نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دوازدهم/ شماره سی و هشتم / پاییز ۱۴۰۴
Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
12th Year/ No. 38/ December 2025

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی با رویکرد سناریوهای CMIP6 (مطالعه موردی: جریان ورودی سد شیرین دره در استان خراسان شمالی)

شهرزاد فیروزی[۱]
سعید جمالی*[۲]

چکیده

از پیامدهای مهم تغییر اقلیم، تغییر در روند جریان رودخانه های تأمین‌کننده ذخیره آب در مخازن سدها است که یکی از چالش های مهم در مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. در این تحقیق به ارزیابی اثر این تغییرات بر جریان رواناب حوضه‌ی بالادست سد شیرین دره در استان خراسان شمالی با رویکرد سناریوهای گزارش ششم IPCC پرداخته شده است. بدین منظور تعدادی از مدل های CMIP6 در مقیاس محلی مورد ارزیابی قرار گرفته و دو مدل IPSL و GFDL با دو سناریو SSP370 و SSP585 انتخاب شدند. با مقایسه متغیرهای هواشناسی برای دوره‌ی آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۵ با دوره‌ی پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۵ مشخص شد، میانگین دمای سالانه به مقدار ۰/۸ سانتی گراد در سناریو SSP370 و ۱/۶ تا ۳/۵ درجه سانتی گراد در سناریو SSP585 افزایش می‌یابد. از طرفی میانگین بارش سالانه به مقدار ۴۰ میلی متر و ۵۴ میلی متر به ترتیب در دو سناریو SSP370 و SSP585 کاهش خواهد یافت. بررسی روند جریان رواناب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل IHECRAS نیز نشان می‌دهد جریان ورودی به مخزن در دوره‌ی آتی در سناریو SSP370 و بر اساس داده‌های دو مدل IPSL و GFDL، به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۲۳ (m^3/s) کاهش خواهد یافت. این روند کاهشی در سناریو SSP585 شدیدتر و با بیشترین مقدار ۰/۷۹ (m^3/s) و معادل ۳۶/۷ درصد کاهش در متوسط جریان ورودی فعلی می باشد. وقوع احتمالی شرایط این سناریو، تأمین آب پایدار ذینفعان را با چالش‌های جدی مواجه خواهد کرد که نیازمند بازنگری در مدیریت مصرف و تخصیص است.

واژه‌های کلیدی

تغییر اقلیم، تأمین آب پایدار، CMIP6، مدل IHECRAS

[۱]دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.
[۲*]استادیار، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، sae.jamali@iauctb.ac.ir

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

۱-مقدمه

افزایش میانگین جهانی گازهای گلخانه‌ای، استمرار تغییر واضح و مشخص در الگوهای مورد انتظار وضعیت آب و هوایی را در یک منطقه‌ی خاص یا برای کل اقلیم جهانی به‌همراه داشته است. یکی از چالش‌های قابل توجه اثرات این پدیده، تغییر در حجم و کیفیت منابع آب در دسترس ساکنین مناطق مختلف جهان است. پیش‌بینی می‌شود تغییر در چرخه‌ی هیدرولوژیکی تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی، منجر به تشدید شرایط خشکسالی به دلیل تغییرات در الگوهای بارش، ذخیره‌ی برفی، رژیم ذوب برف و افزایش تبخیر و تعرق در بسیاری از نقاط جهان گردد (ماداکمبرا[۱]،۲۰۱۹؛ پادرن[۲]،۲۰۲۰). به دنبال تغییر در پارامترهای اقلیمی و همچنین فعالیت‌های بزرگ مقیاس انسانی، شرایط هیدرولوژیکی، از جمله رواناب و جریان رودخانه‌ای نیز دچار کاهش و در برخی موارد به صورت وقوع سیلاب‌های شدید افزایش یافته است (هود[۳]،۲۰۱۱). از طرفی به دلیل اینکه سدها و سازه‌های هیدرولیکی و همچنین بسیاری از سیاست‌های تدوین شده در راستای مدیریت منابع آب، بر اساس تجارب و آمار تاریخی برنامه‌ریزی شده‌اند، ایجاد درک صحیح از تغییرات شرایط هیدرولوژیکی دوره‌های آتی از ضرورت‌های پایه‌ریزی برنامه‌های سازگاری مؤثر با تغییراقلیم در حوزه‌ی مدیریت منابع آب است (ساتوح[۴]،۲۰۲۲). با توجه به نگرانی‌ها در مورد اثرات تغییراقلیم، هیئت بین‌الدول تغییراقلیم (IPCC)[۵] مجموعه‌ای از سناریوهای تغییر اقلیم را بر اساس طیف وسیعی از تغییرات احتمالی در انتشار گازهای گلخانه‌ای آینده، جمعیت و وضعیت اجتماعی-اقتصادی تعریف می‌کند (مک‌گوری[۶] و همکاران، ۲۰۰۱). به منظور پیش بینی شرایط اقلیمی آینده بر اساس سناریوهای تعریف شده، مدل های گردش عمومی جو (GCMs[7]) نیز در پروژه‌ی مقایسه مدل های جفت شده CMIP[۸] توسعه داده شده‌اند که قابلیت شبیه‌سازی و پیش بینی پارامترهای جوی و اقیانوسی در دوره‌های درازمدت را دارند (چن[۹]، ۲۰۱۲).

در تحقیقات در حوزه‌های مختلف مرتبط با تغییراقلیم به منظور انتخاب بهترین مدل و کاهش عدم قطعیت‌ها، ارزیابی و انتخاب GCMها بر اساس عملکرد آن‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای آب و هوایی در مقیاس منطقه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است (زمانی[۱۰]،۲۰۲۰).

با توجه به قدرت تفکیک ۱/۱ تا ۱/۵ درجه‌ای خروجی مدل‌های GCMs و وضوح پایین آن‌ها در مقیاس محلی، استفاده از داده‌ها در تحقیقات محلی، نیازمند استفاده از روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری یا دینامیکی می‌باشد (شرافتی[۱۱]،۲۰۲۰). ابزارهای ریزمقیاس نمایی عامل ارتباط‌دهنده بین متغیرهای بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده‌ها) و متغیرهای اقلیمی در مقیاس محلی و منطقه‌ای (پیش‌بینی شونده‌ها) هستند که امکان بازتولید داده‌ها بر اساس مختصات محلی را فراهم می‌کنند (وایبلی[۱۲]،۲۰۰۲). در بین روش‌های مختلف، ریزمقیاس نمایی آماری که مبتنی بر سابقه‌ی آماری و پیش‌بینی کننده‌های بزرگ مقیاس، توسعه داده شده، به دلیل سادگی و سرعت بالا مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (فولر[۱۳]،۲۰۰۷). مدل LARS-WG[۱۴] یکی از پرکاربردترین مولدهای اقلیمی برای ریزمقیاس نمایی آماری خروجی GCMها است که درتحقیقات پیش‌بینی متغیرهای آب و هوایی دوره‌های آتی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (سمینو[۱۵]،۱۹۹۷؛ سمینو،۱۹۹۸؛ سمینو،۲۰۰۲؛ سیلاخوری[۱۶]،۲۰۲۲).

از طرفی، ارزیابی اثرات تغییر متغیرهای آب و هوایی بر هیدرولوژی حوضه‌های آبریز، نیازمند شبیه‌سازی برهم‌کنش وقایع بارش و نحوه‌ی شکل‌گیری رواناب بر اساس فیزیوگرافی، شرایط رطوبت خاک و سایر پارامترهای مؤثر در

[1] Madakumbura
[2] Padron
[3] Hood
[4] Satoh
[5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
[6] McGuire
[7] General Circulation Model (GCMs)
[8] Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)
[9] Chen
[10] Zamani
[11] Sherafati
[12] Wilby
[13] Fowler
[14] StationLong Ashton ResGenerator (LARS-WG)
[15] Semenov
[16] Silakhori

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

رابطه‌ی بارش-رواناب است که بر این اساس، مدل‌های بارش-رواناب متعددی توسعه داده شده‌اند. یکی از مدل‌های پرکاربرد و ساده که در تحقیقات ارزیابی اثر تغییراقلیم بر جریان‌های سطحی حوضه‌های آبریز در مناطق مختلف استفاده شده، مدل IHECRES[1] است. موفقیت مدل درشبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب در بسیاری از حوضه‌ها، خصوصاً حوضه‌های کوهستانی، مورد تأیید قرار گرفته است (ترامبادیا[2]، ۲۰۱۵).

بررسی کارایی مدل IHECRES در شبیه‌سازی رواناب سطحی رودخانه کن تحت اثر تغییراقلیم، نشان داد مدل از دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان رواناب روزانه و ماهانه برخوردار است (احمدی[3] و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه‌ی بررسی اثر تغییراقلیم بر حوضه‌ی آبریز بابلرود استان مازندران که با مدل گردش عمومی جو HADCM3[4] انجام شد، از مدل IHECRES به منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای استفاده شده است. نتایج، بیانگر کاهش ۱۵ و ۱۸/۵ درصد میانگین رواناب ماهانه این حوضه در دوره‌های آتی به ترتیب (۲۰۶۵-۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۰) است (رزاقیان[5] و همکاران, ۲۰۱۵).

کاربرد این مدل، در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب برخی از حوضه‌های آبریز استان اردبیل نیز، مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، مدل با درنظرگرفتن آمار دبی جریان ثبت شده در ۸ ایستگاه هیدرومتری واقع در جنوب و جنوب غربی این استان کالیبره و برای پیش‌بینی جریان در دوره‌های آتی صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد، با وجود افزایش وقایع دبی جریان حداکثر، دبی متوسط، نسبت به دوره‌ی پایه، ۱۶ درصد کاهش خواهد داشت (آقابیگی[6] و همکاران, ۲۰۱۸).

نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل IHECRES در حوضه‌ی محمدآباد استان گلستان نیز نشان داد، متوسط جریان سالانه، در دوره‌ی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، نسبت به دوره‌ی پایه ۲۰۱۰-۱۹۸۲، به میزان ۴/۸۶ مترمکعب بر ثانیه در سناریوA2 (رشد سریع جمعیت و اقتصاد ناهمگن جهانی) کاهش می‌یابد (نیرومندفر[7] و همکاران, ۲۰۱۶) .

شبیه سازی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری بر اساس مدل‌های گزارش ششم IPCC (CMIP6) در منطقه‌ی ۱۰ تهران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اجرای مدل بارش رواناب تحت سناریو بدبینانه SSP5.85[8] در گزارش ششم نشان داد با افزایش ۳۱/۴و ۲۶/۸ درصدی بارش در دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال نسبت به دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۸۱، حجم رواناب حوضه‌ی شهری، به ترتیب ۲۵/۲ و ۲۰/۷ درصد افزایش می‌یابد و در سناریو SSP2.61، حجم رواناب حداکثر ۸/۳ درصد کاهش خواهد داشت (حسنی[9] و همکاران، ۲۰۲۲).

در این تحقیق، با توجه به اهمیت سد شیرین‌دره در تأمین بخش قابل توجهی از مصارف آب در استان خراسان شمالی، از جمله، نیاز شرب ساکنین مرکز استان، اثر تغییراقلیم بر تغییرات رواناب حوضه‌ی آبریز بالادست سد، با رویکرد سناریوهای گزارش ششم IPCC، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

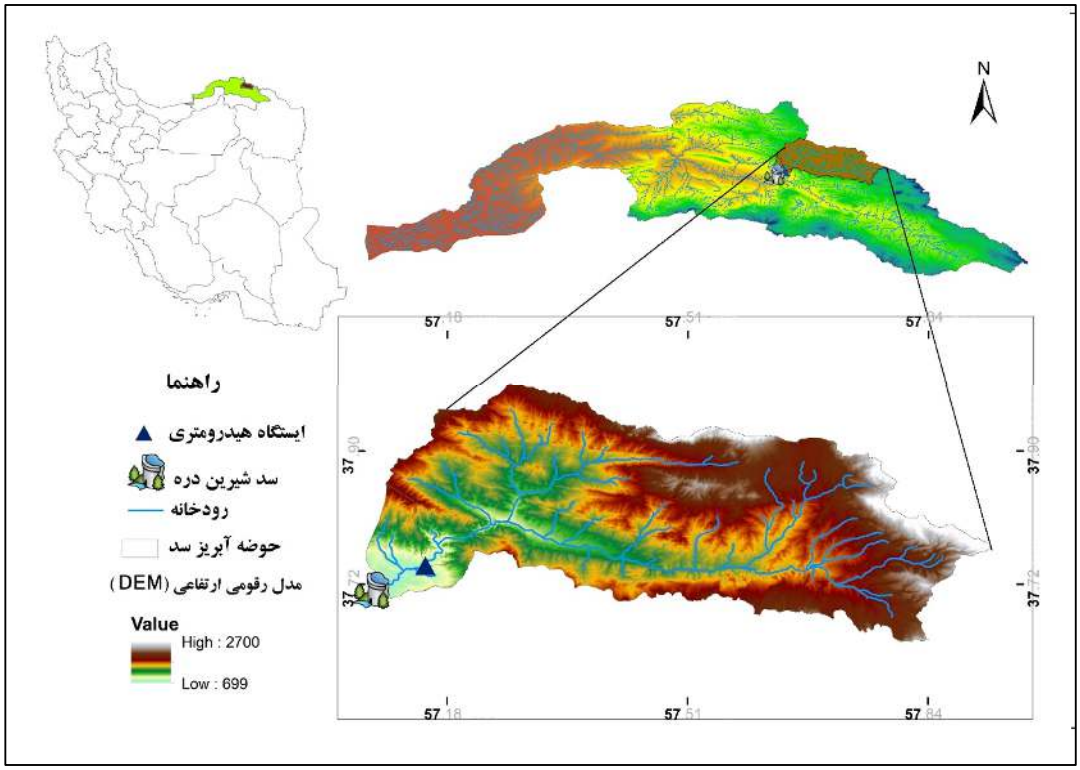
۲- مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی تحقیق، یکی ازسرشاخه‌های مهم رودخانه‌ی اترک، واقع در استان خراسان شمالی است. حوضه‌ی آبریز اترک یکی از حوضه‌های درجه ۲ ریزنده به دریای مازندران است که در شمال شرقی کشور در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و گلستان از شرق به غرب امتداد دارد. این حوضه با وسعت ۲۶۳۹۵/۷ کیلومترمربع در بین طول شرقی ″۵۷-°۵۳ تا ″۵-°۵۹ و عرض شمالی ″۵۵-°۳۶ تا ″۱۶-°۳۸ قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از پتانسیل تولید رواناب، در بخش میانی و از زیرحوضه‌های کوهستانی تأمین می‌شود. رودخانه‌ی شیرین‌دره نیز به عنوان یکی از سرشاخه‌های مهم محدوده، ورودی جریان سد شیرین‌دره را تأمین می‌کند. با توجه به نقش حساس این سد، در تأمین نیازهای آبی چندمنظوره ساکنین منطقه، آگاهی از شرایط جریان ورودی به مخزن در دوره‌های آتی، بسیار حایز اهمیت

[1] Identification of unit hydrograph and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data (IHECRAS)
[2] Trambadia
[3] Ahmadi
[4] Hadley Centre Coupled Model, Version 3 (HADCM3)
[5] Razzaghian
[6] Aghabeigi
[7] Niroumandfar
[8] Shared Socioeconomic Pathway scenarios (SSPs)
[9] Hasani

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

است. موقعیت زیرحوضه‌ی بالادست سد (با وسعت ۱۶۳۸/۹ کیلومترمربع) و ایستگاه‌های آب و هواشناسی موجود در شکل (۱) نشان داده شده است. از دبی جریان ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری قلعه‌ی بربر واقع در خروجی حوضه و در بالادست، به عنوان آمار مشاهداتی استفاده شده است. با توجه به مرجعیت ایستگاه‌های سینوپتیک در پارامتر دما و باران، آمار ایستگاه سینوپتیک بجنورد، به عنوان داده‌های مشاهداتی برای این دو پارامتر ملاک عمل قرار گرفته است.



شکل(۱): حوضه آبریز بالادست سد شیرین دره واقع در حوضه‌ی آبریز درجه ۲ اترک

۲-۱- مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای

مدل‌های گردش عمومی جو مشابه با مدل‌های پیش‌بینی آب و هوایی، معادلات پیوستگی دینامیک سیال جوی را درمقیاس‌های گسسته زمانی و مکانی حل می‌کنند. این مدل‌ها، شبکه‌ای مشتمل بر چند طول و عرض جغرافیایی را شامل شده و قادرند پارامترهای جوی و اقیانوسی را برای یک دوره‌ی بلندمدت، در مقیاس جهانی یا قاره‌ای با در نظر گرفتن سناریوهای IPCC مدل سازی و تولید نمایند (چن،۲۰۱۹). سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، شامل چندین سناریوی مختلف است که به منظور پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی و اثرات آن بر جوامع و محیط‌زیست تهیه شده‌اند. هیئت بین‌الدول تغییراقلیم (IPCC)، هر چند سال یک‌بار، بصورت تناوبی، گزارش‌هایی را از وضعیت اقلیم، اثرات، سازگاری با اقلیم و کاهش آسیب‌پذیری‌ها در مقیاس جهانی و منطقه‌ای ارائه می‌کند. از جدیدترین این سناریوها، سناریوهای انتشار SSP هستند که بر پایه‌ی توسعه پایدار، رقابت منطقه‌ای، نابرابری، توسعه‌ی سوخت‌های فسیلی و توسعه مبتنی بر سیاست‌های بینابین در گزارش ششم IPCC منتشر شده‌اند. این سناریوها، شامل ۵ زیرگروه اصلی هستند که بر شاخص‌های کمّی (جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و ...) و سناریوهای تعمیم یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری)، برنامه انرژی و

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

تغییرات کاربری اراضی و غیره تاکید دارد (انیل[1]،۲۰۱۷ ؛راجلی[2]، ۲۰۱۸).

مدل های ارائه شده در نسخه‌ی ششم پروژه‌ی بین‌المللی بررسی تغییرات آب و هوایی CMIP6، جدیدترین مدل‌های ارائه شده IPCC هستند که اقلیم آینده را تحت سناریوهای انتشار SSP، شبیه‌سازی می‌کنند (پدرسون[3]،۲۰۲۲). از جمله مزیت‌های مهم مدل‌های CMIP6، شبیه‌سازی بهتر فرایندهای فیزیکی سامانه‌ی اقلیم، کاهش چشمگیر اریبی متغیرهای مهم اقلیمی، همچون دما و بارش است که با بهبود مشخصه‌های فیزیکی و دینامیکی تا حد زیادی در مقایسه با مدل‌های مشارکت یافته در CMIP5 بهبود یافته‌اند (فولر[4]،۲۰۰۷). به دلیل وجود عدم قطعیت در خروجی‌های مدل‌های اقلیمی، به بررسی و ارزیابی چند مدل یا استفاده از ترکیب خروجی آن‌ها توصیه شده است (سونیر[5]،۲۰۱۵؛ لی[6]،۲۰۲۱؛ ما[7]،۲۰۲۲). بنابراین در این مطالعه، دقت و کارایی خروجی ۸ مدل CMIP6[8] برای پارامتر دما و بارش تحت دو سناریو SSP3.70 و SSP5.85، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات مدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): معرفی مشخصات مدل های CMIP6 منتخب جهت بررسی عملکرد نتایج در منطقه مطالعه

نام مدل	سازمان توسعه دهنده مدل	کشور مبدا	دقت شبکه مدل (درجه)
ACCESS-ESM1-5	Australian Community Climate and Earth System Simulator Earth System Model	استرالیا	۱/۲×۱/۸۷
MRI-ESM 2-0	Meteorological Research Institute, Ibaraki	ژاپن	۱/۲۵×۱/۲۵
IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre Simon Laplace (IPSL), Paris	فرانسه	۲/۵×۲/۵
GFDL-ESM4	NOAA-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	امریکا	۱/۲۵×۱/۲۵
HadGEM3-GC31	Meteorological Office Hadley Centre	انگلیس	۱/۸۸×۱/۲۵
CMCC-EMS2	Fodazione Centro Euo-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), Lecce, Italy	ایتالیا	۰/۹×۱/۲۵
FIO-ESM2	The First Institute of Oceanography, China	چین	۱/۶۵×۲/۸۱

۲-۲- مدل های GCM و ریزمقیاس نمایی

در ابتدا، با مقایسه داده‌های تاریخی مدل‌های GCM با مقادیر متناظر ثبت‌شده در ایستگاه سینوپتیک بجنورد

[1] O'Neill
[2] Rogeli
[3] Padron
[4] Fowler
[5] Sunyer
[6] Li
[7] Ma
[8] www.climate4impact.eu

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

(داده‌های مشاهداتی) و استفاده از نمودار تیلور، نتایج مدل‌ها ارزیابی شد.

انتخاب مدل‌ها با بهترین تطابق آماری به تنهایی کافی نبوده و به دلیل بزرگی مقیاس مکانی شبکه یا سلول‌های محاسباتی این مدل‌ها نسبت به مختصات محلی داده‌های مشاهداتی، استفاده از روش‌های ریزمقیاس نمایی ضرورت دارد (ایرانشاهی[1] و همکاران, ۲۰۲۲). مدل LARS-WG، یک مولد آب و هوای تصادفی است که سری زمانی داده‌های هواشناسی روزانه (حداکثر و حداقل دما، بارش و تابش خورشیدی) را در مقیاس محلی، برای دوره‌های گذشته و آینده تولید می‌کند (سمینو، ۱۹۹۷). فرایند ریزمقیاس نمایی در مدل، بدین ترتیب است که در ابتدا یک سری آمار تصادفی با توزیع متناسب با توزیع آماری سری داده مشاهداتی تولید می‌شود. سپس با استفاده از ضرایب میانگین و انحراف معیار سناریوهای تعریف شده، داده‌های ریزمقیاس بازتولید می‌شود. در این مطالعه، از نسخه ۶ نرم افزار که بر اساس گزارش پنجمIPCC (AR5) و سناریوهای انتشار RCP[2] (۲۶، ۴۵، و ۸۵) در سال ۲۰۱۸ منتشر شده (حیدری‌تاشه‌کبود[3] و همکاران , ۲۰۱۹)، استفاده شده است. این سناریوها، بیانگر تفاوت بین انرژی تابشی ساطع شده از خورشید و انرژی منعکس شده به جو توسط زمین هستند (IPCC, 2014) .

با توجه به اینکه نسخه ۶ نرم‌افزارLARS-GW، از سناریوهای SSP به صورت پیش‌فرض پشتیبانی نمی‌کند، به منظور ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های CMIP6، نیاز به ایجاد و تعریف سناریو در نرم افزار است. بنابراین ابتدا سناریو نرم‌فزار لارز بر اساس محاسبه‌ی ضرایب نسبت میانگین و واریانس پارامترهای دما حداقل و حداکثر، بارش و تغییرات طول دوره‌های تر و خشک بر اساس داده‌های تاریخی و آتی GCMs تعیین شده است. سپس نرم‌افزار بر اساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک بجنورد کالیبره شده و با معرفی سناریو و داده‌های GCMs، مدل اجرا می‌شود. داده‌های بازتولید شده در این مرحله، داده‌های GCMs برای هر پارامتر، در مقیاس محدوده مطالعاتی است.

۳-۲- مدل بارش-رواناب

بررسی اثر تغییرات آب و هوایی بر رواناب، نیازمند شبیه سازی فرایند بارش- رواناب در حوضه‌ی آبریز است به نحوی که سری زمانی جریان رواناب برای دوره‌های آتی قابل پیش بینی باشد.

مدل IHACRES یک مدل یکپارچه مفهومی متریک با هدف توصیف رابطه‌ی پویا بین بارش و رواناب است که در یک پروژه‌ی مشترک دانشگاه ملی استرالیا و مرکز اکولوژی انگلستان توسعه داده شده است(جکمن[4] و هورمبرگ[5]، ۱۹۹۳). نسخه‌ی نرم‌افزاری مدل، به عنوان ابزاری برای تعیین هیدروگراف‌های واحد و مؤلفه‌های جریان با استفاده از اطلاعات بارش، تبخیر وتعرق و دبی جریان تهیه شده است. رویکرد مدل در شبیه‌سازی، معرفی و توصیف یک رابطه‌ی دینامیکی و پویا بین بارش و رواناب است. با توجه به ساختار یکپارچه و مفهومی، این مدل، در دسته مدل‌های هیدرولوژیکی لامپ[6] قرار می‌گیرد. یکپارچه بودن مدل به این معناست که پارامترهای مورد نیاز در فرایند هیدرولوژیکی شبیه‌سازی رواناب در سطح حوضه آبخیز یکسان در نظر گرفته می‌شود. به عبارتی از تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر در سطح حوضه صرف‌نظر می‌شود (کروک[7]، ۲۰۰۵). شبیه‌سازی مدل، مطابق شکل (۲) از دو مدول غیر خطی کاهش تلفات و مدل خطی هیدروگراف واحد تبعیت می‌کند. به طور کلی، در مدول غیر خطی کاهش، سه فاکتور ثابت خشکیدگی، تعدیل دما و ظرفیت نگهداشت رطوبتی حوضه کالیبره می‌شوند. به منظور تبدیل بارش به بارندگی مؤثر در حوضه، از ضریب رطوبتی حوضه‌ی آبریز[8] S_k، استفاده می‌گردد. هر چه حوضه قبل از بارندگی مرطوب تر باشد، مقدار تبدیل بارندگی به بارش مؤثر بیشتر خواهد بود:

$$u_k = s_k \times r_k \qquad 0 < S_k < 1 \quad (1)$$

[1] Iranshahi
[2] Representative Concentration Pathway (RCP) emission scenarios
[3] Heydari Tashe Kaboud
[4] Jakeman
[5] Hornberger
[6] Lumped
[7] Crook
[8] Catchment Wetness Index

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

در حالتی که حوضه، کاملا خیس باشد، ($S_K = 1$) تمامی بارش به بارندگی مؤثر تبدیل خواهد شد. از طرف دیگر، ضریب رطوبتی حوضه، تابعی از تبخیر و تعرق در حوضه بوده که با روابط (۲) و (۳) بیان می شود:

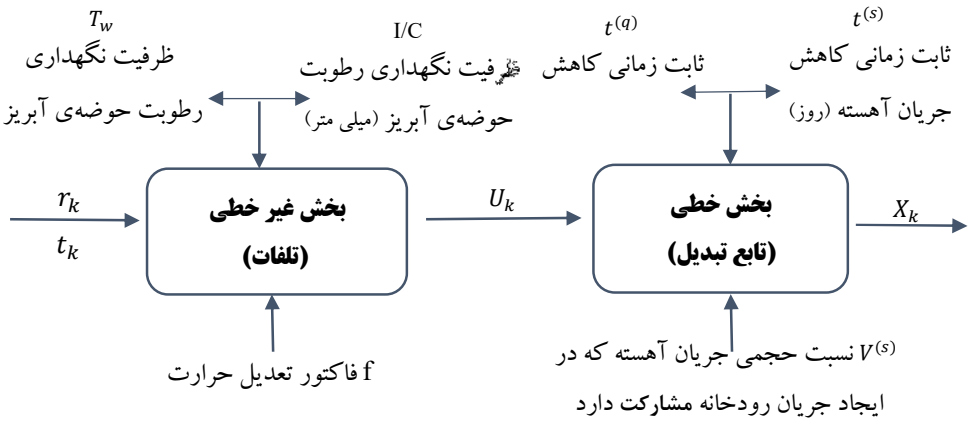
(2)
$$s_k = C \times r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right) s_{k-1} \quad S_0 = 0$$

(3)
$$\tau_w(t_k) = \tau_w e^{0.062 f(R - t_w)} \qquad \tau_w(t_k > 1)$$

$\tau_w(t_k)$، مقدار شاخص s_k را در هنگامی که بارش رخ نمی‌دهد کنترل می‌کند که در آن: R برابر دمای مرجع، τ_w ثابت زمانی خشک شدن حوضه و f فاکتور تعدیل دمای حوضه است.

رواناب ناشی از بارش مؤثری که در مرحله‌ی مدول غیرخطی برآورد شده در بخش مدل خطی هیدروگراف تخمین زده می‌شود. بدین ترتیب که هیدروگراف واحد، پس از ایجاد بارش مؤثر و با استفاده از بخش خطی مدل بر اساس دو مؤلفه جریان سریع و آهسته طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$(4) \quad x_k = a^q x_{k-1} + b^q u_{k-1} + b^s u_{k-1}$$



شکل (۲): نحوه شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل IHECRAS

پارامترهای a^q و b^q، ثابت زمانی برای جریان‌های سریع، a^s و b^s ثابت زمانی برای جریان‌های آهسته، x_k رواناب تخمینی و u_k، بارش مؤثر در رواناب تخمینی در گام زمانی می‌باشند.

معیارهای منتخب، برای ارزیابی نتایج مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، شامل ضریب تبیین[1] R^2، جذر میانگین[2] مربعات خطا RMSE[3]، متوسط خطای مطلق[4] MAE و ضریب ناش-ساتکلیف[5] NSE (رابطه ۵) می‌باشند.

$$(5) \quad NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_o - X_s)^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_o - \bar{X}_o)^2}\right]$$

برای اجرای شبیه‌سازی، سری زمانی داده‌های دما، بارش و دبی رودخانه‌ی شیرین‌دره در ایستگاه هیدرومتری قلعه بربر با مقیاس روزانه، به مدل وارد شد. در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل، با توجه به شرایط هیدرولوژیکی حوضه، دوره‌هایی نمایانگر وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال انتخاب گردید. در نهایت، بازه‌ی زمانی دارای بهترین انطباق میان داده‌های مشاهداتی و نتایج مدل به‌عنوان دوره‌ی کالیبراسیون تعیین شد.

در مرحله‌ی بعد، پارامترهای سه فاکتور ثابت خشکیدگی، تعدیل دما و ظرفیت نگهداشت رطوبتی حوضه، با سعی و خطا، در بازه‌ی منطقی هر پارامتر، کالیبره شده‌اند. پس از به

[1] Determination Coefficient
[2] Root of Mean Squares Error
3 Mean of Absolute Error
[4] Absolute Error
[5] Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

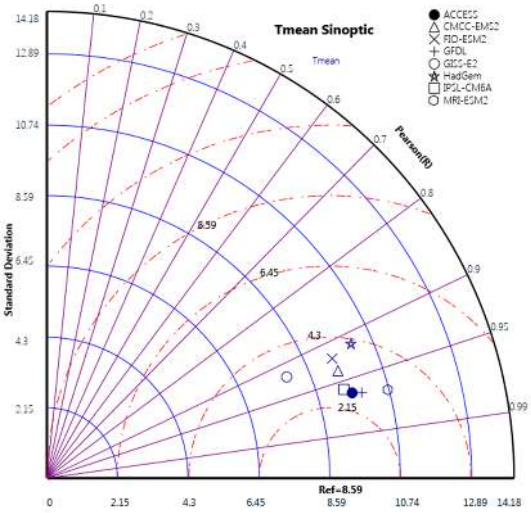
دست آوردن بهترین نتیجه واسنجی، شبیه‌سازی انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل، خروجی شبیه‌سازی مدل در بازه‌ی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۹، مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، به منظور تولید جریان رواناب دوره‌های آتی، داده‌های ریزمقیاس شده بارش و دما را به مدل کالیبره شده، معرفی و پس از اجرای مدل، سری زمانی جریان رودخانه منتهی به سال ۲۰۵۰، تولید شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

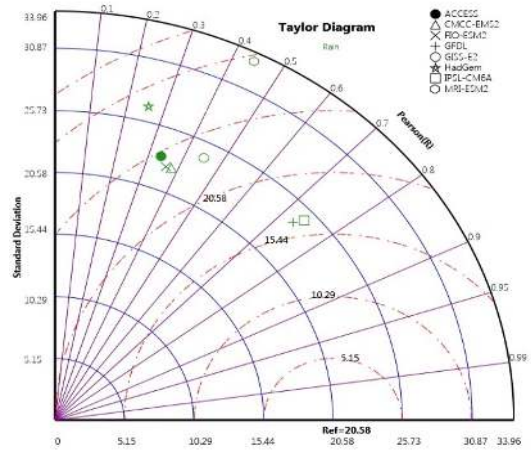
۳-۱- ارزیابی و انتخاب مدل GCM

با توجه به عدم قطعیت بالا، در خروجی مدل‌های GCMs، معمولاً توافق اولیه، بین نتایج شبیه‌سازی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی ایستگاه زمینی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. دیاگرام تیلور (تیلور[1]،۲۰۰۱) که بر مبنای ارتباط هندسی بین ضریب همبستگی (R) و انحراف معیار سری های زمانی و RMSD استوار است، یکی از روش‌های متداول ارزیابی تطابق نتایج مدل‌های CMIP و داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی در یک دوره‌ی مشترک است. در این نمودار، نقطه مرجع در محور افقی، موقعیت ایستگاه زمینی را براساس انحراف معیار سری زمانی ایستگاه مشاهداتی نشان می‌دهد. تفسیر نمودار، بدین ترتیب است که موقعیت مکانی (انحراف معیار و ضریب پیرسون) داده‌های مدلی که در نقطه‌ای نزدیک‌تر به این نقطه مرجع (Ref) قرار می‌گیرند، تطابق بهتری با داده‌های ایستگاه مشاهداتی دارند (عزیزی[2]، ۲۰۱۵). در دیاگرام‌های شکل (۳-الف وب)، عملکرد GCMs در شبیه‌سازی پارامترهای ماهانه بارش و دما طی دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بر اساس داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک بجنورد نمایش داده شده است.

در نمودار شکل (۳-الف)، ضریب همبستگی برای شبیه‌سازی دمای میانگین در تمامی مدل‌ها، بالاتر از ۹۰ درصد و برای مدل‌هایGFDL-ESM4،CMCC-EMS2،MRI-ESM2 و ACCESS، بیشتر از ۹۵ درصد است. اما در شبیه‌سازی پارامتر بارش (شکل ۳-ب) ضرایب همبستگی کاهش یافته و در بیشتر ماه‌ها بین برآورد مدل‌ها و مقادیر مشاهداتی، اختلاف زیادی وجود دارد. نتیجه‌ی این ارزیابی در حوضه‌ی شیرین‌دره، منطبق بر نتایج مطالعات ارزیابی مدل‌های GCM در اقلیم ایران می‌باشد. طبق بررسی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو در ایران، مشخص شد عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی دما (فصلی و سالانه) خوب و قابل قبول بوده، درحالی‌که اکثر مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامتر بارش در شرایط اقلیمی کشور، عملکرد ضعیفی را نشان داده‌اند (عباسیان [3]و همکاران،۲۰۱۹).



شکل (۳-الف): دیاگرام تیلور برای مقایسه عملکرد مدل های Had GEM،GISS،GFDL،FIO-ESM،CMCC،ACCESS MRI،IPSL، در شبیه‌سازی *دما*



شکل (۳-ب): دیاگرام تیلور برای مقایسه عملکرد مدل های Had GEM،GISS،GFDL،FIO-ESM،CMCC،ACCESS MRI،IPSL، در شبیه‌سازی *باران*

[1] Taylor
[2] Azizi
[3] Abbasian

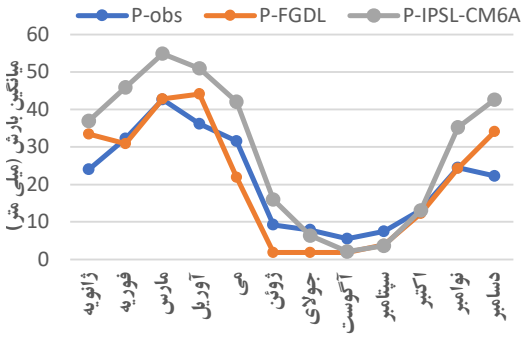
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

با توجه به ارزیابی عملکرد مدل‌ها، نتایج حاصل از مدل‌های IPSL و GFDL به دلیل نزدیکی نقاط آن‌ها به نقطه مرجع در دیاگرام تیلور، همبستگی بیشتری با داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه سینوپتیک بجنورد نسبت به سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی هر دو پارامتر دما و بارش نشان دادند. بر این اساس، خروجی این دو مدل به‌عنوان مبنای شبیه‌سازی جریان رواناب در دوره‌های آتی مورد استفاده قرار گرفت. RMSE محاسبه شده برای مدل GFDL در شبیه‌سازی دما ۱/۶ درجه سلسیوس و بهترین عملکرد در شبیه‌سازی پارامتر باران، مربوط به نتایج مدل IPSL با RMSE معادل ۱۰/۲ میلی‌متر است. ضریب همبستگی برای پارامترهای یاد شده به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۱ برآورد شده است.

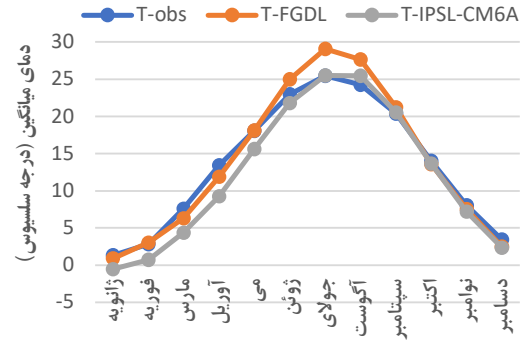
در ادامه‌ی فرایند ارزیابی، دقت داده‌های مدل‌های انتخابی، میانگین ماهانه دما و بارش طی دوره‌ی پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۵ بهمراه میانگین متناظر داده‌های مشاهداتی ترسیم و در شکل‌های شماره (۴) و (۵) ارائه شده است. با توجه به همبستگی بالای ۹۵ درصد خروجی این دو مدل، با داده های مشاهداتی، دقت شبیه‌سازی مدل‌ها در پارامتر دما بالاتر از بارش است. با این وجود، نمودار شکل (۴) نشان می‌دهد نتایج مدل GFDL در ماههای گرم سال، دمای بیشتر و در مدل IPSL در ۶ ماهه اول سال میلادی مقادیر دمای کمتری از داده‌های ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک بجنورد را نشان می‌دهد. در خصوص پارامتر بارش مطابق با نمودار شکل (۵)، با وجود اینکه در اکثر ماه‌های سال، اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی وجود دارد، اما مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل IPSL نسبت به داده‌های مشاهداتی در فصول زمستان و بهار بیش برآورد نشان می‌دهد.

۲-۳- نتایج شبیه سازی بارش-رواناب

همان طور که گفته شد، پیش بینی جریان رواناب در دوره‌های آتی، نیازمند شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در حوضه است. در این مطالعه نیز با استفاده از مدل IHECRES، فرایند شکل‌گیری رواناب در حوضه‌ی شیرین‌دره، شبیه‌سازی شده است. داده‌های روزانه بارندگی (میلی متر)، دما (درجه سانتی‌گراد) و آمار ثبت شده دبی روزانه (مترمکعب در ثانیه) در ایستگاه هیدرومتری قلعه‌بربر (واقع در خروجی زیرحوضه و بالادست سد)، به عنوان متغیرهای ورودی مدل در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): مقایسه متوسط بارش ماهانه دو مدل IPSL و GFDL با داده های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک بجنورد



شکل (۵): مقایسه متوسط دمای ماهانه دو مدل IPSL و GFDL با داده های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک بجنورد

پس از معرفی سری زمانی داده‌ها و مساحت حوضه، با درنظر گرفتن دوره‌های مناسب معرف شرایط حوضه، مرحله‌ی واسنجی مدل آغاز می‌شود. این مرحله، مستلزم در نظرگرفتن دوره‌های تر، خشک و نرمال است بنابراین با انتخاب هر دوره، ارزیابی نتایج شبیه‌سازی انجام و مناسب‌ترین دوره، انتخاب شده است. از طرفی، مقادیر ثابت زمانی خشکی حوضه‌ی آبریز τ_w و فاکتور تعدیل دما (f) در بخش مدول غیر خطی مدل، به صورت دستی توسط کاربر، کالبیره شده‌اند. بهترین عملکرد شبیه‌سازی در دوره‌ی ۲۰۰۶-۲۰۰۱، با ضریب تبیین ۰/۸۷ و RSME معادل ۰/۱۱ و ضریب نش ۰/۸۵ به دست آمده است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

پس از این مرحله، شبیه‌سازی انجام شد و خروجی‌های حاصل برای صحت‌سنجی در دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳، مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی نتایج در این بازه زمانی (ضریب تبیین۰/۸۲، RMSE معادل ۰/۱۹ و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۷۳) نشان داد که مدل توانایی نسبی در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ی شیرین‌دره را دارد.

نتایج ارزیابی عملکرد مدل، در دو دوره‌ی واسنجی و صحت سنجی، در جدول (۲) و شکل های (۵) و (۶) ارائه شده است. ضریب نش ساتکلیف [1](NSE) معادل عدد ۱، بیانگر تناسب کامل بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی است. طبق توصیه‌ها، ضریب بیشتر از ۰/۷۵، عملکرد خوب و بازه‌ی بین ۰/۷۵ و ۰/۳۶، عملکرد قابل قبول مدل در نظر گرفته می‌شود. بر اساس آماره‌های خطای محاسبه شده در جدول(۲)، توانایی مدل در شبیه‌سازی مقدار دبی میانگین و روند جریان‌های حدی زیرحوضه بالادست سد شیرین دره، قابل قبول ارزیابی می‌شود، اما مدل در شبیه‌سازی پیک سیلاب‌ها عملکرد مناسبی ندارد.

۳-۳-پیش بینی جریان ورودی رودخانه به سد در دوره‌های آتی

به منظور شبیه‌سازی سری زمانی جریان رودخانه شیرین‌دره در دوره آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۵، داده‌های ریزمقیاس خروجی دو مدل IPSL و GFDL، برای سناریوهای SSP3.70 و SSP5.85 به عنوان ورودی به مدل IHECRES واسنجی شده، معرفی و مدل به تفکیک هر سناریو اجرا شده است. خروجی مدل در این مرحله، جریان شبیه‌سازی شده در دوره‌ی آتی است. نتایج مقایسه‌ی روند جریان، در دوره‌ی آتی، نسبت به دوره‌ی پایه‌ی ۲۰۱۴-۱۹۸۵، در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. روند کلی تغییرات متوسط جریان سالانه‌ی رودخانه شیرین‌دره، در دوره‌ی ۲۰۵۰-۲۰۲۵، نسبت به دوره‌ی پایه، کاهشی است و بیشترین تغییرات رواناب در سناریو SSP5-85 ، بر اساس داده‌های ریزمقیاس مدل IPSL به میزان ۰/۸ مترمکعب در ثانیه معادل ۳۶/۷ درصد کاهش در دبی جریان متوسط سالانه است.

با در نظر گرفتن داده‌های مدلGFDL در همین سناریو، جریان ورودی به سد، در دوره‌ی آتی با ۲۸/۲ درصد کاهش، مواجه خواهد شد. در سناریوی خوشبینانه SSP3.70 نیز جریان سالانه، نسبت به دوره‌ی پایه، به ترتیب ۱۰/۷ و ۶/۹ درصد براساس داده‌های مدل های IPSL و GFDL کاهش را نشان داده است (جداول (۳) و (۴)).

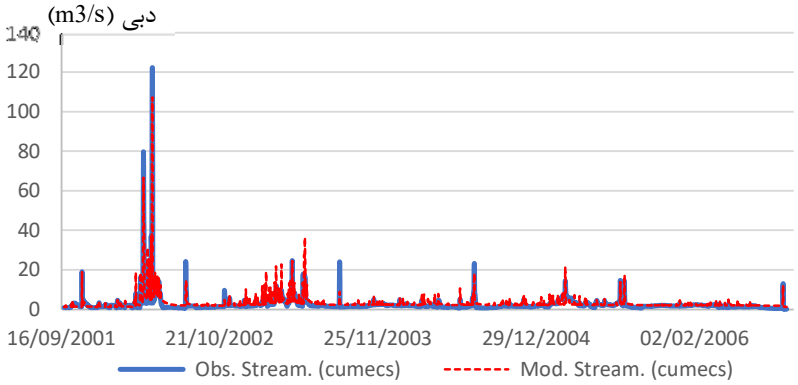
نتایج پیش‌بینی جریان رودخانه‌ی شیرین‌دره در این تحقیق، با نتایج مطالعه‌ی مشابه در حوضه‌ی محمدآباد استان گلستان، رودخانه کن در استان تهران و همچنین حوضه‌ی بالادست سد کرخه، در استان خوزستان، مطابقت دارد. در بررسی اثر تغییر اقلیم، بر جریان رودخانه در این حوضه‌ها نیز ضمن کاهش جریان در تمام سناریوهای مورد بررسی، شدیدترین تغییرات، در سناریو بدبینانه و به میزان ۴/۸۶ مترمکعب بر ثانیه کاهش جریان سالانه در حوضه محمدآباد، ۱۸/۶۵ و ۲۰/۱ درصد کاهش به ترتیب در جریان سالانه رودخانه کن و ورودی سد کرخه نسبت به دوره پایه نتیجه گیری شده است (نیرومندفر[2] و همکاران,۲۰۱۶؛ احمدی[3] و همکاران, ۲۰۱۷؛ مطیعی[4] و همکاران, ۲۰۲۰).

جدول (۲): معیارهای ارزیابی شبیه‌سازی مدل IHECRAS در دوره‌ی مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

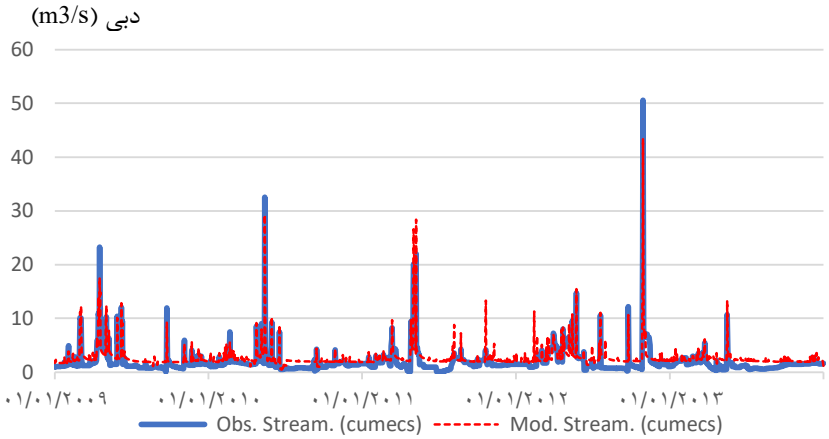
دوره	R^2	NSE	RMSE	ME	MAE	PBIAS
واسنجی	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۱۱	-۰/۲۶	۱/۱۶	-۰/۰۰۰۵
صحت سنجی	۰/۸۲	۰/۷۳	۰/۱۹	-۰/۷۴	۱/۰۲	-۰/۰۰۰۲

[1] Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE)
[2] Niroumandfar
[3] Ahmadi
[4] Motiee

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل(۶): مقایسه سری زمانی جریان رودخانه شیرین‌دره با مقادیر متناظر شبیه‌سازی شده در دوره‌ی واسنجی مدل IHECRAS



شکل(۷): مقایسه سری زمانی جریان رودخانه شیرین‌دره با مقادیر متناظر شبیه‌سازی شده در دوره‌ی صحت‌سنجی مدل IHECRAS

جدول (۳): تغییرات سالانه دما، بارش و جریان رواناب در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بر اساس نتایج مدل *GFDL-ESM4*

سناریو / پارامتر	دوره پایه ۱۹۸۵-۲۰۱۴	GFDL SSP370	تغییرات سالانه (٪)	FGD SSP585	تغییرات سالانه (٪)
(سانتی‌گراد) دما	۱۳/۴۲	۱۴/۲۰	۵/۸۱	۱۵/۰۲	۱۱/۹۲
(میلی‌متر) باران	۳۰۹/۶	۲۶۸/۸۲	-۱۳/۱۷	۲۸۴/۰۹	-۸/۲۱
(مترمکعب‌برثانیه) دبی	۲/۱۶	۱/۹۳	-۱۰/۶۵	۱/۵۵	-۲۸/۲۴

جدول (۴): تغییرات سالانه دما، بارش و جریان رواناب در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بر اساس نتایج مدل *IPSL-CM6A-LR*

سناریو / پارامتر	دوره پایه ۱۹۸۵-۲۰۱۴	IPSL SSP370	تغییرات سالانه (٪)	IPSL SSP585	تغییرات سالانه (٪)
(سانتی‌گراد) دما	۱۳/۴۲	۱۴/۱۹	۵/۷۴	۱۶/۹۶	۲۶/۳۸
(میلی‌متر) باران	۳۰۹/۶	۳۰۶/۷۰	-۰/۹۴	۲۵۷/۵۷	-۱۶/۸۱
(مترمکعب‌برثانیه) دبی	۲/۱۶	۲/۰۱	-۶/۹۴	۱/۳۷	-۳۶/۵۷

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

تغییرات بلندمدت ماهانه و فصلی دما، بارش و جریان رواناب در دوره‌ی آتی، نسبت به دوره‌ی پایه بر اساس مدل های IPSL ،GFDL و سناریوهایSSP370 و SSP585 در نمودارهای ۸ تا ۱۳ نشان داده شده است.

با توجه به مقایسه‌ی دمای ماهانه و فصلی دوره‌ی آتی در مقیاس محلی با آمار دوره‌ی پایه مشاهداتی، مشخص است پارامتر دما در اکثر ماه‌های سال، بر اساس نتایج شبیه‌سازی هر دو مدل GCM، نسبت به دوره‌ی پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۵، به طور مشخص افزایش خواهد داشت. این افزایش روند دما در تمامی سناریوها IPCC، در تحقیقات مشابه در سایر مناطق کشور تأیید شده است (ایران‌شاهی[1] و همکاران،۲۰۲۲؛ سرابی[2] و همکاران،۲۰۲۰؛ زارعیان و همکاران،[3]۲۰۲۴؛ کاظمی[4] و خزایی[5]، ۲۰۲۲). شدیدترین تغییرات درجه حرارت با افزایش ۴/۵ و ۵/۱ درجه سلسیوس، به ترتیب در ماه‌های دی و بهمن در سناریو بدبینانه SSP5.85 و بر اساس نتایج مدل IPSL رخ داده است. بیشترین افزایش دمای فصلی نیز، به مقدار ۴/۲۳ و ۴/۴۳ درجه، به ترتیب برای فصل بهار و زمستان پیش‌بینی می‌شود.

افزایش دما در ماه‌های سرد سال موجب تغییر الگوی بارش منطقه و کاهش سهم رواناب حاصل از ذوب برف در جریان رودخانه ای خواهد شد.

در خصوص پارامتر باران، اگرچه میانگین سالانه بارش شبیه‌سازی شده برای دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) نسبت به دوره‌ی پایه در هر دو سناریو کاهشی است اما میانگین باران ماهانه در ماه‌های تیر تا شهریور به میزان ۱/۶ تا ۱/۸ برابر مقدار منتاظر آن در دوره‌ی پایه افزایش می یابد. با توجه به این‌که دوره متداول وقوع سیلاب در استان خراسان شمالی در ماه‌های مرداد و شهریور است، احتمال افزایش تعداد و شدت رخدادهای سیل منطقه نیز، نیازمند بررسی و مطالعه است. در تحقیق مشابه، در حوضه‌ی آبریز سد کرخه نیز، علی‌رغم کاهش سالانه بارندگی، در سناریو بدبینانه RCP8.5، بارندگی فصل تابستان به میزان ۲۳/۴ و ۲۴/۶ درصد، به ترتیب برای دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۰ و ۲۰۶۰-۲۰۴۰ افزایش می‌یابد (مطیعی[6] و همکاران، ۲۰۲۰).

شدیدترین تغییرات فصلی بارش، در حوضه شیرین‌دره، در فصول سرد سال شناسایی شده، تا حدی که کاهش بارندگی در زمستان، بر اساس نتایج مدل IPSL و GFDL به ترتیب ۷۴ و ۵۴ درصد برآورد می شود. روند کاهشی بارش در زمستان در سایر مناطق ایران نیز گزارش شده است (میرشکاران[7] و همکاران،۲۰۲۲؛ ایران‌شاهی[8] و همکاران، ۲۰۲۲؛ زارعیان [9]و همکاران، ۲۰۲۴؛). کاهش بارندگی در فصل بهار، بر اساس سناریوی بدبینانه نیز، قابل توجه و به میزان ۳۴ و ۴۶ درصد برای هر مدل GFDL و IPSL است. این در حالی است که با توجه به وابستگی تغذیه جریان پایه‌ی رودخانه شیرین‌دره به بارش‌های زمستان و ابتدای بهار، کاهش یا تغییر الگوی بارش در این فصول تأثیر زیادی بر ورودی جریان به مخزن سد خواهد داشت.

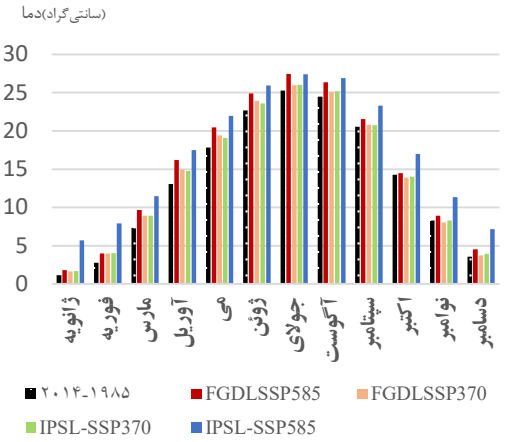
مقایسه متوسط دبی جریان ماهانه در شکل (۱۲) نشان می‌دهد، جریان رودخانه شیرین‌دره در ماه‌های ابتدای سال میلادی تا فروردین و اردیبهشت، نسبت به دوره‌ی پایه کاهش خواهد یافت. متوسط دبی جریان ماهانه، در ماه آوریل،۳/۴۰ مترمکعب در ثانیه در دوره‌ی پایه اندازه گیری شده، اما بر اساس پیش‌بینی انجام شده در این مطالعه، دبی جریان در این ماه، به حدود ۱/۷ مترمکعب در ثانیه در دوره آتی کاهش خواهد یافت. این روند کاهشی حدود ۵۰ درصد از کل جریان رواناب را شامل می‌شود که شدت آن تا ماه می میلادی نیز ادامه خواهد داشت. از طرفی افزایش جریان ماهانه در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر با توجه به افزایش بارش در این ماه‌ها (شکل۱۰)، ریسک افزایش شدت سیلاب‌ها و خسارت ناشی از آن را افزایش می‌دهد.

[1] Iranshahi
[2] Sarabi
[3] Zareian
[4] Kazem
[5] Khazaei
[6] Motiee
[7] Mirshkaran
[8] Iranshahi
[9] Zareian

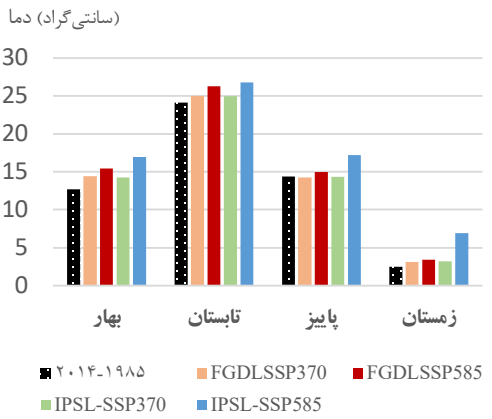
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

مطابق با شکل(۱۳)، در مقیاس فصلی نیز، بیشترین کاهش جریان رواناب در فصول زمستان و بهار (به ترتیب ۵۰/۷ و ۳۶/۲ درصد کاهش در دبی جریان) به وقوع خواهد پیوست. با توجه به الگوی کشت منطقه، ذخیره‌ی مخزن سد برای تحویل آب به کشاورزان در فصل کشت اصلی، در فصول سرد سال انجام می‌شود که در صورت تحقق این نتایج، برنامه‌ریزی و مدیریت مصرف در دوره‌ی تابستان، با چالش زیادی همراه خواهد شد.

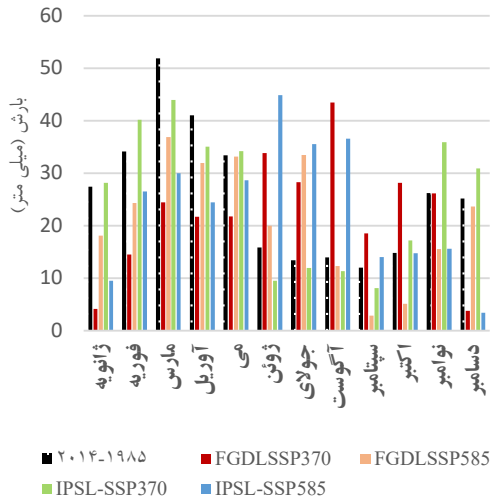
در ارزیابی مشابه، در حوضه‌ی سد کرخه نیز، برای جریان ورودی به مخزن سد، در تمامی فصول و تحت هر دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5، روند کاهشی پیش‌بینی شده که بیشترین تغییرات مربوط به فصل بهار با ۱۵.۴- و ۲۹.۳- درصد به ترتیب در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۰ و ۲۰۶۰-۲۰۴۰ است (مطیعی[1] و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل (۸): مقایسه متوسط *دمای ماهانه* در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)



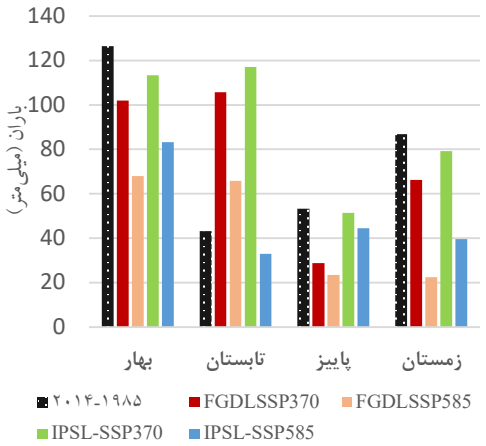
شکل (۹): مقایسه متوسط *دمای فصلی* در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)



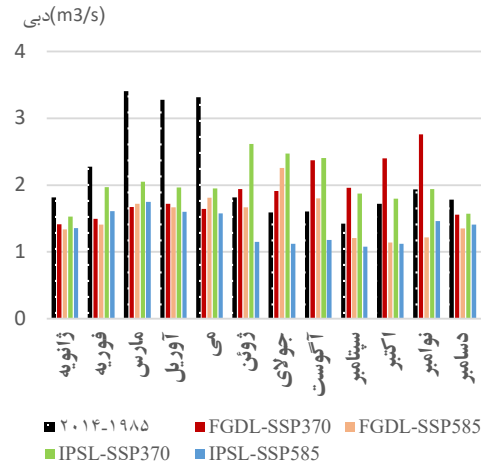
شکل (۱۰): مقایسه متوسط *بارش ماهانه* در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)

[1] Motiee

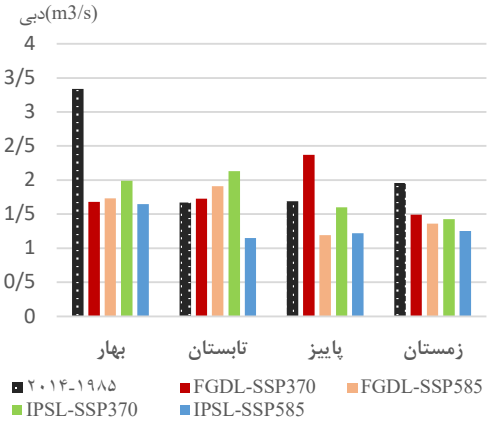
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۱۱): مقایسه متوسط *بارش فصلی* در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)



شکل (۱۲): مقایسه متوسط دبی جریان *ماهانه* در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)



شکل (۱۳): مقایسه متوسط دبی جریان *فصلی* دردوره‌ی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۵) نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر پدیده‌ی تغییر اقلیم بر جریان آب ورودی به سد شیرین‌دره، واقع در استان خراسان شمالی در دوره‌ی آینده نزدیک ۲۰۵۰-۲۰۲۵ مورد بررسی قرار گرفته است. با ارزیابی نتایج خروجی ۸ مدل CMIP6 با داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک بجنورد، در دوره‌ی پایه ۱۹۸۵-۲۰۱۴، مشخص شد تمامی مدل‌ها، قابلیت شبیه‌سازی پارامتر دما با ضریب همبستگی بالای ۹۰ درصد را دارند، اما عملکرد اکثر مدل‌ها، در شبیه‌سازی پارامتر بارش، نسبتاً ضعیف ارزیابی شده است. در نهایت، براساس مجموع نتایج ارزیابی انجام شده، داده‌های خروجی دو مدل IPSL و GFDL در ادامه‌ی روند تحقیق، مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور ریزمقیاس نمایی این داده‌ها، از نرم افزار LARS-GW، به عنوان ابزار ریزمقیاس‌نمایی استفاده شده است. به دلیل اینکه ارزیابی روند جریان رواناب، نیازمند شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه است، از مدل بارش-رواناب IHECRAS برای شبیه‌سازی جریان رودخانه شیرین دره استفاده شده و ضریب ناش-ساتکلیف برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۷۳ به دست آمده است. اگرچه نتایج شبیه‌سازی مدل، قابل قبول بوده است اما بیشترین خطا، در تعیین دبی‌های حداکثر سیلاب اتفاق افتاده و بیانگر عملکرد نسبتاً ضعیف مدل در شبیه‌سازی جریان سیلابی است. پس از انجام شبیه‌سازی بارش-رواناب، داده‌های دما و بارش، در مقیاس روزانه‌ی دوره‌های آتی به مدل کالیبره شده، معرفی و سری زمانی جریان رودخانه شیرین‌دره منتهی به سال ۲۰۵۰ تولید شده است.

نتایج ارزیابی پارامترهای هیدرواقلیمی نشان می‌دهد در سناریو SSP370، افزایش میانگین درجه حرارت سالانه، برای هر دو مدل یکسان و تقریباً ۰/۸ سانتی‌گراد است. میزان کاهش بارندگی برای دو مدل IPSL و GFDL، به ترتیب ۲/۹ و ۴۱/۴ میلی‌متر است. اثر این تغییرات در دما و بارش بر رواناب، کاهش دبی جریان رودخانه به میزان

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

۰/۱۵ و ۰/۲۳ مترمکعب بر ثانیه به ترتیب در دو مدل IPSL و GFDL خواهد بود.

در سناریو SSP585، افزایش میانگین دما ۳/۵۴ و ۱/۶ سانتی‌گراد و کاهش بارندگی سالانه ۵۲/۰۳ و۲۵/۵۱ میلی‌متر، به ترتیب بر اساس دو مدل IPSL و GFDL مشخص شده است. این تغییرات منجر به کاهش ۳۶/۵۷ و ۲۸/۲۴ درصدی در میزان حجم جریان رواناب ورودی به مخزن خواهد شد. با توجه به چالش‌های فعلی در برنامه‌ریزی و تخصیص مصارف فعلی سد، چنین افتی در جریان سالانه، ریسک شکست در تأمین آب سالانه ذینفعان منطقه را افزایش می‌دهد.

در مقیاس فصلی، بیشترین افزایش درجه حرارت، با مقادیر ۴/۲۳ و ۴/۴۳ سانتی‌گراد، به ترتیب مربوط به فصول بهار و زمستان است. از طرفی شدیدترین تغییرات بارندگی فصلی، با کاهش حدود ۷۴ و ۵۴ درصد در زمستان و ۴۶ و ۳۶ درصد در فصل بهار و بر اساس داده‌های دو مدل IPSL و GFDL، پیش‌بینی شده است. این تغییرات، پیامد کاهش جریان رواناب فصلی را از ۳/۳۳ مترمکعب در ثانیه در دوره پایه به ۱/۶۴ و ۱/۷۳ مترمکعب در ثانیه در سناریو SSP585 بهمراه خواهد داشت. متوسط جریان فصلی در زمستان در دوره‌ی پایه نیز ۱/۹۶ مترمکعب بر ثانیه است که در دوره‌ی آتی به ۱/۲۵ و ۱/۳۶ مترمکعب بر ثانیه، به ترتیب بر اساس نتایج دو مدل IPSL و GFDL کاهش خواهد یافت.

همچنین کاهش چشمگیر دبی ماهانه‌ی رواناب در نیمه دی تا پایان فروردین (نسبت به دوره‌ی پایه) که معادل کاهش ۵۰ و ۳۶ درصدی دبی جریان در فصول زمستان و بهار است، بر شدت پیچیدگی چالش تأمین نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی ساکنین در دوره های آتی خواهد افزود. چرا که ذخیره مطمئن مخزن سد شیرین دره، به منظور تأمین نیاز آبی تابستانه ساکنین، به رواناب حاصل از ذوب برف و حجم آورد رودخانه، در بازه‌ی زمانی اواخر زمستان و دو ماهه‌ی اول بهار وابسته است.

در پایان، لازم به ذکر است شبیه‌سازی و ارزیابی تشریح شده، ناگزیر با عدم قطعیت‌های متعددی از جمله شبیه سازی مدل های GCMs، فرایند ریزمقیاس نمایی آماری، انتخاب ضرایب مدل IHECRAS و همچنین کیفیت سری زمانی داده‌های مشاهداتی همراه است. بنابراین با توجه به چندمنظوره بودن این سد، در تأمین نیاز آبی ساکنین و کنترل سیلاب، تحقیق بیشتر، در راستای تدقیق نتایج ارزیابی حاضر و همچنین بررسی تغییرات فراوانی و شدت وقوع رخدادهای سیل برای دوره‌های آتی در منطقه پیشنهاد می‌شود.

مراجع

1- Abbasian, M., Moghim, S. & Abrishamchi, A. (2019) Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. Theor Appl Climatology, 135, 1465–1483.

2- Aghabeigi, N., Esmali Uodi, A., Mostafazade, R., & Golshan, M. The effects of climate change on runoff using IHECRAS hydrologic model in some of watersheds, Ardabil province. Irrigation & Water Engineering. 178-189. [in Persian]

3- Ahmadi, M., Motamed Vaziri, B., Ahmadi, H., Moeeni, A., & Zahtabian, G. (2018). Assessment of climate change effect on extreme flow of KAN watershed. Water and Soil Resources Conservation. 101-119 (in Persian)

4- Azizi G, S. T. (2015). Evaluating and comparing of projected rainfall data for using in Iran. Natural Geographic Research, 48 (33-49).

5- Chen C, K. A. (2019). Hydrological responses to climate change using downscaled GCM data on a watershed scale. Journal of Water and Climate Change, 10(1), 63-77.

6- Chen FW, L. C. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. Paddy Water Environ, 209-222.

7- Crook, B. A. (2005). IHECRAS User Guide. Technical Report. Canberra: School of Resources, Environment and Society, the Australian National University.

8- Flower H.J., a. R. (2007). Beyond the downscaling comparison study. International Journal of Climatology, 27, 1543-1545.

9- Fowler HJ, B. S. (2007). linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. Int J Climatology, 27:1547-1578.

10- Hasani, M., Niksokhan, M., Ardestani, M., & Mousavi Janbesarayi, S., (2022). Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (case study: district 10 of Tehran municipality). Water & Soil Management & Modeling. [in Persian]

11- Heydari Tashe Kaboud, Sh., Ardestani, M., & Mousavi Janbe Sarayi, S. (2019). Prospect of precipitation changes in the Northwest of Iran using

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

atmospheric general circulation models under climate scenarios. Journal of Geography & Environmental Hazard. No.29. 133-151. [in Persian]

12- Hong J, J. K. (2021). Future Projections and Uncertainty Assessment of Precipitation Extremes in Iran from the CMIP6 Ensemble. Atmosphere.

13- Hood, M. (2011). Increased flooding driven by climate change. African Network of Environmental Journal (ANEJ).

14- Iranshahi, M., Ebrahimi, B., Yousefi, H., & Moridi, A. (2022). Investigating the effects of climate change on temperature and precipitation using neural network and CMIP6 (case study: Aleshtar and Khorramamd Stations). Journal of Water and Irrigation Management, (4)12, 821-845. [in Persian]

15- IPCC. (2014). Synthesis Report. Contribution of working groups I. II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 151(10,1017).

16- Jakeman, A. J., & Hornberger, G. M. (1993). How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall–Runoff Model? Water Resources Research, 29(8), 2637–2649. https://doi.org/10.1029/93WR00877

17- Kazemi, R., & Khazaei, M. R. (2022). Prediction of future climate change in Tehran and Yazd under RCPs scenarios and using LARS-WG model. Journal of Environmental Science and Technology, 24(6).

18- Li J, M. C. (2021). Evaluation of CMIP6 global climate models for simulating land surface energy and water fluxes during 1979-2014. Advances in modeling earth Systems, 13(6):1-32.

19- Ma Z, S. P. (2022). the characteristics and evaluation of future droughts across china through the CMIP6 multi-model ensemble. Remote Sensing, 14(5):1-23.

20- Madakumbura, G. K. (2019). Event-to-event intensification of the hydrologic cycle from 1.5 C to a 2 C warmer world. Scientific Reports, 9,1-7.

21- McGuire, A. D., Sitch, S., Clein, J. S., Dargaville, R., Esser, G., Foley, J., ... and Wittenberg, U. (2001). Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO2, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. Global biogeochemical cycles, 15(1), 183-206.

22- Mirshkaran, Y., Kakapour, V., & Zarei, A. (2022). Evaluation of the impact of climate change on precipitation and temperature using AR4 models: Case study of Qarasoo watershed, Kermanshah. Climate Change Research Journal, 2(8), 23–34. [in Persian]

23- Motiee, H., Shirkhodaei, F., Motiee, A., (2020). Impact of Climate Change on Kharkheh Basin and Reservoir Dam Inflow with Using CMIP5-RCP Scenarios. Journal of Dam and Hydroelectric Power Plant. No 25.31-59. [in Persian]

24- Niroumandfar, F., Zaherinia M., Yazarloo B., (2017). Investigating the effect of climate change on river flow using HBV-light rainfall-runoff model; case study MohamadAbad watershed, Golestan. 28(7):152-163. [in Persian]

25- O'Neil B C, K. E.-B. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change, 42:169-180.

26- Padron, R. G. (2020). Observed change in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. Nature, 13,477-481.

27- Pedersen, J. V. (2022). IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990-2022. Global Environmental Change.

28- Razzaghian, H., Shahedi K., Habibnejad Roshan, M., (2015). Evaluation of the climate change effect on Babol-rood watershed runoff using IHECRAS model. (26)7: 159-172. [in Persian]

29- Rogeli J, P. A. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.4 C. Nature Climate Change, 8(4) 325-332.

30- Sarabi, M., Dastorani, T. M., & Zarrin, A. (2020). Investigating impact of future climate change on temperature and precipitation: Case study of Dam Torogh watershed, Mashhad. Journal of Meteorology and Atmospheric Science, 3(1). [in Persian].

31- Satoh Y, Y. K. (2022). The Timing og Unprecedented Hydrological Drought under Climate Change. Nature Communications.

32- Semenov M.A, B. E. (2002). LARS-WG A stochastic weather generator for use in climate impact studies. UK: User Man Herts'

33- Semenov MA, B. E. (1997). Use of a stochastic weather generation in the development of climate change scenarios. Climate Change, 35(4):397-414.

34- Semenov MA, B. R. (1998). Comparison of the WGEN and Lars-WG stochastic weather generators for diverse climates. Clim Res, 10:95-107.

35- Sherafati A, P. E. (2020). A strategy to assess the uncertainty of a climate change impact on extreme hydrological events in the semi-arid Dehbar catchment in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 139(1), 389-402.

36- Silakhori, E. D. (2022). to assess the impacts of climate change on runoff in Golestan Province, Iran. Natural Hazard, 1-20.

37- Sunyer M A, H. Y. (2015). Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of extreme precipitation in Europe. Hydrology and Earth System Sciences, 19(4):1827-1847.

38- Taylor, K. (2001). summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, Journal of. Atmosphere, 106 (7): 7183-7192.

39- Trambadia N K, A. N. (2015). IHECRAS Rainfall-Runoff Model: A Review Paper. International Journal fo Scientific Research & Development (IJSRD), (3) 56-59.

40- Wilby RL, D. C. (2002). SDSM- a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environ Model Soft, 17:147-159.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

41- Xue, J., & Gui, D. (2015). Linear and nonlinear characteristics of the runoff response to regional climate factors in the Qira River basin, Xinjiang, Northwest China. PeerJ-Life & Environment.

42- Zamani Y, H. M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation. Theoretical and Applied Climatology.

43- Zareian, M. J., Seraj Ebrahimi, R., & Dehban, H. (2024). Investigating the impact of climate change on extreme temperature and precipitation in the Sefidrood Basin based on CMIP6 models. Journal of Water and Soil Science, 28(3), Isfahan University of Technology.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دوازدهم/ شماره سی و هشتم / پاییز ۱۴۰۴
Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
12th Year/ No. 38/ December 2025

Evaluating the Effect of Climate Change on Surface Runoff with the Approach of CMIP6 (Case Study: Inflow of Shirindare Dam in North Khorasan Province)

Shahrzad Firouzi[1]
Saeed Jamali*[2]

Abstract

Climate change significantly impacts river flows that supply water storage in dam reservoirs, posing challenges to water resources management. In this research, the effect of climate change on the runoff flow of the upstream basin for Shirin Dareh Dam in North Khorasan province has been evaluated with the approach of the latest scenarios of the IPCC. For this purpose, two CMIP6 models of IPSL and GFDL were selected with scenarios SSP370 and SSP585. Comparing the 2025-2050 projections with the 1985-2014 baseline, determined that the average annual temperature is expected to rise by 0.8 (c^0) in the SSP370 scenario and 1.6 to 3.5 (c^0) in the SSP585 scenario. Concurrently, average annual precipitation will decline by 40 mm and 54 mm in SSP370 and SSP585, respectively. Runoff flow simulated by the IHECRAS model is predicted to decrease by 0.16 and 0.23 (m^3⁄s) in the SSP370 scenario based on IPSL and GFDL data. The SSP585 scenario shows a more severe reduction, with a maximum decline of 0.79 (m^3⁄s), equating to a 36/7% decrease in current total average flow. If this scenario happens, the sustainable water supply for stakeholders will face serious challenges, that requires a review in the management of consumption and allocation.

Keywords
Climate Change, Sustainable Water Supply, CMIP6, IHECRAS Model

[1] Ph.D. Student in Civil Engineering.
[2]* Assistant Professor. sae.jamali@iauctb.ac.ir.

Received: 2023/08/20 Accepted: 2024/11/17

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]