



## بررسی اثر تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقی سد کارون ۴

فهیمة امینی ناغانی<sup>۱</sup>، رسول میرعباسی نجف آبادی<sup>۲\*</sup>، رضا زمانی<sup>۳</sup>، محمدعلی نصر اصفهانی<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴

مقاله پژوهشی

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

### چکیده

بررسی تاثیرات بالقوه تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقی و بهره‌برداری از مخازن در سطح حوضه امری ضروری است. در پژوهش حاضر، اثر تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقی سد کارون ۴ مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور، پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، متغیرهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 از گزارش پنجم IPCC برای دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تولید شدند. سپس مقادیر دما و بارش برای دوره آتی با استفاده از روش دلتا ریزمقیاس شدند. سری‌های زمانی تولید شده بعنوان ورودی مدل بارش-رواناب IHACRES در نظر گرفته شد و میزان رواناب تحت سناریوهای مختلف بدست آمد. سپس اثر تغییرات رواناب تحت سناریوهای مورد مطالعه بر میزان انرژی برقی تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌بینی‌های اقلیمی بیانگر افزایش میانگین بلندمدت سالانه دما به میزان ۱/۷۲ و ۲/۰۴ درجه سانتیگراد و کاهش میانگین بارش سالانه به میزان ۰/۵٪ و ۱/۴٪ به ترتیب تحت دو سناریوی RCP 8.5 و RCP 4.5 در بازه زمانی ۲۰۲۹-۲۰۵۰ میلادی است. نتایج مدل‌سازی بارش-رواناب حاکی از کاهش میانگین سالانه جریان ورودی به مخزن سد به میزان ۲۱٪ و ۳۴٪ به ترتیب تحت دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 می‌باشد. برای بررسی اثر کاهش رواناب بر وضعیت مخزن و تولید انرژی برقی، مخزن سد کارون ۴ با نرم‌افزار WEAP شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که انرژی برقی استحصالی از سد در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) به میزان ۱۷٪ و ۳۱٪ به ترتیب تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 کاهش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: انرژی برقی، تغییر اقلیم، حوضه آبریز کارون ۴، WEAP، IHACRES

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. fhm.amini@gmail.com  
۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. تلفن: ۰۹۱۳۳۳۳۳۲۷۵. [mirabbasi\\_r@yahoo.com](mailto:mirabbasi_r@yahoo.com) (نویسنده مسئول)

۳ دکترای منابع آب، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، تلفن: ۰۹۱۲۹۵۸۲۶۷۷. [reza.zamani65@yahoo.com](mailto:reza.zamani65@yahoo.com)

۴ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. تلفن: ۰۹۱۲۶۰۴۸۳۷۸. [mnasr@sku.ac.ir](mailto:mnasr@sku.ac.ir)

## مقدمه

تولید انرژی برقایی در مخازن سدها کاملا وابسته به ارتفاع آب ذخیره شده در مخزن می باشد که آن هم به شرایط هیدرولوژیکی منطقه وابسته است و متاثر از تغییر اقلیم خواهد بود. تغییر اقلیم منجر به افزایش دما، کاهش بارش، جابجا شدن نقطه پیک رواناب ناشی از ذوب برف و در نتیجه کاهش در میزان رواناب می شود. بدیهی است که رواناب ورودی به مخزن سد تحت این شرایط متفاوت خواهد بود و متعاقب آن میزان انرژی برقایی استحصالی نیز تحت شرایط عادی بهره برداری مخزن، کاهش خواهد یافت. در این زمینه تاکنون مطالعات متعددی در سراسر دنیا صورت گرفته است. Harrison et al. (2002) حساسیت طرح هیدروالکتریک به تغییر اقلیم را در رودخانه زامبزی واقع در مرز کشورهای زیمبابوه و زامبیا را بررسی کردند. نتایج نشانگر کاهش قابل توجه جریان رودخانه و کاهش تولید برق بوده است. Madani et al. (2014) اثر تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقایی در مناطق مرتفع کالیفرنیا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تولید انرژی از ژانویه تا آوریل تحت سناریوی مرطوب افزایش یافته است و تحت سناریوی خشک هم از ژانویه تا مارس افزایش یافته، اما در بقیه ماهها کاهش یافته است. Zarghami et al. (2011) اثر تغییر اقلیم بر رواناب در استان آذربایجان شرقی را با استفاده از مدل HADCM3 و سه سناریوی انتشار، A1B، A2 و B1 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که دمای متوسط سالانه حدود ۲/۳ درجه سلسیوس افزایش می یابد و بارش سالانه حدود ۳ درصد کاهش می یابد. همچنین بیان کردند که آب و هوای این استان از نیمه خشک به خشک و رودخانهها از دائمی به فصلی تغییر خواهند کرد. Ahadi et al. (2016) 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  $\pm 6$  درجه سلسیوس و  $\pm 60$  درصد بوده است و با افزایش دما، میزان تبخیر افزایش و رواناب کاهش می یابد. Hamududu and Killingtveit (2016) تولید انرژی برقایی را تحت سناریوهای اقلیمی در دوره آتی برای رودخانه زامبزی در

جنوب آفریقا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش در منابع آب منجر به کاهش تولید برقایی به میزان ۹ درصد در ۲۰۲۰، ۱۸ درصد در ۲۰۵۰ و ۲۸ درصد در ۲۰۸۰ تحت سناریوی انتشار A1B خواهد شد. Pilesjo et al. (2016) مدل سازی اثر تغییر اقلیم بر انرژی برقایی را در سد داکان عراق مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۵۰ تحت سناریوی انتشار A1B انرژی برقایی کاهشی ۵ تا ۱۰ درصدی خواهد داشت و تولید برق در نیروگاه داکان ۲۰ تا ۴۰ مگاوات کاهش می یابد. Gelete et al. (2019) 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 بارش و رواناب کاهش خواهند یافت. Rončák et al. (2019) 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 دهه های آینده بر اساس خروجی های مدل های تغییر اقلیم منطقه ای و سناریوی انتشار A1B پیش بینی کردند. سپس بر اساس مقادیر مذکور میزان رواناب را با مدل توزیعی WetSpa در مقیاس روزانه تا سال ۲۱۰۰ شبیه سازی کردند. نتایج حاکی از افزایش میزان رواناب در ماههای زمستان و کاهش رواناب در ماههای پاییز و تابستان در آینده بود. Fan et al. (2020) اثر تغییر اقلیم بر تولید برقایی را در چین بررسی کردند. نتایج نشان داد که انرژی برقایی نسبت به تغییرات آب و هوایی بسیار حساس و آسیب پذیر می باشد، به طوریکه تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP4.5 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. جدیری نقاشکار و همکاران (۱۳۹۲) تاثیر تغییر اقلیم بر تولید برقایی سد سفیدرود را در بازه های زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ میلادی تحت سناریوی انتشار A2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشانگر کاهش انرژی برقایی استحصالی از سد در بازه های مطالعاتی ذکر شده به ترتیب به میزان ۱۱٪، ۱۵٪ و ۲۱٪ بود. جمالی (۱۳۹۳) آسیب



4.5 و RCP 8.5 گزارش پنجم IPCC در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

سد کارون ۴ در استان چهارمحال و بختیاری و ۱۸۰ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد قرار دارد که بر روی رودخانه کارون و در فاصله ۶۷۰ کیلومتری ریزشگاه رودخانه کارون به خلیج فارس احداث شده است. این سد بزرگترین سد بتنی دوقوسی ایران و پنجمین سد مرتفع در جهان است که توانایی تولید انرژی برقایی به میزان ۲۱۰۷ گیگاوات ساعت در سال را دارد. حوضه آبریز مذکور تقریباً کوهستانی بوده، ارتفاع متوسط آن ۲۳۵۴ متر و ارتفاع بلندترین نقطه آن ۴۲۰۰ متر می‌باشد. مساحت حوضه آبریز رودخانه کارون در محدوده سد کارون ۴، حدود ۱۲۸۱۳/۴ کیلومترمربع بوده و ارتفاع متوسط بارندگی سالانه حوضه حدود ۶۸۰ میلیمتر برآورد می‌گردد. همچنین متوسط تبخیر از سطح دریاچه سد برابر ۱۸۱۱/۲ میلیمتر برآورد شده است. متوسط آورد سالانه رودخانه ۴۹۲۷/۴ میلیون متر مکعب بوده و دمای حداقل محل سد برابر ۸ درجه سلسیوس و دمای حداکثر در محل سد برابر ۳۲/۴ درجه سلسیوس گزارش شده است. مخزن سد کارون ۴ دارای تراز عادی بهره برداری از مخزن ۱۰۲۵ و تراز حداقل بهره برداری ۹۹۶ و تراز آبگیر نیروگاه ۹۴۵ متر از سطح دریا می‌باشد. همچنین مخزن فوق‌الذکر دارای حجم ۲۱۹۰ میلیون متر مکعب است که ۷۴۸/۷ میلیون متر مکعب آن حجم مفید و ۱۰۹۷ میلیون متر مکعب آن حجم مرده مخزن می‌باشد. همچنین آب قابل تنظیم سالانه توسط مخزن سد کارون ۴ برابر ۳۱۵۶ میلیون متر مکعب می‌باشد (سایت شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران). شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه، محل سد کارون ۴ و موقعیت ایستگاه‌های بارانسجی را نشان می‌دهد. مشخصات ایستگاه‌هایی که در این مطالعه از آمار آن‌ها استفاده شده در جدول (۱) آورده شده است.

شناسی نیروگاه برقایی در مواجهه با اثرات تغییر اقلیم برای حوضه کرخه را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که اثرات تغییر اقلیم، متغیرهای هیدرولوژیکی و متعاقباً تولید انرژی برقایی در حوضه را تحت تاثیر قرار خواهد داد. اکبریان اقدم و همکاران (۱۳۹۴) اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش را در حوضه سد کارون ۴ بر اساس سری های گزارش چهارم IPCC بررسی کردند. آنها از نرم افزار SDSM به منظور ریزمقیاس نمایی داده ها استفاده نمودند. سپس اثرات تغییر اقلیم را بر تولید انرژی برقایی سد کارون ۴ بررسی کردند. در ادامه از نرم افزار Lingo بمنظور بهینه سازی تولید انرژی برقایی استفاده کردند. نتایج نشان داد تا سال ۲۱۰۰ میلادی مقدار بارش ۱۷/۲ درصد کاهش و مقدار دما و تبخیر به ترتیب ۲۲/۶ و ۲۶/۱ درصد افزایش خواهد یافت و میزان جریان رودخانه ۱۰/۹ درصد کاهش می یابد که منجر به کاهش ۱۲ تا ۴۶ درصد تولید انرژی برقایی در این سد خواهد شد. منصوری و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ بر اساس گزارشات چهارم و پنجم IPCC پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش رواناب تحت دو سناریوی B1 و RCP 2.6 و همچنین کاهش رواناب تحت دو سناریوی A2 و RCP 8.5 بود. نیرومندی و همکاران (۱۳۹۷) اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه محمدآباد در استان گلستان را بر اساس سناریوهای A1B، A2 و B1 گزارش چهارم IPCC مورد بررسی قرار دادند. آنها از مدل IHACRES به منظور شبیه سازی بارش - رواناب استفاده کردند و ریزمقیاس نمایی داده ها را با مدل LARS-WG انجام دادند. نتایج نشان داد که رواناب سالانه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 به ترتیب ۱/۷۲، ۴/۸۶ و ۰/۲۵ مترمکعب بر ثانیه کاهش خواهد یافت.

هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ و متعاقباً میزان تولید انرژی برقایی این سد تحت سناریوهای اقلیمی RCP

## روش بررسی تغییر اقلیم

در این تحقیق، از مدل‌های گزارش پنجم CMIP5<sup>۱</sup> تحت دو سناریوی RCP 8.5 و RCP4.5 استفاده شده است. برای ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های شبیه‌سازی از روش دلتا یا عامل تغییر<sup>۲</sup> استفاده شد که عامل تغییر، نسبت بین شبیه‌سازی‌های اقلیم آتی به اقلیم حاضر یک مدل گردش عمومی می‌باشد. در واقع این روش برای اعمال تغییرات شبیه‌سازی شده خروجی مدل‌های گردش عمومی جو در دوره‌های آتی به داده‌های دوره پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور، بر اساس خروجی‌های مدل GCM<sup>۳</sup> در دوره حاضر و دوره آتی تغییرات دما و بارندگی برای متوسط درازمدت هر ماه محاسبه می‌شود (Zamani and Berndtsson, 2018):

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

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

در رابطه‌های بالا،  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به بارندگی و دما برای میانگین بلندمدت ۲۲ ساله در هر ماه،  $\bar{P}_{AOGCM, fut, i}$  میانگین ۲۲ ساله بارش شبیه‌سازی شده در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) برای هر ماه و  $\bar{P}_{AOGCM, base, i}$  میانگین ۲۲ ساله بارش شبیه‌سازی شده در دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) برای هر ماه می‌باشد (برای دما نیز مقادیر متناظر به همین صورت در نظر گرفته شدند).

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 (Wilby and Harris, 2006):

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (3)$$

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad (4)$$

در روابط بالا،  $T_{obs}$  نشان‌دهنده سری زمانی دمای مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵)،  $T$  سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی در دوره آتی،  $\Delta T$  تغییر دمای ریزمقیاس شده تحت سناریوی تغییر اقلیم،  $P_{obs}$  نشان دهنده سری زمانی بارندگی مشاهداتی در دوره پایه،  $P$

سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی در دوره آتی و  $\Delta P$  نسبت بارش شبیه‌سازی شده در دوره پایه به دوره آتی می‌باشند. بدین منظور داده‌های آمار تاریخی موجود در حوضه آبریز کارون ۴ جمع‌آوری شدند. دوره پایه در این مطالعه ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۵ میلادی و دوره آتی ۲۰۲۹ تا ۲۰۵۰ در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی خروجی‌های AOGCMها، بر اساس گزارش پنجم، از میانگین خروجی-های ۴ مدل AOGCM استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. قابل ذکر است که انتخاب این مدل‌ها بر اساس توانایی و عملکرد آنها در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش در دوره پایه صورت گرفته است. برای جزئیات بیشتر در مورد ارزیابی و انتخاب مدل‌های MCG به مطالعه Zamani and Berndtsson (2018) مراجعه شود.

## شبیه‌سازی بارش - رواناب

پس از مدل‌سازی تغییر اقلیم، یک مدل هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب مورد نیاز است تا بتوان اثر تغییر اقلیم را روی تغییرات رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ مورد ارزیابی قرار داد. بدین منظور در این مطالعه، از مدل IHACRES استفاده شده است. مدل IHACRES یک مدل یکپارچه مفهومی متریک برای شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب است که توسط Jakeman and Hornberger (1993) توسعه یافت. این مدل به پنج تا هفت متغیر برای واسنجی نیاز دارد و برای اجرا در حوضه‌های بزرگ مناسب است. این مدل شامل دو بخش به هم پیوسته غیرخطی و خطی است که به ترتیب برای محاسبه تلفات و تبدیل بارش مؤثر به رواناب تعریف شده است. در این مطالعه، از آمار متوسط ماهانه بارندگی و دما در سطح حوضه و دبی ماهانه حوضه در دوره آماری ۱۶ ساله (۱۹۹۰-۱۹۸۴) برای واسنجی مدل و دوره آماری ۶ ساله (۱۹۹۱-۲۰۰۵) به عنوان دوره صحت‌سنجی مدل استفاده شد. همچنین معیارهای مجذور میانگین

<sup>2</sup> Change Factor

<sup>3</sup> General Circulation Models (GCM)

<sup>1</sup> Coupled Model Intercomparison Project phase 5

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^o - \bar{Q}^o)^2}{N}} \quad (۶)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^o - Q_i^p)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^o - \bar{Q}^o)^2} \quad (۷)$$

در رابطه‌های بالا،  $Q_i^o$  دبی مشاهداتی،  $Q_i^p$  دبی

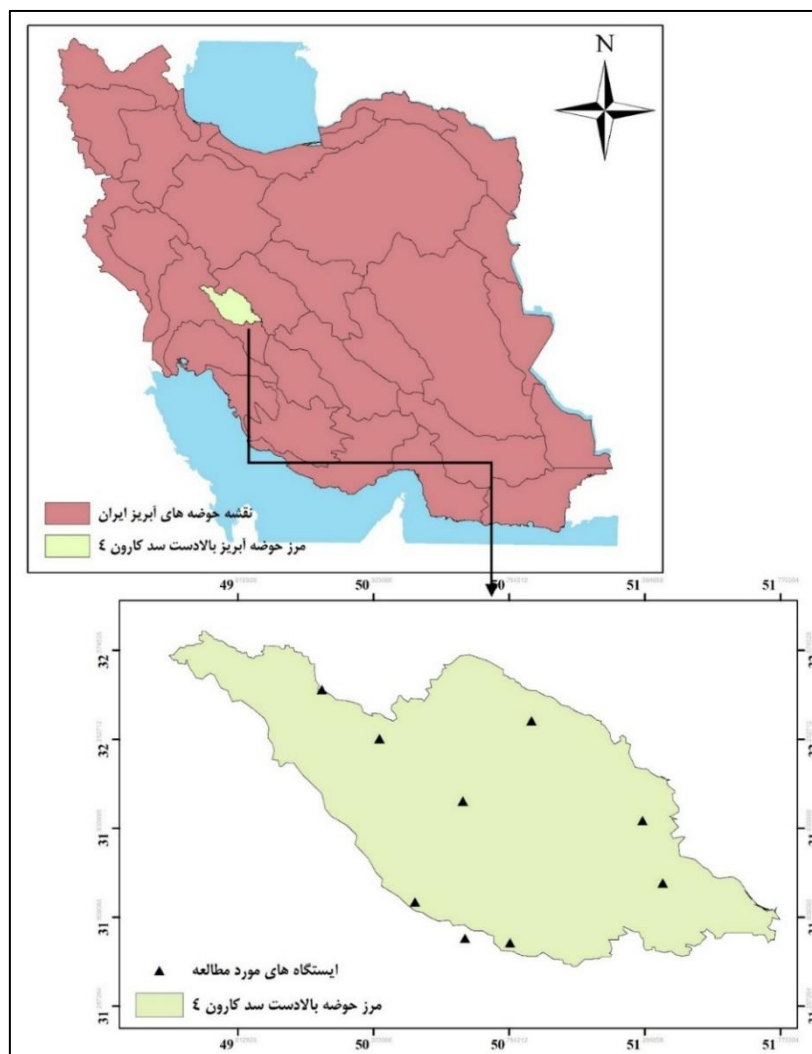
تخمین زده شده توسط مدل،  $N$  تعداد داده‌ها و  $i$  گام

زمانی می‌باشد

مربعاتخطا<sup>۱</sup> RMSE، ضریب همبستگی  $R^2$  و ضریب ناش -

ساتکلیف<sup>۳</sup> NS به منظور بررسی عملکرد مدل مطابق با رابطه‌های زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^o - \bar{Q}^o)(Q_i^p - \bar{Q}^p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i^o - \bar{Q}^o)^2 \sum_{i=1}^N (Q_i^p - \bar{Q}^p)^2}} \quad (۵)$$



شکل (۱): موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه

<sup>۳</sup> Nash-Sutcliffe

<sup>۱</sup> Root-Mean-Square Error

<sup>۲</sup> Correlation Coefficient



جدول (۱): مشخصات ایستگاههای مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نوع ایستگاه	میانگین بارندگی سالانه (mm)	میانگین تبخیر سالانه (mm)
۱	بهشت آباد	۳۲/۰۱	۵۰/۳۷	تبخیرسنجی/آب- سنجی	۵۹۰/۳	-
۲	منج	۳۱/۵۵	۵۰/۶۳	تبخیرسنجی	۵۶۰/۹	-
۳	شهرکرد	۳۲/۲۸	۵۰/۸۵	سینوپتیک	۳۲۹/۷	۲۰۵۲/۰
۴	بروجن	۳۱/۹۷	۵۱/۲۸	باران سنجی	۲۲۲/۲	۱۹۶۳/۰
۵	لردگان	۳۱/۵۰	۵۰/۸۲	باران سنجی	۵۸۳/۵	۲۰۷۸/۵
۶	امام قیس	۳۱/۷۵	۵۱/۳۰	اقلیم شناسی	۵۶۲/۲	-
۷	مرغک	۳۲/۴۸	۵۰/۵۰	باران سنج	۴۴۱/۹	-
۸	کوهزنگ	۳۲/۲۶	۵۰/۷۰	سینوپتیک	۱۳۸۹/۶	۱۴۵۲/۶
۹	دزک آباد	۳۲/۰۹	۵۰/۹۶	اقلیم شناسی	۴۴۰/۰	۴۵۷/۴

نسخه از آن تحت سیستم عامل های مختلف طراحی و هر ساله به روزرسانی می شود. WEAP یک نرم افزار جامع و پیشرفته در مدیریت منابع آب است که در حوضه های آبریز کاربرد گسترده ای دارد. این مدل، همانند اکثر مدل های برنامه ریزی منابع آب، قادر به شبیه سازی انرژی برقی تولید شده در نیروگاه های محل سدها می باشد. این برنامه بر اساس اصل موازنه جرم و روابط پیوستگی مساله را حل می کند.

### مدل سازی مخزن سد و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقی

به منظور مدل سازی مخزن سد، از نرم افزار WEAP<sup>۱</sup> بهره گرفته شد تا بتوان اثر تغییرات رواناب ناشی از تغییرات اقلیمی بر تولید برقی سد کارون ۴ را ارزیابی نمود. مدل WEAP در سال ۱۹۹۰ توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم و با حمایت ویژه مرکز مهندسی هیدرولوژی گردان مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافت و تاکنون چند

جدول (۲): مشخصات مدل های GCM مورد استفاده

مدل	نام مدل	موسسه توسعه دهنده	شناسه موسسه	منبع اصلی
M1	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)
M2	GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	Dunne et al. (2012)
M3	MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	MPI-M	Stevens et al. (2013)
M4	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)



## نتایج و بحث

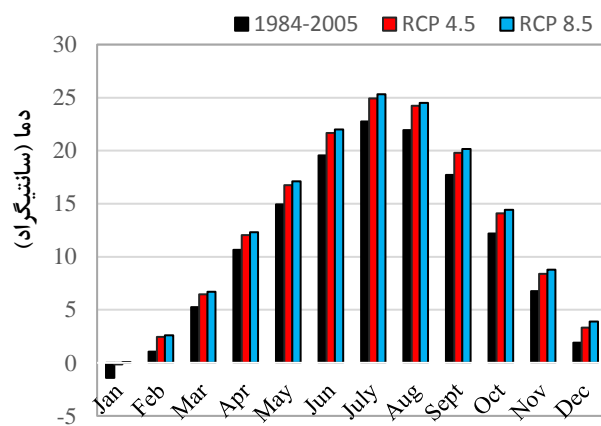
برای مطالعه تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو، مقادیر متغیرهای بارش و دما در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) و تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP 8.5 پیش‌بینی و سپس با استفاده از روش دلتا ریزمقیاس گردید و میزان تغییرات بارش و دما در دوره (۲۰۲۹-۲۰۵۰) میلادی محاسبه شد. شکل (۲) و (۳) نتایج تغییر اقلیم را برای محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود میانگین ماهانه دما در هر دو سناریوی مورد مطالعه افزایش می‌یابد که این افزایش در دوره آتی تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP 4.5 می‌باشد. مطابق با شکل (۳) کاهش در میانگین بارش در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تحت سناریوی RCP 8.5 بیشتر از سناریوی RCP 4.5 می‌باشد. تغییرات میانگین ماهانه بارندگی مورد انتظار در دوره آتی غیر منظم می‌باشد، به صورتی که در بعضی ماه‌ها تغییرات افزایشی و در بعضی ماه‌ها کاهش برآورد شده است. نتایج تغییرات اقلیمی برای منطقه مورد مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده، افزایش ۱/۷۲ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی RCP 4.5 و افزایش ۲/۰۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی RCP 8.5 در میانگین سالانه دما و کاهش حدود ۵ درصدی و ۱۴ درصدی به ترتیب تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 در میانگین بارش سالانه مورد انتظار می‌باشد. همچنین مطابق با نتایج، بیشترین افزایش بارش و کمترین افزایش دما نسبت به دوره پایه در فصل بهار تحت سناریوی RCP 4.5 پیش‌بینی می‌شود. بیشترین کاهش در میانگین بارش در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) مربوط به فصل زمستان تحت هر دو سناریو می‌باشد. بیشترین افزایش دما نیز مربوط به

فصل تابستان تحت سناریوی RCP 8.5 به میزان ۲/۵۲ درجه سانتی‌گراد خواهد بود.

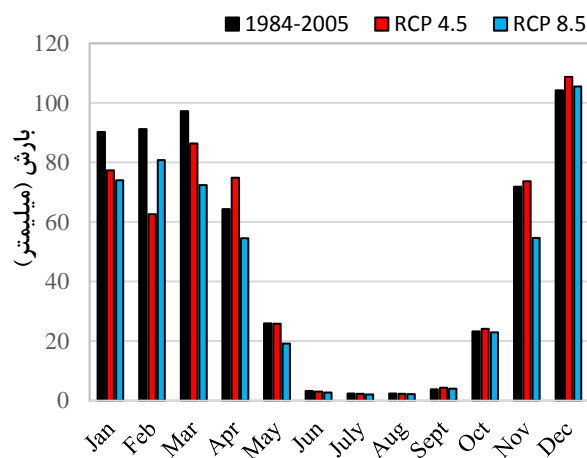
به منظور واسنجی مدل IHACRES سال‌های مختلف در طول دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۴ مورد آزمون قرار گرفت. یک دوره ۱۶ ساله (۱۹۸۴-۱۹۹۹) به عنوان بهترین دوره برای واسنجی انتخاب و مدل برای دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۹۹ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. شکل (۴) نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHACRES را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مدل IHACRES توانایی شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن سد را داشته و مقادیر جریان در دوره پایه را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. معیارهای ارزیابی نیز در جدول (۴) ذکر شده است. بر اساس نتایج جدول (۴)، متوسط جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES بیش از جریان مشاهداتی است. بعد از ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های دما و بارش و همچنین اطمینان از عملکرد مناسب مدل IHACRES، برای هر سناریوی اقلیمی، رواناب ورودی به مخزن شبیه‌سازی شد. شکل (۵) مقایسه میانگین ماهانه رواناب ورودی به مخزن سد در دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) و دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده مقادیر جریان ورودی به مخزن سد در بعضی ماه‌ها کاهش و در بعضی ماه‌ها افزایش می‌یابد. مقادیر جریان ورودی به مخزن سد کارون ۴ در ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر و ژانویه تحت هر دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و در ماه‌های فوریه تا اوت تحت هر دو سناریو نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. همچنین در ماه سپتامبر در سناریوی RCP 4.5 افزایش و در سناریوی RCP 8.5 کاهش جریان نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود.

جدول (۳): تغییرات پیش‌بینی شده فصلی و سالانه دما و بارش تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه

RCP 4.5		RCP 8.5		فصل‌ها
تغییرات دما (C°)	تغییرات بارش (درصد)	تغییرات دما (C°)	تغییرات بارش (درصد)	
۱/۲۸	-۱۸/۷۳	۱/۴۹	-۱۸/۴۳	زمستان
۱/۱۱	۱۰/۹۲	۲/۱۰	-۱۸/۲۷	بهار
۲/۱۷	۳/۷۱	۲/۵۲	-۴/۲۹	تابستان
۱/۶۴	۳/۶۱	۲/۰۶	-۸/۱۸	پاییز
۱/۷۲	-۵	۲/۰۴	-۱۴/۶	سالانه

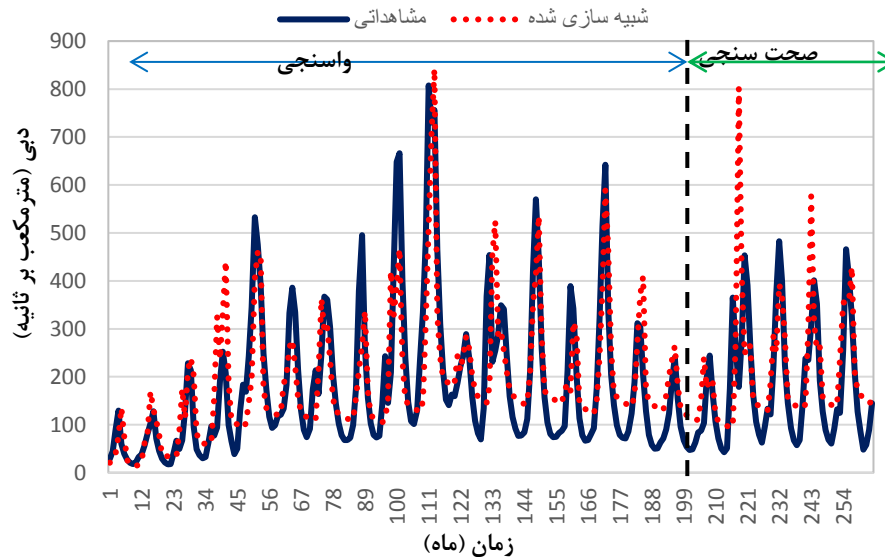


شکل (۲): مقایسه میانگین ماهانه دما در دوره پایه و دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5



شکل (۳): مقایسه میانگین ماهانه بارش در دوره پایه و دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5





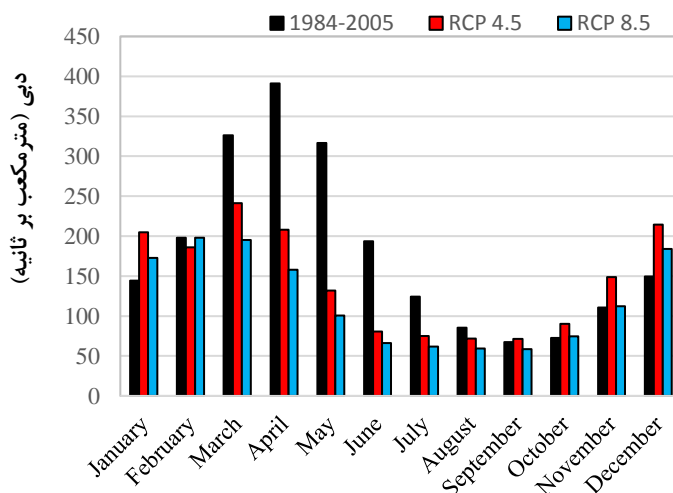
شکل (۴): سری زمانی جریان مشاهداتی و شبیه سازی شده (با مدل IHACRES) ورودی به مخزن کارون ۴ (۱۹۸۴-۲۰۰۵)

جدول (۴): معیارهای ارزیابی مدل بارش-رواناب (واسنجی و صحت سنجی) در دوره آماری (۱۹۸۴-۲۰۰۵)

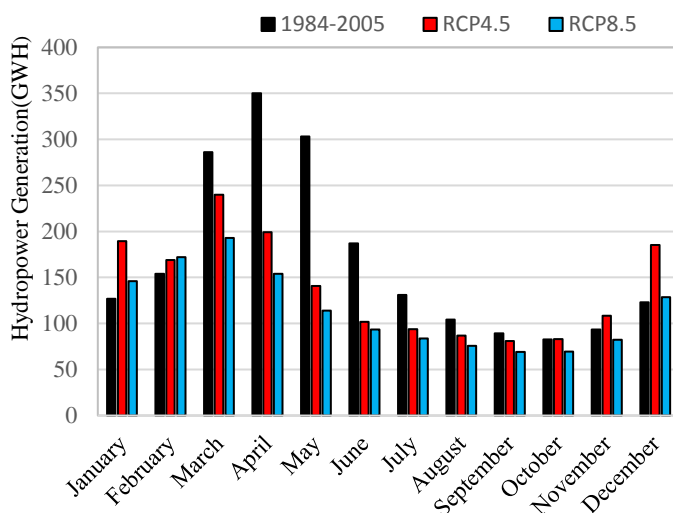
صحت سنجی			واسنجی			دوره
R	RMSE (CMS)	NS	R	RMSE (CMS)	NS	آماره
۰/۶۴	۱۱۱/۲۸	۰/۶۲	۰/۸۲	۸۷/۴۹	۰/۶۷	ماهانه

سناریوی RCP 8.5 می باشد. تغییرات پیش بینی شده فصلی و سالانه رواناب ورودی به مخزن و انرژی برقی استحصالی سد کارون ۴ تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره آتی نسبت به دوره پایه در جدول (۵) ارائه شده است. مطابق نتایج جدول (۵)، مجموع تولید سالانه انرژی برقی تحت شرایط تغییر اقلیم در بازه زمانی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) به میزان تقریبی ۱۷ درصد در سناریوی RCP 4.5 و ۳۲ درصد در سناریوی RCP 8.5 نسبت به دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) کاهش می یابد. بیشترین کاهش رواناب و به دنبال آن، کاهش انرژی برقی در فصل بهار تحت سناریوی RCP 8.5 پیش بینی می شود. همچنین بیشترین افزایش رواناب و انرژی برقی در فصل پاییز تحت سناریوی RCP 4.5 مورد انتظار می باشد.

در این مطالعه، برای بررسی اثر کاهش رواناب بر وضعیت مخزن، از مدل WEAP استفاده شد. شکل (۶) مقایسه میانگین ماهانه انرژی برقی در دوره پایه و تحت سناریوهای اقلیمی را نشان می دهد. با توجه به شکل (۶) مشاهده می شود که تغییرات میزان تولید انرژی برقی در دوره آتی نیز غیرمنظم خواهد بود و در بعضی ماهها تغییرات افزایشی و در بعضی ماهها کاهشی است. میانگین تولید انرژی برقی سالانه برای دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تحت هر دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) کاهش می یابد. میزان انرژی برقی استحصالی سد کارون ۴ در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) در همه ماهها تحت سناریوی RCP 4.5 بیشتر از



شکل (۵): مقایسه میانگین ماهانه رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ در دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) و دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5



شکل (۶): مقایسه میزان انرژی برقایی استحصالی سد کارون ۴ در دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) و دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5

جدول (۵): تغییرات پیش‌بینی شده فصلی و سالانه رواناب ورودی به مخزن و انرژی برقایی استحصالی سد کارون ۴ تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵)

فصل	RCP 4.5		RCP 8.5	
	تغییرات انرژی برقایی (درصد)	تغییرات رواناب (درصد)	تغییرات انرژی برقایی (درصد)	تغییرات رواناب (درصد)
زمستان	۵/۵	-۵/۳	-۹/۸	-۱۵/۳
بهار	-۴۷/۴	-۵۳/۳	-۵۶/۹	-۶۳/۹
تابستان	-۱۹/۴	-۲۱/۲	-۲۹/۴	-۳۵/۱
پاییز	۲۵/۸	۳۶/۲	-۶/۲	۱۱/۵
سالانه	-۱۷/۳	-۲۰/۹	-۳۱/۹	-۳۳/۸



خروجی مدل های گزارش پنجم (CMIP5) در مطالعات هواشناسی و منابع آب منتهی به نتایج قابل اعتمادی نمی-شود و می بایست از پس-پردازش های آماری برای دستیابی به نتایج قابل اعتمادتر استفاده کرد (Fan et al., 2020). بیشترین اختلاف نتایج مطالعه حاضر با نتایج منصوری و همکاران (۱۳۹۷) مربوط به شبیه سازی میانگین تغییرات بارش در دوره آتی می باشد که متناسب با پیچیدگی و خطای موجود در پیش بینی بارندگی نسبت به دما و همچنین تفاوت مدل های مورد استفاده و منبع داده ها توجیه پذیر می باشد. قابل ذکر است در شبیه سازی دما، هر دو مطالعه روندی افزایشی را شبیه سازی کرده اند.

#### نتیجه گیری

هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقی سد کارون ۴ در دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۹) تحت سناریوهای اقلیمی RCP 4.5 و RCP 8.5 بود. بدین منظور ابتدا به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش در دوره آینده، پرداخته شد، سپس اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد مدل سازی شد و در نهایت با استفاده از مدل WEAP میزان تولید انرژی برقی تحت سناریوهای اقلیمی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از مدل سازی تغییر اقلیم انتظار می رود در این حوضه میانگین سالانه دما حدود ۱/۷۲ درجه سانتی گراد تحت سناریوی RCP 4.5 و ۲/۰۴ درجه سانتی گراد تحت سناریوی RCP 8.5 افزایش یابد. همچنین میانگین سالانه بارش تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب حدود ۵ درصد و ۱۴ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج مدل سازی بارش-رواناب حاکی از کاهش رواناب در شرایط تغییر اقلیم به میزان ۳۴٪ و ۲۱٪ به ترتیب تحت سناریوهای RCP 8.5 و RCP 4.5 در بازه زمانی مطالعاتی (۲۰۲۹-۲۰۵۰) می باشد. در نهایت نتایج نشان داد که تغییر اقلیم با اثرگذاری روی متغیرهای آب و هوایی و چرخه هیدرولوژیکی، منجر به کاهش تولید برقی در بازه زمانی مطالعاتی ۲۰۲۹-۲۰۵۰ به میزان ۳۱٪ و ۱۷٪ به ترتیب

مطالعه دیگری که برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقی سد کارون ۴ توسط اکبریان اقدم و همکاران (۱۳۹۴) تحت سناریوهای گزارش چهارم IPCC انجام شده میزان کاهش بارش را ۱۷/۲ درصد، افزایش دما را ۲۲/۶ درصد و کاهش جریان رودخانه را ۱۰/۹ درصد در دوره آتی (۲۰۱۵-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۲۱۰۰ گزارش نموده است. بر اساس آن مطالعه، تولید انرژی برقی تا سال ۲۱۰۰ بین ۱۲ تا ۴۶ درصد کاهش خواهد یافت. تفاوت نتایج مطالعه حاضر با مطالعه اکبریان اقدم و همکاران (۱۳۹۴) بدلیل متفاوت بودن دوره آتی مورد بررسی و همچنین استفاده از گزارش پنجم IPCC در مطالعه حاضر می باشد. همچنین مطالعه دیگری بر روی جریان ورودی به مخزن سد کارون ۴ توسط منصوری و همکاران (۱۳۹۷) تحت سناریوی RCP 8.5 و از گزارش پنجم برای دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) انجام شده است. نتایج آن تحقیق نیز روند افزایشی دما در دوره آتی و روند کاهشی جریان ورودی به مخزن سد را تحت این سناریو نشان می دهد که با نتایج این تحقیق سازگاری دارد. نتایج ارائه شده در این تحقیق مربوط به دوره ۲۰۲۹-۲۰۵۰ است، بنابراین امکان اینکه برای بازه های زمانی مختلف در دوره آتی تحت سناریوهای اقلیمی متفاوت و مناطق دیگر، روند متفاوتی حاصل شود، وجود دارد. لذا پیشنهاد می شود این تحقیق در دوره های آتی دیگر و برای مناطق دیگر انجام گیرد. قابل ذکر است که منصوری و همکاران (۱۳۹۷) برای حوضه بالادست کارون ۴ متوسط بارندگی را تحت سناریوی RCP 2.6 افزایشی (به میزان ۵ درصد) و تحت سناریوی RCP 8.5 کاهشی (به میزان ۶ درصد) گزارش نموده اند. در مطالعه حاضر، برخلاف مطالعه منصوری و همکاران (۱۳۹۷)، متوسط بارندگی بلندمدت سالانه در این منطقه کاهشی گزارش شده است (کاهش میانگین بارش سالانه به میزان ۵٪ و ۱۴٪ به ترتیب تحت دو سناریوی RCP 4.5). یکی از دلایل این اختلاف را می توان افزایش دقت استفاده از داده های تصحیح بایاس شده دانست. بر اساس توصیه هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) استفاده مستقیم از



سازگاری با تغییر اقلیم، به منظور بهبود عملکرد نیروگاه-های برقایی مدل سازی شود.

تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 خواهد شد. با توجه به امکان ارزیابی به هنگام و مستمر شرایط اقلیمی آینده، پیشنهاد می شود روش های مختلف مدیریت

## منابع

- اکبریان اقدام ا.، ع. م. احمدوند و س. علی محمدی. ۱۳۹۴. مدیریت تولید آینده در نیروگاه های برقایی تحت تاثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی نیروگاه سد کارون ۴). مدیریت صنعتی دانشگاه تهران، دوره ۷، شماره ۲، ص ۲۱۵-۲۴۴.
- جدیری نقاشکار ل.، و م. ضرغامی. ۱۳۹۲. مدلسازی تاثیر تغییر اقلیم بر تولید برقایی سد سفیدرود. اولین کنفرانس ملی هیدرولوژی مناطق نیمه خشک. سنندج. جهاد دانشگاهی استان کردستان.
- جمالی س. ۱۳۹۳. آسیب شناسی نیروگاه های برقایی در مواجهه با اثرات تغییر اقلیم. مطالعه موردی: حوضه آبریز کرخه. فصلنامه سد و نیروگاه برقایی ایران. سال اول. شماره ۲، ص ۳۷-۲۵.
- منصوری ا.، ب. امین نژاد و ح. احمدی. ۱۳۹۷. بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ بر اساس گزارشات چهارم و پنجم IPCC. نشریه علوم آب و خاک، شماره ۲، ص ۳۵۹-۳۴۵.
- نیرومندفرد ف.، م. ذاکری نیا و ب. یازرلو. ۱۳۹۷. بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES (مطالعه موردی: حوضه محمدآباد در استان گلستان). مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۴۱، شماره ۳، ص ۱۱۷-۱۰۳.

Ahadi M. S., H. Eshraghi, M. Habibi Nokhandan, M. Shahni Danesh and H. Fahmi. 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.

Dunne J. P., J. G. John, A. J. Adcroft, S. M. Griffies, R. W. Hallberg, E. Shevliakova, R. J. Stouffer, W. Cooke, K. A. Dunne and M. J. Harrison. 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., J. Hu, X. Zhang, L. Kong, F. Li and Z. Mi. 2020. Impacts of climate change on hydropower generation in China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 167: 4-18.

Gelete G., H. Gokcekus and T. Gichamo. 2019. Impact of climate change on the hydrology of Blue Nile basin, Ethiopia: A review. *Journal of Water and Climate Change*, Doi: 10.2166/wcc.2019.014.

Hamududu B. H. and A. Killingtveit. 2016. Hydropower production in future climate scenarios, the case for the Zambezi River. *Energies*, 9(7): 502. Doi: 10.3390/en9070502

Harrison G. P. and H. W. Whittington. 2002. Vulnerability of hydropower projects to climate change. *IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution*, 149(3): 249-255.

Jakeman A. J. and G. M. Hornberger. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?. *Water Resources Research*, 29: 2637-2649.

Madani K., M. Guégan and C. B. Uvo. 2014. Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California. *Journal of Hydrology*, 510: 153-163.

Pileşjo P. and S. S. Al-Juboori. 2016. Modelling the effects of climate change on hydroelectric power in Dokan, Iraq. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 5(2-1): 7-12.

Rončák P., K. Hlavčová, S. Kohnová and J. Szolgay. 2019. Impacts of future climate change on runoff in selected catchments of Slovakia. In: Leal Filho W, Trbic G, Filipovic D, (eds) *Climate Change Adaptation in Eastern Europe*. Climate Change Management. Springer, Cham.

Rotstayn L.D., S. J. Jeffrey, M. A. Collier, S. M. Dravitzki, A. C. Hirst, J. I. Syktus and K. K. Wong. 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., M. Giorgetta, M. Esch, T. Mauritsen, T. Crueger, S. Rast, M. Salzmann, H. Schmidt, J. Bader, K. Block, R. Brokopf, I. Fast, S. Kinne, L. Kornblueh, U. Lohmann, R. Pincus, T. Reichler and E. Roeckner. 2013. Atmospheric component of the MPI-M earth system model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2): 146–172

Watanabe S., T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori and M. Kawamiya. 2011. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP 5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4: 845–872.

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.

Zarghami M., A. Abdi, I. Babaeian, Y. Hassanzadeh and R. Kanani. 2011. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan Iran. *Global and Planetary Change*, 78(3–4): 137-146.

Zamani R. and R. Berndtsson. 2018. Evaluation of CMIP5 models for west and southwest Iran using TOPSIS-based method. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1–2): 533–543.



## Investigation of Climate Change Effect on Hydropower Energy Generation by Karun 4 Dam

Fahimeh Amini Naghani<sup>1</sup>, Rasoul Mirabbasi Najafabadi<sup>2\*</sup>, Reza Zamani<sup>3</sup>, Mohammad Ali Nasr Esfahani<sup>4</sup>

### Abstract

Investigation of the potential impacts of climate change on hydropower generation and reservoir operation at the basin is a necessary issue. In this research, the effect of climate change on the generation of hydroelectric energy in the Karun 4 dam was investigated. For this purpose, after collecting the required data, temperature and precipitation variables were generated using general circulation models (GCM) under RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios for the upcoming period (2029-2050). Then, the temperature and precipitation values were downscaled for the future period using the changes factor method. The generated time series were used as inputs for the IHACRES rainfall-runoff model and the runoff were simulated under different scenarios. Then the effect of runoff variation under considered scenarios in the amount of generating hydroelectric energy was investigated. Climate predictions indicate an increase of 1.72 and 2.4° C in the long-term average annual temperature, and a reduction in the annual precipitation of 5% and 14% under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively, in the period of 2029-2050. The results of rainfall-runoff modeling indicate that the average annual inflow into the dam reservoir will be decreased 21% and 34% under the scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively. In order to investigate the effect of runoff reduction on reservoir status and hydroelectric generation, the reservoir of Karun 4 Dam was simulated with WEAP software. The results showed that the generated hydroelectric energy by the Karun 4 Dam in the upcoming period (2029-2050) will be decreased by 17% and 31% under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively.

**Keywords:** Climate change, Hydropower energy, Karun 4 basin, IHACRES, WEAP.

<sup>1</sup> MSc. Student of Water Resources Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: fhm.amini@gmail.com

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.  
E-mail: mirabbasi\_r@yahoo.com

<sup>3</sup> Ph.D. of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: reza.zamani65@yahoo.com

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mnasr@sku.ac.ir



## Investigation of Climate Change Effect on Hydropower Energy Generation by Karun 4 Dam

Fahimeh Amini Naghani<sup>16</sup>, Rasoul Mirabbasi Najafabadi<sup>17\*</sup>, Reza Zamani<sup>18</sup>, Mohammad Ali Nasr Esfahani<sup>19</sup>

### Introduction

Hydropower generation in dam reservoirs is completely dependent on the height of water stored in the reservoir, which is also dependent on the hydrological conditions of the region and will be affected by climate change. Climate change leads to an increase in temperature, a decrease in precipitation, a shift in the peak point of runoff due to snowmelt, and a decrease in runoff. It is obvious that the runoff entering the dam reservoir will be different under these conditions and consequently the amount of hydropower energy production will be reduced under normal reservoir operating conditions. Therefore, Investigation of the potential impacts of climate change on hydropower generation and reservoir operation at the basin is a necessary issue. Numerous studies have been conducted on this subject around the world.

Madani et al. (2014) examined the effect of climate change on hydropower generation in the highlands of California. The results showed that energy production increased from January to April under the wet scenario and increased from January to March under the dry scenario, but decreased in the other months. Hamududu and Killingtveit (2016) examined hydropower generation under future climate scenarios for the Zambezi River in South Africa. The results show that the reduction in water resources will lead to a reduction of hydropower production by 9% in 2020, 18% in 2050 and 28% in 2080 under the A1B emission scenario. Fan et al. (2020) examined the effect of climate change on hydropower production in China. The results showed that hydropower is very sensitive and vulnerable to climate change, so that by 2100 under the RCP4.5 scenario at the rate of 67.49 billion kWh and under the RCP8.5 scenario at the rate of 153.29 billion kWh will be reduced compared to 2011.

The aim of the present study is to investigate the effects of climate change on the amount of runoff entering the reservoir of Karun 4 Dam and consequently the amount of hydropower generation of this dam under RCP 4.5 and RCP 8.5 climate scenarios.

### Methodology

Karun 4 Dam is located in Chaharmahal and Bakhtiari province, 180 km southwest of Shahrekord, which has been built on the Karun River, 670 km from the Karun River tributary to the Persian Gulf. This dam is the largest two-arched concrete dam in Iran and the fifth tallest dam in the world, which has the ability to generate hydropower at a rate of 2107 GWh per year. The area of Karun River basin in the area of Karun 4 Dam is about 12813.4 square kilometers and the average annual rainfall height of the basin is estimated at about 680 mm. Also, the average evaporation from the surface of the dam lake is estimated to be 1811.2 mm. The average annual flow of the river is 4927.44 million cubic meters and the minimum temperature and maximum temperature in the dam position are reported to be 8.0 and 32.4 degrees Celsius, respectively.

<sup>16</sup> MSc. Student of Water Resources Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: fhm.amini@gmail.com

<sup>17</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.  
E-mail: mirabbasi\_r@yahoo.com

<sup>18</sup> Ph.D. of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: reza.zamani65@yahoo.com

<sup>19</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mnasr@sku.ac.ir



In this research, the effect of climate change on the generation of hydroelectric energy in the Karun 4 dam was investigated. For this purpose, after collecting the required data, temperature and precipitation variables were generated using general circulation models (GCM) under RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios for the upcoming period (2029-2050). The base period in this study was 1984 to 2005 and the future period was 2029 to 2050. Also, the outputs of AOGCMs, according to the fifth report, were checked by the average outputs of four AOGCM models have been used. Then, the temperature and precipitation values were downscaled for the future period using the changes factor method (Zamani and Berndtsson, 2018). The generated time series were used as inputs for the IHACRES rainfall-runoff model and the runoff were simulated under different scenarios (Jakeman and Hornberger, 1993).

In this study, the mean monthly time series of rainfall and temperature in the basin and the monthly discharge of the basin in the 16-year period (1984-1990) for model calibration and a 6-year period (1991-2005) were used as the validation period of the IHACRES model. Then the effect of runoff variation under considered scenarios in the amount of generating hydroelectric energy was investigated. In order to model the dam reservoir, WEAP software was used to evaluate the effect of runoff changes due to climate change on hydropower generation of Karun 4 dam.

### Discussion and Conclusion

The results showed that the average monthly temperature increases in both scenarios, which in the future period under the RCP8.5 scenario will be more than the RCP 4.5 scenario. Also, the decrease in the average rainfall in the future period (2029-2050) under the RCP 8.5 scenario is greater than the RCP 4.5 scenario. The changes in the average monthly rainfall are expected to be irregular in the coming period, so that in some months the changes are estimated to increase and in some months to decrease. Climate predictions indicate an increase of 1.72 and 2.4 °C in the long-term average annual temperature, and a reduction in the annual precipitation of 5% and 14% under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively, in the period of 2029-2050. Also, according to the results, the highest increase in precipitation and the lowest increase in temperature compared to the base period is predicted for spring season under the RCP 4.5 scenario. The largest decrease in the average rainfall in the future period (2029-2050) is expected to occur in winter under both scenarios. The highest temperature increase will be related to the summer season under the RCP 8.5 scenario by 2.52 °C. The results of rainfall-runoff modeling indicate that the average annual inflow into the dam reservoir will be decreased 21% and 34% under the scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively. In order to investigate the effect of runoff reduction on reservoir status and hydroelectric generation, the reservoir of Karun 4 Dam was simulated with WEAP software. The results showed that the generated hydroelectric energy by the Karun 4 Dam in the upcoming period (2029-2050) will be decreased by 17% and 31% under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively.

**Keywords:** Climate change, Hydropower energy, Karun 4 basin, IHACRES, WEAP.

### The most important references

Fan J., J. Hu, X. Zhang, L. Kong, F. Li and Z. Mi. 2020. Impacts of climate change on hydropower generation in China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 167: 4-18.

Hamududu B. H. and A. Killingtveit. 2016. Hydropower production in future climate scenarios, the case for the Zambezi River. *Energies*, 9(7): 502. Doi: 10.3390/en9070502

Jakeman A. J. and G. M. Hornberger. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?. *Water Resources Research*, 29: 2637-2649.

Madani K., M. Guégan and C. B. Uvo. 2014. Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California. *Journal of Hydrology*, 510: 153-163.

Zamani R. and R. Berndtsson. 2018. Evaluation of CMIP5 models for west and southwest Iran using TOPSIS-based method. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1-2): 533-543.