

مقاله پژوهشی

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دبی ورودی به سد جره با استفاده از خروجی مدل‌های CMIP5

مریم دهقانی فرد^۱، رسول میرعباسی نجف آبادی^{۲*}، محمدعلی نصر اصفهانی^۳، رضا زمانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۴- دکترای هیدرولوژی و منابع آب، شرکت آب منطقه ای چهارمحال و بختیاری

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mirabbasi_r@yahoo.com

چکیده

امروزه پدیده‌های تغییر اقلیم و گرمایش جهانی از مهمترین تهدیدات جدی بر منابع آب و توسعه پایدار کشاورزی محسوب می‌شوند. با توجه به محدودیت منابع آب در ایران، افزایش جمعیت و متعاقباً افزایش میزان تقاضا، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های منابع آب و بخش کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. در مطالعه حاضر، اثرات تغییر اقلیم بر دبی ورودی به مخزن سد جره واقع در حوضه رود زرد که آب مورد نیاز کشاورزی دشت رامهرمز را تامین می‌کند، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، با استفاده از روش وزن‌دهی عملکرد، از بین ۲۰ مدل گردش عمومی جو (GCM)، سه مدل که تطبیق بیشتری با داده‌های تاریخی داشتند (مدل‌های MIROC-ESM، CSIRO-Mk3.6.0 و GFDL-ESM2M)، انتخاب شدند. سپس مقادیر بارش و دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 تخمین زده شد و با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس گردید. برای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب و تخمین رواناب ورودی به مخزن سد از مدل IHACRES و برای بهینه کردن پارامترهای مدل از سری زمانی داده‌های بارش، دما و دبی روزانه ثبت شده در ایستگاه آب‌سنجی ماشین در دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۵ استفاده شد. بعد از ریزمقیاس‌نمایی و تولید کردن سری‌های بارش و دما و اطمینان از دقت مناسب مدل IHACRES، مقادیر متناظر رواناب به مخزن سد برای هر سناریوی اقلیمی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که رواناب ورودی به مخزن سد تحت هر دو سناریوی مورد بررسی کاهش می‌یابد. بطوریکه میانگین سالانه ورودی به مخزن سد جره تحت دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب حدود ۲۷ و ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، بارش- رواناب، مدل IHACRES، LARS-WG، سد جره، مدل‌های گردش عمومی جو

Investigation of Climate Change Impacts on Inflow Discharge to Jarreh Dam Using the Output of CMIP5 Models

M Dehghanifard¹, R Mirabbasi Najafabadi^{2*}, MA Nasr Esfahani³, R Zamani⁴

Received: April 16, 2020 Accepted: April 10, 2021

1. M.Sc. student, Water Resources Engineering, Shahrekord University

2. Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Shahrekord University

3. Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Shahrekord University

4. PhD of Hydrology and Water Resources, Regional Water Company of Chaharmahal and Bakhtiari

*Corresponding Author, E-mail: mirabbasi_r@yahoo.com

Abstract

Nowadays, global warming and climate change phenomena are considered as the most important threats to water resources and sustainable agricultural development. Due to the limitation of water resources in Iran, population growth and subsequent water demand increase, investigation of the effects of climate change on the water resources systems and agriculture is an important issue. In this study, the effect of climate change on inflow discharges to Jarreh Dam reservoir located in Zard River Basin, which supplies the agricultural demand of Ramhormoz Plain was investigated. For this purpose, using the performance weighting method, among 20 atmospheric general circulation models (GCM), three models were chosen that were more compatible with historical data (CSIRO-Mk3.6.0, MIROC-ESM and GFDL-ESM2M). Then, precipitation and air temperature values at a height of two meters above the ground in future periods and under RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios were estimated and downscaled using the LARS-WG model. In order to rainfall-runoff simulation and estimating the inflow to the dam reservoir, the IHACRES model was applied and the daily precipitation, temperature and discharges series recorded at the Mashin Hydrometric Station in the period of 1976- 2005 were used to optimize the model parameters. After downscaling and generating the precipitation and temperature series and verifying the accuracy of the IHACRES model, the corresponding inflow discharge to dam reservoir for every climatic scenario was simulated. The results showed that the value of inflow to dam reservoir has decreased under both considered scenarios. The annual average of inflow into Jarreh Dam reservoir will decrease 27 and 40 percent under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively.

Keywords: Climate change, General circulation models, IHACRES model, Jarreh Dam, Lars-WG, Rainfall-runoff

مقدمه

چرخه هیدرولوژیکی و به دنبال آن سامانه‌های منابع آب، این پدیده را به یکی از تهدیدات جدی بشر در قرن ۲۱ تبدیل کرده است (مساح بوانی و آشفته ۲۰۰۸). گرم شدن زمین و تاثیر آن بر چرخه آب موضوعی است که امروزه اغلب دانشمندان علوم جوی بر روی آن اتفاق نظر دارند. مطالعات نشان داده است که افزایش ۲ درجه سانتیگرادی

تغییر اقلیم بخش‌های مختلف چرخه هیدرولوژی و به تبع آن زندگی بشر را متاثر می‌سازد. مثلاً با تأثیر بر منابع آب، سبب تغییر در بخش کشاورزی می‌شود و بدین‌سان در بخش غذا، اقتصاد و حتی سیاست آثارش دیده می‌شود. اما بی‌شک تأثیر منفی پدیده تغییر اقلیم بر

جنوبی‌ترین بخش منطقه می‌باشد. همچنین نتایج این بررسی حاکی از بزرگ‌تر بودن عدم‌قطعیت ناشی از مدل‌های گردش عمومی از عدم‌قطعیت مدل‌های بارش-رواناب بود. لی و همکاران (۲۰۱۴) اثرات تغییر اقلیم بر رواناب را در منطقه‌ای واقع در جنوب شرقی فلات تبت مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که هر دو مدل GR4^۱ و SIMHYD^۲ در همه رودخانه‌های مورد مطالعه، افزایش رواناب را در دوره‌های آتی پیش‌بینی کردند. احدی و همکاران (۲۰۱۶) اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در ایران را با استفاده از روش‌های پویایی سیستم‌ها ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تغییرات دما و بارش به ترتیب در محدوده ± 6 درجه سلسیوس و ± 60 درصد بوده است و با افزایش دما، تبخیر افزایش و رواناب کاهش می‌یابد. فن و همکاران (۲۰۲۰) اثر تغییر اقلیم را بر تغییرات میزان رواناب و به تبع آن تغییرات تولید انرژی برقی در چین بررسی کردند. نتایج نشان داد که انرژی برقی نسبت به تغییرات آب و هوایی بسیار حساس و آسیب‌پذیر می‌باشد، به طوری که تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP4.5^۳ به میزان ۶۷/۴۹ میلیارد کیلووات ساعت و تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۱۵۳/۲۹ میلیارد کیلووات ساعت در مقایسه با سال ۲۰۱۱ کاهش خواهد یافت. گلت و همکاران (۲۰۲۰) اثرات تغییر اقلیم را بر بارش، دما، رواناب و رسوب در حوضه رودخانه نیل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان دما و بار رسوب در آینده افزایش خواهد یافت، در حالیکه مقادیر بارش و رواناب کاهش خواهند یافت. رونچاک و همکاران (۲۰۱۹) اثرات تغییر اقلیم را بر رژیم هیدرولوژیکی و رواناب در چند حوضه منتخب کشور اسلواکی مورد بررسی قرار دادند. آنها تغییرات بارش، دمای هوا و تبخیر-تعرق را در دهه‌های آینده بر اساس خروجی‌های مدل‌های تغییر اقلیم منطقه‌ای KNMI^۴ و MPI^۵ و سناریوی انتشار A1B

دما منجر به کاهش ۵ تا ۱۲ درصدی جریان‌ها می‌شود، همچنین تغییرات ۱۰ درصدی میزان نزولات جوی منجر به تغییرات ۱۵ تا ۲۵ درصدی جریان رودها می‌شود (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹). چرخه هیدرولوژیکی و رواناب خروجی یک حوضه تحت تاثیر عوامل مهمی چون پارامترهای اقلیمی، خصوصیات فیزیکی حوضه و فعالیت‌های بشری می‌باشد. مشکلات ناشی از کمبود آب و بلایای طبیعی مرتبط با آن، مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر رواناب را ضروری می‌سازد. راف و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر فرکانس سیل در چهار حوضه با شرایط جغرافیایی مختلف پرداختند. آنها در این مطالعه حداکثر جریان سالانه را توسط مدل بارش-رواناب بدست آوردند. نتایج نشان داد که برای همه حوضه‌ها، تغییر اقلیم منجر به افزایش در پتانسیل حداکثر جریان سالانه می‌شود. چانگ و جانگ (۲۰۱۰) به برآورد رواناب و عدم‌قطعیت آن در ۲۱۸ زیرحوضه در ایالت اورگان پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات فصلی رواناب در جریان زمستانه به صورت افزایشی و در جریان تابستانه کاهش است و رواناب نیز ممکن است در آینده از نظر زمانی و مکانی دچار تغییر شود که مقدار و جهت آن به خصوصیات زیرحوضه‌ها بستگی دارد. گوش و داتا (۲۰۱۲) به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات سیل در حوضه رودخانه براهماپوترا پرداختند. تحلیل سری زمانی جریان شبیه‌سازی شده نشان داد که افزایش قابل توجهی در میزان دبی اوج جریان و مدت زمان آن در آینده انتظار می‌رود. همچنین در این مطالعه مخرب‌ترین سیل طراحی تحت سناریوهای تغییر اقلیم پیش‌بینی شد. تنگ و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه عدم‌قطعیت ۱۵ مدل گردش عمومی جو و ۵ مدل بارش-رواناب در نتیجه حاصل از تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب در کشور استرالیا پرداختند. بیشتر نتایج بدست آمده حاکی از کاهش قابل‌توجه حجم رواناب در

^۴ Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

^۵ Max-Planck-Institute

^۱ Génie Rural à 4 paramètres Journalier (in French)

^۲ Simple hydrology

^۳ Representative concentration pathways (RCPs)

این مطالعه حاکی از این بود که عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی تأثیر قابل توجهی، نسبت به نوسانات اقلیمی در برآورد رواناب یک حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم دارد. ذهیون و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی مدل SWAT^۴ در جهت تخمین رواناب حوضه آبریز قره‌سو در دوره آتی تحت تغییر اقلیم با استفاده از مدل HadCM3 پرداختند. به این منظور آن‌ها ابتدا مدل SWAT را برای دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار دادند. نهایتاً نتایج حاکی از تغییر رواناب منطقه در این دوره بین ۹۰ تا ۱۲۰ درصد در ماه‌های مختلف بود. منسوری و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ را بر اساس گزارشات چهارم و پنجم IPCC^۵ بررسی کردند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش رواناب تحت دو سناریوی B1 و RCP2.6 و همچنین کاهش رواناب تحت دو سناریوی A2 و RCP8.5 بود.

در این پژوهش، با توجه به اهمیت موضوع تغییر اقلیم به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رود زرد با رویکرد احتمالاتی و تحلیل عدم قطعیت ناشی از مدل‌های گردش عمومی جو پرداخته شده است. قابل ذکر است که سد جره در خروجی حوضه مورد مطالعه قرار دارد و لذا بررسی تغییر رواناب ورودی به مخزن سد تحت تأثیر تغییر اقلیم به منظور برنامه‌ریزی منابع آب و سازگاری با آثار احتمالی و منفی این پدیده باعث افزایش اهمیت این مطالعه شده است. در این پژوهش، از ۳ مدل GCM^۶ برای شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم و همچنین از مدل IHACRES^۷ برای شبیه‌سازی بارش-رواناب و جریان ورودی به مخزن سد استفاده شده است. روش ترکیبی ضریب تغییرات^۸ (CF) و مدل تولید

پیش‌بینی کردند. سپس بر اساس مقادیر مذکور میزان رواناب را با مدل توزیعی WetSpa^۱ در مقیاس روزانه تا سال ۲۱۰۰ شبیه‌سازی کردند. نتایج حاکی از افزایش میزان رواناب در ماه‌های زمستان و کاهش رواناب در ماه‌های پاییز و تابستان در آینده بود. آشفته و مساح (۲۰۰۹) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به مدل‌های گردش عمومی در حوضه آیدوغموش واقع در استان آذربایجان شرقی پرداختند. در این مطالعه پس از آماده‌سازی داده‌های هواشناسی (دما و بارش) در دوره آتی، تابع توزیع احتمالی این داده‌ها برای دوره آتی به وسیله وزن‌دهی مدل‌های گردش عمومی با استفاده از روش MOTP^۲ تولید گردید و با استفاده از روش مونت‌کارلو تعداد ۲۰۰۰ سری نمونه از توزیع احتمالی دما و بارش کوچک مقیاس شده به مدل بارش-رواناب معرفی شد و تعداد ۲۰۰۰ سری رواناب روزانه شبیه‌سازی شد. کمال و مساح بوانی (۲۰۱۰) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قره‌سو با دخالت عدم قطعیت دو مدل هیدرولوژیکی IHACRES^۳ و SYMHYD پرداختند. بدین منظور، در ابتدا نوسانات و مقادیر متوسط متغیرهای دما و بارش HadCM3^۴ تحت سناریو A2 و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که محدوده عدم قطعیت مربوط به نوسانات اقلیمی در ماه‌های مختلف سال بین ۰/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد برای دما و ۱۰- تا ۲۰ میلی‌متر برای بارش می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که دو مدل در شبیه‌سازی تغییرات رواناب در دوره آتی هماهنگی دارند، به‌گونه‌ای که هر دو مدل کاهش رواناب را برای فصل پاییز و افزایش رواناب را برای فصل‌های دیگر تخمین زدند. به طور کلی، نتایج

⁴ Hadley coupled atmosphere-ocean general circulation model

⁵ Soil and water assessment tool

⁶ Intergovernmental panel on climate change

⁷ General circulation models

⁸ Change factor

¹ Water and energy transfer between soil, plants and atmosphere

² Mean observed temperature precipitation

³ Identification of unit hydrographs and component flow from rainfall, evaporation and streamflow data

که مشخصات آنها در جدول ۲ آمده است، استفاده شد. با توجه به عدم قطعیت موجود در مدل‌های گردش کلی اقلیم، در اینجا با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه قوی به نام تاپسیس^۲ (هوانگ و یون ۱۹۸۱)، مدل‌های دارای بهترین عملکرد شناسایی شده‌اند. برای این کار از داده‌های روزانه ریزمقیاس شده شامل دمای کمینه، بیشینه و بارش برگرفته از مرکز ناسا^۴ (GDDP) استفاده شده است که تصحیح اریبی^۵ نیز بر روی آنها انجام شده است (تراشر و نمانی ۲۰۱۲). براساس روش تاپسیس، سه مدل MIROC-ESM، CSIRO-Mk3.6.0 و GFDL-ESM2M بهترین عملکرد و انطباق را با داده‌های مشاهداتی روزانه داشتند و از آنها در این مطالعه استفاده شد (زمانی و همکاران ۲۰۱۷b).

ریزمقیاس‌نمایی با مدل LARS-WG

مراحل تولید سری زمانی داده‌های وضعیت هوا در دوره آتی در سه مرحله انجام شده است. اولین گام برای تهیه این داده‌ها محاسبه خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) منتخب در مقیاس محلی و یا ریزمقیاس‌نمایی می‌باشد. به این منظور با وارد کردن سری زمانی روزانه داده‌های مشاهداتی شامل دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش در نرم افزار LARS-WG به ریزمقیاس‌نمایی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. در واقع در ابتدا خروجی مدل‌های GCM با استفاده از سری زمانی مشاهداتی روزانه ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) برای بالادست حوضه مورد واسنجی قرار گرفتند. در گام دوم، برای اطمینان از عملکرد مناسب مدل به صحت‌سنجی نتایج آن پرداخته شده است. بدین منظور، با آزمون وجود یا عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین پارامترهای آماری داده‌های مشاهداتی و تولید شده توسط مدل به صحت‌سنجی آن پرداخته شده است.

داده‌های تصادفی اقلیمی^۱ LARS-WG به عنوان یک روش ترکیبی برای ریزمقیاس‌نمایی بکار گرفته شده است. همچنین روش MOTP برای وزن‌دهی به مدل‌های GCM حاصل از گزارش پنجم IPCC و اعمال سناریوهای احتمالاتی برای تحلیل عدم قطعیت ناشی از مدل‌های گردش عمومی جو بر رواناب ورودی به مخزن سد چره تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

حوضه رود زرد با مساحت حدوداً ۸۱۰ کیلومتر مربع می‌باشد که در جنوب غربی ایران در استان خوزستان واقع شده است. میانگین بارش سالانه در این حوضه حدود ۶۶۰ میلی‌متر می‌باشد. سد چره با حجم مخزن حدود ۲۶۱ میلیون مترمکعب به عنوان یکی از منابع تامین کننده آب کشاورزی اراضی طرح رامهرمز (به وسعت حدود ۲۲۵۰۰ هکتار) در پایاب این مخزن واقع شده است. الگوی کشت عمده این منطقه شامل گندم، ذرت، جو و یونجه می‌باشد. در اینجا به منظور استفاده از ایستگاه‌های مجاور، منطقه مورد مطالعه تا اطراف حوضه رودخانه زرد نیز گسترده شده به طوری که منطقه انتخاب شده در ناحیه‌ای بین عرض جغرافیایی ۰۰' تا ۳۱' و طول جغرافیایی ۲۰' ۴۹ تا ۳۰' ۵۰ شرقی قرار دارد. از دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۵ به عنوان دوره آماری پایه و همچنین از دمای حداکثر روزانه، دمای حداکثر ماهانه و دبی روزانه ایستگاه‌ها استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌ها و موقعیت منطقه مورد مطالعه به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

در این مطالعه، از سری داده‌های گزارش پنجم^۲ هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) شامل ۲۰ مدل GCM،

^۴ NASA earth exchange (NEX) global daily downscaled projections dataset

^۵ Bias correction

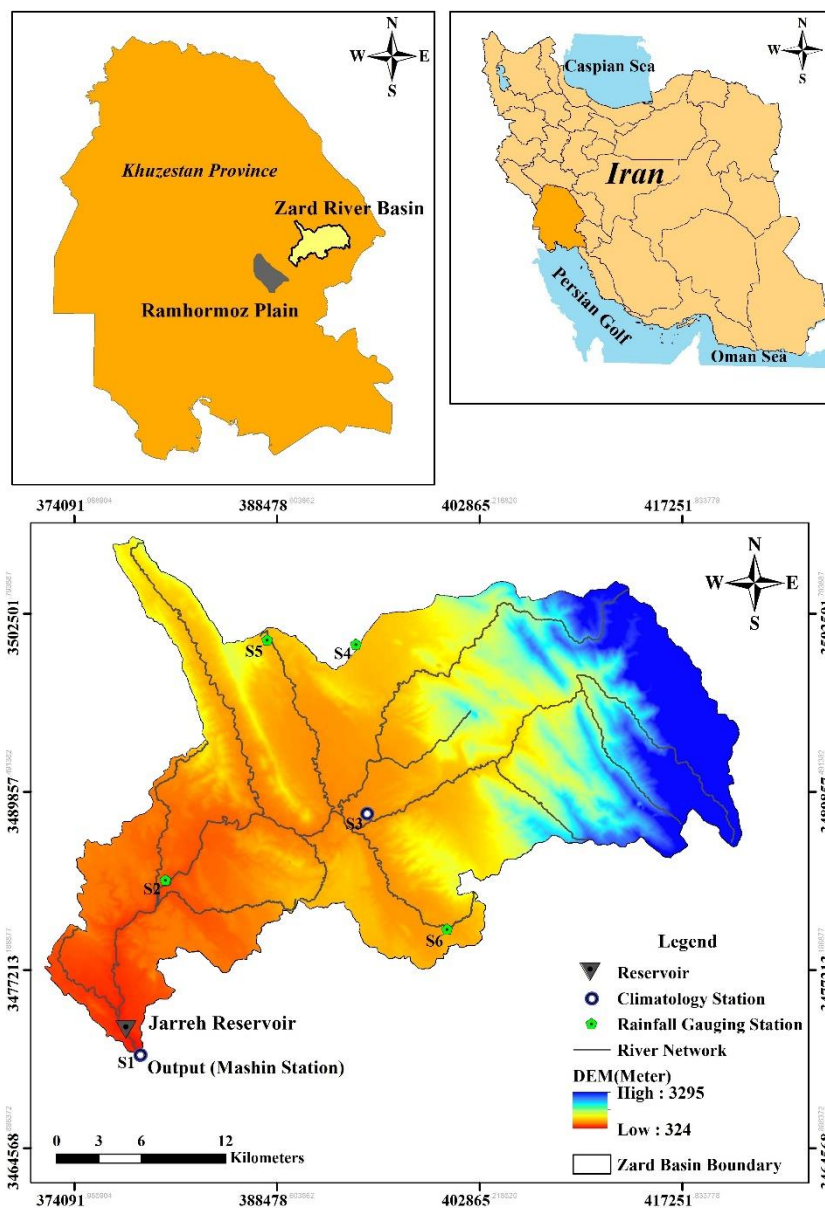
^۱ Long Ashton Research Station Weather Generator

^۲ The fifth assessment report of IPCC (AR5)

^۳ Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه.

کد	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نوع ایستگاه
S1	ماشین	۳۱° ۲۳'	۴۹° ۴۳'	تبخیرسنجی/آب‌سنجی
S2	دهسادات	۳۱° ۲۰'	۴۹° ۴۵'	باران‌سنجی
S3	باغملک	۳۱° ۳۳'	۴۹° ۵۲'	تبخیرسنجی
S4	قلعه‌تل	۳۱° ۳۸'	۴۹° ۵۱'	باران‌سنجی
S5	چشمه‌شیرین	۳۱° ۳۸'	۴۹° ۴۷'	باران‌سنجی
S6	گنداب	۳۱° ۲۷'	۴۹° ۴۷'	باران‌سنجی



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌ها و سد جره و منطقه مورد مطالعه در ایران.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های GCM استفاده شده مربوط به گزارش پنجم (CMIP5).

No.	Model Name	Modeling Center (or Group)	Institute ID	Key references
1	ACCESS1.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia	CSIRO-BOM	Franklin et al. (2013)
2	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC	Wu et al. (2013)
3	BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	GCESS	Wei et al. (2012)
4	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CCCMA	von Salzen et al. (2013)
5	CCSM4	National Center for Atmospheric Research	NCAR	Meehl et al. (2012)
6	CESM1(BGC)	Community Earth System Model Contributors	NSF-DOE-NCAR	Meehl et al. (2012)
7	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	CNRM-CERFACS	Voltaire et al. (2013)
8	CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	CSIRO-QCCCE	Rotstayn et al. (2012)
9	GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	Donner et al. (2011)
10	GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	Dunne et al. (2012)
11	GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	Dunne et al. (2012)
12	INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	INM	Volodin et al. (2010)
13	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL	Dufresne et al. (2013)
14	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL	Dufresne et al. (2013)
15	MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC	Watanabe et al. (2010)
16	MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	MIROC	Watanabe et al. (2011)
17	MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	MPI-M	Stevens et al. (2013)
18	MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	MPI-M	Stevens et al. (2013)
19	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	MRI	Yukimoto et al. (2012)
20	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	NCC	Iversen et al. (2013)

نشان‌دهنده سری زمانی بارش مشاهداتی در دوره پایه، P سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی در دوره آتی و ΔP نسبت بارش شبیه‌سازی شده در دوره پایه و آتی می‌باشد.

در گام سوم و بعد از اطمینان از عملکرد مدل LARS-WG (انجام مراحل واسنجی و صحت‌سنجی)، برای دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 سری زمانی ۳۰۰ سال (۱۰ سری ۳۰ ساله) از کمیت‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش به صورت روزانه تولید شد. در ادامه با میانگین‌گیری از این ۱۰ سری داده، یک سری زمانی روزانه (۳۰ سال) از متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای مورد مطالعه در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تولید شد. این رویکرد می‌تواند در کاهش عدم قطعیت ناشی از تولید اعداد تصادفی توسط مدل LARS-WG مفید واقع شود (هادی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۱).

پردازش داده‌های اقلیمی به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم

پس از تعیین محدوده تغییرات میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی ماهانه هر یک از سه مدل GCM انتخاب شده در دوره آینده و برای برآورد عدم قطعیت حاصل از نتایج مدل‌های GCM، به هر یک از مدل‌ها با توجه به توانایی آن مدل برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی مشاهداتی، یک وزن تعلق گرفت. به این روش برآورد وزن، روش دامنه محدود یا میانگین دما و بارش مشاهداتی (MOTP) نیز گفته می‌شود (مساح یوانی ۲۰۰۶) که از رابطه ۵ قابل محاسبه است:

$$w_{ij} = \frac{\left(\frac{1}{\Delta d_{ij}}\right)}{\sum_{j=1}^3 \left(\frac{1}{\Delta d_{ij}}\right)} \quad [5]$$

در رابطه بالا، w_{ij} وزن زامین مدل GCM در ماه نام است. (Δd_{ij}) انحراف میانگین طولانی مدت دما (بارش) شبیه‌سازی شده هر یک از مدل‌ها در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی در هر ماه می‌باشد. در ادامه محدوده تغییرات بلندمدت متغیرهای اقلیمی (بارش و دمای ماهانه) و وزن مدل‌های انتخابی تعیین و نهایتاً

چنانچه گفته شد، در این مطالعه از خروجی سه GCM از سری داده‌های گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 استفاده شده است. برای تولید داده‌های اقلیمی در دوره آتی مقادیر "اختلاف" برای دما و "نسبت" برای بارش به ترتیب بر اساس روابط ۱ و ۲ استفاده شده است:

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM,fut,i} - \bar{T}_{GCM,base,i}) \quad [1]$$

$$\Delta P_i = \left(\frac{P_{GCM,fut,i}}{P_{GCM,base,i}}\right) \quad [2]$$

در رابطه‌های بالا، ΔT_i و ΔP_i به ترتیب بیانگر تغییرات میانگین بلندمدت ۳۰ ساله بارش و دما برای هر ماه بین دوره مشاهداتی و دوره آتی می‌باشد. $\bar{T}_{GCM,fut,i}$ نشان‌دهنده میانگین دمای ۳۰ ساله شبیه‌سازی شده توسط GCM در دوره‌های آینده در هر ماه $\bar{T}_{GCM,base,i}$ نشان‌دهنده میانگین دمای ۲۷ سال شبیه‌سازی شده توسط GCM در دوره مشابه دوره مشاهداتی در هر ماه ($1 \leq i \leq 12$) می‌باشد.

در این مطالعه، سال‌های ۲۰۲۵ تا ۲۰۵۴ به عنوان دوره آتی و دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ به عنوان دوره مشاهداتی برای هر ماه در نظر گرفته شده است. دوره آتی به این دلیل انتخاب شده است که اصطلاحاً به آن دوره آینده نزدیک گفته می‌شود و مزیت آن این است که مدل‌های اقلیمی در این دوره خطای کمتری به نسبت دوره‌های دورتر دارند و از طرف دیگر، برای برنامه‌ریزی منابع آب با توجه به وضعیت موجود بهتر قابل درک و انجام است. همچنین برای دستیابی به سری زمانی دما و بارش تحت سناریوی اقلیمی در آینده، مقادیر به دست آمده از روابط ۱ و ۲ به مقادیر مشاهداتی طبق روابط زیر افزوده می‌شود:

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad [3]$$

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad [4]$$

در روابط بالا، T_{obs} نشان‌دهنده سری زمانی دمای مشاهداتی در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۶)، T سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی در دوره آتی و ΔT تغییر دمای ریزمقیاس شده تحت سناریوی تغییر اقلیم، P_{obs}

حوضه قبل از بارش مرطوب‌تر باشد، مقدار تبدیل بارش به بارش مؤثر بیشتر خواهد بود:

$$u_k = S_k \times r_k \quad [7]$$

که در آن، r_k بارش و u_k بارش مؤثر می‌باشد. در حالتی که حوضه کاملاً خیس باشد، $S_k = 1$ تمامی بارش به بارش مؤثر تبدیل خواهد شد. از طرف دیگر، ضریب رطوبتی حوضه تابعی از تبخیر- تعرق در حوضه بوده که با روابط ۸ و ۹ بیان می‌گردد:

$$S_k = (C \times r_k) + \left(1 + \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right)^{S_{k-1}} \quad S_0 = 0 \quad [8]$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w e^{0.062f(R-t_k)} \quad \tau_w(t_k) > 1 \quad [9]$$

مقدار $\tau_w(t_k)$ در مواقعی که بارش روی نمی‌دهد، مقدار شاخص S_k را در رابطه ۸ کنترل می‌کند. در این رابطه، R دمای مرجع، f فاکتور تعدیل دما و τ_w ثابت زمانی خشک شدن حوضه می‌باشند. قابل ذکر است که پارامتر C به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارش مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان گردد.

مدول خطی هیدروگراف واحد

اگر بارش مؤثر در یک گام زمانی مطابق با شکل ۲ فرض شود و در یک حوضه، به مقدار b واحد رواناب تولید کند، بدیهی است با توجه به تلفات مختلف در تبدیل بارش به رواناب، مقدار رواناب حاصل در همان گام زمانی، کمتر از واحد خواهد بود ($b < 1$). با فرض اینکه بارش مؤثر و رواناب در تمام گام‌های قبلی صفر بوده و همچنین بارش مؤثر در گام‌های بعدی نیز صفر باشد، می‌توان در گام‌های بعدی میزان رواناب را به‌صورت نسبت a ($a < 1$) از مقدار آن در مرحله قبل محاسبه کرد. بنابراین مطابق شکل ۲ رواناب به‌صورت نمایی با نرخ a در هر گام زمانی کاهش می‌یابد.

میزان تغییرات متوسط هر متغیر در هر ماه با استفاده از میانگین شبیه‌سازی شده و وزن هر مدل در هر ماه بر اساس رابطه ۶ محاسبه شده است:

$$\overline{\Delta X}_i = \sum_{j=1}^3 (w_{ij} \times \Delta X_{ij}) \quad [6]$$

در رابطه بالا، ΔX_{ij} میزان تغییرات شبیه‌سازی شده دما یا بارش در ماه i م توسط مدل j ام، w_{ij} وزن متناظر هر مدل و $\overline{\Delta X}_i$ مقدار متوسط تغییرات دما یا بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها در ماه i م و n تعداد مدل انتخابی می‌باشند.

معرفی مدل IHACRES

مدل IHACRES یک مدل دوگانه مفهومی-متریک^۱ می‌باشد که با استفاده از مزیت سادگی مدل‌های متریک جهت کاهش عدم قطعیت پارامتر ذاتی مدل‌های هیدرولوژیک، در عین حال تلاش می‌کند که جزئیات بیشتری از فرآیندهای درونی که برای یک مدل متریک معمول است را نشان دهد. مدل IHACRES به لحاظ پارامتریک یک مدل بارش- رواناب کارآمد است که تاکنون برای تعداد زیادی از حوضه‌های آبریز که طیف وسیعی از تنوع آب و هوایی را پوشش می‌دهند، بکار رفته است. این مدل توسط جکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳) ارائه شده است. اساس این مدل از دو مدول غیرخطی کاهش^۲ و مدول خطی هیدروگراف^۳ تشکیل شده است. به این منظور، بارندگی r_k و دما t_k در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی مؤثر u_k تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد، به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود.

مدول غیرخطی کاهش

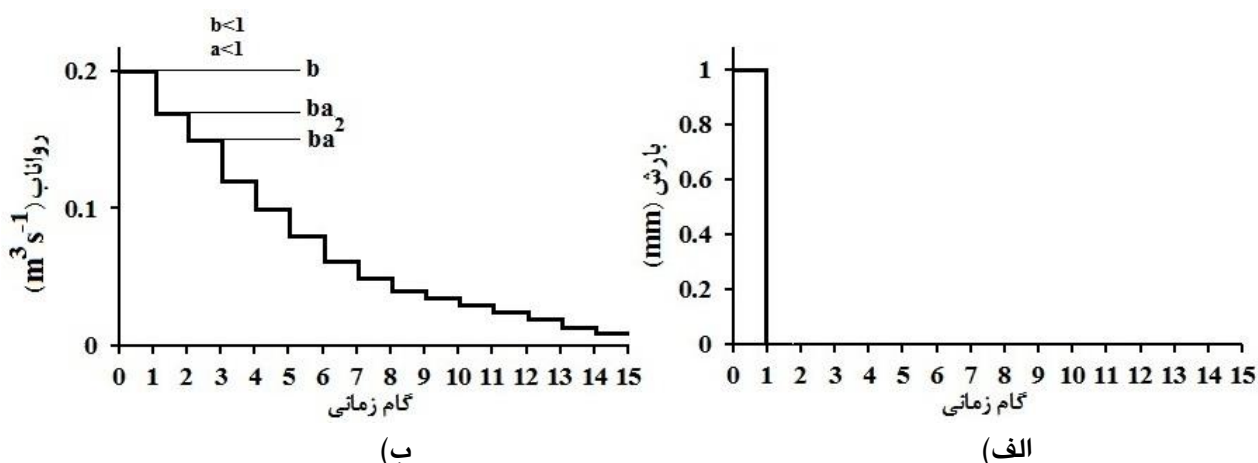
به منظور تبدیل بارش به بارش مؤثر از ضریب رطوبتی حوضه^۴ که با S_k ($0 < S_k < 1$) نشان داده می‌شود، استفاده می‌گردد. مطابق با رابطه ۷ هرچه

³ Linear unit hydrograph module

⁴ Catchment wetness index

¹ Hybrid metric-conceptual

² Non-linear loss module



شکل ۲- هیدروگراف حاصل از بارندگی مؤثر واحد. الف: بارش مؤثر واحد. ب: هیدروگراف واحد.

محاسبه می‌باشد، با تعیین پارامترهای a و b می‌توان رواناب حاصله را تعیین کرد. مساحت زیر شکل ۲ مطابق رابطه ۱۵ قابل محاسبه می‌باشد:

$$b + ba + ba^2 + ba^3 \dots = \frac{b}{1-a} \quad [15]$$

همچنین با توجه به مفهوم هیدروگراف واحد، رابطه ۱۵ برابر واحد می‌باشد و بنابراین:

$$\frac{b}{1-a} = 1 \quad [16]$$

از طرف دیگر، می‌توان هیدروگراف واحد اصلی را به صورت تلفیقی از تعداد مختلفی از هیدروگراف‌های واحد به صورت موازی یا سری و یا به صورت منفرد در نظر گرفت. به عنوان مثال، با تقسیم هیدروگراف واحد کل به دو قسمت موازی هیدروگراف سریع q و هیدروگراف s ، مطابق ۱۷ تعریف می‌گردد:

$$\frac{b^q}{1-a^q} + \frac{b^s}{1-a^s} = 1 \quad [17]$$

نهایتاً بر این اساس رابطه ۱۷ به فرم زیر تبدیل خواهد شد:

$$x_k = a^q x_{k-1} + b^q u_{k-1} + a^s x_{k-1} + b^s u_{k-1} \quad [18]$$

قابل ذکر است که روش ارائه شده توسط جکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳)، سه پارامتر τ_w ، f و c از مدول غیرخطی کاهش و سه پارامتر از چهار پارامتر a^q ، a^s ، b^q و b^s از مدول خطی هیدروگراف باید بر اساس داده‌های مشاهداتی برای حوضه مورد مطالعه واسنجی کردند. در این پژوهش، با استفاده از مدل‌های گردش

بر اساس شکل ۲، میزان رواناب کل حاصل از بارندگی مؤثر واحد، برابر مجموع رواناب‌های هر گام زمانی خواهد بود $(b + ba + ba^2 + ba^3 + \dots)$. در ادامه با فرض بارش مؤثر، u_k (محاسبه شده از مدول غیرخطی کاهش) در گام زمانی k ، دبی حاصل از آن در گام‌های متوالی k ، $k+1$ ، $k+2$ و ...، مطابق رابطه زیر خواهد بود:

$$(bu_k + bau_k + ba^2u_k + ba^3u_k + \dots) \quad [10]$$

با فرض اینکه بارش مؤثر u_{k-1} در گام زمانی $(k-1)$ رخ داده باشد، رواناب حاصل از آن در گام‌های زمانی $(k-1)$ ، (k) ، $(k+1)$ برابر با مقدار زیر می‌باشد:

$$(bu_{k-1} + bau_{k-1} + ba^2u_{k-1} + ba^3u_{k-1} + \dots) \quad [11]$$

با فرض بارش‌های مؤثر در گام‌های مختلف $(k-n, \dots, k-1, k, k+1, \dots, k+n)$ و محاسبه مقدار دبی حاصل از آنها در گام‌های مختلف مطابق با روابط زیر می‌توان مقدار رواناب را در گام زمانی k و $k-1$ محاسبه کرد:

$$x_k = bu_k + bau_{k-1} + ba^2u_{k-2} + \dots \quad [12]$$

$$x_{k-1} = bu_{k-1} + bau_{k-2} + ba^2u_{k-3} + \dots \quad [13]$$

با مقایسه رابطه‌های بالا می‌توان نوشت:

$$x_k = bu_k + au_{k-1} \quad [14]$$

بنابراین با توجه به رابطه ۱۴، دبی هر گام تابعی از بارش مؤثر در همان گام و دبی حاصل از گام قبل می‌باشد. از آنجایی که مقدار u_k در یک حوضه قابل

صحت‌سنجی مدل انتخاب شد. قابل ذکر است که دوره‌های برای واسنجی مدل انتخاب شد که شامل مقادیر حدی، خشک‌سالی و ترسالی باشد و مدل در این دوره بهترین عملکرد را داشته باشد. محققان دیگری نیز از با همین شیوه دوره واسنجی مناسب را برای مدل IHACRES انتخاب کرده‌اند (زمانی و همکاران ۲۰۱۷a؛ حیدری تاشه کیود و همکاران ۲۰۲۰). در واقع با معرفی سه سری داده ثبت شده به مدل و با استفاده از تغییر پارامترهای مدل و دوره زمانی، مدل برای بهترین دوره انتخابی واسنجی شد. در ادامه با استفاده از پارامترهای به دست آمده از مرحله واسنجی، مدل در دوره باقیمانده مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. همچنین معیارهای ضریب تعیین (R^2) و ضریب ناش-ساتکلیف^۱ (NS) به منظور بررسی عملکرد مدل مطابق با روابط ۱۹ و ۲۰ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (کولت و همکاران ۲۰۱۴):

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_m^t - \bar{Q}_m)(Q_o^t - \bar{Q}_o)}{\sigma_m - \sigma_o} \right]^2 \quad [19]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad [20]$$

در روابط بالا، Q_o^t دبی مشاهداتی، Q_m^t دبی تخمین زده شده توسط مدل، σ واریانس، T تعداد سال‌های آماری و t گام زمانی می‌باشد.

نتایج و بحث

در جدول ۳ نتایج حاصل از مقایسه توزیع‌های احتمال و میانگین‌های ماهانه متغیرهای بارندگی، دمای حداکثر و دمای حداقل در بالادست حوضه بر اساس آزمون کای-اسکوئر (KS) ذکر شده است. بر اساس نتایج و با توجه به مقادیر P-value در سطح معنی‌داری ۱ درصد می‌توان گفت که مدل توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی داده‌های دمای حداکثر، دمای حداقل و بارندگی دارد.

عمومی جو، مقادیر متغیرهای بارش و دمای هوا در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 پیش‌بینی و سپس با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس گردید. در ادامه با مدل IHACRES به شبیه‌سازی فرآیند رواناب-بارش پرداخته شد.

کاربرد مدل IHACRES

برای شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب خروجی حوضه نیاز به واسنجی و صحت‌سنجی این مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی حوضه می‌باشد. در واقع باید بتوان بهترین ارتباط را بین دما و بارش حوضه و میزان رواناب خروجی ثبت شده از حوضه برقرار کرد. به این منظور، از سری زمانی داده‌های بارش، دما و دبی روزانه ثبت شده در ایستگاه آب‌سنجی ماشین در دوره آماری (۲۰۰۵-۱۹۷۶) استفاده شده است. ایستگاه ماشین از سال ۱۳۴۸ دارای آمار بوده و اشل آن در حال حاضر در پای پل جدید روستای زرد نصب شده است. تجهیزات این ایستگاه شامل اشل ۵ متری و پل تلفریک می‌باشد. مقطع رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری مستطیل شکل با دیواره‌های بلند بتنی است. جنس بستر قله سنگی، شن و ماسه و دیواره‌های آن بتن می‌باشد.

به منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و تخمین رواناب ورودی به مخزن سد جره از مدل IHACRES (جکمن و هورنبرگر ۱۹۹۳) استفاده شد. قابل ذکر است که به منظور پوشش دادن بیشتر فرآیندهای موثر بر بارش-رواناب از جمله خشک‌سالی یا ترسالی و همچنین انتخاب دوره‌ای که همزمان با بحث مطالعه دوره پایه باشد، از آمار متوسط روزانه بارش و دما در سطح حوضه و دبی روزانه ثبت شده در ایستگاه آب‌سنجی ماشین واقع در خروجی حوضه در دوره آماری ۷ ساله (۱۹۹۶-۱۹۹۰) برای واسنجی مدل و دوره آماری ۱۴ ساله (۱۹۸۹-۱۹۷۶) به عنوان دوره

¹ Nash-Sutcliffe

جدول ۳- نتایج آزمون کای-اسکوئر برای توزیع احتمالاتی داده‌های بارندگی، دمای حداکثر و دمای حداقل

مشاهداتی و تولید شده توسط LARS-WG

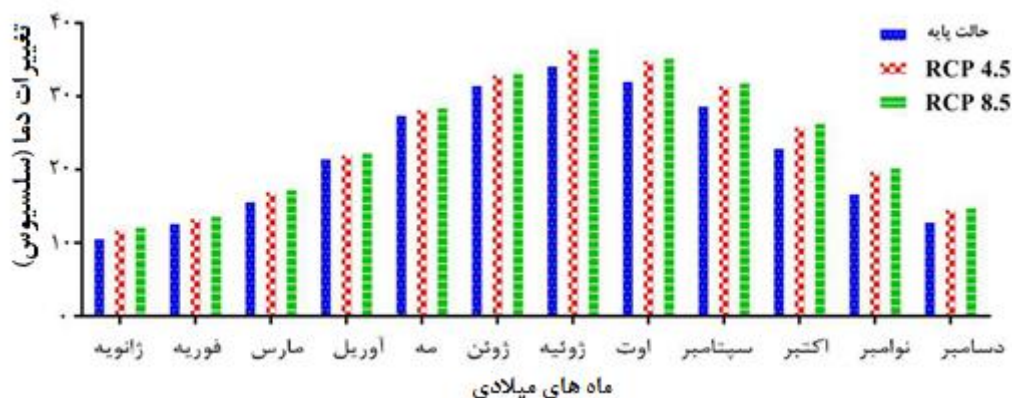
ماه	بارندگی		دمای حداکثر		دمای حداقل	
	p-value	KS	p-value	KS	p-value	KS
ژانویه	۰/۰۰۵	۱	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸
فوریه	۰/۰۰۹	۱	۰/۰۵۳	۱	۰/۰۵۳	۱
مارس	۰/۲۸۴	۰/۲۶۳	۰/۰۵۳	۱	۰/۰۵۳	۱
آوریل	۰/۰۳۴	۱	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸
مه	۰/۰۶۶	۱	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	۰/۰۵۳	۱
ژوئن	۰/۱۷۱	۰/۸۵۶	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸
ژوئیه	۰/۴۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۵۳	۱	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸
اوت	۰/۳۰۶	۰/۱۹۰	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸	۰/۱۵۸	۰/۹۱۲
سپتامبر	۰/۰۶۹	۱	۰/۰۵۳	۱	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹
اکتبر	۰/۰۶۱	۱	۰/۰۵۳	۱	۰/۰۵۳	۱
نوامبر	۰/۰۴۶	۱	۰/۰۵۳	۱	۰/۰۵۳	۱
دسامبر	۰/۰۵۵	۱	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	۰/۱۰۶	۰/۹۹۸

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش با استفاده از خروجی مدل‌های منتخب

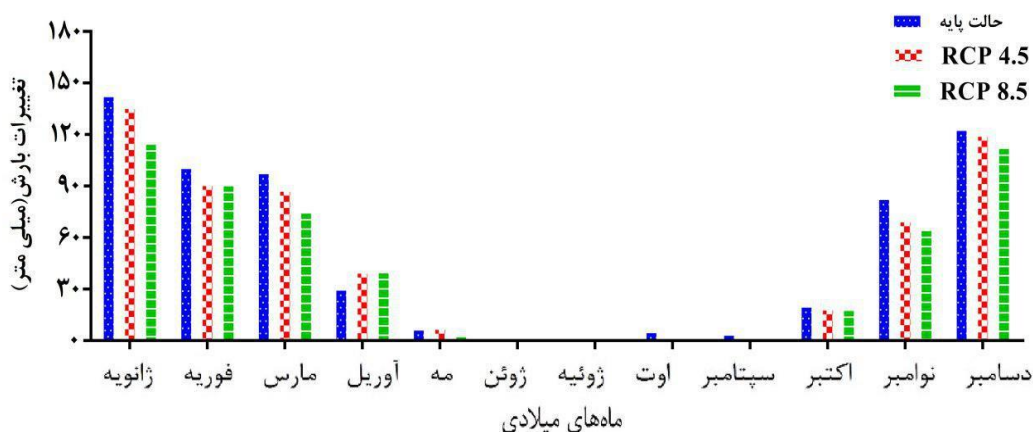
بعد از اطمینان از عملکرد مدل LARS-WG، استخراج میزان تغییرات شبیه‌سازی شده دما و بارش (در دوره آتی) و ریزمقیاس‌نمایی به بررسی تغییرات ماهانه دما و بارش در منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. شکل ۳ میزان تغییرات میانگین بلندمدت ماهانه دما در دوره آتی نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است میزان تغییرات دمای شبیه‌سازی شده در دوره آتی تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP4.5 می‌باشد. بیشترین افزایش دما در ماه‌های فصل پاییز می‌باشد که میزان افزایش دمای متوسط در این فصل تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲/۹۲ و ۳/۳۹ درجه سانتی‌گراد بدست آمد. در شکل ۴ نیز تغییرات بارش پیش‌بینی شده در بالادست حوضه تحت هر دو سناریو نشان داده شده است. نتایج حاکی از کاهش حدود ۷ درصدی و ۱۵ درصدی به ترتیب تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

در میانگین بارش سالانه می‌باشد. نتایج حاصل از تغییرات پیش‌بینی شده فصلی و سالانه در بالادست سد جره در جدول ۴ ذکر شده است. مطابق با نتایج انتظار بیشترین تغییرات بارش و کمترین تغییرات دما نسبت به دوره پایه در فصل بهار تحت سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 پیش‌بینی می‌شود. نتایج این پژوهش با نتایج مطالعه قندهاری و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد.

به منظور واسنجی مدل IHACRES سال‌های مختلف در طول دوره آماری (۲۰۰۵-۱۹۷۶) مورد آزمون قرار گرفت. یک دوره ۷ ساله (۱۹۹۷-۱۹۹۰) به عنوان بهترین دوره برای واسنجی (با ضرائب T_w برابر ۲۱ روز و f برابر با ۰/۲۲) انتخاب و مدل برای دوره آماری (۱۹۸۹-۱۹۷۵) مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. شکل ۵ نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHACRES را نشان می‌دهد. معیارهای ارزیابی نیز در جدول ۵ ذکر شده است. بعد از اطمینان از عملکرد مناسب مدل، با استفاده از خروجی مدل LARS-WG برای هر سناریوی اقلیمی، رواناب ورودی به مخزن شبیه‌سازی گردید.



شکل ۳- مقادیر پیش‌بینی شده ماهانه دما تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره آبی نسبت به دوره پایه.



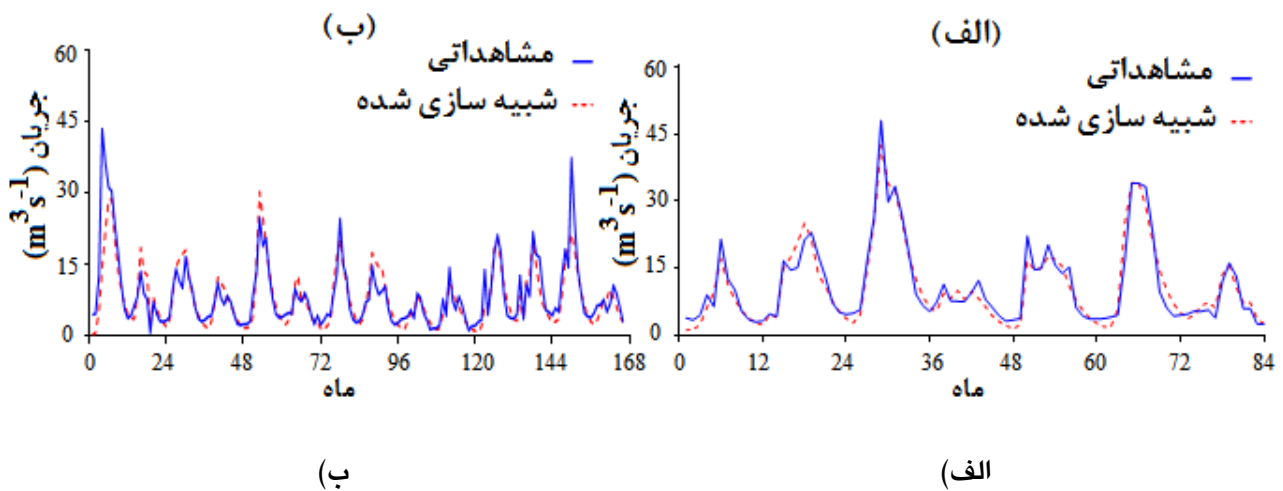
شکل ۴- مقادیر پیش‌بینی شده ماهانه بارش تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره آبی نسبت به دوره پایه.

جدول ۴- تغییرات پیش‌بینی شده فصلی و سالانه دما و بارش تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره آبی نسبت به دوره پایه.

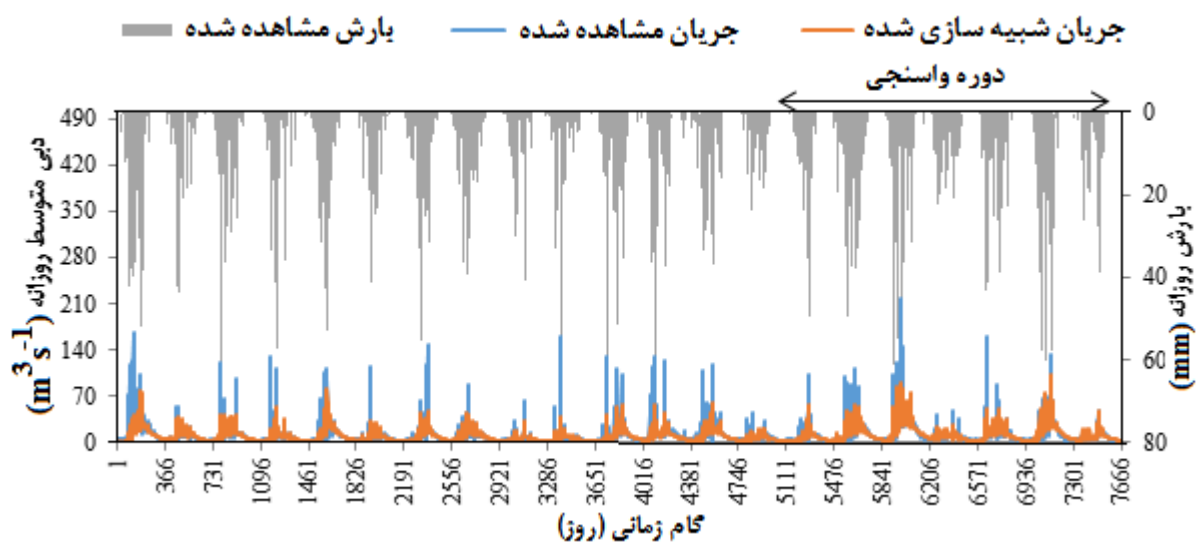
	RCP 4.5		RCP 8.5		
	تغییرات دما (C°)	تغییرات بارش (درصد)	تغییرات دما (C°)	تغییرات بارش (درصد)	
۱/۲۱	۰/۹۵	۱/۵۱	۰/۸۷	زمستان	
۰/۹۱	۰/۹۹	۱/۱۷	۰/۸۸	بهار	
۲/۱۷	۰	۲/۳۶	۰	تابستان	
۲/۹۲	۰/۸۴	۳/۳۹	۰/۷۹	پاییز	
۱/۸۰	۰/۹۳	۲/۱۱	۰/۸۵	سالانه	

استفاده از خروجی مدل LARS-WG برای هر سناریوی اقلیمی، رواناب ورودی به مخزن شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده حاکی از کاهش رواناب ورودی به مخزن سد جره تحت هر دو سناریوی مورد مطالعه می‌باشد.

نتایج مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده و رواناب مشاهداتی در مقیاس روزانه و ماهانه در طول دوره آماری مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. بعد از ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های دما و بارش و همچنین اطمینان از عملکرد مناسب مدل IHACRES با



شکل ۵- مقایسه رواناب مشاهداتی ماهانه و شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES الف- واسنجی، ب- صحت‌سنجی.



شکل ۶- مقایسه رواناب روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در خروجی حوضه رود زرد (ایستگاه آب‌سنجی ماشین).

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، کاهش میانگین سالانه ورودی به مخزن سد برابر با مقادیر تقریبی ۲۷ درصد و ۴۰ درصد به ترتیب تحت دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 می‌باشد. قابل ذکر است که نتایج شبیه‌سازی دما تحت تاثیر تغییر اقلیم که حاکی از افزایش دما در تمامی ماه‌ها می‌باشد، با نتایج گوهری و همکاران (۲۰۱۴) و همچنین با نتایج زمانی و همکاران

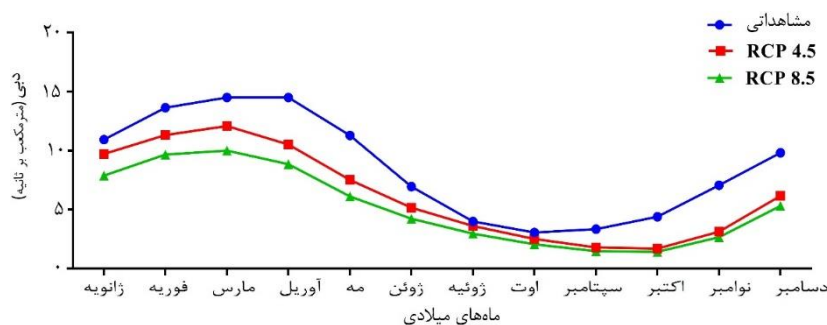
جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل بارش-رواناب (واسنجی و صحت‌سنجی) در دوره مورد مطالعه.

مقیاس	واسنجی		صحت‌سنجی	
	R ²	NS	R ²	NS
روزانه	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۶۶
ماهانه	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۷۳	۰/۷۲

درصد تحت سناریوی RCP4.5 و به مقدار تقریبی ۳۵ درصد تحت سناریوی RCP8.5 وجود دارد. این میزان کاهش در حالت بحرانی تا حدود ۵۱ درصد نیز افزایش می‌یابد که بیانگر وضعیت وخیم منابع آب در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه می‌باشد. با توجه به این موضوع که هدف اصلی از احداث سد جره تامین بخشی از آب مورد نیاز شبکه آبیاری و زهکشی دشت رامهرمز می‌باشد، طبیعتاً کاهش حجم رواناب ورودی به مخزن می‌تواند در افزایش آسیب‌پذیری سیستم منابع آب سد جره موثر باشد.

(۲۰۱۷b) نیز که در همین منطقه انجام شده است، مطابقت دارد. از جمله تفاوت‌های این مطالعه با مطالعه زمانی و همکاران (۲۰۱۷b) استفاده از داده‌های گزارش پنجم IPCC می‌باشد. با مقایسه نتایج می‌توان گفت که انتظار افزایش دمای بیشتری در شبیه‌سازی با استفاده از خروجی مدل‌های گزارش پنجم نسبت به استفاده از خروجی مدل‌های گزارش چهارم IPCC می‌باشد.

مطابق با نتایج بدست آمده در این مطالعه، بیشترین کاهش رواناب در ماه‌های اکتبر و سپتامبر مورد انتظار می‌باشد. مطابق با نتایج فوق انتظار کاهش حجم رواناب ورودی به مخزن سد جره با مقدار متوسط حدود ۳۰



شکل ۷- تغییرات بلندمدت ماهانه رواناب ورودی به مخزن سد جره تحت تاثیر تغییر اقلیم.

بارش، دما و دبی روزانه ثبت شده در ایستگاه آب‌سنجی ماشین در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶ استفاده گردید. بعد از ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های دما و بارش و همچنین اطمینان از عملکرد مناسب مدل IHACRES از خروجی مدل LARS-WG برای هر سناریوی اقلیمی، رواناب ورودی به مخزن سد برای دوره آتی شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از کاهش رواناب ورودی به مخزن تحت هر دو سناریوی مورد مطالعه می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود از هم اکنون در جهت برنامه‌ریزی برای اعمال گزینه‌های سازگاری به منظور کاهش اثرات منفی ناشی از تغییر اقلیم در این منطقه و سایر مناطق استان خوزستان مطالعات جامعی صورت گیرد. بازنگری در قوانین تخصیص آب، قیمت‌گذاری

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد جره واقع در جنوب غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. این سد تامین کننده آب کشاورزی مورد نیاز در دشت رامهرمز می‌باشد. برای این منظور با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)، مقادیر متغیرهای بارش و دمای هوا در دوره‌های آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) و تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 پیش‌بینی شد. برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ مقیاس مدل‌های اقلیمی به مقیاس محلی، از مدل LARS-WG استفاده شد. برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و تخمین رواناب ورودی به مخزن سد جره از مدل IHACRES و از سری زمانی داده‌های

محصولات مقاوم به کم‌آبی و همچنین آموزش کشاورزان و تشویق آنها برای شرکت در اعمال سناریوهای سازگاری از جمله مواردی می‌باشند که با توجه به روند کاهشی پیش‌بینی شده در حجم آب به مخزن سد جره در دوره‌های آتی، می‌توانند مفید واقع شوند.

آب، بهینه‌سازی الگوی کشت و حذف محصولات پرمصرف آب، افزایش راندمان آبیاری و استفاده از تکنولوژی‌های جدید آبیاری به جای استفاده از روش‌های سنتی آبیاری، مطالعات جامع در خصوص ایجاد تعادل بین میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی و سطحی، مطالعات لازم برای توسعه و کاشت

منابع مورد استفاده

- Ahadi MS, Eshraghi H, Habibi Nokhandan M, Shahni Danesh M and Fahmi H, 2016. Climate change impact assessment on water resources in Iran: applying dynamic and statistical downscaling methods. *Journal of Water and Climate Change* 7(3): 551-577.
- Ashofteh P and Massah AR, 2009. Uncertainty of climate change impact on the flood regime. Case study: Aidoghmoush basin, East Azerbaijan, Iran. *Iran-Water Resources Research* 5(2): 27-39. (In Persian with English abstract)
- Chang H and Jung IW, 2010. Spatial and temporal changes in runoff caused by climate change in a complex large river basin in Oregon. *Journal of Hydrology* 388: 186-207.
- Donner LJ, Wyman BL, Hemler RS, Horowitz LW, Ming Y, Zhao M, Golaz J, Ginoux P, Lin SJ, Schwarzkopf MD, Austin J, Alaka G, Cooke WF, Delworth TL, Freidenreich SM, Gordon CT, Griffies SM, Held IM, Hurlin WJ, Klein SA, Knutson TR, Langenhorst AR, Lee H, Lin Y, Magi BI, Malyshev SL, Milly PCD, Naik V, Nath MJ, Pincus R, Ploshay JJ, Ramaswamy V, Seman CJ, Shevliakova E, Sirutis JJ, Stern WF, Stouffer RJ, Wilson RJ, Winton M, Wittenberg AT and Zeng F, 2011. The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3. *Journal of Climate* 24: 3484-3519.
- Dufresne JL, Foujols MA, Denvil S, Caubel A, Marti O, Aumont O, Balkanski Y, Bekki S, Bellenger H, Benshila R, Bony S, Bopp L, Braconnot P, Brockmann P, Cadule P, Cheruy F, Codron F, Cozic A, Cugnet D, de Noblet N, Duvel JP, Ethé C, Fairhead L, Fichefet T, Flavoni S, Friedlingstein P, Grandpeix JY, Guez L, Guilyardi E, Hauglustaine D, Hourdin F, Idelkadi A, Ghattas J, Joussaume S, Kageyama M, Krinner G, Labetoulle S, Lahellec A, Lefebvre MP, Lefevre F, Levy C, Li ZX, Lloyd J, Lott F, Madec G, Mancip M, Marchand M, Masson S, Meurdesoif Y, Mignot J, Musat I, Parouty S, Polcher J, Rio C, Schulz M, Swingedouw D, Szopa S, Talandier C, Terray P, Viovy N and Vuichard N, 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 earth system model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* 40(9-10): 2123-2165.
- Dunne JP, John JG, Adcroft AJ, Griffies SM, Hallberg RW, Shevliakova E, Stouffer RJ, Cooke W, Dunne KA and Harrison MJ, 2012. GFDLs ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of Climate* 25: 6646-6665.
- Fan J, Hu J, Zhang X, Kong L, Li F and Mi Z, 2020. Impacts of climate change on hydropower generation in China. *Mathematics and Computers in Simulation* 167: 4-18.
- Franklin CN, Sun Z, Bi D, Dix M, Yan H and Bodas-Salcedo A, 2013. Evaluation of clouds in access using the satellite simulator package cosp: global, seasonal, and regional cloud properties. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 732-748.
- Gelete G, Gokcekus H and Gichamo T, 2020. Impact of climate change on the hydrology of Blue Nile basin, Ethiopia: A review. *Journal of Water and Climate Change* 11(4): 1539-1550.
- Ghandhari GH, Soltani J and Hamidian Pour M, 2015. Evaluation of optimal water allocation scenarios for Bar river of Neishabour using WEAP model under A2 climatic changes scenario. *Journal of Water and Soil* 29(5): 1158-1172. (In Persian with English abstract)
- Ghosh S and Dutta S, 2012. Impact of climate change on flood characteristics in Brahmaputra Basin using a macro-scale distributed hydrological model. *Journal of Earth System Science* 121: 637-657.
- Gohari A, Bozorgi A, Madani K, Elledge J and Berndtsson R, 2014. Adaptation of surface water supply to climate change in central Iran. *Journal of Water and Climate Change* 5: 391-407.

- Hadizadeh M, Shahidi A and Farzaneh, MR, 2011. Uncertainty analysis of precipitation under climate change (Case study: Birjand Synoptic Station). 4th Conference of Water Resources Management of Iran. 3 May, Tehran, Iran.
- Heydari Tasheh Kabood S, Hosseini SA and Heydari Tasheh Kabood A, 2020. Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment* 6: 329-339.
- Hwang CL and Yoon K, 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag.
- Iversen T, Bentsen M, Bethke I, Debernard JB, Kirkevåg A, Seland Ø, Drange H, Kristjansson JE, Medhaug I, Sand M and Seierstad IA, 2013. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M- Part 2: Climate response and scenario projections. *Geoscientific Model Development* 6: 389-415.
- Jakeman AJ and Hornberger GM, 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. *Water Resources Research* 29(8): 2637-2649.
- Kamal A and Massah Bavani A, 2010. Climate change and variability impact in basin's runoff with interference of two hydrology models uncertainty. *Journal of Water and Soil* 24(5): 920-931. (In Persian with English abstract)
- Kult J, Choi W and Choi J, 2014. Sensitivity of the snowmelt runoff model to snow covered area and temperature inputs. *Applied Geography* 55: 30-38.
- Li F, Xu Z, Liu W and Zh Y, 2014. The impact of climate change on runoff in the Yarlung Tsangpo river basin in the Tibetan Plateau. *Stochastic Environmental Research and Assessment* 28: 517-526.
- Mansouri A, Aminnejad B and Ahmadi H, 2018. Investigating the effect of climate change on inflow runoff into the Karun-4 Dam based on IPCC's fourth and fifth report. *Journal of Water and Soil Science* 22(2): 345-359. (In Persian with English abstract)
- Massah Bavani A and Ashofteh P, 2008. Investigating the importance of climate change in the world and its impact on various systems. Technical Workshop on the Effects of Climate Change on Water Resources Management. 13 Feb. Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Massah Bavani AR, 2006. Risk Assessment of Climate Change and Its Impact on Water Resources. A Case Study in Zayandeh-Rud Basin. PhD. Thesis. Faculty of Agriculture, Tarbait Modares University. (In Persian with English abstract)
- Meehl GA, Washington WM, Arblaster JM, Hu A, Teng H, Tebaldi C, Sanderson BN, Lamarque JF, Conley A, Strand WG and White JB III 2012. Climate system response to external forcings and climate change projections in CCSM4. *Journal of Climate* 25: 3661-3683.
- Raff DA, Sutley D, Pruitt T and Brekke LD, 2010. Flood frequency in a changing climate. Projections approach and diagnostics. 2nd Joint Federal Interagency Conference. 27 June- 1 July. Las Vegas, USA.
- Rončák P, Hlavčová K, Kohnová S and Szolgay J, 2019. Impacts of future climate change on runoff in selected catchments of Slovakia. Pp.279- 292. In: Leal Filho W, Trbic G, Filipovic D, (eds.) *Climate Change Adaptation in Eastern Europe*. Climate Change Management. Springer-Verlag.
- Rotstayn LD, Jeffrey SJ, Collier MA, Dravitzki SM, Hirst AC, Syktus JI and Wong KK, 2012. Aerosol-and greenhouse gas-induced changes in summer rainfall and circulation in the Australasian region. a study using single-forcing climate simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12: 6377-6404.
- Stevens B, Giorgetta M, Esch M, Mauritsen T, Crueger T, Rast S, Salzmann M, Schmidt H, Bader J, Block K, Brokopf R, Fast I, Kinne S, Kornblueh L, Lohmann U, Pincus R, Reichler T and Roeckner E, 2013. Atmospheric component of the MPI-M earth system model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5(2): 146-172.
- Teng J, Vaze J, Chiew FHS, Wangand B and Perraud JM, 2012. Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling climate change impact on runoff. *Journal of Hydrometeorology* 13: 122-139.
- Thrasher B and Nemani R, 2012. NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP). Intent of This Document and POC. Earth Engine Data Catalog.
- Voltaire A, Sanchez-Gomez E, Salas y Méliá D, Decharme B, Cassou C, Sénési S, Valcke S, Beau I, Alias A, Chevallier M, Déqué M, Deshayes J, Douville H, Fernandez E, Madec G, Maisonnave E, Moine MP, Planton S, Saint-Martin D, Szopa S, Tyteca S, Alkama R, Belamari S, Braun A, Coquart L and Chauvin F, 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics* 40: 2091-2121.