه با دوره مشاهداتی بهبود را نشان داد. در ایستگاه ارومیه در سناریو بدبینانه، خشک‌سالی در مقایسه با دوره مشاهداتی ۶۷ درصد افزایش خواهد داشت. در ایستگاه تبریز در سناریو متوسط، خشک‌سالی در مقایسه با دوره مشاهداتی ۱۹ درصد افزایش خواهد یافت. بر اساس مطالعه صورت گرفته بیشینه تغییرات افزایش خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه با توجه به مقیاس زمانی فصلی، در فصل

دامنه عدم قطعیت

بر اساس نمودار عدم قطعیت که برای ایستگاه همدیدی جلفا در منطقه جنوبی حوضه آبریز ارس تحت ۲ سناریو SSP245 و SSP585 ترسیم شد، در هر ۲ سناریو با فاصله گرفتن از دوره مشاهداتی بر میزان عدم قطعیت افزوده گردیده است.

با تشدید تغییرات اقلیمی، بارش کاهش یافته و افزایش دما در اکثر مناطق جهان رخ داده است و رخدادهای حدی رو به افزایش است. یکی از پیامدهای زیان‌بار این دگرگونی‌ها تهدید جدی بخش کشاورزی است که می‌تواند بسیاری از اقشار در هر جامعه را با مشکلات مختلف از قبیل اقتصادی مواجه کند. یکی از مخاطرات حاصل از تغییرات اقلیمی، خشک‌سالی است که عدم توجه به آن آسیب‌های زیادی به بخش کشاورزی وارد می‌کند. پیش‌نگری و برنامه‌ریزی و آگاهی دادن به کشاورزان و همچنین مدیریت بخش آب می‌تواند کمک زیادی برای جلوگیری از غافلگیری در مقابل این رویداد حدی اقلیمی کند.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه پیش‌نگری خشک‌سالی در بخش جنوبی حوضه آبریز رود ارس در ایران دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و دور آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) با استفاده از ۳ مدل GCM ارائه شده در گزارش ششم IPCC در ۷ ایستگاه هواشناسی همدیدی تحت ۲ سناریو متوسط (SSP245) و بدبینانه (SSP585) بر اساس ریزگردانی آماری با نرم‌افزار CMHYD با روش

- Nivar, 49(128-129), 68-79. doi:10.30467/nivar.2025.476368.1307. (In Persian)
4. Babaeian, A., Modirian, R., Khazanehdari, L., Karimian, M., Kozehegaran, S., Kohi, M., Flamerzi, Y., & Malboosi, Sh. (1402). Iran's precipitation outlook in the 21st century using statistical downscaling of selected CMIP6 model outputs by CMHyd software. *Journal of Earth and Space Physics*, 49(2), 431-449. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436. (In Persian)
 5. Babaeian, A., Modirian, R., Khazanehdari, L., Kohi, M., Kozehegaran, S., Flamerzi, Y., Karimian, M., & Malboosi, Sh. (1400). Projection of the country's precipitation using statistical downscaling of CMIP6 model outputs, internal project of the Climate Research Institute, Mashhad. (In Persian)
 6. Hafezparast, M., Araqi-Nejad, Sh., & Sharif Azari, S. (1394). Sustainability criteria in evaluating integrated water resources management of the Aras river basin based on the DPSIR approach. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 22(2), 61-77. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1394.22.2.4.8>. (In Persian)
 7. Rashidi Ghane, M., Motovali/Motavali, S., Janbazan Ghobadi, Gh., & Kohi, M. (1403). Frequency and characteristics of droughts in Farin Dasht of Mashhad under SSP scenarios. *Environmental Hazards Management*, 11(2), 85-102. doi: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.380699.837>. (In Persian)
 8. Rashidi-Ghane, M., Motovali/Motavali, S., Janbazan Ghobadi, Gh., & Kohi, M. (1403). Future characteristics of drought in the Kashaf (Kashafrud) basin under SSP scenarios. *Nivar*, 48(126-127), 169-191. doi:10.30467/nivar.2024.471479.1302. (In Persian)
 9. Ramazani E'tedali, H., & Ahmadi, M. (1403). Examining the relationship between drought indices and corn yield using the random forest method (Case study: Dasht

بهار در بخش شرقی، در فصل تابستان در بخش مرکزی، در فصل زمستان در بخش غربی و در فصل پاییز در شمال غرب منطقه مورد مطالعه اتفاق خواهد افتاد. در کل بر اساس مطالعه انجام گرفته منطقه مورد مطالعه شرایط نامطلوب رطوبتی در دور گذشته را تجربه کرده و در دوره آینده نیز در هر ۲ سناریو شرایط رطوبتی را نخواهد داشت و اگر خشک‌سالی کاهش هم در برخی فصل‌ها داشته چشمگیر نخواهد بود و با توجه به موارد ذکر شده شرایط آبی منطقه نامساعد است و خشک‌سالی منطقه مورد مطالعه را تهدید می‌کند. نتایج این مطالعه با نتایج تحقیق انجام شده توسط زرین و همکاران (۱۴۰۱) از لحاظ تشدید رخداد‌های خشک‌سالی در حوضه دریاچه ارومیه مطابقت دارد. نتایج پژوهش حاضر از بابت پیشینه خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان است و همچنین خشک‌سالی در ایستگاه‌های بخش غربی شدیدتر از ایستگاه‌های بخش شرقی حوضه رود ارس است با تحقیق انجام شده توسط صلاحی و وطن‌پرست قلعه‌جوق (۱۴۰۳) هم‌راستا است.

منابع

1. Arkhi, S., Barzegar Savasari, M., & Emadeddin, S. (1401). Assessing the performance of indices derived from remote sensing technology VCI, TCI and VHI in drought assessment using MODIS imagery (Case study: central regions of Iran). *Geography and Environmental Hazards*, 11(3), 189-224. doi: 10.22067/geoh.2021.72253.1102. (In Persian)
2. Avand, M., Moradi, H., & Hezbavi, Z. (1403). Assessment of current meteorological and hydrological drought and its future projection in the Tajan watershed. *Modeling and Management of Water and Soil*, 4(4), 57-78. doi: 10.22098/mmws.2023.13352.1330. (In Persian)
3. Asadi, A., & Sanaee-Nejad, S.H. (1404). Spatial analysis of observed precipitation in Fars province and its projection using outputs of the CanESM5 climate model.

- basin. Master's thesis, University of Tabriz, Faculty of Humanities and Social Sciences, Department of Geography. (In Persian)
16. Ministry of Energy (1390). Delineation and coding of watersheds and study areas at the national level (revision in 1389–1390), Iran Water Resources Management Company, Deputy for Coordination of Watersheds, Office of Basic Water Resources Studies, Esfand 1390. (In Persian)
 17. Bowell, A., Salakpi, E. E., Guigma, K., Muthoka, J. M., Mwangi, J., and Rowhani, P., 2021. Validating commonly used drought indicators in Kenya. *Environmental Research Letters*, 16(8), 084066. DOI 10.1088/1748-9326/ac16a2
 18. Chen, W., Jiang, Z. and Li, L., 2011. Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*, 24(17), pp.4741-4756. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4102.1>
 19. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. and Taylor, K. E., 2016. Overview of the coupled model Intercomparison project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, pp.1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
 20. Fallah Ghalhari, G. A., Yousefi, H., Hosseinzadeh, A., Alimardani, M. and Reyhani, E., 2019. Assessment of climate change in Bojnourd station in 2016-2050 using downscaling models LARS WG and SDSM. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(1), pp.99-109. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.265918.952>
 21. Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X. and Wang, H., 2021. Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024013. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abd7ad>
 22. Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. and Martinez, G. F., 2009. Decomposition of the Qazvin irrigation network). *Nivar*, 48(126–127), 127–137. doi:10.30467/nivar.2024.467444.1299. (In Persian)
 10. Zareian, M. (1401). Impacts of climate change on temperature and precipitation of Yazd province based on combined outputs of CMIP6 models. *Water and Soil Sciences*, 26(2), 91–105. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501>. (In Persian)
 11. Zarrin, A., & Dadashi Roudbari, A. (1400). Projection and homogeneity of drought indices in Iran based on multi-model CMIP5 outputs. *Climate Change Research*, 7(2), 71–82. doi: 10.30488/ccr.2021.317280.1058. (In Persian)
 12. Zarrin, A., Dadashi Roudbari, A., & Kadhoda, A. (1401). Projection of drought under SSP scenarios until the end of the 21st century (Case study: Urmia Lake basin). *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 53(7), 1499–1516. doi: 10.22059/ijswr.2022.343700.669278. (In Persian)
 13. Salahi, B., & Vatanparast Qalehjoq, F. (1403). Monitoring agricultural drought in the Aras river basin using satellite and meteorological indices. *Environmental Hazards Management*, 11(3), 193–212. doi: 10.22059/jhsci.2024.384523.847. (In Persian)
 14. Abdolalizadeh, F., Mohammad Khorshid Doost, A., & Jahanbakhsh Asl, S. (1402). Projection and trend assessment of temperature, precipitation, and drought in the Urmia Lake basin. *Hydrogeomorphology*, 10(36), 39–57. doi: 10.22034/hyd.2023.56103.1687. (In Persian)
 15. Kiani Sefidan Jadid, T. (1384). Synoptic analysis of convective (showery) rainfall in the southern Aras basin. Master's thesis, University of Tabriz, Faculty of Humanities and Social Sciences, Department of Geography.
 15. Kiani Sefidan Jadid, T. (1384). Synoptic analysis of convective (torrential) rainfall in the southern Aras

30. Taylor, K. E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), pp.7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
31. Tegegne, G., Melesse, A. M. and Worqlul, A. W., 2020. Development of multi-model ensemble approach for enhanced assessment of impacts of climate change on climate extremes. *Science of the Total Environment*, 704, 135357. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135357>
32. Uwimbabazi, J., Jing, Y., Iyakaremye, V., Ullah, I. and Ayugi, B., 2022. Observed changes in meteorological drought events during 1977–2020 over Rwanda, East Africa. *Sustainability*, 14(3), 1519. <https://doi.org/10.3390/su14031519>
33. Yoo, J. H. and Kang, I. S., 2005. Theoretical examination of a multi-model composite for seasonal prediction. *Geophysical Research Letters*, 32(18). <https://doi.org/10.1029/2005GL023513>
34. Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... and Uddin, M. J., 2020. Future drought through multiple characteristics over South Asia from CMIP6 ensemble model. *Atmospheric Research*, 246, 105111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111>
- mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), pp.80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
23. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>
24. Knoben, W. J., Freer, J. E. and Woods, R. A., 2019. Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), pp.4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
25. Morsy, M., Moursy, F. I., Sayad, T. and Shaban, S., 2022. Climatological study of SPEI drought index using observed and CRU gridded dataset over Ethiopia. *Pure and Applied Geophysics*, 179(8), pp.3055-3073. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03091-z>
26. Pyarali, K., Peng, J., Disse, M. and Tuo, Y., 2022. Development and application of high resolution SPEI drought dataset for Central Asia. *Scientific Data*, 9(172), <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01279-5>
27. Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I. and Arnold, J. G., 2016. *CMhyd User Manual: Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies*. Texas: SWAT
28. Samantaray, A. K., Ramadas, M. and Panda, R. K., 2022. Changes in drought characteristics based on rainfall pattern drought index and the CMIP6 multi-model ensemble. *Agricultural Water Management*, 266, 107568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107568>
29. Sung, H. M., Kim, J., Shim, S. et al., 2021. Climate change projection in the twenty-first century simulated by NIMS-KMA CMIP6 model based on new GHGs concentration pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57, pp.851-862. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00225-6>