Archive of SID.ir

Integrated Watershed Management, Winter 2025, (4)4, 32-50 Article Type: Research

doi: 10.22034/iwm.2024.2022522.1133 Online ISSN: 2783-4581

Streamflow forecasting under the impacts of climate change based on the combined output of CMIP6 models (Case study: Dez Dam)

Fahimeh Khadempour[1], Mahdi Amirabadizadeh[2]*, Yashar Falamarzi[3]

1. Department of Water Engineering and Sciences, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
2. Department of Water Engineering and Sciences, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran and member of Drought and Climate Change Research Group
3. Department of Climate Modeling and Forecasting Research Group, Climatology Research Institute, Mashhad, Iran

* **Corresponding author**: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir

(Received: 11 Feburary 2024 Revised: 30 March 2024 Accepted:10 Jun 2024)

Extended Abstract

Introduction: Surface runoff is one of the main reasons for erosion, sedimentation and reduction of river water quality. Therefore, it is important to predict the watershed response to precipitation events. Selecting an appropriate rainfall and runoff model for the basin is crucial for effectively planning and managing water resources. Moreover, the increase in greenhouse gases can lead to numerous adverse effects on all systems interacting with the climate. In this research, the effect of chandes in precipitation and temperature investigated using BCSD downscaling method based on a combination of the output of AOGCM models of the 6th IPCC report under two emission scenarios of SSP245 and SSP585. This study projected future climate change scenarios and investigated the simulation of runoff entering the reservoir based on these scenarios to forecast river flow to the Dez Dam reservoir located in Khuzestan province, Iran.

Materials and methods: To examine the effects of climate change on streamflow in Dez dam station, the output of six AOGCM models from the 6th IPCC assessment report was utilized. The output of these models includes temperature and precipitation data for the base period of 1991-2020 and the future period of 2030-2059 and under SSP245 and SSP585 scenarios were extracted. Also, the simulation of the runoff entering the reservoir is based on two future climate scenarios in order to produce the river flow to the Dez dam reservoir.

Results and Discussion: The results of current research showed that the combined global climate model performs better than the other 6 individual models and also has a better fit with the observational data. Also, rainfall reduction in most months in SS245 scenario is more than SSP585. Temperature increases are more pronounced in the warmer months of the year than in the colder months. Furthermore, the results indicate that the IHACRES model effectively simulates flow during wet periods, or high flow rates, whereas its performance is less consistent during periods of low flow. The results indicate that the highest amount of increase in runoff in both scenarios compared to the observation period is in February at the rate of 248.20 m^3/s in the SSP585 scenario and the lowest amount in January at the amount of 194.26m^3/s in the SSP245 scenario.

Conclusions: In this research, the latest emission scenarios compiled in the 6th report of the IPCC were used and are more compatible with the climatic conditions of the planet. The results showed that the combined model performs better than the other 6 individual models; Therefore, the combined model was used to forecast the climate parameters of the study area under two emission scenarios of SSP245 and SSP585 in the future period (2030-2059). The results showed that the highest amount of rainfall occurs in the winter months. The temperature has increased in most months in both scenarios compared to the observation period. Therefore, upon reviewing the results, it is evident that there is good agreement between the measured and predicted values in the downscailing process. The BCSD model demonstrates strong performance in simulating precipitation and temperature at the Dez Dam station, making it suitable for estimation purposes. Also, based on the results, the IHACRES model has a good ability to simulate the flow in wet periods or, in other words, high discharges, while in low discharges, this adaptation is less. Investigating the impact of climate change on underground water resources and dam useful life is essential for water resources management. The results of this research can be useful in analyzing droughts, controlling destructive floods, allocating surface and underground water resources, increasing water regulation for drinking and agriculture, drought analysis, and comprehensive management of water resources at the basin level.

Key words: BCSD, CMIP6, Downscale, Emission Scenarios, SSP

Citation: Khadempour, F., Amirabadizadeh, M., & Falamarzi, Y. (2025). Streamflow forecasting under the impacts of climate change based on the combined output of CMIP6 models (Case study: Dez Dam). Integrated Watershed Management, 4(4), 32-50. doi: 10.22034/iwm.2024.2022522.1133

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال چهارم، شماره چهارم، صفحات (۵۰-۳۲) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2024.2022522.1133

پیش‌بینی جریان تحت تأثیر تغییر اقلیم بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: سد دز)

فهیمه خادم‌پور[۱]، مهدی امیرآبادی‌زاده[۲*]، یاشار فلامرزی[۳]

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم

۳- گروه پژوهشی مدل‌سازی و پیش‌آگاهی اقلیمی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد، ایران

*نویسنده مسئول: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۳/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱)

چکیده مبسوط

مقدمه: رواناب سطحی، یکی از دلایل عمده در فرسایش، رسوب‌گذاری و کاهش کیفیت آب رودخانه است؛ بنابراین، پیش‌بینی پاسخ حوضه به رویدادهای بارش مهم است. انتخاب یک مدل بارش رواناب مناسب برای حوضه از جهت بهره‌وری برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مهم است. از طرفی افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌تواند تأثیرات منفی زیادی بر کلیه سیستم‌هایی که در کنش با سیستم اقلیم می‌باشند، بگذارد. در این پژوهش، اثر تغییرات شاخص‌های بارش و دما با استفاده از روش ریزمقیاس سازی BCSD (روش جداسازی فضایی تصحیح اریبی) بر اساس ترکیبی از خروجی مدل‌های AOGCM گزارش ششم IPCCتحت دو سناریوی انتشار SSP245 و SSP585 به مقیاس محلی مدنظر و تولید سناریوهای تغییر اقلیم آتی و هم‌چنین، شبیه‌سازی رواناب ورودی به مخزن بر اساس سناریوهای اقلیمی به‌منظور تولید آورد رودخانه به مخزن سد دز واقع در استان خوزستان بررسی شد.

مواد و روش‌ها: برای بررسی اثرات تغییر اقلیم روی جریان در ایستگاه مطالعاتی سد دز، از خروجی ۶ مدل AOGCM مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC از پایگاه داده‌ای CMIP6 دریافت شده و با استفاده از ArcGIS10.8.2 اطلاعات منطقه موردنظر استخراج شد. سپس با انجام فرآیند معیارهای ارزیابی مدل‌ها نسبت به یکدیگر، مدلی که دارای عملکرد مناسب‌تری بود انتخاب و در نهایت سناریوهای آینده برای این مدل در نظر گرفته شد. خروجی این مدل‌ها شامل دما و بارش برای دوره پایه ۲۰۲۰-۱۹۹۱ و دوره آتی ۲۰۵۹-۲۰۳۰ و تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585 استخراج شدند. هم‌چنین، شبیه‌سازی رواناب ورودی به مخزن بر اساس سناریوهای اقلیمی آتی به‌منظور تولید آورد رودخانه به مخزن سد دز در استان خوزستان است.

بحث و نتایج: نتایج نشان داد که مدل ترکیبی نسبت به ۶ مدل منفرد دیگر عملکرد بهتری دارد و تناسب بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد. هم‌چنین، کاهش بارندگی در اغلب ماه‌ها در سناریوی SSP245 بیشتر از SSP585 است. افزایش دما در ماه‌های گرم سال بیشتر از ماه‌های سرد سال اتفاق می‌افتد. هم‌چنین، بر اساس نتایج، مدل IHACRES توانایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان در دوره‌های مرطوب یا به عبارتی دبی‌های بالا داشته است، این در حالی است که در مورد دبی‌های کم جریان این تطابق کمتر است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان افزایش رواناب در هر دو سناریو نسبت به دوره مشاهداتی در ماه فوریه (۱۲ بهمن تا ۱۰ اسفند) به میزان ۲۴۸/۲۰ مترمکعب بر ثانیه در سناریوی SSP585 و کمترین میزان آن در ماه ژانویه (۱۱ دی تا ۱۱ بهمن) به میزان ۱۹۴/۲۶ مترمکعب بر ثانیه در سناریوی SSP245 است.

نتیجه‌گیری: در این پژوهش از جدیدترین سناریوهای انتشار که در گزارش ششم IPCC تدوین‌شده و تطابق‌پذیری مناسب‌تری با شرایط اقلیمی کره‌زمین دارد استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی نسبت به ۶ مدل منفرد دیگر عملکرد بهتری دارد؛ بنابراین مدل ترکیبی جهت چشم‌انداز پارامترهای اقلیمی منطقه مورد مطالعه تحت دو سناریوی انتشار SSP245 و SSP585 در دوره آینده (۲۰۵۹-۲۰۳۰) استفاده شد. هم‌چنین، نتایج نشان داد که بیشترین میزان بارندگی در ماه‌های زمستان رخ می‌دهد. دما در اکثر ماه‌ها در هر دو سناریو نسبت به دوره مشاهده افزایش یافته است. بنابراین با بررسی نتایج مشخص شد که بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده همخوانی خوبی وجود دارد و مدل BCSD عملکرد خوبی برای شبیه‌سازی بارش و دما در ایستگاه سد دز دارد و می‌توان از آن برای تخمین استفاده کرد. هم‌چنین بر اساس نتایج، مدل IHACRES توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان در دوره‌های مرطوب یا به عبارتی دبی‌های بالا دارد، درحالی‌که در دبی‌های پایین، این سازگاری کمتر است. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و عمر مفید سد برای مدیریت منابع آب ضروری است. نتایج این تحقیق می‌تواند در تحلیل خشکسالی‌ها، کنترل سیلاب‌های مخرب، تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی، افزایش تنظیم آب برای شرب و کشاورزی، تحلیل خشکسالی و مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس‌نمائی، سناریوهای انتشار، BCSD، CMIP6، SSP

استناد: خادم‌پور، ف.، امیرآبادی‌زاده، م؛ و فلامرزی، ی. (۱۴۰۳). پیش‌بینی جریان تحت تأثیر تغییر اقلیم بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: سد دز). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۴(۴)، ۵۰-۳۲.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مقدمه

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای که به‌عنوان علت اصلی تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود، به‌طور مستقیم بر میزان و توزیع زمانی متغیرهای اقلیمی ازجمله بارندگی و دما تأثیر دارد (Ma *et al.*, 2013). تغییرات اقلیمی، میزان دفعات، شدت سیل و خشک‌سالی، زمان و بزرگی بارندگی و اوج ذوب برف را تغییر می‌دهد (Blackshear *et al.*, 2011). طبق گزارش هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی[1] (IPCC)، با توجه به تغییر آب‌و هوا در سراسر جهان در طول قرن گذشته، میانگین دمای جهانی مشاهده‌شده دو دوره زمانی ۱۹۰۰-۱۸۵۰ و ۲۰۰۵-۱۹۸۶ حدود ۰/۶۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (IPCC, 2014). IPCC در ارزیابی گزارش چهارم خود پیش‌بینی کرد که میانگین دمای جهانی برای پایان قرن ۲۱ (۲۰۹۰-۲۰۹۹) نسبت به دوره ۱۹۹۹-۱۹۸۰ با ۰/۳-۶/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (IPCC, 2007). هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم هم‌چنین اظهار داشت که تا اواسط قرن ۲۱، متوسط رواناب سالانه و میزان دسترسی آب در برخی مناطق گرمسیری مرطوب و در عرض‌های جغرافیایی بالا بین ۱۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد، درحالی‌که در بعضی از مناطق خشک در عرض متوسط جغرافیایی و در مناطق گرمسیری ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد (IPCC, 2007). این پیش‌بینی‌ها حاکی از اهمیت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم است. برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی، متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای انتشار مختلف شبیه‌سازی می‌شوند. هر یک از این سناریوها شامل طیف گسترده‌ای از تغییرات در رشد آینده جمعیت، هم‌چنین در عوامل اقتصادی، سیاسی و فناوری است که ممکن است در انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در هوا تأثیر بگذارد. مدل‌های گردش عمومی[2] (GCMs) برآوردهای معتبر از تغییرات اقلیمی آینده را ارائه می‌دهند (Randall *et al.*, 2007). این مدل‌ها به‌عنوان مفیدترین ابزار برای شبیه‌سازی آب‌وهوای حال و آینده در سناریوهای مختلف اقلیمی معرفی می‌شوند (Wilby *et al.*, 2002; Chu *et al.*,2010). محدودیت اصلی این مدل‌ها، بزرگ‌مقیاس بودن آن‌ها است. به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو، هیچ‌گاه نمی‌توان به‌طور مستقیم از آن در شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های بلندمدت اقلیمی بدون ریزمقیاس‌نمایی استفاده نمود و برای مطالعات در سطح منطقه‌ای و محلی مناسب نمی‌باشند؛ بنابراین، خروجی این مدل‌ها به‌منظور استفاده در مقیاس منطقه‌ای بایستی ریزمقیاس شوند (Harpham & Wilby, 2005; Fu & Charles, 2011; Liu *et al.*, 2013). IPCC از سال ۲۰۱۶ تدوین گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم[3] (CMIP6) را با همکاری مراکز تحقیقاتی مختلف در سطح جهان آغاز کرده است. نتیجه این همکاری منجر به فراهم‌سازی زمینه تولید مدل‌های جدید برای پیش‌بینی اقلیم آتی جهان و تکمیل آن‌ها تا سال ۲۰۲۲ خواهد بود (Tebaldi *et al.*, 2021). باوجوداین، در حال حاضر نیز خروجی برخی از مدل‌های گفته‌شده به‌تدریج از طریق پایگاه اطلاعاتی IPCC در اختیار عموم قرار گرفته است. استفاده از یک مدل منفرد AOGCM[4] برای برآورد تغییرات دما و بارش در نقاط مختلف جهان، یک روش معمول در بسیاری از تحقیقات قبلی در این زمینه به شمار می‌رود. ولی نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که استفاده از یک مدل واحد در این زمینه، ممکن است باعث ایجاد خطا و عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های مرتبط با تغییر اقلیم شود (Zareian., 2015). در این راستا استفاده از روش‌های ترکیبی برای افزایش دقت برآورد دما و بارش آتی نواحی مختلف جهان با استفاده از مدل‌های AOGCM مورد تأکید بسیاری قرار گرفته است. یکی از مرسوم‌ترین این روش‌ها، وزن‌دهی این مدل‌ها بر

[1] The Intergovernmental Panel on Climate Change
[2] General Circulation Models
[3] Coupled Model Intercomparison Project-Phase 6
[4] Atmosphere Ocean General Circulation Models

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی و استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی دما و بارش دوره آتی است (Gohari *et al.*, 2015). تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و رواناب در نواحی مختلف ایران و جهان صورت گرفته است. Lopez-Ballesteros و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی آینده به دلیل تغییرات آب و هوایی در حوضه رودخانه آراکتوس[5] در شمال غربی یونان پرداختند. نتایج نشان داد که در مقایسه با دوره تاریخی انتظار می‌رود میزان بارش و جریان کاهش‌یافته و حداکثر و حداقل دما افزایش یابد. Yazdandoost و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی شبیه‌سازی‌های بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6، عدم قطعیت و مقایسه بین مدل‌ها در مناطق آب و هوایی مختلف ایران پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌ها CMIP6 به بهترین نحو ویژگی‌های آب و هوایی بارش و تغییرات مکانی - زمانی آن را در مناطق خشک و فراخشک کشور بازتولید می‌کنند. مدل‌هایی که در منطقه مرطوب به‌خوبی عمل کردند در مناطق فراخشک و خشک به‌خوبی عمل نکردند. به‌طور مشابه، مدل‌هایی که در مناطق خشک و فراخشک عملکرد خوبی داشتند در مناطق مرطوب عملکرد خوبی نداشتند. Zhao و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی جریان بازسازی‌شده رودخانه جینگ[6] در غرب چین و چشم‌انداز ۳۹۹ ساله برای تغییرات هیدرولوژیکی در فلات لس[7] پرداختند. سناریوهای مختلف آب و هوایی، کاهش مستمر جریان رودخانه جینگ در آینده و بدتر شدن وضعیت منابع آب را نشان داد. این بازسازی جریان جدید می‌تواند به‌عنوان یک مرجع ارزشمند برای تجزیه‌وتحلیل هیدرولوژی منطقه‌ای و اطلاع‌رسانی مدیریت منابع آب و تدوین سیاست‌ها باشد. Han و همکاران (۲۰۲۳) تأثیرات تغییر آب‌وهوا بر رواناب طبیعی در حوضه رودخانه زرد[8] چین طی سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۲۰ را بررسی کردند. تجزیه‌وتحلیل نشان می‌دهد که کاهش رواناب طبیعی، عمدتاً ناشی از کاهش بارش است. Khadempour و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیرتعرق مرجع روزانه در مدل‌های با ساختار ریاضی متفاوت در اقلیم‌های مختلف ایران پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از افزایش دما و کاهش بارندگی و همچنین افزایش تبخیرتعرق روزانه در اقلیم‌های مختلف بود. Khadempour و Amirabadizadeh (۲۰۱۹) به بررسی سناریوهای تغییر اقلیم بر اساس نتایج حاصل از روش ریز مقیاس‌گردانی آماری برای متغیر دما در ایستگاه یاسوج پرداختند. در این مطالعه مشخص شد که مدل ریز مقیاس‌نمائی SDSM توانایی زیادی در مدل‌سازی داده‌ی میانگین دما در منطقه موردمطالعه را داشته است. Roshani و Hamidi (۲۰۲۱) پیش‌بینی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش بر اساس مدل‌های CMIP6 در ایستگاه ساری پرداختند. نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش بارش بود. Niroumand Fard و همکاران (۲۰۲۲) بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 در ایستگاه بیرجند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تغییرات دمای حداکثر و حداقل در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای روند افزایشی است و پارامتر بارش دارای روند سینوسی است و در برخی ماه‌ها افزایشی و در برخی کاهشی است، اما به‌طورکلی می‌توان گفت میانگین مجموع بارش‌های ماهانه در آینده تحت هر سه سناریوی برای مدل MIROC- ES2L روند افزایشی دارد. با توجه به در دسترس قرار گرفتن نتایج مدل‌های گزارش ششم IPCC و تحول صورت گرفته در زمینه توسعه این مدل‌ها نسبت به گزارش‌های قبلی IPCC، هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر تغییرات شاخص‌های بارش و دما با استفاده از روش

[5] Aracthos
[6] Jing River
[7] Loess Plateau
[8] Yellow River Basin

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ریزمقیاس‌سازی BCSD[9] (روش جداسازی فضایی تصحیح اریبی) بر اساس ترکیبی از خروجی مدل‌های AOGCM مربوط به گزارش ششم IPCC تحت دو سناریوی انتشار SSP245 و SSP585 به مقیاس محلی مدنظر و تولید سناریوهای تغییر اقلیم آتی و همچنین، شبیه‌سازی رواناب ورودی به مخزن بر اساس سناریوهای اقلیمی آتی به‌منظور تولید آورد رودخانه به مخزن سد دز واقع در استان خوزستان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

سد دز یک سد بتنی برقابی است که بر روی رودخانه دز در ۲۳ کیلومتری شمال اندیمشک احداث شد. این منطقه در محدوده عرض جغرافیایی '۳۲°۳۶ تا '۳۲°۴۵ شمالی و طول جغرافیایی '۴۸°۲۲ تا '۴۸°۳۹ شرقی قرار دارد. این سد ۱۲۵ هزار هکتار از اراضی پایین‌دست را آبیاری می‌کند و نقش مهمی در کنترل سیلاب‌های بالادست دارد. شهرستان‌های دزفول، شوش، شوشتر و اهواز در پایین‌دست آن قرار دارند و از افزایش خروجی این سد تأثیر می‌پذیرند. هدف اصلی از احداث سدهایی نظیر سد دز تأمین نیروی لازم جهت تولید برق، کنترل سیلاب‌ها و تنظیم آب جهت مصارف آبیاری است. شکل (۱)، موقعیت منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. داده‌های اقلیمی مورداستفاده در مقیاس ماهانه شامل بارش، حداقل و حداکثر دما و دبی در ایستگاه مطالعاتی در دوره پایه ۲۰۲۰-۱۹۹۱ است. داده‌های اقلیمی از سازمان آب و برق استان خوزستان اخذ شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

Figure 1- Geographical location of the study area

جدول ۱- فهرست ۶ مدل CMIP6 مورداستفاده در پژوهش حاضر

Table 1- List of 6 CMIP6 models used in this research

ردیف	مدل	کشور توسعه‌دهنده	نام مرکز تحقیقاتی	دقت مکانی (درجه)
1	ACCESS-CM2	استرالیا	Australian community climate and earth system simulator	1.25×1.87
2	CanESM5	کانادا	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	2.81×2.81
3	GFDL-ESM4	آمریکا	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1×1.25
4	IPSL-CM6A-LR	فرانسه	Institute Pierre Simon Laplace	1.125×2.5
5	MIROC6	ژاپن	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)	1.4×1.4
6	MRI-ESM2-0	ژاپن	Meteorological Research Institute	1.125×1.125

[9] Bias Corrected Spatial Disaggregation

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر ایستگاه مطالعاتی سد دز، از خروجی ۶ مدل AOGCM مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC از پایگاه داده‌ای CMIP6 دریافت شده و با استفاده از ArcGIS10.8.2 اطلاعات منطقه موردنظر استخراج شد. سپس با انجام فرآیند معیارهای ارزیابی مدل‌ها نسبت به یکدیگر، مدلی که دارای عملکرد مناسب‌تری بود انتخاب شد و در نهایت سناریوهای آینده برای این مدل در نظر گرفته شد که در ادامه ارائه شده است. دوره تاریخی این مدل‌ها از سال ۲۰۲۰-۱۹۹۱ و به مدت ۳۰ سال تهیه شد به این دلیل دوره تاریخی مدل‌های CMIP6 در این بازه است چون برای ایستگاه موردنظر این پژوهش (ایستگاه سد دز) نیز این دوره آماری در دسترس بود. مدل‌های مورداستفاده در این پژوهش که داده‌های بارش و دمای آن‌ها در دسترس بوده در جدول (۱) ارائه شده است. در این پژوهش از دو سناریوی حد متوسط (SSP245) و بدبینانه (SSP585) استفاده شد که در جدول (۲) ویژگی‌های آن‌ها به‌اختصار بیان شده است. برای افزایش دقت استفاده از مدل‌های AOGCM در برآورد دما و بارش در ایستگاه مطالعاتی، این مدل‌ها در هر ماه بر اساس شاخص‌های ارزیابی وزن‌دهی شدند. در پژوهش حاضر، جهت صحت‌سنجی پارامترهای بارش و دمای مدل‌های انتخاب‌شده CMIP6 از متوسط قدر مطلق خطا[10] (MAE)، ریشه متوسط خطای مربعات[11] (RMSE) و معیار اریب خطا[12] (MBE) استفاده شد. روابط در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات سناریوهای انتشار (O'Neil *et al.*, 2016)

Table 2- Characteristics of emission scenarios (O'Neil et al., 2017)

سناریوهای نتشار		
SSP	SSP245	SSP585
فناوری		
توسعه	متوسط، سریع ناهموار	سریع
شدت کربن	متوسط	بالا
تغییر فناوری انرژی	مقداری سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر اما اتکای مداوم به سوخت‌های فسیلی	هدایت به سمت سوخت‌های فسیلی؛ منابع جایگزین به طور فعال دنبال نشده‌اند
اقتصاد و سبک زندگی		
رشد (سرانه)	متوسط، ناهموار	بالا
جهانی‌شدن	اقتصاد نیمه‌باز جهانی شده	به شدت جهانی شده، به‌طور فزاینده‌ای مرتبط است
مصرف و رژیم غذایی	مصرف مواد فشرده، مصرف متوسط گوشت	مادی‌گرایی، مصرف وضعیت، گردشگری، تحرک، رژیم‌های غذایی غنی از گوشت
سیاست‌ها و نهادها		
همکاری بین‌المللی	نسبتاً ضعیف	مؤثر در تعقیب اهداف توسعه، محدودتر شدن اهداف
سیاست زیست‌محیطی	نگرانی برای آلاینده‌های محلی اما موفقیت متوسط در اجرا	تمرکز بر محیط محلی با مزایای آشکار برای رفاه، نگرانی کمی با مشکلات جهانی
جهاگیری سیاست	تمرکز ضعیف بر پایداری	به سوی توسعه، بازارهای آزاد، سرمایه انسانی

[10] Mean Absolute Error
[11] Root Mean Square Error
[12] Mean Bias Error

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۳- معیارهای ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی بارش و دما CMIP6

Table 3- Evaluation criteria of observed and simulated precipitation and temperature data CMIP6

روش	واحد	محدوده	روابط ریاضی
متوسط قدر مطلق خطا (MAE)	پارامتر	$[0 \sim +\infty)$	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lvert X_i - Y_i \rvert}{N}$
ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)	پارامتر	$[0 \sim +\infty)$	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Xi - Yi)^2}{N}}$
معیار اریبی خطا (MBE)	پارامتر	$(-\infty \sim +\infty)$	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - Y_i)}{N}$

که در روابط بالا، N تعداد کل داده‌ها، X_i داده‌های شبیه‌سازی شده، Y_i داده‌های مشاهداتی و i گام‌های زمانی است.

روش ریزمقیاس‌نمایی

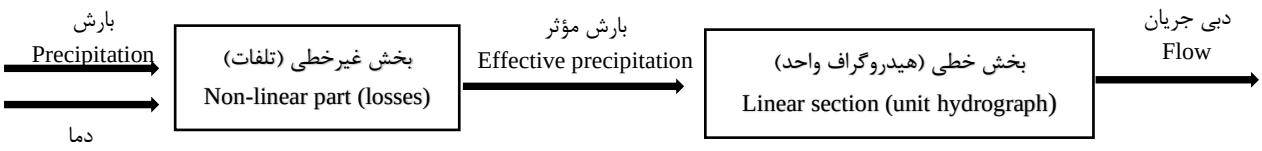
بسیاری از مدل‌های گردش عمومی برآورد کمتر یا بیشتر از مقدار مشاهداتی مؤلفه‌های اقلیمی (بارش، حداکثر و حداقل دما) دارند. به‌منظور تصحیح خطای داده‌های شبیه‌سازی‌شده ماهانه بارش و دما در دوره تاریخی و سپس دوره آینده در ایستگاه مطالعاتی و برای دیده‌بانی شده شبکه‌ای در مقیاس مکانی و دوره زمانی مشابه مقایسه می‌شوند. سپس شبیه‌سازی‌های GCM در دوره آینده بر اساس نتایج مقایسه انجام‌شده تنظیم و تصحیح می‌شوند. نهایتاً، به روش تولید داده سری زمانی داده‌های روزانه اقلیم آتی به روش تصادفی تولید می‌شوند. در این روش، پیش‌بینی شونده و پیش‌بینی‌کننده یکی هستند، منتهی مقیاس مکانی و زمانی آن‌ها مختلف است (Brekke *et al.*, 2013). پس از انجام تصحیحات مرحله اول بر روی برونداد شبکه‌ای مدل گردش عمومی، مرحله دوم روش BCSD می‌تواند با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و RStudio انجام گیرد.

تمامی مدل‌ها، از روش دینامیکی جداسازی فضایی تصحیح اریبی (BCSD) استفاده می‌شود که در ادامه توضیح داده خواهد شد. این روش دارای دو مرحله تصحیح اریبی و تولید داده است. در مرحله تصحیح اریبی، مقادیر میانگین‌گیری شده ماهانه مدل گردش عمومی (GCM) در دوره پایه با سری زمانی داده‌های

شبیه‌سازی بارش- رواناب

مدل بارش – رواناب IHACRES

این مدل یک مدل یکپارچه مفهومی- متریک برای شبیه‌سازی بارش- رواناب است که توسط جیکمن[13] در سال ۱۹۹۰ توسعه یافت. این مدل به پنج تا هفت متغیر برای واسنجی نیاز دارد و برای اجرا در حوضه‌های بزرگ مناسب است (Croke & Jakeman., 2008). این مدل مطابق شکل (۲) شامل دو بخش به‌هم‌پیوسته غیرخطی و خطی است که به ترتیب برای محاسبه تلفات و تبدیل بارش مؤثر به رواناب تعریف شده است (Croke & Jakeman.2008., Mclntyre & Al-Qurashi., 2009).



شکل ۲- ساختار مدل هیدرولوژیک IHACRES (Littlewood *et al.*, 1997)

Figure 2- Structure of IHACRES hydrological model (Littlewood *et al.*, 1997)

[13] Jikman

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تبدیل بارش به بارش مؤثر (بخش غیرخطی)

در این بخش، بارش مؤثر از حاصل‌ضرب بارش کل در شاخص رطوبت خاک حوضه در هر بازه زمانی محاسبه می‌شود که به‌صورت رابطه (۱) است.

$$u_k = [c(\Phi_k - l)]^P r_k \quad (۱)$$

که در آن، C ضریب تعادل حجم بارش، l آستانه شاخص رطوبت خاک، P فاکتور واکنش غیرخطی و r_k بارش مشاهداتی است. Φ_k شاخص رطوبت خاک است که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\Phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_k}\right)\Phi_{k-1} \quad (۲)$$

که در آن، τ_k برابر شدت خشکی خاک و به‌عنوان تابعی از دما است که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\tau_k = \tau_w \exp(f(T_{ref} - T_k) \times 0.062) \quad (۳)$$

که در آن، τ_w شدت خشکی خاک مبنا f تابع تعدیل دما (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات)، T_{ref} دمای مرجع و T_k دما در بازه زمانی موردنظر هستند. بعد از محاسبه بارش مؤثر، هیدروگراف واحد کل با استفاده از بخش خطی در مدل محاسبه می‌گردد.

تبدیل بارش مؤثر به رواناب (بخش خطی)

بخش خطی دارای سه پارامتر τ_q، τ_s و V_s (به ترتیب مدت‌زمانی‌که طول می‌کشد جریان سریع و آهسته کاهش یابد و حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد) است. ترکیب دو مؤلفه جریان سریع $x_k^{(q)}$ و جریان آهسته $x_k^{(s)}$ منجر به تولید رواناب x_k می‌شود که با استفاده از روابط (۴ تا ۶) محاسبه می‌گردد (Taesombat & Sriwongsitanon., 2010).

$$x_k = x_k^{(q)} + x_k^{(s)} \quad (۴)$$

$$x_k^{(q)} = -\alpha_q x_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \quad (۵)$$

$$x_k^{(s)} = -\alpha_s x_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k \quad (۶)$$

که در آن، α_q و β_q به ترتیب، ثابت زمانی جریان سریع و α_s و β_s به ترتیب، ثابت زمانی جریان آهسته می‌باشند که با استفاده از روابط (۷) و (۸) به دست می‌آیند.

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \quad (۷)$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \quad (۸)$$

که در آن، Δ بازه زمانی، τ_q و τ_s ثابت زمانی فروکش برای جریان سریع و آهسته در مخازن متوالی (برحسب‌روز) می‌باشند. نسبت حجمی جریان سریع و آهسته به‌صورت رابطه (۹) در نظر گرفته می‌شوند.

$$V_q = 1 - V_s = \frac{\beta_q}{1+\alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1+\alpha_s} \quad (۹)$$

واسنجی مدل

هدف از واسنجی مدل، حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده است (Ye *et al.*, 1998). در واسنجی مدل IHACRES مقادیر ثابت زمانی خشکی آبخیز τ_ω و فاکتور تعدیل دما f در بخش غیرخطی مدل به‌صورت دستی توسط کاربر انتخاب می‌شوند و مقادیر پارامترها در بخش روندیابی خطی مدل و پارامتر $1/C$ (ثابت میزان ذخیره آبخیز) توسط خود نرم‌افزار محاسبه می‌شود. در این مرحله، بهترین مدل بر اساس مقادیر معیارهای ارزیابی ضریب تبیین ساده و تبدیل‌شده (جذر، لگاریتم و معکوس) انتخاب می‌گردد.

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل

در ارزیابی نتایج شبیه‌سازی پیوسته جریان در مدل از معیارهای آماری مختلفی استفاده می‌شود که در روابط (۱۰) تا (۱۶) ارائه شده است. در رابطه (۱۰)، معیار ضریب تبیین (R^2) بر اساس رابطه میان مجذور مربعات خطا و واریانس مقادیر مشاهداتی بیان می‌گردد. سایر معیارها بر اساس معیار ضریب تبیین بنا نهاده شده‌اند، با این تفاوت مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر ریشه مربعات (رابطه ۱۱)، لگاریتم (رابطه ۱۲) و عکس مقادیر

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

(رابطه ۱۳)، جایگزین شده‌اند (Croke & Jakeman., 2008; Littlewood *et al.*, 1997). مقادیر معیارهای خطای نسبی[14] (RE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) بر اساس روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه شدند (Sadeghi *et al.*, 2005). در معیار خطای نسبی، قدر مطلق اختلاف نسبی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌صورت درصد بیان می‌گردد. در هر دو معیار مذکور، مقادیر کمتر، نشان‌دهنده خطای کمتر مدل در برآورد دبی جریان است. در معیار ضریب کارایی[15] (CE)، (رابطه ۱۶)، هر چه مقدار عددی ضریب مذکور به عدد یک نزدیک‌تر باشد، حاکی از توانایی بالاتر مدل در شبیه‌سازی خواهد بود. در این پژوهش، برای ارزیابی مدل هیدرولوژیکی از معیارهای R^2، NS و KGE استفاده شد که در جدول (۴) ارائه شده است.

$$R-sqrt = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^o - Q_i^m)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^o - \overline{Q^o})^2} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_o} - \sqrt{Q_m})^2}{\sum(\sqrt{Q_o} - \overline{\sqrt{Q_o}})^2} \quad (۱۱)$$

$$R^2log = 1 - \frac{\sum(\ln(Q_o + \varepsilon) - \ln(Q_m + \varepsilon))^2}{\sum(\ln(Q_o + \varepsilon) - \overline{\ln(Q_m + \varepsilon)})^2} \quad (۱۲)$$

$$R^2i_{nv} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\frac{1}{Q_i^o + \varepsilon} - \frac{1}{Q_i^m + \varepsilon})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\frac{1}{Q_i^o + \varepsilon} - \overline{\frac{1}{Q_i^o + \varepsilon}})^2} \quad (۱۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n}\sum(Q_o - Q_m)^2}{n}} \quad (۱۴)$$

$$C_E = \frac{\frac{1}{n}\sum_{0}^{i=1}(Q_o - \overline{Q_o})^2 - \frac{1}{n}\sum_{n}^{i=1}(Q_o - Q_m)^2}{\frac{1}{n}\sum_{0}^{i=1}(Q_o - \overline{Q_o})^2} \quad (۱۵)$$

$$RE = \left|\frac{Q_o - Q_m}{Q_o}\right| \times 100 \quad (۱۶)$$

که در آن، Q_o داده‌های مشاهداتی، $\bar{Q}_o$ میانگین داده‌های مشاهداتی، Q_m داده‌های شبیه‌سازی‌شده، ε مقداری است که برای داده‌های صفر جریان مشاهداتی در نظر گرفته می‌شود و n تعداد مشاهدات است. مقدار ضریب تبیین بین منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و مقدار یک نشان‌دهنده تطابق کامل است. هر چه مقادیر سایر ضرایب به عدد یک نزدیک‌تر باشد، تناسب بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی بیشتر خواهد بود (Blaker & Norton, 2007; Sadeghi *et al.*, 2005).

نتایج و بحث

نتایج تغییر اقلیم

برای تعیین بهترین مدل در منطقه مطالعاتی، برونداد تاریخی ۶ مدل اقلیمی موردنظر و مدل ترکیبی را نسبت به داده‌های مشاهداتی با استفاده از معیارهای MBE، RMSE و MAE برای پارامترهای دما و بارش مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول (۵)، مشاهده می‌شود که مدل ترکیبی در پارامترهای بارش و دما دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد است. در نتیجه مدل ترکیبی دارای توانمندی بیشتری در

[14] Relative Error

[15] Coefficient of Efficiency

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شبیه‌سازی بارش و دمای مشاهداتی منطقه موردمطالعه است. لذا این مدل به دلیل برتری در عملکرد نسبت به مدل‌های منفرد، برای بررسی و تحلیل تغییرات اقلیمی منطقه مطالعاتی تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585 انتخاب گردید؛ بنابراین ریزمقیاس نمایی پارامترهای بارش و دما تحت دو سناریوی انتشار برای مدل ترکیبی در دوره آینده ۲۰۳۰-۲۰۵۹ انجام شد.

جدول ۵- مقایسه آماری و انتخاب بهترین مدل

Table 5- Statistical comparison and selection of the best model

پارامتر	مدل	MBE	RMSE	MAE
بارش	ACCESS-CM2	-15.48	41.69	19.44
	CanESM5	1.77	11.89	6.96
	GFDL-ESM4	-27.15	48.26	28.36
	IPSL-CM6A-LR	-2.79	19.49	9.91
	MIROC6	-4.02	17.13	9.32
	MRI-ESM2-0	-16.38	32.22	18.75
	مدل ترکیبی	1.20	9.13	6.50
دما	ACCESS-CM2	1.39	3.76	3.10
	CanESM5	4.67	8.98	7.27
	GFDL-ESM4	2.93	8.29	6.74
	IPSL-CM6A-LR	1.51	3.14	2.33
	MIROC6	-7.34	8.76	7.55
	مدل ترکیبی	0.92	2.89	2.20

بررسی تغییرات پارامترهای دما و بارش در شرایط تغییر اقلیم

نتایج مقادیر میانگین ماهانه دما و بارش داده‌های مشاهداتی ایستگاه سد دز در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ و داده‌های خروجی مدل ترکیبی تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585 در جدول‌های (۶ و ۷) و شکل‌های (۳ و ۴) نشان داده شده است. برای داده‌های بارش در جدول (۶) و شکل (۳) مشاهده می‌شود که بیشترین افزایش بارش در ماه مارس (۱۰ اسفند تا ۱۱ فروردین) به میزان ۰/۴۶ میلی‌متر نسبت به دوره مشاهداتی در سناریوی SSP245 است و بیشترین کاهش بارندگی در ماه‌های ژوئیه و آگوست (۱۱ مرداد تا ۹ شهریور) خواهد بود. هم‌چنین، بارندگی مربوط به دوره مشاهداتی نشان می‌دهد که بیشینه بارندگی‌ها در ماه‌های فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) اتفاق می‌افتد. کاهش بارندگی در اغلب ماه‌ها (نسبت به دوره مشاهداتی) در سناریوی SSP245 بیشتر از SSP585 است و بیشترین کاهش بارندگی در ماه‌های فصل تابستان خواهد بود. با توجه به جدول (۷) و شکل (۴) مشاهده می‌شود، مقادیر میانگین تغییرات ماهانه دما در برخی ماه‌ها دارای روند افزایشی است. بیشترین افزایش دما مربوط به ماه ژوئیه (۱۰ تیر تا ۹ مرداد) به میزان ۱/۷۰ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP585 نسبت به دوره مشاهداتی است. هم‌چنین مشاهده می‌شود میانگین تغییرات دما در فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه، آگوست) نسبت به سایر فصل‌ها بیشتر است. Roshani و Hamidi (۲۰۲۱) پیش‌بینی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش براساس مدل‌های CMIP6 در ایستگاه ساری پرداختند. نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش بارش بود. Zareian (۲۰۲۱) در پژوهشی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 تحت سناریوی انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 را بررسی کرد. نتایج نشان داد که در تمامی سناریوهای انتشار، دما افزایش و بارندگی کاهش پیدا خواهد کرد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۶- مقایسه میانگین ماهانه بارش در دوره مشاهداتی و آینده تحت سناریوهای SSP245 و SSP585

Table 6 - Comparison of monthly average precipitation in the observation period and the future under SSP245 and SSP585 scenarios

SSP585	SSP245	دوره مشاهداتی	ماه
10.44	9.52	13.21	ژانویه
9.82	9.70	11.00	فوریه
10.57	10.95	11.41	مارس
10.25	9.81	9.97	آوریل
6.20	4.85	7.02	می
0.13	0.11	0.38	ژوئن
0.00	0.00	0.00	ژوئیه
0.00	0.00	0.00	آگوست
0.62	1.77	1.13	سپتامبر
3.04	8.75	3.05	اکتبر
9.12	9.33	9.70	نوامبر
10.93	9.48	13.83	دسامبر

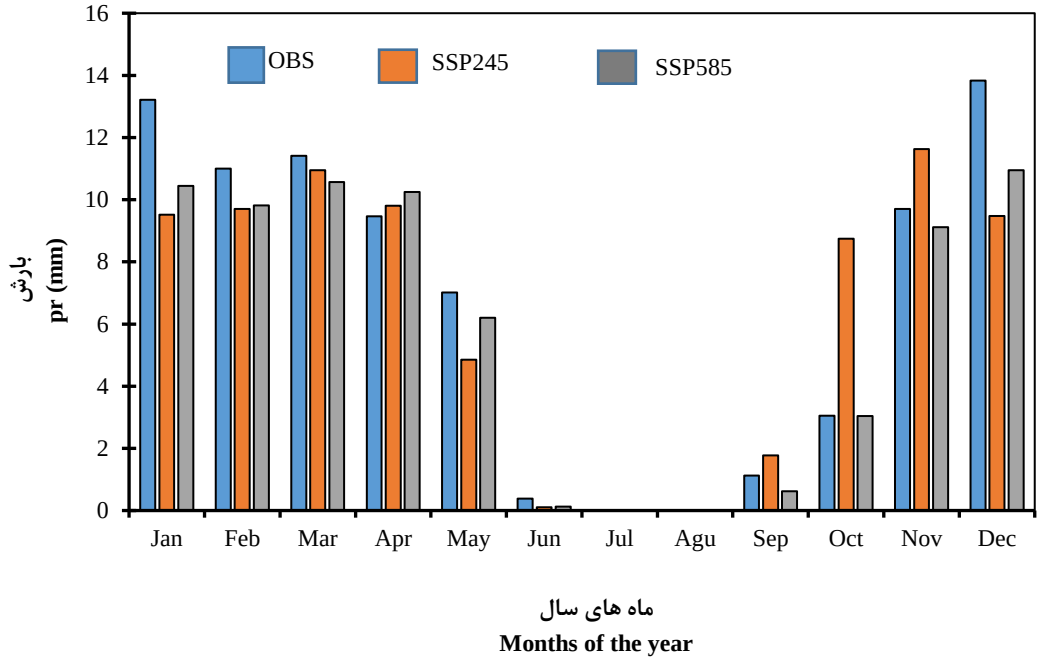
جدول ۷- مقایسه میانگین ماهانه دما در دوره مشاهداتی و آینده تحت سناریوهای SSP245 و SSP585

Table 7 - Comparison of monthly average temperature in the observation period and the future under SSP245 and SSP585 scenarios

SSP585	SSP245	دوره مشاهداتی	ماه
12.32	11.87	12.30	ژانویه
14.69	14.24	12.56	فوریه
19.20	18.82	16.05	مارس
24.66	24.14	20.05	آوریل
31.06	30.08	27.11	می
36.87	36.85	34.24	ژوئن
39.40	39.26	37.70	ژوئیه
37.83	38.05	38.14	آگوست
32.95	33.58	35.18	سپتامبر
28.26	27.14	29.78	اکتبر
18.66	19.05	22.50	نوامبر
13.52	13.65	14.70	دسامبر

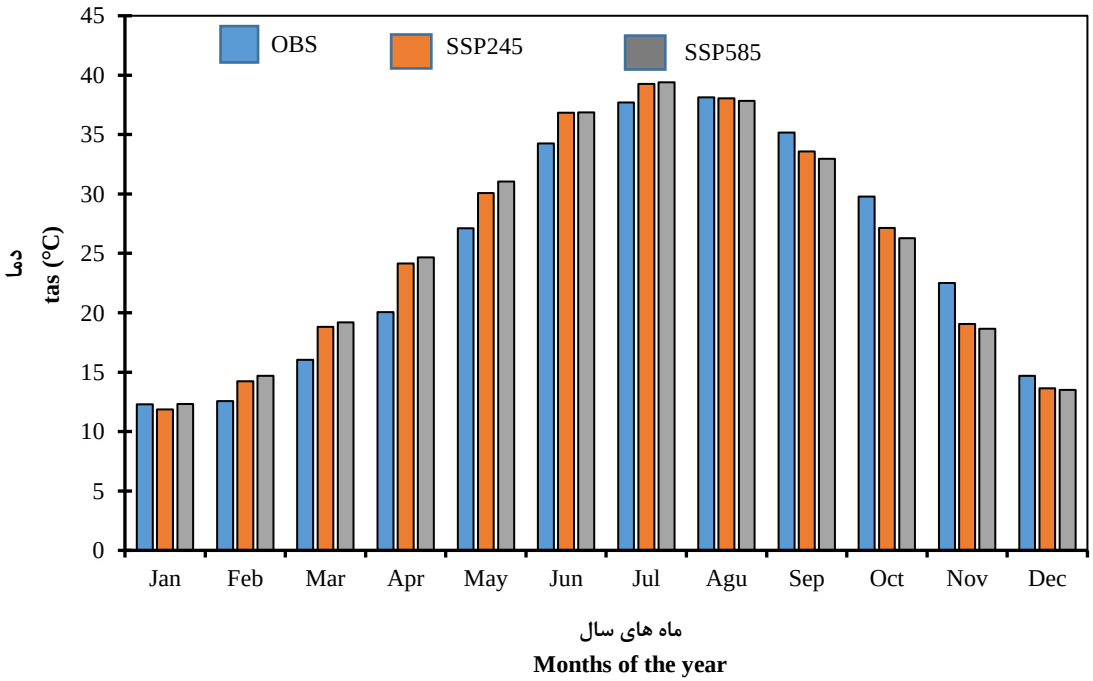
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۳- تغییرات میانگین بلندمدت پارامتر بارش تحت سناریوهای SSP در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۹۱-۲۰۲۰)

Figure 3- Long-term average changes of precipitation parameters under SSP scenarios in the future period (2030-2059) compared to the observation period (1991-2020)



شکل ۴- تغییرات میانگین بلندمدت پارامتر دما تحت سناریوهای SSP در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۹۱-۲۰۲۰)

Figure 4- Long-term average changes of temperature parameters under SSP scenarios in the future period (2030-2059) compared to the observation period (1991-2020)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نتایج مدل IHACRES

به‌منظور شبیه‌سازی جریان در مقیاس ماهانه برای حوضه سد دز، ابتدا ۳ درصد از داده‌ها به‌عنوان Warm-Up مدل در نظر گرفته شد. ازآنجاکه مدل IHACRES برای اینکه بتواند دبی‌های حداکثر را به‌خوبی شبیه‌سازی کند، باید دوره واسنجی را به گونه‌ای در نظر گرفت که شامل تعداد کافی از این وقایع باشد؛ بنابراین با در نظر گرفتن این مطلب، در این پژوهش مدل IHACRES در سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۹۱ واسنجی گردید. پارامترهای بهینه‌شده برای حوضه تله‌زنگ حوضه بالادست سد دز و هم‌چنین نتایج عملکرد حوضه به ترتیب در جدول‌های (۸ و ۹) آورده شده است. در مرحله بعد، مدل واسنجی شده در طول سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۰۹ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. پس از اجرای مدل برای حوضه و انجام واسنجی با روش سعی و خطا، مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، امکان ارزیابی کلی و سریع مدل را فراهم می‌کند. بر این اساس، مقایسه کرافیگی مقادیر ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده جریان برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های (۵ و ۶) ارائه شده است.

جدول ۸- مقادیر پارامترهای بهینه به‌دست‌آمده از مرحله واسنجی مدل IHACRES درحوضه تله زنگ

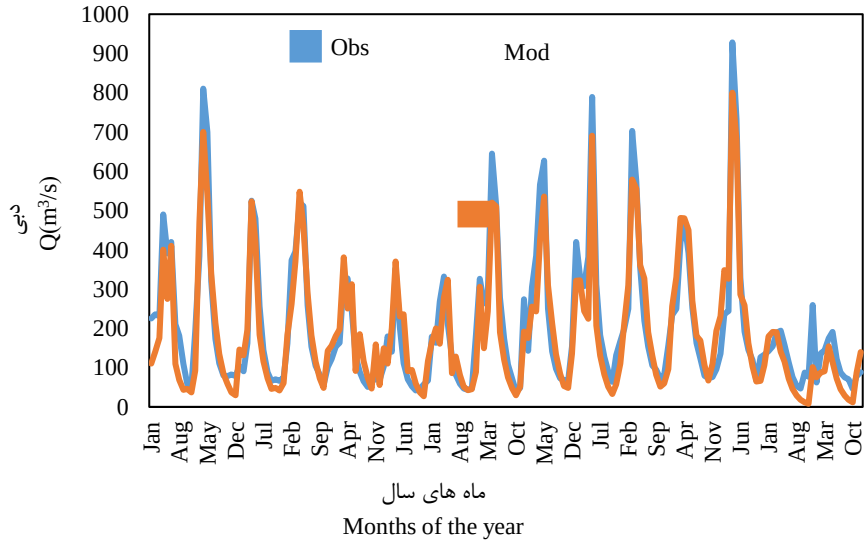
Table 8- The values of the optimal parameters obtained from the recalibration stage of the IHACRES model in the Tale- Zang watershed

پارامتر	V(s)	τ(s)	C	f	τ(w)
مقادیر اولیه	1.00	3.92	29.99	0.00	2.00
مقادیر واسنجی و بهینه	1.00	2.17	0.057940	3.00	30.00

جدول ۹- نتایج عملکرد مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHACRES

Table 9- Performance results of the calibration and validation stage of the IHACRES model

دوره	R^2	NS	KGE
واسنجی	0.86	0.84	0.84
صحت‌سنجی	0.93	0.87	0.92

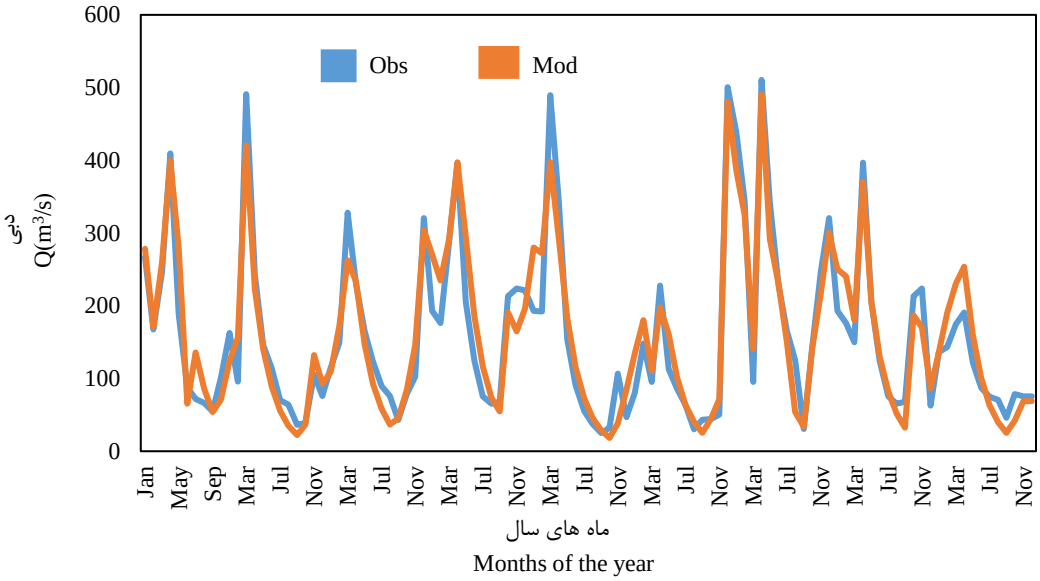


شکل ۵- سری زمانی رواناب مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل IHACRES در دوره واسنجی

Figure 5- Observed and predicted runoff time series by the IHACRES model in the calibration period

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۶- سری زمانی رواناب مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل IHACRES در دوره صحت‌سنجی

Figure 6- The observed and predicted runoff time series by the IHACRES model during the validation period

با استفاده از اطلاعات جدول (۹)، در ایستگاه مطالعاتی مقادیر معیارهای ارزیابی قابل مشاهده است. Motovilov و همکاران (۱۹۹۹) که مطالعه‌ای بر اساس ۷ سال داده انجام داده بودند، بیان نموده‌اند که اگر مقادیر NS و R^2 در ارزیابی مدل بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۷۵ باشد، نتایج خوب و درصورتی‌که این مقدار ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی قابل قبول است؛ بنابراین، نتایج ایستگاه مطالعاتی قابل‌قبول است و مدل IHACRES توانسته است جریان را تا حد قابل قبولی شبیه‌سازی کند. با توجه به عملکرد در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل‌های (۵ و ۶) می‌توان دریافت که عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان در مرحله صحت‌سنجی بهتر از مرحله واسنجی بوده است که این نتیجه با نتایج Muelchi و همکاران (۲۰۲۱) و Asgari و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. پارامتر v(s) نشان‌دهنده مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه‌ای است و مقادیر زیاد این پارامتر نشان‌دهنده وجود جریان پایه بیشتر رودخانه است. این نتیجه با نتایج Zareii و همکاران (۲۰۱۰) و Kheirfam و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد. C حجم رطوبت ذخیره‌شده در حوضه برحسب میلی‌متر است و نشان‌دهنده سرعت واکنش حوزه آبخیز نسبت به بارش است. مقدار به‌دست‌آمده برای این دو عامل در این حوضه بسیار کم بوده و بنابراین حوضه نسبت به بارش با سرعت کمتری واکنش نشان می‌دهد، که علت آن را احتمالاً می‌توان در وجود پوشش جنگلی در بخش‌هایی از حوضه دانست که باعث تأخیر در تولید جریان می‌شود. بر اساس نتایج، مدل IHACRES توانایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان در دوره‌های مرطوب یا به عبارتی دبی‌های بالا داشته است، این در حالی است که در مورد دبی‌های کم جریان این تطابق کمتر است. در مرحله واسنجی، کمترین و بیشترین دبی پایه به ترتیب، ۳۹/۶۵m^3/s در ماه اکتبر (۹ مهر تا ۹ آبان) و ۹۲۸/۱۹m^3/s در ماه آوریل بوده است. هم‌چنین، کمترین و بیشترین دبی آینده به ترتیب، ۷/۹۳m^3/s در ماه نوامبر و ۸۰۰/۲۰m^3/s در ماه آوریل بود. در مرحله صحت‌سنجی، کمترین دبی پایه ۲۵/۱۱m^3/s در ماه سپتامبر (۱۰ شهریور تا ۸ مهر) و کمترین دبی آینده ۱۸/۳۰m^3/s در ماه اکتبر بوده است. هم‌چنین، بیشترین و کمترین دبی پایه و آینده در ماه آوریل به ترتیب با مقادیر ۵۱۰/۵۶m^3/s و ۴۹۰/۵۴m^3/s بود.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

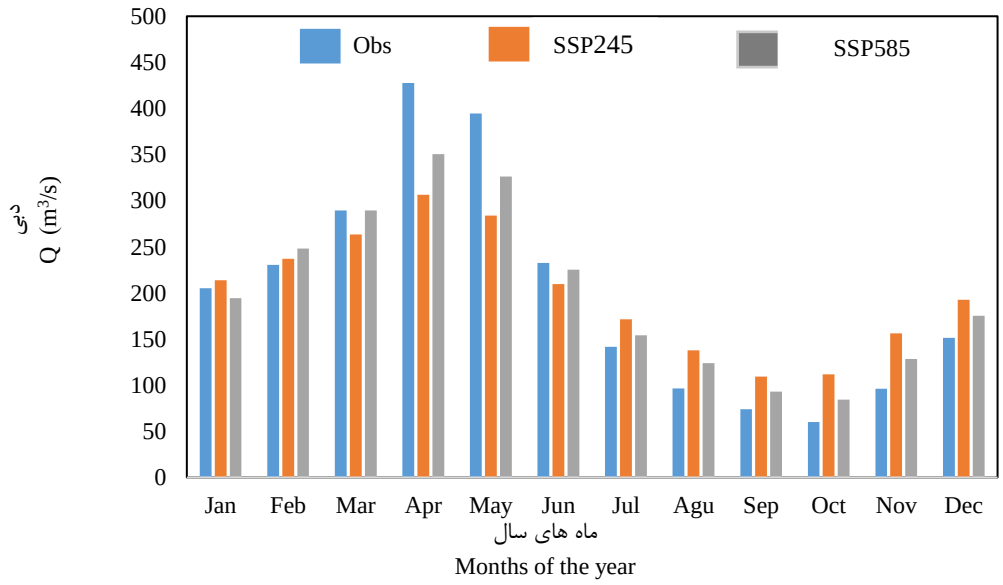
پیش‌بینی جریان آینده حوضه آبریز سد دز تحت شرایط تغییر اقلیم

در این مرحله به‌منظور پیش‌بینی جریان در افق‌های آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم از داده‌های ریزمقیاس شده به‌عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی استفاده شد. سپس متوسط رواناب درازمدت (۳۰ ساله) دوره آتی با متوسط رواناب دوره مشاهداتی در هر دو سناریو موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره ۲۰۵۹-۲۰۳۰ به میزان ۱/۳۸ m^3/s در سناریوی SSP245 و به میزان ۰/۹m^3/s در سناریوی SSP585 نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت (جدول ۱۰).

جدول ۱۰- پارامتر آماری سالانه دبی تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 در مدل IHACRES

Table 10- Annual statistical parameters of discharge under the SSP245 and SSP585 scenarios in the IHACRES model

سناریوها و دوره پایه	متوسط سالانه دبی (m^3/s)
1991-2020	200.34
SSP245	198.96
SSP585	199.44



شکل ۷- میانگین درازمدت ماهانه رواناب طی دوره مشاهداتی و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوهای SSP245 و SSP585

Figure 7- Long-term average monthly runoff during the observation period and climate change periods of SSP245 and SSP585 scenarios

با توجه به نتایج شکل (۷)، در برخی از ماه‌های سال افزایش و در برخی دیگر کاهش میزان رواناب در دوره آتی را شاهد خواهیم بود. افزایش میزان رواناب در هر دو سناریو در ماه‌های فوریه، ژوئیه، آگوست (۱۰ مرداد تا ۹ شهریور)، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر و در سایر ماه‌ها کاهش میزان رواناب را طی دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی انتظار خواهیم داشت. بیشترین میزان افزایش رواناب در هر دو سناریو نسبت به دوره مشاهداتی در ماه فوریه به میزان ۲۴۸/۲۰m^3/s در سناریوی SSP585 و کمترین میزان آن در ماه ژانویه به میزان ۱۹۴/۲۶m^3/s در سناریوی SSP245 است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از جدیدترین سناریوهای انتشار که در گزارش ششم IPCC تدوین‌شده و تطابق‌پذیری مناسب‌تری با شرایط اقلیمی کره زمین دارد استفاده شد. برای رسیدن به این هدف از یکی از پرکاربردترین مدل‌های ریزمقیاس‌نمائی (BCSD) استفاده گردید. هم‌چنین از ۶ مدل AOGCM که تا لحظه نگارش این پژوهش هر دو داده‌های دمای میانگین و بارش آن‌ها در هر دو سناریوی SSP245 و SSP585 برای دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) بر روی پایگاه‌های اطلاعاتی قرار داشت استخراج گردید. سپس از مدل BCSD برای ریزمقیاس نمایی داده‌ها استفاده شد و با به کار بردن آزمون‌های آماری MBE، RMSE و MAE مدل‌ها موردبررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی نسبت به ۶ مدل منفرد دیگر عملکرد بهتری دارد و هم‌چنین تناسب بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد و دارای کمترین مقدار RMSE در هر دو پارامتر نسبت به سایر مدل‌ها است. بنابراین مدل ترکیبی جهت چشم‌انداز پارامترهای اقلیمی منطقه موردمطالعه تحت دو سناریوی انتشار SSP245 و SSP585 در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) استفاده شد. هم‌چنین، نتایج نشان داد که بیشترین بارندگی‌ها در ماه‌های فصل زمستان رخ می‌دهد. کاهش بارندگی در اغلب ماه‌ها (نسبت به دوره مشاهداتی) در سناریوی SSP245 بیشتر از SSP585 است و بیشترین کاهش بارندگی در ماه‌های فصل تابستان خواهد بود. هم‌چنین، دما در اغلب ماه‌ها در هر دو سناریو نسبت به دوره مشاهداتی افزایش داشته است. افزایش دما در ماه‌های گرم سال بیشتر از ماه‌های سرد سال اتفاق می‌افتد. بنابراین، با بررسی نتایج مشخص شد که سازگاری خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده وجود دارد و مدل BCSD عملکرد مناسبی برای شبیه‌سازی بارش و دما در ایستگاه سد دز را دارد و می‌توان از آن در برآورد این متغیرها در دوره‌های آینده بهره برد. هم‌چنین، بر اساس نتایج، مدل IHACRES توانایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان در دوره‌های مرطوب یا به عبارتی دبی‌های بالا داشته است، این در حالی است که در مورد دبی‌های کم جریان این تطابق کمتر است. نتایج نشان می‌دهد که متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۹ به میزان ۱/۳۸m^3/s در سناریوی SSP245 و به میزان ۰/۹m^3/s در سناریوی SSP585 نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش رواناب در هر دو سناریو نسبت به دوره مشاهداتی در ماه فوریه به میزان ۲۴۸/۲۰m^3/s در سناریوی SSP585 و کمترین میزان آن در ماه ژانویه به میزان ۱۹۴/۲۶m^3/s در سناریوی SSP245 است. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و طول عمر مفید سد برای مدیریت منابع آب ضروری است. از نتایج این پژوهش می‌توان در تحلیل خشکسالی‌ها، کنترل سیلاب‌های مخرب، تخصیص منابع آب سطحی، زیرزمینی، بالا بردن تنظیم آب برای مصارف شرب و کشاورزی و مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه کاربردی خواهد بود.

References

Asgari, E., Baaghideh, M., Entezari, A., Hoseeini, M., & Kamyar. A. (2022). Evaluation of changes in reservoir volume and inflow to Dez Dam under climate change conditions. *Physical Geography Research Quarterly*, 54(3), 365-384. https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.347398.1007721 (In Persian)

Blackshear, B., Crocker, T., Drucker, E., Filoon, J., Knelman, J., & Skiles, M. (2011). Hydropower Vulnerability and Climate Change, A Framework for Modeling the Future of Global Hydroelectric Resources. *Middlebury College Environmental Studies Senior Seminar*, Middlebury, VT, USA.

Blaker, R.S., & Norton, J.P. (2007). Efficient investigation of the feasible parameter set

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

for large models. Proceeding of the International Congress on Modelling and Simulation, *MODSIM: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, 1526-1532.

Brekke, L., Thrasher, B.L., Maurer, E.P., & Pruitt, T. (2013). *Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate Projections: Release of Downscaled CMIP5 Climate Projections, Comparison with Preceding Information, and Summary of User Needs. U.S.* Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, (p.116).

Chu, J.T., Xia, J., Xu, C.Y., & Singh, V.P. (2010). Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China. *Theoretical Applied Climatology*, 99, 149–161. https://doi.org/10.1007/s00704-009-01296

Croke, B.F., & Jakeman, A.J. (2008). *Use of the IHACRES rainfall- runoff model in arid and semi- arid regions*. In: H.S. Wheater, S. Sorooshian and K.D. Sharma, (eds.) *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*, 41-48. Cambridge University Press, Cambridge. https://doi.org/10.1017/CBO9780511535734.005

Fu, G., & Charles, S.P. (2011). *Statistical downscaling of daily rainfall for southeastern Australia*. In Proceedings of the Symposium JH02 Held during IUGG2011, Melbourne, Australia, 28 June–7 July 2011; IAHS Publ 344; IAHS Press: Wallingford, Melbourn, Australia, 69–74.

Gohari, A., Zareian, M.J., & Eslamian, S. (2015). *A multi-model framework for climate change impact assessment. handbook of climate change adaptation*, Ed. By Leal Filho, W., Springer, 17-35.

Han, Z., Zuo, Q., Wang, Ch., & Gan, R. (2023). Impact of climate change on natural runoff in the Yelliw River Basin of china during 1961-2020. *Journal of Water*, 15(5), 929. https://doi.org/10.3390/w15050929

Harpham, C., & Wilby, R.L. (2005). Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. *Journal of Hydrology*, 312, 235–255. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.020

IPCC. (2007). Summary for policymakers. contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: impacts, adaptation and vulnerability; Cambridge University Press: Cambridge, UK.

IPCC. (2014). Summary for policymakers. In Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Khadempour, F., Khozeymehnezhad, H., & Amirabadizadeh, M. (2019). Investigating the effects of climate change on daily evapotranspiration in models with different mathematical structures in various climates of Iran. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sci.)*, 33(1), 149-163. https://doi.org/10.22092/jwra.2019.119121 (In Persian)

Khadempour, F., & Amirabadizadeh, M. (2019). Investigating climate change scenarios based on the results of microscale statistical rotation method for temperature variable (case study: Yasouj station). *The 4th International Congress of Agricultural Development, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, Tabriz- Tabriz University of Islamic Arts, Permanent Secretariat- Miyad University and in cooperation with Shiraz University, Yasouj University and Mazandaran University, 23-25 August 2018*. https://civillica.com/doc/97132 (In Persian)

Kheirfam, H., Mostafazadeh, R., & Sadeghi., S.H.R. (2013). Daily discharge prediction using ihacres model in some watersheds of Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*, 4(7), 114-127. (In Persian)

Littlewood, I.G., Down, K., Parker, J., & Post, D. (1997). *IHACRES v1.0 user guide. Center for ecology and hydrology, wallingford, UK and Intergrated catchment assessment and management center*, Australian National University, Canberra, (pp. 94).

Liu, W., Fu, G., Liu, C., Song, X., & Ouyang, R. (2013). Projection of future rainfall for the North China Plain using two statistical downscaling models and its hydrological implications. Stoch. *Environmental*

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Research and Risk Assessment, 27(8), 1783–1797. https://doi.org/10.1007/s00477-013-0714-1

Lopez-Ballesteros, A., Senent-Aparicio, J., Martinez, C., & Perez-Sanchez, J. (2020). Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Aracthos River basin (NW Greece). *Science of the Total Environment*, 733, 139299. https://doi.org/101016/j.scitotenv.2020.139299

Ma, Z.F., Liu, J., & Yang, S.Q. (2013). Climate Change in Southwest China during 1961–2010: Impacts and Adaptation. *Advances in Climate Change Research*, 4(4), 223–229. https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2013.223

Mclntyre, N., & Al-Qurashi, A. (2009). Performance of ten rainfall- runoff models applied to an arid catchment in Oman. *Environmental Modelling and Software*, 24(6), 726-738. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.001

Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., & Rodhe, A. (1999). Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99, 257-277. https://doi.org/10.1016/S01681923(99)00102-1

Muelchi, R., Rossler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., & Martius, O. (2021). An ensemble of daily simulated runoff data (1981-2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble). *Geoscience Data Journal*, 9(1), 46-57. https://doi.org/10.1002/gdj3.117

Niroumandfard, F., Khashei Sivaki, A., Hashemi, R., & Ghorbani, Kh. (2022). Investigation of climate change projection on temperature and precipitation parameters using cmip 6 models (Case study: Birjand Station). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2009-2026. https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284 (In Persian).

O'Neil, B.C., Tebaldi, C., & van Vuuren, D.P. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMTP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461-82. https://doi.org/0.5194/gmd-9-3461-2016

Randall, D.A., Wood, R.A., Bony, S., Colman, R., Fichefet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., & Stouffer, R.J. (2007). Climate models and their evaluation. In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK*.

Roshani, A., & Hamidi, M. (2021). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water management and Irrigation*, 11(4), 781-795. https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603.920 (In Persian)

Sadeghi, S.H.R., Yasrebi, B., & NoorMohammadi, F. (2005). Development and analysis of monthly precipitation runoff relationships for Haraz Watershed in Mazandaran Province. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources of Khazar*, 3(1), 1-12. (In Persian)

Taesombat, W., & Sriwongsitanon, N. (2010). Flood investigation in the upper Ping River basin using mathematical models. *Kasetsart Natural Science*, 44(1), 152-166.

Tebaldi, C., K. Debeire, V. Eyring, E. Fischer, J. Fyfe, P. Friedlingstein, R. Knutti, J. Lowe, B. O'Neill, B. Sanderson., & D. van Vuuren. (2021). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253-293. https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021

Wilby, R.L., Dawson, C.W., & Barrow, E.M. (2002). SDSM—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145–157. https://doi.org/10.1016/S13648152(01)00060-3

Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climate zones; Uncertainty and model intercomparison. *Journal of Atmospheric Research*, 250, 105369.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369

Ye, W., Jakeman, A.J., & Young, P.C. (1998). Identification of improved rainfall-runoff models for an ephemeral low-yieldind Australian catchement. *Environmental Modelling and Software*, 13(1), 59-74. https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00004-8

Zareii, M., Habibenegad, M., Ghanbarpour, M.R., & Shahedi, K. (2010). Hydrological Model Classification and Description IHACRES Rainfall-Runoff Model. *The 5th National Conference on Watershed Sciences and Engineering of Iran (Sustainable Management of Natural Disasters). Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*. (In Persian).

Zareian, M. J., Eslamian, S., & Safavi, H.R. (2015). A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theoretical and Applied Climatology* 122(3), 497-516. (In Persian)

Zareian, M.J. (2022). Effects of climate change on temperature and precipitation in Yazd Province based on combined output of cmip6 models. *Journal of Water and Soil Science*, 26(2), 91-105. https://doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501 (In Persian)

Zhao, X., Fang, K., Chen, F., Martin, H., & Roig, F.A. (2023). Reconstructed Jing River streamflow from western China; a 399-year perspective for hydrological changes in the Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 621, 129573. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129573

Archive of SID.ir