

## بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ براساس گزارشات چهارم و پنجم IPCC

افشین منصوری، بابک امین‌نژاد\* و حسن احمدی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۲۲)

### چکیده

در مقاله حاضر، تغییرات جریان ورودی به سد کارون ۴ تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از خروجی‌های مدل HadCM3 تحت سناریوهای B1 (خوش‌بینانه) و A2 (بدبینانه) برای گزارش چهارم و خروجی‌های مدل ترکیبی (ensemble)، تحت سناریوهای RCP 2/6 (خوش‌بینانه) و RCP 8/5 (بدبینانه) برای گزارش پنجم استفاده شد، همچنین به منظور برآورد رواناب در دوره آتی، شبکه عصبی مصنوعی به عنوان مدل بارش-رواناب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که متوسط بارش سالانه در پنج ایستگاه مورد بررسی تحت سناریوهای B1 و RCP 2/6 به ترتیب ۱۵ و ۵ درصد افزایش و تحت سناریوهای A2 و RCP 8/5، به ترتیب ۸ و ۶ درصد کاهش را نشان می‌دهد، همچنین متوسط دمای سالانه در تمام سناریوها، افزایش را نشان می‌دهد که مقدار این افزایش حداقل ۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد تحت سناریو B1 و حداکثر ۱/۸۹ درجه سانتی‌گراد تحت سناریو RCP 8/5 بوده است. بررسی رواناب ورودی به سد کارون ۴ نشان داد، تحت دو سناریو B1 و RCP 2/6 به ترتیب جریان سالانه ورودی ۱/۸ و ۱/۵ درصد افزایش خواهد یافت و تحت دو سناریو A2 و RCP 8/5، جریان سالانه ورودی ۱۰/۴ و ۹/۸ کاهش را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل HadCM3، مدل ensemble، سناریوهای خوش‌بینانه، سناریوهای بدبینانه

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Aminnejad@riau.ac.ir

## مقدمه

در بالادست رودخانه زرد در چین براساس دو سناریو A2 و B2 بین سال‌های ۲۱۰۰-۱۹۶۱ بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی رواناب تحت سناریوی تغییر اقلیم نشان داد که مقدار رواناب تا قبل از سال ۲۰۲۰ تغییر کمی داشته و پس از آن حدود پنج درصد در سال کاهش خواهد یافت. الیاس و همکاران (۱۲) به بررسی اثر تغییر اقلیم در پنج زیر حوضه از حوضه ریوگراندا (Rio Grande) در ایالات متحده آمریکا پرداختند. ایشان در تحقیق خود از خروجی مدل (Bias Correction Constructed Analogues) BCCA-CMIP3 تحت سناریو A2 و BCCA-CMIP5 تحت سناریو RCP 8.5 استفاده کردند. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، دما بین ۳ تا ۶/۲ درجه در بین سال‌های ۲۰۹۰ تا ۲۰۹۹ نسبت به ۱۹۰۰ تا ۱۹۹۹ افزایش خواهد یافت و بارش در دوره آینده حداکثر ۱۸ میلی‌متر کاهش و حداکثر ۲۶ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. همچنین شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های مورد مطالعه، به‌کمک مدل SRM (Snowmelt Runoff Model) انجام گرفت که نتایج کاهش ۲۱ درصدی تا افزایش چهار درصدی رواناب را در حوضه‌های مورد مطالعه نشان داد. سو و همکاران (۱۹) اثر تغییر اقلیم را براساس سه سناریو انتشار RCP2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 بر روی شش حوضه در فلات تبت براساس خروجی‌های ۲۰ مدل گردش عمومی جو بررسی کردند. ایشان برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از مدل VIC (Variable Infiltration Capacity) استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد، که بارش بین ۵ تا ۱۰ درصد در آینده نزدیک (۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰) و بین ۱۰ تا ۲۰ درصد در آینده دور (۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰) در منطقه افزایش خواهد داشت، همچنین نتایج افزایش ۲ تا ۴ درصدی دما در حوضه‌های شمالی و ۱/۲ تا ۲/۸ درصدی در مناطق جنوبی را نشان داد. نتایج شبیه‌سازی رواناب در دروه آتی، افزایش ۲/۷ تا ۲۲/۴ درصدی در حجم رواناب سالانه در منطقه را نشان می‌دهد.

اشنوبس و کنون (۱۸) به مطالعه تغییرات رواناب در دوره‌های آتی در حوضه بریتیش کلمبیا در کانادا، براساس

صنعتی شدن جوامع و افزایش گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های گذشته، باعث افزایش دمای کره زمین و تغییر در دیگر پارامترهای اقلیمی شده است که در متون علمی به‌نام تغییر اقلیم شناخته می‌شود (۴)، لذا تغییر اقلیم یعنی هر تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب‌وهوایی که در طولانی‌مدت در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی، رخ بدهد. افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی و در نتیجه تشدید تغییرات پارامترهای اقلیمی، می‌تواند تأثیرات منفی زیادی را بر سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب، محیط زیست، صنعت، بهداشت، کشاورزی و کلیه سامانه‌هایی که در کنش با سامانه اقلیم هستند، بگذارد (۷). تبعات منفی تغییر اقلیم برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ۱۰ عامل تهدیدآمیز بشر در قرن بیست و یکم، پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به‌خود اختصاص داده است (۱۱). هیئت بین‌دول تغییر اقلیم (Panel on Climate Change (IPCC) Intergovernmental) در زمینه بررسی جامع مسئله تغییر اقلیم، تاکنون پنج گزارش منتشر کرده است که این گزارش‌ها مبنای مطالعات تغییر اقلیم را تشکیل می‌دهند. لازم به‌ذکر است که در حال حاضر تنها از گزارش چهارم و پنجم در مطالعات استفاده می‌شود. در مدل‌های ارزیابی چهارم از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (Special Report on Emission Scenarios (SRES)) استفاده شده است و در گزارش پنجم این سناریوها جای خود را به سناریوهای جدید که براساس واداشت تابشی (Forcing Radiative) بنا شده‌اند، داده‌اند. در گزارش چهارم، سناریوی اصلی B1، B2، A1 و A2 به‌ترتیب نماینده خوش‌بینانه‌ترین تا بدبینانه‌ترین حالت انتشار گازهای گلخانه‌ای بودند که در گزارش پنجم با سناریوهای (Representative Concentration Pathway) RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6.0، و RCP 8.5 جایگزین شدند (۶).

مطالعات گسترده‌ای در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است. از جمله مطالعات خارجی در زمینه تغییر اقلیم می‌توان به مطالعه لی و همکاران (۱۵) اشاره کرد. ایشان اثرات تغییر اقلیم را بر روی رواناب

۱۴۳۵ و ۱۴۷۰ مقدار حداکثر دبی جریان به ترتیب به میزان ۱۴، ۲۷ و ۴۳ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. با توجه به اینکه ایران در دهه‌های اخیر با روند افزایشی در جمعیت، نیاز به تولید مواد غذایی بیشتر و خشکسالی مواجه بوده است، به شدت با کمبود آب مواجه شده است. از طرف دیگر در سال‌های اخیر افزایش دمای سطح زمین در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای و به دنبال آن امکان تغییر در اقلیم جهان، سبب شده است که دغدغه‌های جدی در مورد تغییر میزان آب تجدیدپذیر و رژیم هیدرولوژی در هر منطقه به وجود آید. مطالعات نشان داده است که اثر پدیده تغییر اقلیم در مناطق مختلف جهان متفاوت است، اما براساس مطالعات تبری و طلایی (۲۰ و ۲۱) براساس داده‌های مشاهداتی گذشته تاکنون، در بیشتر مناطق ایران روند افزایشی در دما و کاهش در بارش مشاهده شده است. با توجه به شرایط بحرانی آب در کشور و نتایج تحقیقات ارائه شده، ضرورت ارزیابی شرایط آبی منابع آب در دسترس، به شدت احساس می‌شود. اما تحقیقات در این زمینه نیاز به بررسی دقیق و توجه به عدم قطعیت‌های موجود دارد. همان‌طور که نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است، عدم قطعیت ناشی از سناریوهای مختلف تغییر اقلیم می‌تواند از مهم‌ترین منابع این عدم قطعیت‌ها باشد. از این‌رو در تحقیق حاضر، جریان ورودی به سد کارون ۴ تحت دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه برای گزارش چهارم و پنجم IPCC در دوره آبی ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین در مجموع دو سناریو B1 و A2 برای گزارش چهارم و دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 برای گزارش پنجم مورد استفاده قرار گرفت و جریان ورودی به مخزن کارون ۴ تحت این چهار سناریو ارزیابی شد. در ادامه مراحل کار تشریح شده است.

## مواد و روش‌ها

### مطالعه موردی

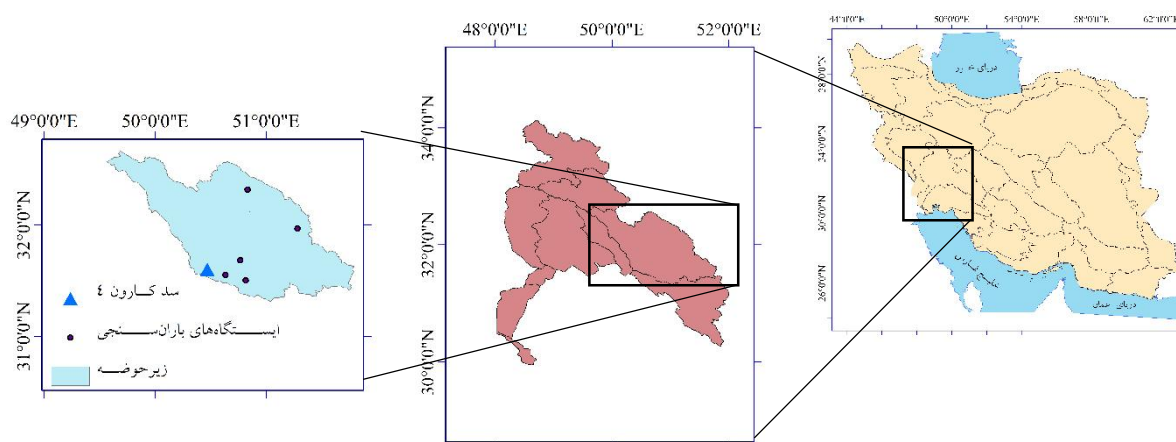
رودخانه کارون پرآب‌ترین رودخانه کشور است که از سلسله

گزارش چهارم و پنجم IPCC پرداختند. ایشان از ۲۲ مدل AOGCM (Atmosphere-Ocean General Circulation Model) در گزارش چهارم تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 و ۲۷ مدل AOGCM در گزارش پنجم تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 استفاده کردند. مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده در این تحقیق مدل VIC بود. نتایج نشان داد که پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه تحت گزارش چهارم و پنجم مشابه است و تنها در انتهای قرن حاضر کاهش بیشتری در رواناب تولیدی براساس سناریو بدبینانه گزارش پنجم (RCP 8.5) نسبت به سناریو بدبینانه در گزارش چهارم (A2) مشاهده می‌شود. ژانگ و همکاران به ارزیابی تغییرات رواناب تحت تأثیر افزایش دما در مقیاس جهانی براساس گزارش چهارم و پنجم IPCC پرداختند (۲۵). ایشان برای گزارش چهارم از نتایج تحقیق تانگ و لاتن‌مایر (۲۲) استفاده کردند و برای گزارش پنجم از خروجی ۳۴ مدل AOGCM تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6.5 و RCP 8.5 بهره گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که براساس نتایج گزارش پنجم، رواناب ۲/۹ درصد به‌ازای هر واحد افزایش دما، افزایش خواهد یافت که این مقدار براساس گزارش چهارم برابر ۱/۹ درصد بوده است.

در مورد مطالعات داخلی نیز می‌توان به مطالعه یعقوب‌زاده و همکاران (۸) اشاره کرد. ایشان به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی دشت نیشابور تحت سه سناریو A2، B1 و A1B براساس مدل‌های HadCM3، ECHAM5OM و CGCM3T47 پرداختند. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق مرجع روزانه در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ تحت سناریو A2 بیشترین اختلاف را با دوره پایه ۲۰۱۱-۱۹۹۲ دارد. ثانی‌خانی و همکاران (۱) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قره‌چای در استان مرکزی براساس خروجی‌های مدل HadCM3 تحت سه سناریو A1B، A2 و B1 پرداختند. ایشان از مدل استنتاج فازی عصبی برای مدل‌سازی رواناب استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که در افق‌های آبی شامل ۱۴۰۰،

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول (درجه)	عرض (درجه)	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)	سال آماری موجود	تعداد ماه‌های بازسازی شده	سال‌های بازسازی شده
ارمند	باران‌سنجی	۵۰/۷۷	۳۱/۶۸	۶۱۴/۴۲	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۰	-
بروجن	باران‌سنجی	۵۱/۲۸	۳۱/۹۷	۲۲۲/۱۷	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۵	۱۹۷۱-۱۹۹۵-۱۹۹۶
لردگان	باران‌سنجی	۵۰/۸۲	۳۱/۵۰	۵۸۳/۴۶	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۱۳	۱۹۸۰-۱۹۸۱
منج شهرکرد	تبخی سنجی	۵۰/۶۳	۳۱/۵۵	۵۶۰/۹۱	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۱۳	۱۹۹۱-۱۹۹۰
شهرکرد	همدیدی	۵۰/۸۵	۳۲/۲۸	۳۲۹/۶۹	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۱	۱۹۷۷



شکل ۱. موقعیت سد کارون چهار و ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده در پژوهش حاضر

دما یک ایستگاه همدیدی انجام شد. لازم به ذکر است اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی از مقیاس روزانه به معادل ماهانه میلادی تبدیل شدند، همچنین در مواردی که نیاز به بازسازی اطلاعات بود، از طریق برقراری رگرسیون بین ایستگاه دارای نقص اطلاعات با ایستگاه ارمند در دوره آماری مشترک و استفاده از رابطه حاصل برای ماه‌های دارای نقص اطلاعات، اطلاعات بازسازی شد. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده و سد کارون ۴ را نشان می‌دهد.

#### سناریوهای غیر اقلیمی

فعالیت‌های اقتصادی جوامع و متعاقب آن رشد صنایع و

کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد. این رود منبع اصلی برای آبیاری دشت خوزستان به‌شمار می‌رود. در دهه‌های اخیر پتانسیل برقابی این رودخانه نیز مورد توجه قرار گرفته است و پروژه‌ها زیادی به‌منظور استفاده از این پتانسیل روی رودخانه کارون اجرا شده است. یکی از این پروژه‌ها، سری سد‌های کارون است که سد کارون ۴، بالاترین سد در این مجموعه است (۲). به‌همین علت رواناب ورودی به این سد را می‌تواند، رواناب طبیعی در نظر گرفت که اثر انسانی در آن مشاهده نمی‌شود. از این‌رو در این تحقیق سد کارون ۴، به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی فرآیند بارش رواناب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و با توجه به اطلاعات بارش چهار ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه همدیدی و اطلاعات

مدل‌های جهانی گردش عمومی اقیانوس - اتمسفر (AOGCM) است (۲۴). سناریوهای غیر اقلیمی مبنای اجرای مدل‌های AOGCM هستند. در این مطالعه برای گزارش چهارم IPCC، از خروجی‌های مدل HadCM3 تحت دو سناریوی خوش‌بینانه (B1) و بدبینانه (A2) استفاده شد. این مدل که رایج‌ترین مدل مورد استفاده در گزارش چهارم در ایران است (۳)، خروجی‌های با تفکیک مکانی ۲/۵ در ۳/۷۵ درجه را تولید می‌کند. برای گزارش پنجم نیز دو سناریوی خوش‌بینانه (RCP 2.6) و بدبینانه (RCP 8.5) در نظر گرفته شد. برای بررسی خروجی‌های AOGCM ها، براساس گزارش پنجم، به‌جای استفاده از یک AOGCM، از میانگین خروجی‌های ۲۹ عدد AOGCM که به‌عنوان مدل ترکیبی (Ensemble) توسط درگاه اینترنتی <https://www.canada.ca/en.html> تهیه شده است، استفاده شد. قدرت تفکیک مکانی این مدل ترکیبی یک در یک درجه است. گرچه تفکیک مکانی مدل‌ها در گزارش پنجم، بهبود چشمگیری نسبت به گزارش چهارم داشته است، اما همچنان برای مدل‌سازی در مقیاس کوچک، نیاز به ریزمقیاس‌نمایی وجود دارد. در این مطالعه برای ریزمقیاس‌نمایی از روش دلتا (Delta) یا عامل تغییر استفاده شد. این روش در ادامه تشریح شده است. لازم به‌ذکر است، خروجی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، از درگاه اینترنتی <https://www.canada.ca/en.html> به‌صورت رایگان قابل دریافت است.

#### ریزمقیاس‌نمایی

در این مطالعه به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی از روش دلتا استفاده شد. در این روش فرض می‌شود مقدار تغییرات دما و بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه را می‌توان توسط خروجی‌های AOGCM محاسبه و بر روی داده‌های مشاهداتی ایستگاهی اعمال کرد. در این روش تغییرات دما و بارش در دوره آتی نسبت به حال، براساس خروجی‌های مدل‌های AOGCM تحت یک سناریو مشخص محاسبه می‌شود. برای این منظور،

کارخانه‌ها و تغییرات کاربری اراضی از عوامل اصلی افزایش گازهای گلخانه‌ای هستند. از این‌رو لازم است تا وضعیت اقتصادی اجتماعی کره زمین در دوره‌های آتی به نوعی در محاسبات وارد شود که این وضعیت با استفاده از سناریوهای غیر اقلیمی در نظر گرفته می‌شود. به‌طورکلی یک سناریوی غیر اقلیمی حاوی اطلاعاتی از وضعیت اقتصادی اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین است که به آن سناریوی انتشار نیز گفته می‌شود. IPCC سری اولیه سناریوهای انتشار را در سال ۱۹۹۲ با نام IPCC Scenario (IS92a-IS92f) ارائه کرد. در این سناریوها، مقادیر گازهای گلخانه‌ای با نرخ ثابت تا سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۶، به‌منظور به‌روز کردن و جایگزینی سناریوهای IS92 مجموعه‌ای از سناریوهای انتشار به‌نام گزارش ویژه سناریوهای انتشار (SRES, Special Report of Emission Scenario) برای مطالعات تغییر اقلیم منتشر کرد. سناریوهای انتشار به‌منظور کشف توسعه آینده در محیط زیست جهانی و فراهم آوردن مرجعی ویژه برای انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در جو، بنا نهاده شده‌اند. SRES چهار عنوان A1، A2، B1 و B2 را برای توصیف رابطه میان انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در هوا و اثرات آنها بر روی نواحی مختلف جهان در طول قرن ۲۱ تعریف کرد. هرکدام از این عناوین که شرایط مختلفی را از قبیل اجتماعی، اقتصادی، تکنولوژی و محیط‌زیستی ارائه می‌دهند، در شاخه‌های متعدد توسعه یافته‌اند. در جدیدترین گزارش IPCC، سری جدید سناریوها، براساس واداشت تابشی، جایگزین سناریوهای گزارش چهارم شدند، این سناریوها، RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6.0، RCP 8.5 و RCP نام دارند. توضیحات مختصری در مورد سناریوهای مختلف غیر اقلیمی استفاده شده در گزارش چهارم و پنجم به‌صورت خلاصه در جدول (۲) ارائه شده است.

#### سناریوهای اقلیمی

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی،

جدول ۲. سناریوهای غیر اقلیمی اصلی مورد استفاده در گزارش چهارم و پنجم IPCC (۱۶ و ۲۳)

گزارش چهارم IPCC	توضیح
B1	خوش بینانه غلظت CO <sub>2</sub> تا در نیمه قرن جاری به اوج خود می‌رسد و در سال ۲۱۰۰ به ۵۳۸ ppm می‌رسد.
B2	میانہ متمایل به خوش بینانه غلظت CO <sub>2</sub> روند افزایشی داشته و در سال ۲۱۰۰ به ۶۱۵ ppm می‌رسد.
A1	میانہ متمایل به بدبینانه روند افزایشی در غلظت CO <sub>2</sub> مشابه A2 که در نیمه قرن به اوج رسیده و سپس با روند کاهشی همراه است و در ۲۱۰۰ به B2 نزدیک می‌شود.
A2	بدبینانه غلظت CO <sub>2</sub> روند افزایشی داشته و در سال ۲۱۰۰ به ۸۷۵ ppm می‌رسد.
گزارش پنجم IPCC	توضیح
RCP 2.6	خوش بینانه واداشت تابشی در اواسط قرن جاری به حدود ۳/۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد.
RCP 4.5	میانہ متمایل به خوش بینانه واداشت تابشی، قبل از سال ۲۱۰۰ کمتر از ۴/۵ وات بر مترمربع و بعد از آن در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.
RCP 6.0	میانہ متمایل به بدبینانه واداشت تابشی قبل سال ۲۱۰۰ کمتر از ۶ وات بر مترمربع و بعد از ۲۱۰۰ به ۶ وات بر مترمربع می‌رسد و ثابت می‌ماند.
RCP 8.5	بدبینانه واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد و بعد از سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد.

در رابطه فوق  $T_{obs}$  و  $P_{obs}$  بیانگر سری زمانی دما و بارش مشاهداتی در دوره پایه،  $T$  و  $P$  سری زمانی کوچک مقیاس شده حاصل از سناریوی اقلیمی دما و بارش در دوره آتی است. لازم به ذکر است دوره پایه در این مطالعه ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ و دوره آتی ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ در نظر گرفته شد.

#### برآورد رواناب دوره آتی

به منظور برآورد رواناب در دوره‌های آتی نیاز به یک مدل برای تبدیل متغیرهای هواشناسی بارش و دما به متغیر هیدرولوژیکی رواناب است. در این زمینه می‌توان از مدل‌های داده مبنای یا مدل‌های مفهومی مختلفی استفاده کرد که با توجه به اینکه مدل‌های مفهومی اطلاعات زیادی برای انجام یک فرایند نیاز دارند، استفاده از مدل‌های داده مبنای گزینه مناسب‌تری است (۱۰). مدل‌های داده مبنای مختلفی به منظور برآورد رواناب در دوره‌های آتی مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آنها می‌توان به مدل شبکه عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک و رگرسیون بردار پشتیبان اشاره کرد (۱۳ و ۱۷). با توجه به عملکرد مناسب

بر اساس خروجی‌های مدل AOGCM در دوره حاضر و دوره آتی، تغییرات دما و بارندگی (رابطه (۱) و رابطه (۲)) برای متوسط درازمدت هر ماه محاسبه می‌شود (۱۴):

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

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

در روابط فوق  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیانگر مقدار تغییر مربوط به دما و بارندگی برای میانگین دراز مدت برای هر ماه،  $\bar{T}_{GCM, fut, i}$  میانگین بلندمدت دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه،  $\bar{T}_{GCM, base, i}$  میانگین بلندمدت دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره پایه است. برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار است. در گام بعد با اعمال مقدار تغییرات به دست آمده بر روی داده‌های ایستگاهی (رابطه (۳) و رابطه (۴))، داده‌های بارش و دما ریزمقیاس شده برای دوره آتی حاصل می‌شود.

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

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

### معیارهای کارایی

بعد از شبیه‌سازی رواناب در دوره حاضر، به منظور ارزیابی مدل و تعیین بهترین مدل ممکن، کارایی مدل‌های توسط سه معیار ضریب نش ساتلکیف (Nash-Sutcliffe coefficient (NS)، ضریب همبستگی (Correlation Coefficient (CC) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Squared Error (RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفت. روابط این معیارها به صورت زیر است:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t - \bar{Q})^2} \quad [6]$$

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t - \bar{Q})(\hat{Q}_t - \bar{\hat{Q}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_t - \bar{Q})^2 \sum_{t=1}^T (\hat{Q}_t - \bar{\hat{Q}})^2}} \quad [7]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{T}} \quad [8]$$

در این روابط  $Q_t$  دبی مشاهداتی،  $\hat{Q}_t$  دبی شبیه‌سازی شده،  $\bar{Q}$  میانگین دبی مشاهداتی،  $\bar{\hat{Q}}$  میانگین دبی شبیه‌سازی شده و  $T$  تعداد ماه‌های مورد بررسی است.

### نتایج و بحث

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از تحقیق حاضر پرداخته شده است. نتایج در سه قسمت ارائه شده است، در قسمت اول تغییرات بارش و دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه بررسی شده است، در قسمت دوم نتایج کالیبراسیون مدل بارش رواناب ارائه شده است و در بخش سوم به بررسی تغییرات دبی ورودی به مخزن کارون ۴ در دوره آتی پرداخته شده است. در ادامه این نتایج به تفکیک ارائه شده‌اند.

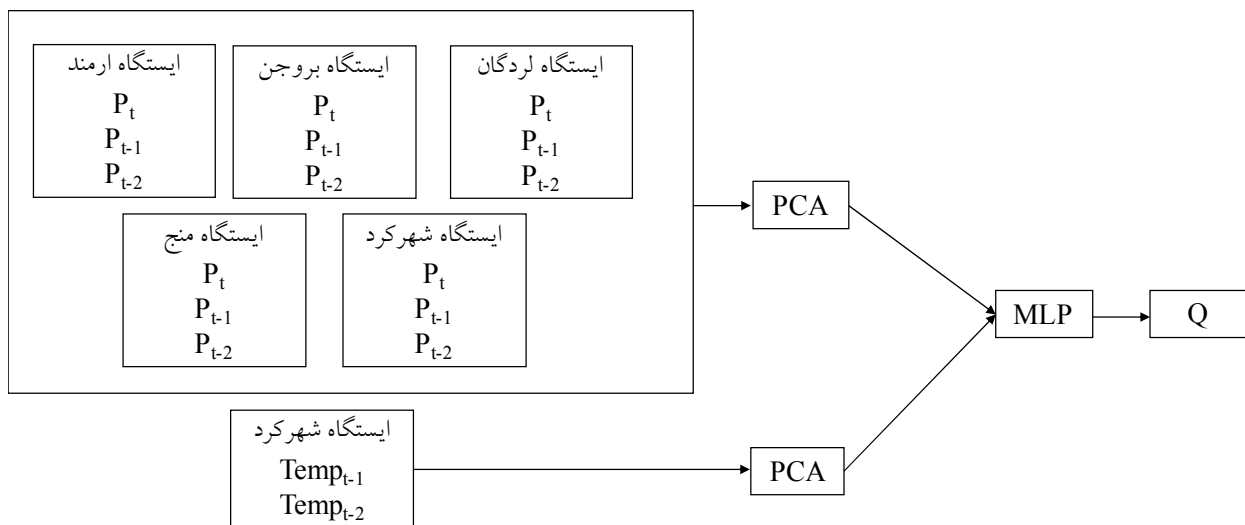
#### بررسی تغییرات بارش و دما

شکل (۳) میانگین بارش ماهانه مشاهداتی در دوره ۱۹۷۱ تا

مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)، در این تحقیق از مدل MLP برای مدل‌سازی بارش - رواناب استفاده شد. یکی از انواع شبکه‌های عصبی است که در این شبکه، وزن‌ها و بایاس‌ها می‌توانند برای تولید یک هدف مشخص آموزش داده شوند. MLP از آن جهت که عملکرد مناسبی از خود نشان داده است، بسیار شایان توجه است. این شبکه، مجموعه‌ای از نورون‌ها است که در لایه‌های مختلفی پشت سر هم قرار گرفته‌اند. نورون یک واحد ریاضی با یک دستگاه غیر خطی است. بنابراین یک شبکه عصبی MLP که از اجتماع این نورون‌ها تشکیل می‌شود، یک سامانه پیچیده و غیر خطی خواهد بود (۵). MLP از یادگیری نظارت شده که شامل ارائه ورودی‌ها و خروجی‌ها به شبکه و به حداقل رساندن خطای تخمین است، برای آموزش استفاده می‌کند. در این تحقیق برای آموزش MLP از الگوریتم آموزشی پس‌انتشار خطا (Back Propagation) استفاده شد، همچنین تابع انتقال زیگموئید برای لایه مخفی و تابع انتقال خطی برای لایه خروجی در نظر گرفته شده است. رابطه (۵) برای مدل‌سازی بارش رواناب از بین ساختارهای مختلف بررسی شده بهترین عملکرد را داشت، بنابراین از این رابطه در مدل‌سازی بارش رواناب استفاده شد.

$$Q_t = f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, Temp_{t-1}, Temp_{t-2}) \quad [5]$$

در این رابطه  $Q$  رواناب،  $P$  بارش،  $Temp$  دما و  $t$  شمارنده ماه شبیه‌سازی است. لازم به ذکر است برای بارش، از اطلاعات پنج ایستگاه و برای دما از اطلاعات یک ایستگاه که در بالا اشاره شد، استفاده شد. ۶۵ درصد اطلاعات به منظور آموزش مدل، ۱۰ درصد به منظور صحت‌سنجی و ۲۵ درصد نیز برای آزمایش مدل در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به اینکه تعداد ورودی‌های مدل برای بارش، ۱۵ ورودی و برای دما، ۲ ورودی بود، از روش تحلیل مؤلفه اصلی (Principal component analysis (PCA) به منظور کاهش ابعاد اطلاعات استفاده شد. براساس موارد گفته شده، شکل (۲) روند مدل‌سازی رواناب را نشان می‌دهد.

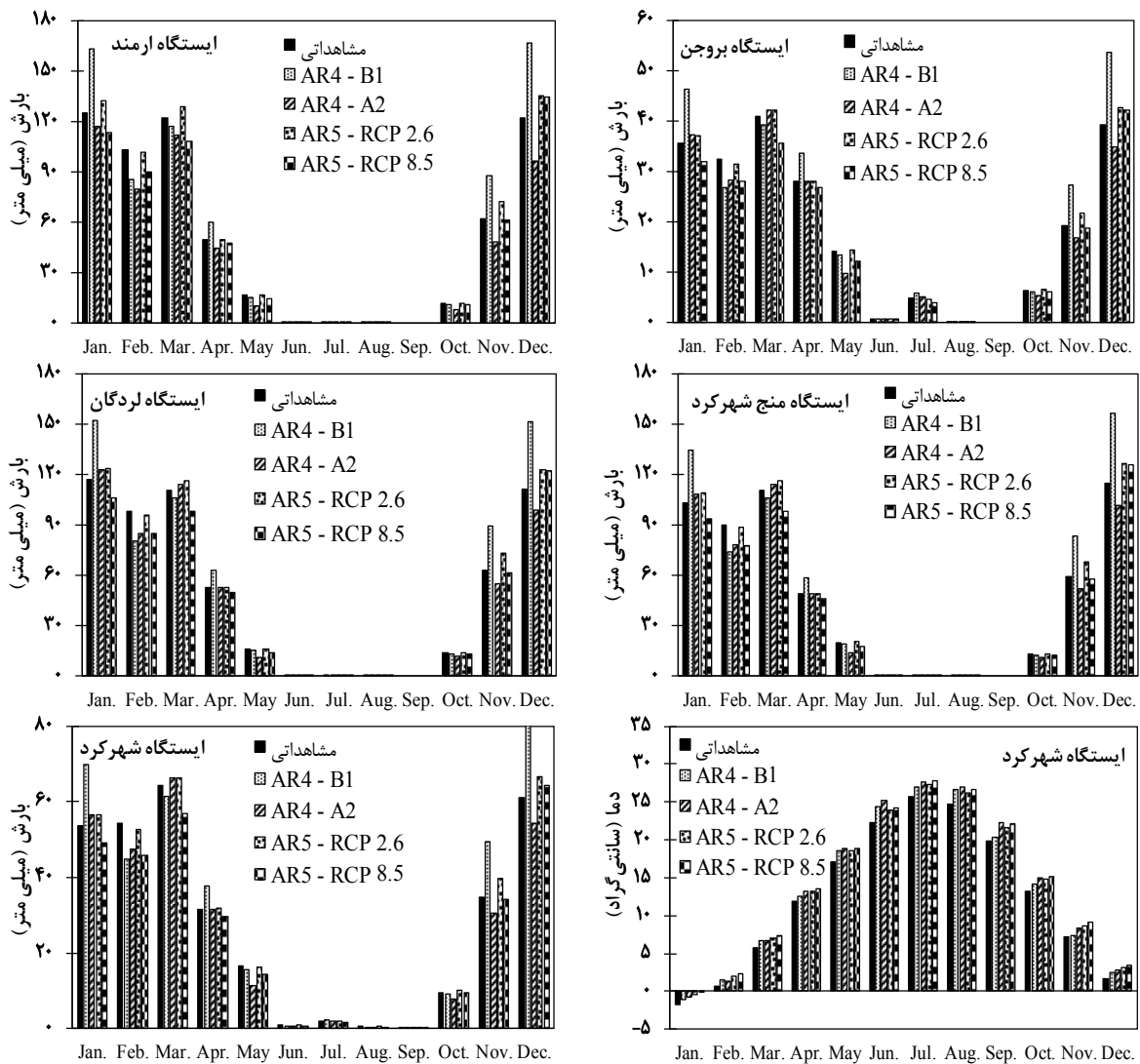


شکل ۲. روند مدل‌سازی بارش - رواناب در تحقیق حاضر

میلی‌متر در دوره آتی خواهد رسید. بارش سالانه در این دو ایستگاه تحت سناریوهای A2 و RCP 8.5 به ترتیب کاهش پنج و شش درصدی و شش و پنج درصدی را نشان می‌دهد. بیشترین کاهش در ایستگاه لردگان، حدود ۱۲ میلی‌متر کاهش (برای سناریو A2 در ماه دسامبر و برای سناریو RCP 8.5 در ماه مارچ) و بیشترین کاهش بارندگی سالانه در ایستگاه منج شهرکرد نیز حدود ۱۳ میلی‌متر برای هر دو سناریو بدبینانه (برای سناریو A2 در ماه دسامبر و برای سناریو RCP 8.5 در ماه مارچ) به دست آمده است. در ایستگاه شهرکرد نیز افزایش ۱۴ و ۴ درصدی بارش برای سناریوهای B1 و RCP 2.6 دیده می‌شود و تحت سناریوهای A2 و RCP 8.5 بارندگی کاهش ۲۰ و ۲۳ میلی‌متری (۶ و ۷ درصدی) را نشان می‌دهد. برای متغیر دما در ایستگاه شهرکرد، در تمام سناریوها افزایش مشاهده می‌شود. متوسط ماهانه دمای مشاهداتی ایستگاه شهرکرد در دوره پایه ۱۲/۳۵ درجه سانتی‌گراد بوده است که براساس سناریوهای A2، B1، RCP 2.6 و RCP 8.5 در دوره آتی به ترتیب به ۱۳/۴۱، ۱۳/۹۵، ۱۳/۸۲ و ۱۴/۲۳ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. بیشترین افزایش دما براساس سناریوهای گزارش چهارم در ماه ژانویه (برای سناریو B1، ۲/۱۲ و برای A2، ۲/۸۲ درجه افزایش) و براساس گزارش پنجم در ماه سپتامبر (برای

۲۰۰۰ را در کنار متوسط بارش ماهانه در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ تحت چهار سناریو مورد بررسی نشان می‌دهد. براساس شکل (۳)، در ایستگاه ارمنند متوسط بارندگی سالانه از ۶۱۴ میلی‌متر در دوره پایه، براساس سناریوهای A2، B1، RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب به ۷۰۷، ۵۸۲، ۶۴۹ و ۵۸۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. بر این اساس متوسط بارندگی سالانه تحت سناریوهای خوش‌بینانه B1 و RCP 2.6 به ترتیب افزایش ۱۵ و ۶ درصدی و تحت سناریوهای بدبینانه A2 و RCP 8.5 کاهش پنج درصدی را نشان می‌دهد. بیشترین افزایش مربوط به سناریو B1 با ۴۱ میلی‌متر افزایش و بیشترین کاهش مربوط به سناریو A2 با ۲۶ میلی‌متر کاهش بارندگی بوده است که هر دو در ماه دسامبر رخ داده است. در ایستگاه بروجن نیز برای سناریوهای خوش‌بینانه افزایش ۱۴ و ۳ درصدی (به ترتیب مربوط به B1 و RCP 2.6) و تحت سناریوهای بدبینانه کاهش ۶ و ۷ درصدی دیده می‌شود (به ترتیب مربوط به A2 و RCP 8.5). تغییرات بارندگی در ماه دسامبر و ژانویه در این ایستگاه شدیدتر از ماه‌های دیگر است. در ایستگاه لردگان و منج شهرکرد، درصد افزایش بارندگی تحت دو سناریو B1 و RCP 2.6 به ترتیب برابر ۱۵ و ۶ درصد بوده است، به نحوی که متوسط بارندگی لردگان از ۵۶۱ میلی‌متر در سال به ترتیب به مقدار ۶۴۶ و ۵۹۳





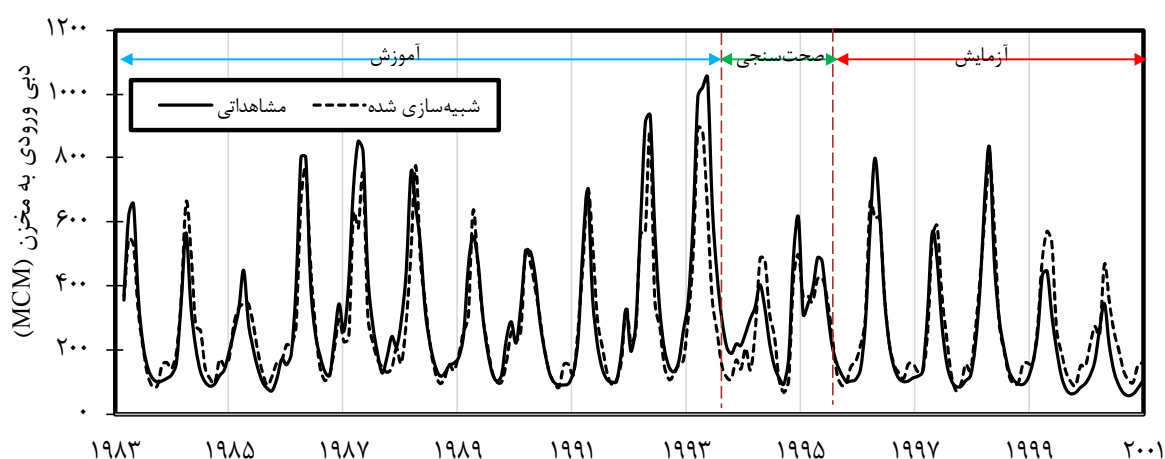
شکل ۳. مقایسه متوسط بارش ماهانه در دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱ و دروه آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در ایستگاه‌های مورد مطالعه

این منظور استفاده شد. برای مدل‌سازی از اطلاعات بارش با سه گام تأخیر و اطاعات دما با دو گام تأخیر برای ایستگاه‌های ذکر شده، استفاده شد. بنابراین تعداد ورودی‌های بارش ۱۵ ورودی و تعداد ورودی‌های دما از آنجا که تعداد ورودی‌های زیاد، فرآیند کالیبراسیون را دشوار می‌کند، از روش تحلیل مولفه اصلی (Principal component analysis (PCA)) به‌منظور کاهش ابعاد اطلاعات استفاده شد. سه مؤلفه اصلی اول که ۹۵ درصد واریانس اطلاعات بارش را توجیه می‌کردند به‌عنوان ورودی برای بارش و مؤلفه اصلی اول که ۹۲ درصد

RCP 2.6، ۱/۸۱ و برای RCP 8.5، ۲/۳۷ درجه افزایش) رخ خواهد داد. براساس نتایج این قسمت، برای متغیر بارش در سناریو خوش‌بینانه B1، افزایش بیشتری را نسبت به RCP 2.6 نشان می‌دهد، اما A2 و RCP 8.5 تقریباً نتایج یکسانی را گزارش کرده‌اند.

### نتایج کالیبراسیون مدل

به‌منظور برآورد رواناب در دوره‌های آتی نیاز به یک مدل بارش - رواناب است که در این تحقیق شبکه عصبی مصنوعی برای



شکل ۴. سری زمانی جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ورودی به مخزن کارون ۴

جدول ۳. مقدار معیارهای کارایی برای مرحله آموزش، صحت‌سنجی و آزمایش مدل بارش - رواناب

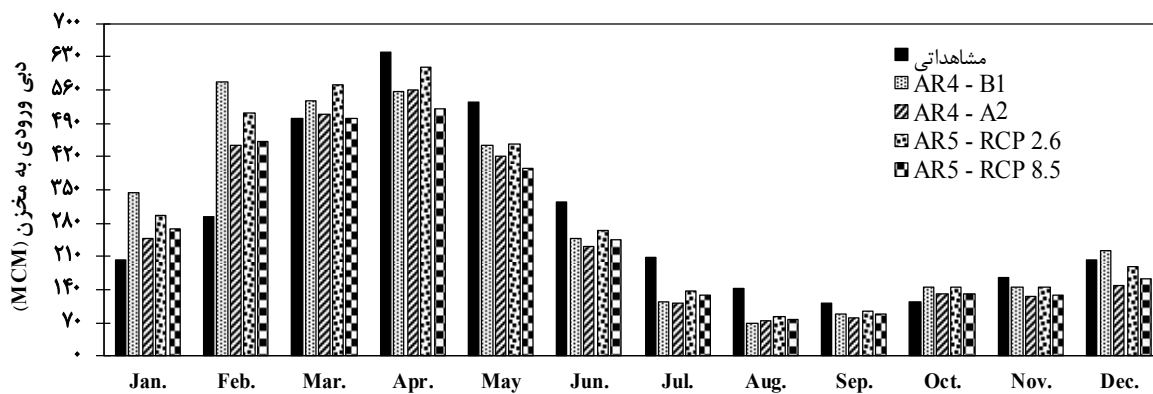
RMSE (MCM)	CC	NS	
۸۷/۷۸	۰/۹۲	۰/۸۳	آموزش
۶۶/۳۶	۰/۹۵	۰/۸۹	صحت‌سنجی
۶۷/۷۱	۰/۹۵	۰/۸۳	آزمایش

(۳) ارائه شده است. بعد از اطمینان از ایجاد مدل مناسب بارش و رواناب، مدل برای دوره آتی به منظور شبیه‌سازی رواناب به کار گرفته شد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی رواناب برای دوره آتی ارائه شده است.

#### بررسی تغییرات دبی در دوره آتی

در شکل (۵) متوسط دبی ورودی به مخزن سد کارون ۴ در دوره پایه، در مقابل متوسط دبی ورودی به این مخزن در دوره آتی ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ تحت چهار سناریو مورد مطالعه نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده تحت سناریو B1، دبی ورودی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارچ، اکتبر و دسامبر افزایش خواهد داشت و در ماه‌های دیگر با کاهش دبی مواجه خواهیم بود. بیشترین افزایش دبی در ماه فوریه مشاهده می‌شود که برابر ۲۸۴ میلیون مترمکعب است. تحت این سناریو متوسط جریان ورودی سالانه به مخزن سد کارون ۴ برابر ۳۴۹۳ میلیون مترمکعب به دست آمده است که نسبت به دوره پایه با متوسط

واریانس دما را توجیه می‌کرد، به عنوان ورودی دما به مدل وارد شد. ۶۵ درصد اطلاعات به منظور آموزش مدل، ۱۰ درصد به منظور صحت‌سنجی و ۲۵ درصد نیز برای آزمایش مدل در نظر گرفته شد. تعداد بهینه نورون‌های لایه مخفی با آزمون و خطا تعیین شد، به نحوی که با تعداد نورون‌های بین ۵ تا ۳۰ مدل، ۱۰ بار اجرا شد و میانگین عملکرد MLP در این ۱۰ اجرا به عنوان عملکرد MLP برای آن تعداد نورون در نظر گرفته شد. براساس این الگوریتم، تعداد ۱۷ نورون برای مدل MLP در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی جریان براساس مدل بهینه انجام شد. سری زمانی جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به دوره پایه در شکل (۴) نشان داده شده است. براساس این شکل، توافق مناسبی بین دبی شبیه‌سازی شده با دبی مشاهداتی دیده می‌شود. مقدار ضریب کارایی NS برای کل دوره برابر ۰/۸۴، مقدار CC برابر ۰/۹۲ و مقدار RMSE برای ۸۴/۷۳ میلیون مترمکعب بوده است. مقدار معیارهای ارزیابی برای هر سه بخش آموزش، صحت‌سنجی و آزمایش به تفکیک در جدول

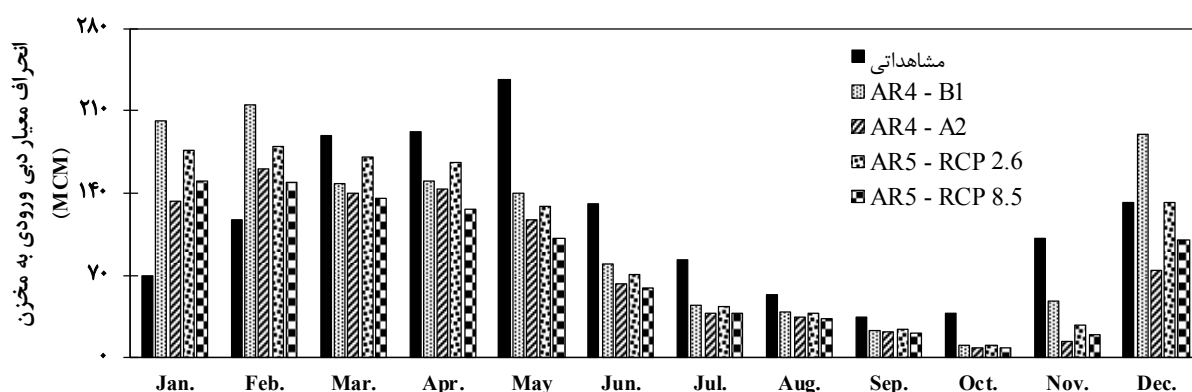


شکل ۵. دبی ماهانه ورودی به مخزن کارون ۴ در دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۸۳ در مقایسه با دوره آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۱

مترمکعب رسیده است.

شکل (۶) انحراف معیار دبی ورودی به مخزن کارون ۴ در دوره پایه و آتی را نشان می‌دهد. براساس این شکل در ماه‌هایی که در آنها افزایش دبی مشاهده شده بود، انحراف معیار جریان نیز، افزایش چشمگیری داشته است. برای مثال در ماه ژانویه انحراف معیار از ۷۰ میلیون مترمکعب در دوره پایه تحت سناریوهای A2، B1، RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب به مقدار ۲۰۱، ۱۳۳، ۱۷۶ و ۱۵۰ رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات دبی در دوره آتی در ماه‌های تر سال بیشتر خواهد بود و در واقع پدیده‌های حدی افزایش خواهند یافت. برعکس در ماه‌های خشک سال، انحراف معیار مربوط به دوره پایه، بیشتر از دوره آتی برآورد شده است. بیشترین مقدار افزایش کاهش انحراف معیار به ترتیب مربوط به ماه فوریه و می خواهد بود. افزایش یا کاهش انحراف معیار دبی تقریباً در تمام سناریوها، در تمام ماه‌ها به جز دسامبر الگوی افزایشی یا کاهش‌ی هم‌هنگام نشان می‌دهد. در ماه دسامبر انحراف معیار تحت سناریو B1 افزایش، تحت سناریو RCP 2.6 تقریباً ثابت و تحت دو سناریو دیگر کاهش یافته است. مطالعه دیگری بر روی جریان ورودی به مخزن کارون ۴ تحت سناریو A2 و مدل HadCM3 برای سه دوره آتی ۲۰۳۹-۲۰۲۵، ۲۰۶۹-۲۰۵۵ و ۲۰۹۹-۲۰۸۵ توسط احمدی و همکاران (۹) انجام شده است. نتایج آن تحقیق نیز روند افزایشی دما در دوره‌های آتی و روند کاهش دبی جریان ورودی به مخزن را تحت این سناریو

۳۴۳۲ میلیون مترمکعب، افزایش ۱/۷۶ درصدی را نشان می‌دهد. براساس سناریو A2 افزایش دبی در ماه‌های ژانویه و فوریه مشاهده می‌شود اما در ماه‌های دیگر سال دبی کاهش داشته است، در مجموع در این سناریو دبی سالانه با ۱۰/۴ درصد کاهش به مقدار ۳۰۷۵ میلیون مترمکعب در سال خواهد رسید. تحت سناریو A2 بیشترین افزایش دبی در ماه فوریه دیده می‌شود که حدوداً رشد ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد و بیشترین کاهش دبی با نرخ ۴۸ درصد، مربوط به ماه آگوست است. در سناریو خوش‌بینانه گزارش پنجم (RCP 2.6) تغییرات کمی در مجموع دبی ورودی به مخزن دیده می‌شود، به نحوی که دبی سالانه ورودی به مخزن با ۱/۵ درصد افزایش، به مقدار ۳۴۸۴ میلیون مترمکعب خواهد رسید. براساس این سناریو مانند سناریو قبل، در ماه‌های تر، افزایش دبی و در ماه‌های خشک، کاهش دبی مشاهده می‌شود. افزایش ۷۴ درصدی دبی در ماه فوریه و کاهش ۴۲ درصدی در ماه آگوست، بیشترین تغییرات دبی ماهانه براساس این سناریو است. تحت سناریو RCP 8.5 دبی ورودی به مخزن کاهش ۹/۷ درصدی را نشان می‌دهد. در این سناریو به جز در ماه‌های ژانویه، فوریه و اکتبر، دبی ورودی به مخزن کاهش داشته است. مشابه سناریوهای قبل، دبی در فوریه با ۵۴ درصد افزایش، بیشترین افزایش را نشان می‌دهد به نحوی که دبی ورودی به مخزن به ۴۵۲ میلیون مترمکعب رسیده است و بیشترین کاهش مربوط به ماه آگوست است که با کاهش ۴۶ درصدی جریان، دبی ورودی به مخزن به ۶۵ میلیون



شکل ۶. انحراف معیار دبی ورودی به مخزن کارون ۴ در دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۸۳ در مقایسه با دوره آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۱

بارش - رواناب از مدل شبکه عصبی MLP استفاده شد. نتایج نشان داد که به طور متوسط بارش در منطقه تحت سناریوهای مختلف بین ۱۵ درصد افزایش تا ۶ درصد کاهش خواهد داشت. اما در مورد دما تمام سناریوها نرخ افزایشی را نشان می دهند که کمترین مقدار افزایش دمای متوسط سالانه حداقل  $1/06$  درجه سانتی گراد تحت سناریوها B1 و حداکثر  $1/89$  درجه سانتی گراد تحت سناریو RCP 8.5 بوده است. نتایج بررسی رواناب ورودی به مخزن نشان داد که تحت دو سناریو B1 و RCP 2.6 به ترتیب جریان سالانه ورودی  $1/8$  و  $1/5$  درصد افزایش خواهد یافت و تحت دو سناریو A2 و RCP 8.5 جریان سالانه ورودی  $10/4$  و  $9/8$  کاهش می یابد، همچنین انحراف معیار دبی در ماه های تر در دوره آتی افزایش و در ماه های خشک کاهش خواهد یافت که نشان دهنده تغییرات رژیم هیدرولوژی رودخانه است. در مجموع تفاوت هایی بین نتایج سناریوهای خوش بینانه و بدبینانه گزارش چهارم و پنجم دیده شد اما روند تغییرات یکسان است. در این رابطه سناریو B1 افزایش بارش بیشتری و افزایش دما کمتری را نسبت به RCP 2.6 نشان می دهد و سناریو A2، کاهش بارش بیشتر و افزایش دما کمتری را نسبت به RCP 8.5 نشان داده است.

نشان می دهد که با نتایج حاصل از این تحقیق سازگاری دارد. در انتها باید این نکته بیان شود، که نتایج ارائه شده مربوطه به دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ است، بنابراین این امکان وجود دارد روند متفاوتی برای بازه های زمانی مختلف در دوره آتی و مناطق دیگر حاصل شود، بنابراین پیشنهاد می شود که دوره های مختلف دیگری به عنوان دوره آتی در نظر گرفته شود و همچنین این تحقیق روی مناطق دیگر نیز انجام شود.

### نتیجه گیری

هدف از این مقاله بررسی اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن سد کارون ۴ در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بود. بدین منظور خروجی های مدل HadCM3 برای دو سناریو B1 و A2 از گزارش چهارم و خروجی های مدل ensemble تحت دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 مربوط به گزارش پنجم IPCC مورد استفاده قرار گرفت. به منظور آشکارسازی پدیده تغییر اقلیم از اطلاعات بارش پنج ایستگاه و اطلاعات دما یک ایستگاه در دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ استفاده شد. بعد از دریافت خروجی های مدل های اقلیمی با استفاده از روش دلتا، ریزمقیاس نمایی صورت گرفت و اطلاعات دما و بارش برای دوره آتی در مقیاس ایستگاه ها محاسبه شد. در ادامه به منظور مدل سازی

## منابع مورد استفاده

۱. ثانی‌خانی، ه. م. ر. گوهردوست و م. صادقی. ۱۳۹۵. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبخیز قره چای در استان مرکزی. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز ۷(۱۳): ۱۲-۲۲.
۲. حسینی موغاری، س. م. م. مقدس و ش. عراقی‌نژاد. ۱۳۹۶. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در بهره‌برداری بهینه از آبگیرهای برقابی (مطالعه‌ی موردی: مخزن کارون ۴). مجله مهندسی منابع آب ۱۰: ۱۹-۳۲.
۳. صمدی، ز. ع. مساح‌بوانی و م. مهدوی. ۱۳۸۶. بررسی روش‌های کوچک مقیاس کردن رگرسیونی بر رژیم سیلاب رودخانه، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب. تهران، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ۹۸-۸۱.
۴. فاتحی، ا. ا. جباریان امیری و ن. محمدزاده. ۱۳۹۵. ریزمقیاس‌نمایی مدل گردش عمومی جو و کاربرد آن در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی استان گیلان. محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران ۶۹(۱): ۱۵۸-۱۴۳.
۵. کارآموز، م. و ش. عراقی‌نژاد. ۱۳۸۹. هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.
۶. کوهستانی، ش. س. س. اسلامیان و ع. ا. بسالت‌پور. ۱۳۹۶. تأثیر تغییر اقلیم بر درجه حرارت حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از محاسبات نرم یادگیری ماشینی بیزین. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی) ۲۱(۱): ۲۱۶-۲۰۳.
۷. مدرسی، ف. ش. عراقی‌نژاد، ک. ابراهیمی و م. خلقی. ۱۳۸۹. بررسی منطقه‌ای پدیده تغییر اقلیم با استفاده از آزمون‌های آماری مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگانرود- قره‌سو. نشریه آب و خاک ۲۴(۳): ۴۸۹-۴۷۶.
۸. یعقوب‌زاده، م. م. احمدی، س. برومندنسب و س. ا. حقایقی‌مقدم. ۱۳۹۵. اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر تعرق در طی دوره رشد گیاهان مزارع آبی و دیم با استفاده از مدل‌های AOGCM. نشریه پژوهش آب در کشاورزی ۳۰(۴): ۵۲۳-۵۱۱.
9. Ahmadi, M., O. B. Haddad and H. A. Loáiciga. 2015. Adaptive reservoir operation rules under climatic change. *Water Resources Management* 29(4): 1247-1266.
10. ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. 2000. Application of artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering* 5: 115-123.
11. Carter, T. R., M. Hulme and M. Lal. 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment IPCC Report 15-37, Chapter 3.
12. Elias, E., A. Rango, C. M. Steele, J. F. Mejia, R. Baca, D. James and P. Gronemeyer. 2016. Simulated impact of climate change on hydrology of multiple watersheds using traditional and recommended snowmelt runoff model methodology. *Journal of Water and Climate Change* 7(4): 665-682.
13. Isik, S., L. Kalin, J. E. Schoonover, P. Srivastava and B. G. Lockaby. 2013. Modeling effects of changing land use/cover on daily streamflow: an artificial neural network and curve number based hybrid approach. *Journal of Hydrology* 485: 103-112.
14. Jones, P. D. and M. Hulme. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16(4): 361-377.
15. Li, L., Z. C. Hao, J. H. Wang and Z. B. Yu. 2008. Impact of future climate change on runoff in the head region of the Yellow river. *Journal of Hydrologic Engineering* 13(5): 347-354.
16. Nakicenovic, N., J. Alcamo, A. Grubler, K. Riahi, R. A. Roehrl, H. H. Rogner and N. Victor. 2000. Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, England.
17. Sachindra, D. A., F. Huang, A. Barton and B. J. C. Perera. 2013. Least square support vector and multi-linear regression for statistically downscaling general circulation model outputs to catchment streamflows. *International Journal of Climatology* 33(5): 1087-1106.
18. Schnorbus, M. A. and A. J. Cannon. 2014. Statistical emulation of streamflow projections from a distributed hydrological model: Application to CMIP3 and CMIP5 climate projections for British Columbia, Canada. *Water Resources Research* 50(11): 8907-8926.
19. Su, F., L. Zhang, T. Ou, D. Chen, T. Yao, K. Tong and Y. Qi. 2016. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change* 136: 82-95.
20. Tabari, H. and P. H. Talaei. 2011a. Temporal variability of precipitation over Iran: 1966-2005. *Journal of*

*Hydrology* 396(3): 313-320.

21. Tabari, H. and P. H. Talaee. 2011b. Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change* 79(1): 1-10.
22. Tang, Q. and D. P. Lettenmaier. 2012. 21<sup>st</sup> century runoff sensitivities of major global river basins. *Geophysical Research Letters* 39(6): 1-5.
23. Van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard and T. Masui. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change* 109(1-2): 5.
24. Wilby, R. L. and I. Harris. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42(2): 1-10.
25. Zhang, X., Q. Tang, X. Zhang and D. P. Lettenmaier. 2014. Runoff sensitivity to global mean temperature change in the CMIP5 Models. *Geophys. Geophysical Research Letters* 41(15): 5492-5498.

## Investigating the Effect of Climate Change on Inflow Runoff into the Karun-4 Dam Based on IPCC's Fourth and Fifth Report

A. Mansouri, B. Aminnejad\* and H. Ahmadi<sup>1</sup>

(Received: September 9-2017; Accepted: November 13-2017)

### Abstract

In the present paper, fluctuations of inflow into the Karun-4 Dam under different scenarios of the climate change for the future period of 2021-2050 were investigated. For this purpose, the outputs of the HadCM3 model under the scenarios of B1 (optimistic) and A2 (pessimistic) were utilized for the fourth report; additionally, the outputs of the ensemble model under RCP 2.6 (optimistic) and RCP 8.5 (pessimistic) scenarios were used for the fifth report. Moreover, in order to estimate runoff in the future period, the artificial neural network was considered as a rainfall-runoff model. The results indicated that the average annual precipitation in the five study stations under B1 and RCP 2.6 scenarios was increased by 15 and 5%, respectively, while it showed a decrease equal to 8 and 6%, respectively under the scenarios A2 and RCP 8.5. Furthermore, the average annual temperature in all scenarios showed increase, which was at least 1.06 °C under the scenario B1 and 1.89 °C under scenario RCP 8.5. Examining the input inflow into the Karun-4 dam showed that under both B1 and RCP 2.6 scenarios, the annual inflow will be increased by 1.8 and 1.5%, respectively; under the two scenarios A2 and RCP of 8.5, the annual inflow will be decreased to 10.4 and 9.8%, respectively.

**Keywords:** HadCM3 model, Ensemble model, Optimistic scenarios, Pessimistic scenarios

---

1. Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: Aminnejad@riau.ac.ir