



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۵۵۳-۲۵۳۹)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.324895.668998>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Prediction of Changes in Inflow Suspended to the Dam Reservoir using IHACRES Rainfall-runoff Model under the Influence of Climate Change Phenomenon (Case Study: Torogh Dam)

SOHEILA SEIFI¹, SAEED REZA KHODASHENAS^{*1}, ABOLFAZL MOSAEDI¹

1. Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

(Received: June. 9, 2021- Revised: Aug. 31, 2021- Accepted: Sep. 13, 2021)

ABSTRACT

Given the changes in rainfall and temperature of the regions in recent decades due to global warming, it is necessary to study the temporal changes of sediment in rivers. In the present study, the changes of sediment entering the reservoir of Torogh dam under the influence of the climate change phenomenon were evaluated using the data of the base period (1980-2000) in the period 2076-2056. In this regard, the output of five climate models BCC-CSM-1-1, GFDL-ESM2M, IPSL-CS5A-IR, MICRO-ESM-CHEM, and MRI-CGCM3 and their group implementation under two emission scenarios RCP2.6 and RCP8.5. The IHACRES Rainfall-runoff model was used to simulate the inflow to the dam reservoir, and the sediment measurement curve was used to evaluate sediment changes. The results of flow simulation in the baseline period (1980-2000) indicated that the IHACRES model has a good ability to simulate monthly flow in the study basin. The results of reviewing different climate change scenarios showed that the amount of rainfall in the next period compared to the base period under the RCP2.6 scenario would increase by 7.25%, and under the RCP8.5 scenario will decrease by 1.24%. Both scenarios jointly predicted an upward trend for the average temperature. But the slope of this increase under the RCP8.5 scenario was greater than RCP2.6. The results showed that due to changes in Rainfall and temperature, the amount of discharge in the next period compared to the base period under the RCP2.6 scenario will increase by 13.63% and under the RCP8.5 scenario will decrease by -22.55%. Also, this study showed that the rate of annual changes in suspended sediment load to the Torogh Dam reservoir in the future period compared to the base period under RCP2.6 scenario will increase by 11.58 percent and under RCP8.5 scenario will decrease by -25.32 percent. Therefore, predicting the amount of sediment entering the dam reservoir is strongly a function of the scenario under study.

Key word: Torogh Dam Basin, Suspended Load, Runoff, Climate Change, IHACRES.

پیش‌بینی تغییرات رسوب ورودی به مخزن سد با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم (مطالعه موردی: سد طرق)

سهیلا سیفی^۱، سعیدرضا خدانشناس^{۱*}، ابوالفضل مساعدی^۱

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۶/۹ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۶/۲۲)

چکیده

با توجه به تغییراتی که در مقدار بارندگی و دمای مناطق طی دهه‌های اخیر به دلیل گرمایش جهانی اتفاق افتاده است، بررسی وضعیت تغییرات زمانی رسوب انتقالی در رودخانه‌ها ضروری می‌باشد. در تحقیق حاضر تغییرات رسوب ورودی به مخزن سد طرق تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم با استفاده از داده‌های دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۰) در دوره ۲۰۷۶-۲۰۵۶ مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا از برون‌داد پنج مدل اقلیمی BCC-CSM-1-1, GFDL-ESM2M, IPSL-CS5A-IR, MICRO-ESM-CHEM و MRI-CGCM3 و اجرای گروهی آن‌ها تحت ۲ سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شد. جهت شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن سد نیز از مدل بارش-رواناب IHACRES و جهت ارزیابی تغییرات رسوب از منحنی سنج رسوب استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی جریان در دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۰) حاکی از آن بود که مدل IHACRES توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان ماهانه در حوضه مورد مطالعه دارد. نتایج بررسی سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نشان داد که میزان بارش در دوره آبی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی RCP2.6 به میزان ۷/۲۵ درصد افزایش و تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۱/۲۴ درصد کاهش می‌یابد. هر دو سناریو به طور مشترک روندی افزایشی را برای دمای متوسط پیش‌بینی کردند. اما شیب این افزایش تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از RCP2.6 بود. نتایج نشان داد که با توجه به تغییرات بارش و دما، مقدار دبی در دوره آبی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی RCP2.6 افزایشی معادل ۱۳/۶۳ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 کاهش معادل ۲۲/۵۵ درصد خواهد داشت. همچنین این تحقیق نشان داد که میزان تغییرات سالانه بار معلق رسوب ورودی به مخزن سد طرق در دوره آبی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی RCP2.6 افزایشی معادل ۱۱/۵۸ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 کاهش ۲۵/۳۲ درصد خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبریز سد طرق، رسوب معلق، رواناب، تغییر اقلیم، IHACRES.

مقدمه

بر روی آن اتفاق نظر دارند. بر اساس یکی از نظریه‌های موجود، بخشی از دلایل تغییر اقلیم در دوره‌های آماری، مربوط به فعالیت‌های بی‌رویه انسان و به‌ویژه فعالیت‌های صنعتی و افزایش گازهای گلخانه‌ای است. مدل‌های گردش عمومی و مطالعات انجام شده بیانگر افزایش درجه حرارت به میزان ۱ الی ۲ درجه سلسیوس و افزایش بارندگی، به میزان ۳ الی ۱۵ درصد هستند. اما به دلیل الگوی غیریکنواخت توزیع، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش بارندگی و در مناطق مرتفع و مرطوب افزایش بارندگی مشاهده می‌شود (IPCC, 1995). افزایش دما باعث افزایش تبخیر از سطوح مرطوب می‌شود، ضمن آنکه هوای گرم قادر به نگهداری رطوبت بیشتر نیز می‌باشد. با افزایش رطوبت در اتمسفر، رخدادهای بارش باران و برف در بعضی مناطق شدیدتر شده و پتانسیل وقوع سیلاب افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار رطوبت در خاک برای تبخیر کم و یا ناچیز می‌باشد، میزان

رویکرد توسعه پایدار با حفظ و مدیریت منابع سه‌گانه آب، خاک و پوشش گیاهی در حوضه‌های آبریز ممکن می‌شود. تغییرات اقلیمی در بعضی موارد می‌تواند منجر به ایجاد تغییر در میزان، شدت و پراکنش بارندگی‌ها شده، که علاوه بر تأثیر بر منابع آب، موجب افزایش میزان فرسایش خواهد شد. فرسایش خاک طی چند دهه اخیر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی جهان مطرح بوده است. رسوب و فرسایش هر چند که می‌توانند به صورت طبیعی رخ دهند، اما توسط فعالیت‌های انسانی نظیر جنگل‌تراشی، چرای بیش از حد دام‌ها و مدیریت کشاورزی ناپایدار تشدید می‌شوند. این فرآیندها سبب تخریب منابع طبیعی و نشست رسوب در مزارع، دشت‌های ساحلی و سیلابی و سدها می‌شود. گرم شدن زمین و تأثیر آن بر چرخه آب مسئله‌ای است که امروزه تمام دانشمندان علوم جوی

ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. به دنبال این تغییرات رواناب در دوره آبی نسبت به دوره مشاهداتی در هر دو سناریوی A1 و B1 به ترتیب به میزان ۱۷/۲ و ۱۹/۴ درصد کاهش می‌یابد (Nazari et al, 2016).

Li et al. (2016) در پژوهش خود به بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبریز بزرگ واقع در انتاریو کانادا پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از مدل هیدرولوژیکی HIM و مدل اقلیمی PRECIS تحت دو سناریو A2 و B2 استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که در حوضه مورد مطالعه، دما در دوره آبی (۲۰۷۱-۲۱۰۰) نسبت به پایه (۲۰۰۶-۱۹۷۲) افزایش و میزان بارش در دوره آبی نسبت به دوره پایه در فصل زمستان و بهار افزایش و در فصل تابستان کاهش می‌یابد. به دنبال این تغییرات میزان آب در دسترس در حوضه آبریز مورد مطالعه در دوره آبی نسبت به دوره پایه در فصل زمستان افزایش و در فصل تابستان کاهش می‌یابد.

Adem et al. (2016) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل اقلیمی HADCM3 تحت دو سناریو A2 و B2 تأثیر تغییر اقلیم بر میزان رسوب در بالادست حوضه آبریز Nile واقع در اتوپیا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان رسوب در سه دوره آبی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۹۹-۲۰۷۱ تحت سناریو A2 به ترتیب به میزان ۱۱/۳، ۱۶/۳ و ۲۱/۳ درصد و تحت سناریو B2 به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۴/۳ و ۱۱/۳ افزایش می‌یابد. افزایش رسوب به دلیل افزایش جریان رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم در همه دوره زمانی آینده بوده است.

Zare et al. (2017) به بررسی تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر سرعت فرسایش در حوضه آبریز کسلیان واقع در شمال ایران با استفاده از مدل فرسایش RUSLE پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از سه سناریو با در نظر گرفتن تغییرات بارش در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۱۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۱) به این ترتیب استفاده کردند: افزایش بارش به میزان ۱۰ درصد، کاهش بارش به میزان ۱۰ درصد و عدم تغییر بارش. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان فرسایش تحت هر سه سناریو در دوره آینده افزایش خواهد یافت.

Ghazavi et al. (2019) در پژوهش خود به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر آورد رسوب معلق حوزه آبخیز شهرکرد پرداختند. در این راستا ابتدا مدل پیوسته نیمه توزیعی SWAT برای دوره پایه ۲۰۱۰-۲۰۰۲ مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و گرمایش جهانی بر آورد رسوبات معلق حوضه در دوره ۲۰۴۵-۲۰۴۶ میلادی داده

بازتابش خورشیدی از سطح خاک بیشتر شده که این نیز به شدت و مدت گرم شدن می‌افزاید. به‌طور کلی می‌توان گفت تغییرات اقلیمی، بر مقدار رطوبت خاک، تغذیه آب‌های زیرزمینی، فراوانی سیلاب و وقوع خشکسالی در مناطق مختلف تأثیرگذار است (Chiew et al, 1995). مطالعات متعددی به بررسی و شبیه‌سازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر آورد حوضه‌های آبریز پرداخته‌اند. در بسیاری از این مطالعات، داده‌های ریز مقیاس شده اقلیمی به عنوان ورودی‌های مدل کالیبره شده هیدرولوژیکی به این مدل‌ها معرفی شده و تأثیرات احتمالی تغییر اقلیم بر آورد دبی و رسوب حوضه‌های آبریز بررسی شده است (Mosaffaie, 2016).

Sohrabian et al. (2015) اثرات تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز گالیکش را با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش از مدل بارش-رواناب IHACRES و مدل اقلیمی Hadcm3 (تحت سناریوهای A1B، A2 و B1) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایط اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ دما و بارندگی نسب به دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۵) به ترتیب افزایش و کاهش خواهد یافت. در نهایت مدل IHACRES نیز نشان داد که رواناب در دوره آبی نسبت به دوره مشاهداتی در هر سه سناریو به ترتیب به میزان ۶/۳۷، ۴/۴۳ و ۷/۹۴ متر مکعب در ثانیه کاهش پیدا کرده، که نشان از تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه در دوره آبی دارد.

Ghorbani et al. (2016) اثر پدیده تغییر اقلیم را بر روند دبی ماهانه رودخانه حوضه آبریز گالیکش را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه دما و بارش برای دوره اقلیمی آبی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) بر اساس مدل گردش عمومی جو HADCM3 توسط مدل مولد داده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی تولید و به عنوان ورودی مدل واسنجی شده IHACRES به منظور شبیه‌سازی دبی برای دوره‌های اقلیمی آینده وارد شد. نتایج ایشان نشان داد که در منطقه مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف دمای هوا در ماه‌های مختلف سال افزایش پیدا می‌کند، اما متوسط مجموع بارش سالانه کاهش می‌یابد. همچنین دبی در فصل بهار و نیمه اول سال بدون روند و در دیگر فصل‌های سال و نیمه دوم سال دارای روند کاهشی می‌باشد.

در پژوهشی با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES و سه مدل اقلیمی MPEH5، HADCM3 و IPCM4 (تحت دو سناریوی A1 و B1) به ارزیابی تغییرات رواناب حوضه آبریز سد اکباتان در همدان تحت تأثیر تغییرات اقلیمی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دما و بارش تحت هر دو سناریوی مورد بررسی در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۵ (نسبت به دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۸۳) به

جنوب شرق مشهد بین عرض جغرافیایی شمالی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۷ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه واقع شده است. منطقه مورد مطالعه دارای مساحت ۱۶۵ کیلومتر مربع می باشد. سد طرق سدی بتنی و دو قوسی است که حجم مفید آن ۳۵ میلیون مترمکعب است. از مخزن این سد به عنوان سازه تنظیم سیلاب فصلی و همچنین برای آبیاری ۱۷۰۰ هکتار اراضی کشاورزی پایین دست سد طرق استفاده می شود. این سد در سال ۱۳۶۷ با هدف تامین حق آبه پائین دست و همچنین تامین بخشی از آب شرب شهر مشهد مورد بهره برداری قرار گرفت. رودخانه طرق مهم ترین رودخانه دائمی در بخش جنوبی مشهد است و از کوه های شمالی بینالود سرچشمه می گیرد و یکی از سرشاخه های کشف رود می باشد. رودخانه های فصلی نیز از جمله رودخانه اردمه در طول فصل زمستان و بهار که میزان بارندگی حداکثر است، جاری می شود. پوشش گیاهی حوضه شامل مراتع نیمه متراکم و متراکم، زراعت دیم، آبی و باغات است. همچنین قابل ذکر است شیب طولی رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری کرتیان ۱٫۲ درصد می باشد. موقعیت حوضه آبریز سد طرق در ایران و استان خراسان رضوی در شکل (۱) نشان داده شده است (بر اساس داده های دریافت شده از شرکت آب منطقه ای استان خراسان رضوی، ۱۳۹۵).

داده های مورد استفاده

اطلاعات و داده های به کاررفته در انجام پژوهش حاضر را، می توان به دو دسته زیر تقسیم بندی نمود:

۱- داده های مشاهداتی شامل بارش و دما (ثبت شده در ایستگاه تبخیرسنجی سد طرق)، جریان رودخانه و رسوب ورودی به مخزن سد طرق (ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری کرتیان، ورودی به سد طرق) در دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۸۰.

با توجه به داده های دریافت شده از شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، مشاهده می شود که بخش قابل توجهی از جریان رودخانه در ماه های بهمن تا خرداد در مخزن سد طرق ذخیره می شود. میزان حجم جریان ورودی به مخزن سد طرق در فصل زمستان و بهار در دوره پایه بر اساس داده های شرکت آب منطقه ای برابر ۱۶ میلیون متر مکعب می باشد.

۲- داده های استخراج شده از مدل های اقلیمی شامل بارش

و دما.

مدل های گردش عمومی (GCMs) منبع اصلی اطلاعات برای ساختن سناریوهای اقلیمی بوده و مبنای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم در مقیاس های محلی و جهانی را ایجاد می کنند.

های مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 برای منطقه ریزمقیاس شد. در ادامه داده های اقلیمی ریزمقیاس شده به مدل SWAT معرفی و تغییرات رسوب در دوره آبی و در پایه های زمانی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج سناریوی اقلیمی دما و بارش مدل HadCM3 نشان داد که در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ دمای منطقه در ماه های مختلف بین ۱/۱ تا ۲/۶ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. بارش نیز بجز در ماه های کم بارش، تغییری بین ۱۸ تا ۳۰ درصد خواهد داشت که می تواند بر مقدار کلی آورد رسوب حوزه آبخیز اثرگذار باشد. در هر سه سناریو در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ کاهش رسوب در مقایسه با رسوب مشاهداتی برای ماه های فوریه، مارس و می و افزایش رسوب برای سایر ماه های سال برآورد شد. بررسی های انجام شده نشان می دهد که فعالیت های انسان همراه با تغییرات اقلیمی باعث تغییر در چرخه هیدرولوژیکی شده و این امر خود میزان فرسایش و رسوب را در حوضه های آبخیز تحت تاثیر قرار داده است. وقوع سیل های با شدت بالا، گرما و سرماهای بی موقع، تکرار بیشتر خشکسالی ها، بالا آمدن سطح آب دریاها، کاهش ضخامت لایه ازن، گرم شدن جهانی هوا و ذوب شدن یخ های دائمی از جمله مواردی است که بحث تغییر اقلیم را در دهه جاری در جهان بیشتر مطرح کرده است. پژوهش های متعددی در زمینه تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر جریان در حوضه های مختلف در ایران انجام شده است، اما حوضه آبریز سد طرق جزو مناطقی است که به شبیه سازی جریان با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES و بررسی پدیده تغییر اقلیم با استفاده از اجرای گروهی پنج مدل اقلیمی تحت سناریوهای گزارش پنجم هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) پرداخته نشده است. همچنین پژوهش های محدودی در زمینه بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رسوب انجام شده است. از این رو در این پژوهش به شبیه سازی جریان ورودی به مخزن سد طرق با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES و همچنین بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر جریان و در نتیجه رسوب ورودی به مخزن سد طرق با استفاده از پنج مدل اقلیمی و اجرای گروهی آنها پرداخته خواهد شد. اهداف اصلی در این پژوهش عبارتند از: (۱) برآورد تغییرات جریان ورودی به مخزن سد طرق تحت تاثیر تغییرات بارش و دما (۲) برآورد تغییرات میزان رسوب ورودی به مخزن سد طرق تحت تاثیر تغییرات جریان ورودی به مخزن سد.

مواد و روش ها

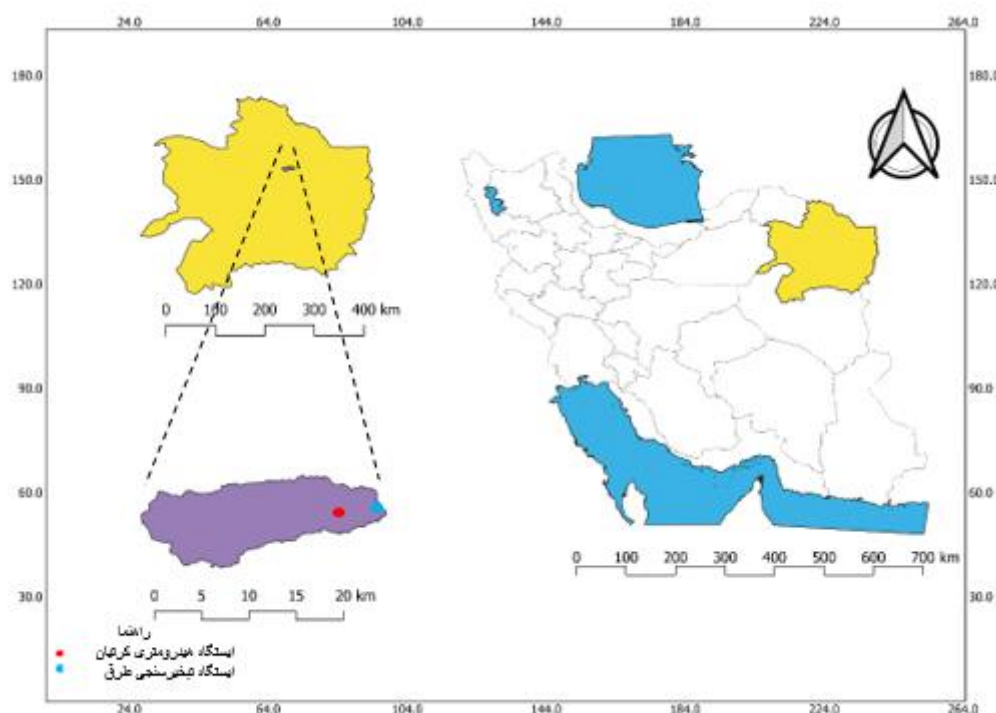
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد طرق در شمال شرق ایران و در ۲۵ کیلومتری

برای کاربر فراهم می‌کند. داده‌های دوره پایه از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۰۴ و دوره آینده از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۱۰۰ در سایت مذکور ارائه شده‌است.

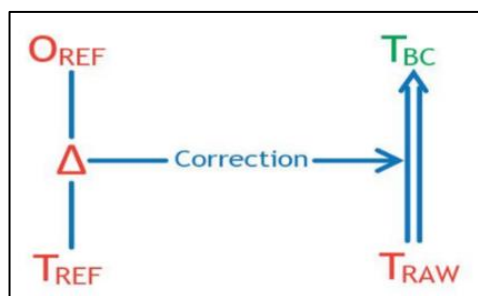
عمده‌ترین مسئله در استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی، بزرگ بودن مقیاس سلول‌های محاسباتی آن‌ها در مقایسه با منطقه مورد مطالعه و یا به عبارت دیگر کم بودن قدرت تفکیک مکانی آن‌هاست (IPCC, 1995). بنابراین لازم است خروجی آن‌ها قبل از استفاده در مطالعات تغییر اقلیم جهت تولید سناریوهای اقلیم منطقه‌ای، ریزمقیاس و اصلاح شود (Mitchell, 2003).

امروزه تهیه و استخراج داده‌های خروجی مدل‌های اقلیمی از طریق مراکز مختلف تحقیقاتی امکان‌پذیر است. یکی از مراکز ارائه‌دهنده این داده‌ها سایت CCAFS که تحت مدیریت دانشگاه Wageningen در کشور هلند است، می‌باشد. این سایت امکان استخراج داده‌های روزانه شبیه‌سازی شده توسط ۳۶ مدل گردش عمومی جفت شده جوی-اقیانوسی برای پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه، دمای متوسط، تابش خورشیدی و بارش بر اساس سناریوهای مختلف انتشار (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 و RCP8.5) را بر اساس خصوصیات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز سد طرق

تغییرات بین داده‌های مدل اقلیمی و داده‌های مشاهداتی در دوره پایه اصلاح می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- تصویر شماتیکی روش Bias correction (سایت CCAFS)

روش BC با استفاده از خروجی خام مدل برای دوره آینده

یکی از فواید سایت مذکور، اصلاح و ریزمقیاس‌نمایی خروجی ۳۶ مدل اقلیمی بوده و کاربر می‌تواند بعد از استخراج داده‌ها از سایت به طور مستقیم از آن‌ها استفاده کند. روش‌های اصلاح و ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی که توسط سایت CCAFS ارائه شده‌است، شامل موارد ذیل می‌باشد:

(۱) Bias correction (Hawkins et al, 2013)

(۲) change factor (Hawkins et al, 2013)

(۳) Quantile Mapping (Gudmundsson et al, 2012)

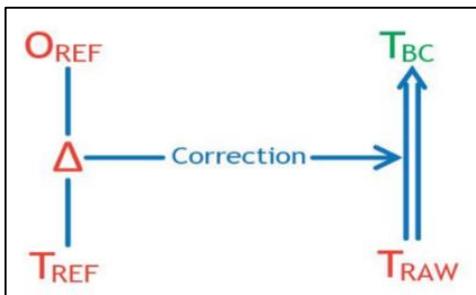
در این پژوهش روش Bias correction جهت اصلاح و ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی انتخاب شد. در روش مذکور خروجی روزانه مدل‌های اقلیمی با استفاده از میانگین و

تحت ۲ سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 جهت شبیه‌سازی داده‌ها در دوره ۲۰۷۶-۲۰۵۶ استفاده شد. داده‌های سال ۲۰۰۰-۱۹۸۰ جهت بررسی توانایی مدل‌ها و داده‌های بعد از این تاریخ جهت پیش‌بینی بارش، دما، دبی و رسوب مورد استفاده قرار گرفتند. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده‌است.

و با استفاده از اختلاف بین داده‌های مدل و داده‌های مشاهداتی در دوره پایه، داده‌ها را اصلاح می‌کند. در تصویر فوق O_{REF} داده‌های مشاهداتی در دوره پایه، T_{REF} خروجی مدل اقلیمی در دوره پایه، T_{RAW} خروجی خام مدل اقلیمی در دوره آینده و T_{BC} خروجی مدل اقلیمی اصلاح شده می‌باشد. در پژوهش حاضر از برون‌داد پنج مدل اقلیمی GFDL-ESM2M, BCC-CSM-1-1, MRI-CGCM3 و MICRO-ESM-CHEM, IPSL-CS5A-IR

جدول ۱- مشخصات مدل‌های اقلیمی

نام مدل	قدرت تفکیک (درجه)	موسسه تولیدکننده
BCC-CSM-1-1	2.8125x2.8125	Climate Center, China Meteorological Administration Beijing
GFDL-ESM2M	2.5x2.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA
IPSL-CM5A-LR	1.875 x 3.75	Institute Pierre-Simon Laplace
MIROC-ESM-CHEM	2.8125 x 2.8125	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology
MRI-CGCM3	1.125 x 1.125	Meteorological Research Institute



شکل ۲- تصویر شماتیکی روش Bias correction (سایت CCAFS)

در مورد داده‌های دبی فصل زمستان و فصل بهار تعیین شد. بر این اساس می‌توان تغییرات رسوب معلق در دوره آبی را با توجه به مقادیر برآورد شده برای دبی در دوره‌های آبی، مورد بررسی قرار داد.

به منظور بررسی پدیده تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه از خروجی ۵ مدل اقلیمی و در نهایت اجرای گروهی آن‌ها تحت دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 (واداشت تابشی به میزان ۲/۶ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰) و RCP8.5 (واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰) استفاده شد. خروجی‌های این مدل‌ها شامل دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش می‌باشند. جهت بررسی کارایی مدل‌های اقلیمی انتخاب شده، داده‌های بارش و دما حاصل از خروجی یکایک مدل‌های اقلیمی و در نهایت داده‌های حاصل از اجرای گروهی مدل‌ها با داده‌های بارش و دمای دوره پایه (ثبت شده در ایستگاه تبخیرسنجی سد طرق) مقایسه شدند. سپس جهت بررسی تغییرات دبی در دوره آبی ۲۰۷۶-۲۰۵۶، داده‌های بارش و دما حاصل از خروجی مدل‌های اقلیمی و اجرای گروهی آن‌ها تحت دو سناریوی اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آبی به عنوان ورودی مدل بارش-

اجرای گروهی مدل‌ها و یا به عبارت دیگر استفاده از چندین مدل به جای اجرای منفرد مدل‌ها جهت کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌های اقلیمی توصیه شده‌است (IPCC, 2010). تحقیقاتی در این زمینه توسط پژوهشگرانی همچون (Feng and Fu (2012) و (Semenov and Stratonovitch (2010) انجام شده که نتایج بر کاهش معنادار عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در مقایسه با استفاده از یک مدل منفرد تاکید نمودند. در پژوهش حاضر از روش وزن‌دهی یکسان جهت اجرای گروهی مدل‌های اقلیمی استفاده شده‌است.

معرفی مدل بارش-رواناب IHACRES

مدل مفهومی و نرم‌افزار IHACRES به‌طور مشترک توسط مرکز اکولوژی و هیدرولوژی والینگفورد و مرکز مدیریت و ارزیابی جامع حوضه (ICAM) وابسته به دانشگاه ملی استرالیا در کانبرا ایجاد شده‌است. هدف از ایجاد این نرم‌افزار کمک به هیدرولوژیست‌ها و مهندسی منابع آب برای تعیین رابطه دینامیکی میان بارش و جریان در یک حوضه می‌باشد. این مدل برای حوضه‌هایی با ابعاد مختلف (از ۴۹۰ متر مربع در چین تا نزدیک ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع در انگلستان) توانسته‌است فرایند بارش-رواناب را با دقت خوبی مدل‌سازی نماید.

با توجه به هدف پژوهش حاضر، ابتدا مدل IHACRES بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده بارش، دما و دبی در قسمت ورودی سد با ۷۰ درصد داده‌ها (۱۹۹۳-۱۹۸۰) واسنجی و با ۳۰ درصد باقی‌مانده (۲۰۰۰-۱۹۹۳) اعتبارسنجی شد. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی غلظت رسوب و دبی، در طول دوره آماری، مناسب‌ترین منحنی‌های منحنه رسوب

همانگونه که مشاهده می‌شود، شاخص NRMSE به شدت وابسته به شاخص RMSE می‌باشد و با توجه به اینکه شاخص NRMSE بی‌بعد می‌باشد و می‌توان دقت مدل را در مورد کمیت‌های مختلف با آن مقایسه نمود از این رو، در این پژوهش از شاخص NRMSE استفاده شده است.

$$R = \frac{\sum(X_0^t - \bar{X}_0)(X_M^t - \bar{X}_M)}{\sqrt{\sum(X_0^t - \bar{X}_0)^2} \cdot \sqrt{\sum(X_M^t - \bar{X}_M)^2}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه (۴)، X_0^t و X_M^t به ترتیب مقادیر تخمین زده شده و مشاهداتی در زمان t و \bar{X}_0 و \bar{X}_M به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و تخمین زده شده می‌باشد. مقدار شاخص ضریب همبستگی در دامنه $[-1, 1]$ تغییر می‌کند. مقدار یک نشان‌دهنده همبستگی کامل خطی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و مقدار منفی یک نشان‌دهنده همبستگی معکوس خطی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. همچنین، مقدار صفر این شاخص نشان می‌دهد که مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده هیچ‌گونه همبستگی معنادار ندارند. بنابراین، هر چه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، مقادیر شبیه‌سازی شده دارای همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی هستند و صحت نتایج بیشتر است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی جریان در دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۰) جهت شبیه‌سازی جریان در دوره پایه، بازه زمانی (۱۹۹۳-۱۹۸۰) به عنوان دوره واسنجی مدل انتخاب شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در جدول (۲) ارائه شده است. جریان شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی و نیز در کل دوره پایه در شکل (۳) نشان داده شده است.

رواناب IHACRES استخراج شدند. پس از شبیه‌سازی جریان در دوره آتی با استفاده از منحنی سنج رسوب به‌دست آمده در فصل زمستان و بهار تغییرات رسوب معلق در دوره آینده مورد بررسی قرار گرفت.

در این تحقیق به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از فرایندهای پیش‌بینی بارش و دما با استفاده از مدل‌های اقلیمی و مدل‌سازی بارش-رواناب، از شاخص‌های ارزیابی خطا شامل: راندمان نش-ساتکلیف (رابطه ۱)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (رابطه‌های ۲ و ۳) و ضریب همبستگی (رابطه ۴) استفاده شده است.

در رابطه (۱)، \bar{X}_0 میانگین مقادیر مشاهداتی متغیر مدل‌سازی شده، X_0^t و X_M^t به ترتیب مقادیر تخمین‌زده شده و مشاهداتی در زمان t برای متغیر مدل‌سازی شده است. مقدار این ضریب بین منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. مقدار بهینه این متغیر یک هست.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(X_0^t - X_M^t)^2}{\sum(X_0^t - \bar{X}_0)^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه (۲)، X_0^t و X_M^t به ترتیب مقادیر تخمین‌زده شده و مشاهداتی در زمان t و n تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار این شاخص از صفر تا مثبت بی‌نهایت تغییر می‌کند. هر چه میزان خطای مقادیر تخمین‌زده شده کمتر باشد، مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر و دقت مدل بیشتر است.

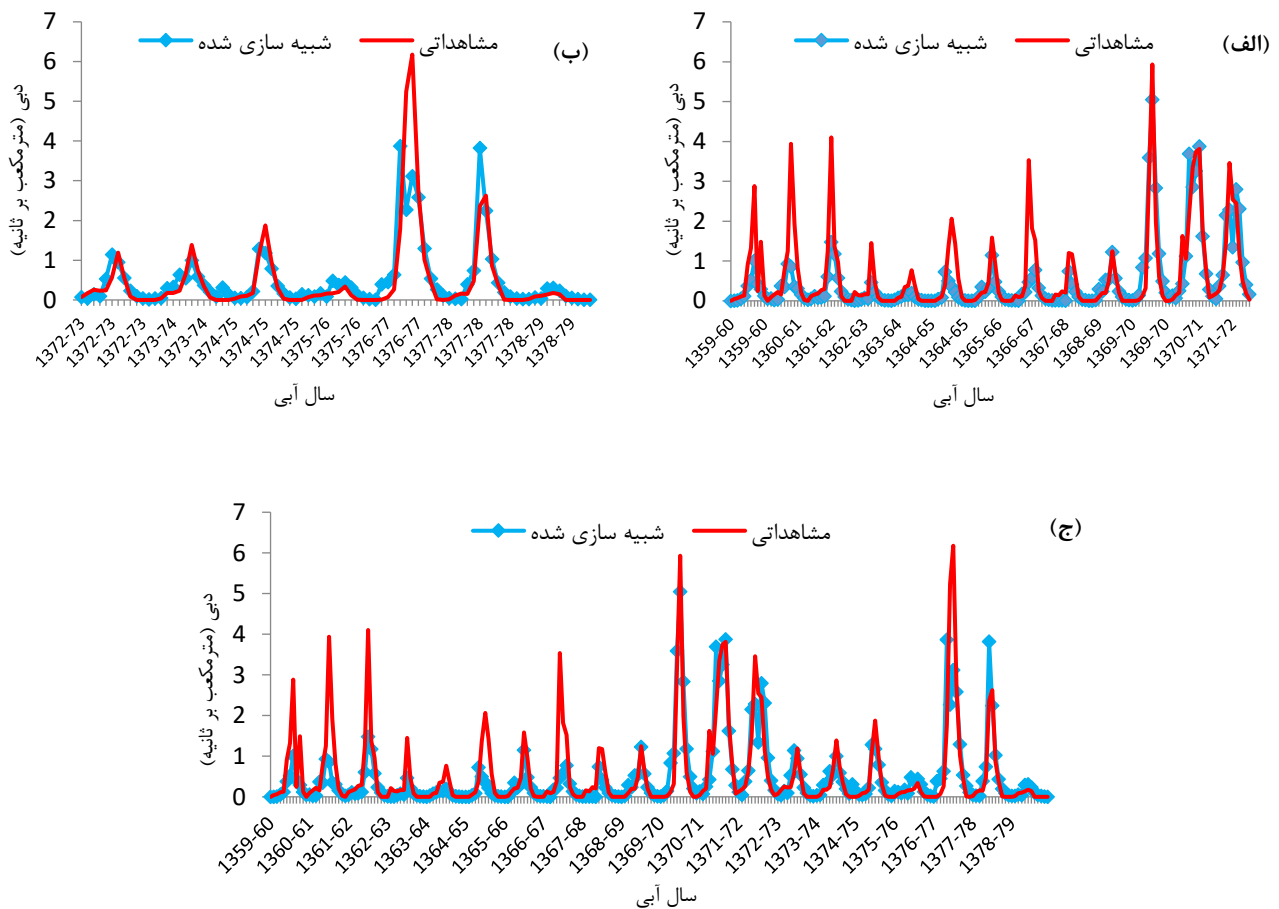
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(X_0 - X_M)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه (۳)، \bar{X}_0 میانگین مقادیر مشاهداتی متغیر مدل‌سازی شده می‌باشد. که اگر NRMSE زیر ده درصد باشد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل، ۱۰-۲۰ درصد مناسب بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد دقت متوسط و اگر بیش از ۳۰ درصد باشد نشان‌دهنده ضعیف بودن مدل است.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}_0} \quad (\text{رابطه ۳})$$

جدول ۲- ارزیابی و صحت‌سنجی مدل IHACRES در دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۰

مقدار	شاخص خطاسنجی	دوره
۰/۶۱	RMSE(m ³ /s)	واسنجی (۱۹۸۰-۱۹۹۳)
۰/۶۴	NSE	
۰/۸۱	R	
۰/۵۷	RMSE(m ³ /s)	اعتبارسنجی (۱۹۹۳-۲۰۰۰)
۰/۵	NSE	
۰/۸۵	R	



شکل ۳- الف) شبیه‌سازی جریان در دوره واسنجی، ب) شبیه‌سازی جریان در دوره اعتبارسنجی، ج) شبیه‌سازی جریان در دوره پایه

گروهی پنج مدل اقلیمی به کار رفته میزان خطاها کاهش و ضریب همبستگی و شاخص کارآیی نش-ساتکلیف افزایش می‌یابد. ضمن آنکه کمترین مقدار خطاها متعلق به پارامترهای دمای کمینه و دمای بیشینه می‌باشد.

تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره آتی (۲۰۷۶-۲۰۵۶) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۸۰)

برآورد مقادیر ماهانه پارامترهای اقلیمی شبیه‌سازی شده برای دوره آتی (۲۰۷۶-۲۰۵۶) و نحوه تغییرات آن‌ها نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۸۰) در تمامی ماه‌های سال صورت گرفته‌است. اما با توجه به اهداف تحقیق، بهتر دیده شد که ارزیابی روند این تغییرات در ماه‌هایی که جریان رودخانه و در نتیجه آن مقدار رسوب قابل توجهی وارد مخزن سد می‌شود (فصل زمستان شامل ماه‌های دی، بهمن و اسفند و فصل بهار شامل ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد) صورت گیرد. با توجه به ارزیابی مدل‌ها، جهت پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در دوره‌های آتی، از نتایج حاصل از اجرای گروهی مدل‌ها استفاده شده‌است. در شکل (۵) به ترتیب نمودارهای ماهانه پارامترهای بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و دمای متوسط شبیه‌سازی شده توسط اجرای

مقادیر بهینه پارامترهای مربوط به واسنجی مدل شامل ثابت زمانی خشکی حوضه آبریز (τ_w) و فاکتور تعدیل دما (f) با سعی و خطا در مرحله واسنجی تعیین شد.

با توجه به جدول (۲) (مقادیر پایین RMSE و مقادیر بالای NSE و R) و شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که مدل به خوبی توانسته‌است جریان در دوره پایه را شبیه‌سازی نماید.

صحت‌سنجی بارش و دمای شبیه‌سازی شده با استفاده از اجرای منفرد و گروهی مدل‌های اقلیمی منتخب

ارزیابی قابلیت مدل‌های اقلیمی استفاده شده در تحقیق حاضر، با استفاده از محاسبه شاخص‌های خطاسنجی صورت گرفته‌است.

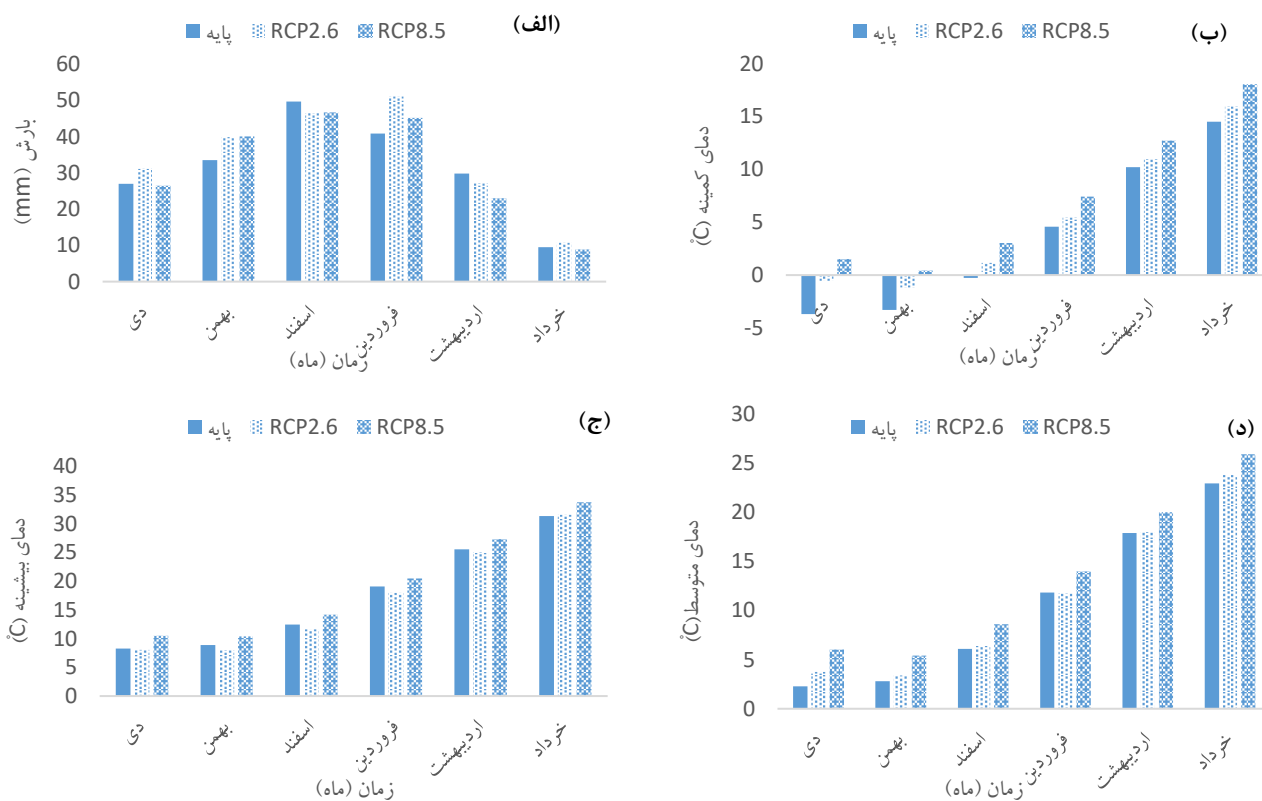
مقادیر شاخص‌های خطاسنجی و ارزیابی محاسبه شده برای پارامترهای اقلیمی در جدول (۳) ارائه شده‌است.

چنانچه در جدول (۳) مشاهده می‌شود، به‌طور کلی مقدار شاخص‌های محاسبه شده هنگامی که مدل‌ها به‌صورت گروهی اجرا شده‌اند در بازه مجاز قرار گرفته، که بیانگر انطباق نسبی و قابل قبول مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی ثبت شده در ایستگاه تبخیرسنجی سد طرق می‌باشد. بیشترین میزان خطاها در همه مدل‌ها مربوط به پارامتر بارش می‌باشد که با اجرای

گروهی مدل‌ها در دوره آتی (۲۰۵۶-۲۰۷۶) در مقایسه با مقادیر داده شده‌است. ماهانه این پارامترها در دوره پایه در ماه‌های دی تا خرداد نشان

جدول ۳- ارزیابی خطای مدل‌ها در دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۰

مدل اقلیمی	شاخص آماری	بارش	دمای کمینه	دمای بیشینه
BCC_CSM1_1	NRMSE	۰/۴۴	۰/۱۶	۰/۰۵
	NSE	۰/۷۴	۰/۹۷	۰/۹۸
	R	۰/۸۷	۰/۹۹	۰/۹۹
GFDL_ESM2M	NRMSE	۰/۳۹	۰/۰۷	۰/۰۳
	NSE	۰/۷۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	R	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۹
IPSL_CMA_IR	NRMSE	۰/۵۲	۰/۱۲	۰/۰۵
	NSE	۰/۶۳	۰/۹۸	۰/۹۸
	R	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۹۹
MICRO_ESM_CHEM	NRMSE	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۰۴
	NSE	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۹۸
	R	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹
MRI_CGCM3	NRMSE	۰/۳۲	۰/۱۳	۰/۲۵
	NSE	۰/۸۵	۰/۹۸	۰/۶۷
	R	۰/۹۴	۰/۹۹	۰/۹۹
Ensemble	NRMSE	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۰۷
	NSE	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۹۷
	R	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۹



شکل ۴- مقایسه پارامترهای اقلیمی در دوره ۲۰۵۶-۲۰۷۶ با دوره پایه به صورت ماهانه (الف) میزان بارش، (ب) میزان دمای کمینه، (ج) میزان دمای بیشینه، (د) میزان دمای متوسط

بارش بر اساس سناریوی RCP2.6 در فروردین ماه به میزان ۲۵

در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود که بیش‌ترین افزایش

۵ درجه سلسیوس در دی ماه می‌باشد. مطابق شکل (۴-ج) حداکثر افزایش دمای بیشینه تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۲۳ و ۲/۴ درجه سلسیوس در خرداد ماه رخ خواهد داد. بیشترین کاهش دما نیز تحت سناریوی RCP2.6 به میزان ۱ درجه سلسیوس در فروردین ماه می‌باشد. با توجه به اهداف این پژوهش و استفاده از دو پارامتر اقلیمی بارش و دمای متوسط، در جدول (۴) تغییرات ماهانه این دو پارامتر ارائه شده‌است.

درصد و بر اساس سناریوی RCP8.5 در بهمن ماه به میزان ۱۹ درصد نسبت به دوره پایه خواهد بود. بیشترین کاهش بارش تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۹ و ۲۳ درصد در اردیبهشت ماه خواهد بود. شکل (۴-ب) نشان‌دهنده افزایش دمای کمینه شبیه‌سازی شده با استفاده از اجرای مدل‌ها طبق هر دو سناریوی تغییر اقلیم در مقایسه با دوره پایه در تمامی ماه‌های مورد مطالعه می‌باشد. بیشترین افزایش دمای کمینه بر اساس سناریوی RCP2.6 به میزان ۳ درجه سلسیوس و بر اساس سناریوی RCP8.5 به میزان

جدول ۴- تغییرات ماهانه پارامترهای اقلیمی

ماه	پارامتر اقلیمی	سناریو	تغییرات ماهانه	ماه	پارامتر اقلیمی	سناریو	تغییرات ماهانه
دی	بارش (درصد)	RCP2.6	۲۷/۵۲	فروردین	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP2.6	-۰/۰۴
	بارش (درصد)	RCP8.5	۸/۴۰		دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP8.5	۲/۲۳
	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP2.6	-۰/۰۴		بارش (درصد)	RCP2.6	۴/۵۸
	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP8.5	۲/۲۳		بارش (درصد)	RCP8.5	-۱۱/۵۹
بهمن	بارش (درصد)	RCP2.6	۷/۳۸	اردیبهشت	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP2.6	۰/۳۱
	بارش (درصد)	RCP8.5	۷/۸۰		دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP8.5	۲/۳۴
	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP2.6	۰/۱۶		بارش (درصد)	RCP2.6	-۸/۳۴
	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP8.5	۲/۱۷		بارش (درصد)	RCP8.5	-۲۴/۰۶
اسفند	بارش (درصد)	RCP2.6	-۷/۷۶	خرداد	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP2.6	۱/۰۸
	بارش (درصد)	RCP8.5	-۷/۳۷		دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP8.5	۳/۲۰
	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP2.6	۰/۶۲				
	دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP8.5	۲/۸۳				

تغییرات دبی در دوره آتی (۲۰۷۶-۲۰۵۶) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۰) در شکل (۵) میزان دبی جریان شبیه‌سازی شده در دوره آتی (۲۰۷۶-۲۰۵۶) تحت دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۰) نشان داده شده‌است. در جدول (۶) درصد تغییرات دبی ورودی به مخزن سد طرق در مقیاس زمانی ماهانه تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 نشان داده شده‌است.

با توجه به شکل (۵) و جدول (۶)، بیشترین میزان افزایش دبی مربوط به ماه فروردین تحت سناریوی RCP2.6 بوده و بیشترین میزان کاهش دبی تحت سناریوی RCP8.5 و مربوط به ماه اسفند می‌باشد.

با توجه به جدول (۷) میزان تغییرات دبی جریان ورودی به مخزن سد طرق در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی RCP2.6 افزایش ۱۳/۶۳ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 کاهش ۲۲/۵۵ درصد را خواهد داشت.

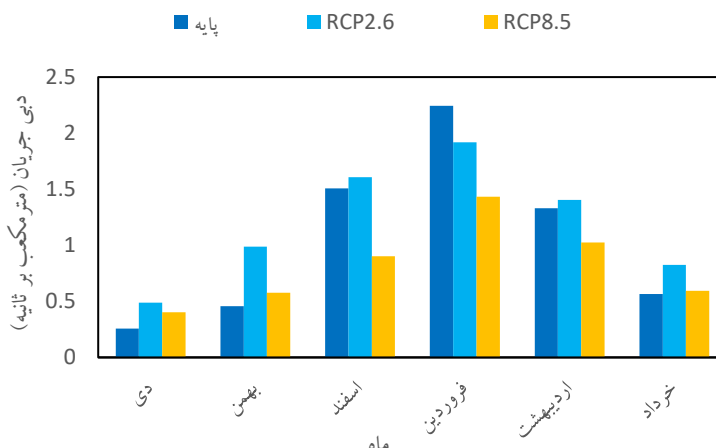
در جدول (۵) میزان تغییرات بارش (برحسب درصد) و تغییرات دمای متوسط (برحسب درجه سلسیوس) در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 ارائه شده‌است. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود میزان بارش در دوره آتی در شرایط خوشبینانه (RCP2.6) افزایش یافته و در شرایط بدبینانه (RCP8.5) دارای روندی کاهشی است. هر دو سناریو به طور مشترک روندی افزایشی را برای دمای متوسط پیش‌بینی کرده‌اند. اما شیب این افزایش تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از RCP2.6 است.

جدول ۵- تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره آتی نسبت به دوره پایه

پارامتر اقلیمی	سناریو	تغییرات سالانه
بارش (درصد)	RCP2.6	۷/۲۵
بارش (درصد)	RCP8.5	-۱/۲۴
دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP2.6	۰/۳۹
دمای متوسط (درجه سلسیوس)	RCP8.5	۲/۵۴

جدول ۶- درصد تغییرات دبی جریان در دوره آتی نسبت به دوره پایه

پارامتر	سناریو	میزان تغییرات (درصد)
دبی جریان	RCP2.6	۱۳/۶۳
	RCP8.5	-۲۲/۵۵



شکل ۵- دبی جریان در ماه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۷۶-۲۰۵۶ نسبت به دوره پایه

جدول ۷- تغییرات دبی ماهانه جریان در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت تاثیر سناریوهای مورد بررسی

تغییرات ماهانه (%)	سناریو	زمان (ماه)	تغییرات ماهانه (%)	سناریو	زمان (ماه)
-۱۴/۵۲	RCP2.6	فروردین	۸۸/۸۴	RCP2.6	دی
-۳۶/۱۵	RCP8.5		۵۵/۶۱	RCP8.5	
۵/۶۱	RCP2.6	اردیبهشت	۱۱۵/۵۰	RCP2.6	بهمن
-۲۳/۰۸	RCP8.5		۲۵/۸۸	RCP8.5	
۴۵/۸۳	RCP2.6	خرداد	۶/۵۸	RCP2.6	اسفند
۴/۷۲	RCP8.5		-۴۰/۱۷	RCP8.5	

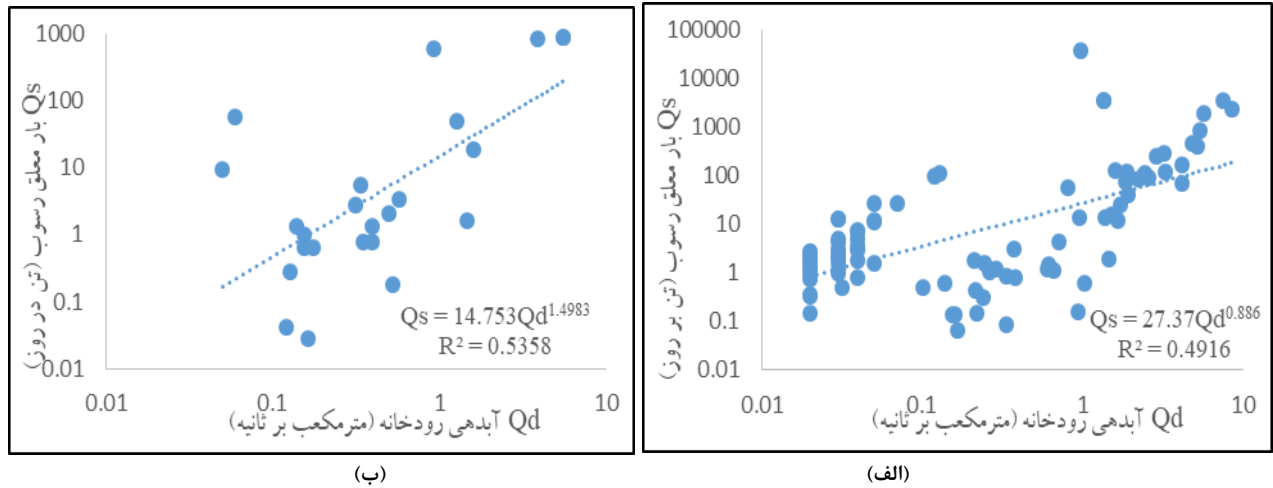
مخزن سد طرق است. با توجه به جدول (۸) میزان تغییرات سالانه بار معلق رسوب ورودی به مخزن سد طرق در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی RCP2.6 افزایشی معادل ۱۱/۵۸ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 کاهش می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت میزان رسوب معلق ورودی به مخزن سد طرق در دوره آتی تحت سناریوی RCP2.6 برابر ۴۸۶۰ تن در سال و تحت سناریوی RCP8.5 برابر ۳۲۵۳ تن در سال می‌باشد.

جدول ۸- تغییرات سالانه رسوب معلق در دوره آتی نسبت به دوره پایه

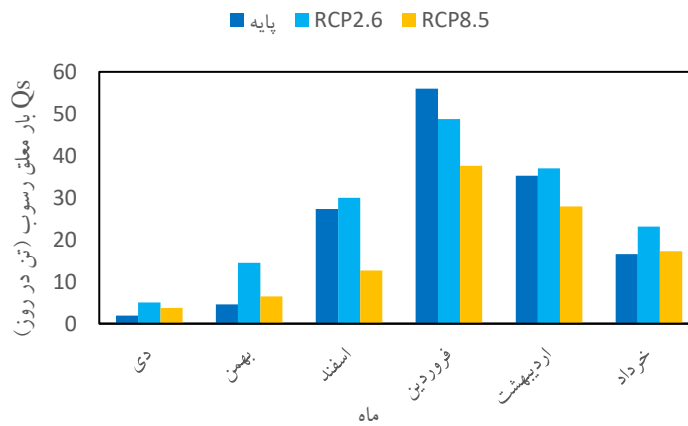
پارامتر	سناریو	میزان تغییرات سالانه
رسوب معلق (درصد)	RCP2.6	۱۱/۵۸
	RCP8.5	-۲۵/۳۲

تغییرات بار معلق رسوب ورودی به مخزن سد طرق در دوره آتی (۲۰۷۶-۲۰۵۶) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۸۰) بر اساس داده‌های بار معلق رسوب و آبدهی رودخانه در طول دوره مشاهداتی، منحنی‌های سنج رسوب در مورد فصل زمستان (شکل ۶-الف) و فصل بهار (شکل ۶-ب) تعیین شدند. پس از شبیه‌سازی جریان در دوره آتی، با استفاده از معادلات به‌دست آمده در مورد منحنی سنج رسوب در فصل‌های زمستان و بهار (فصل‌هایی که رودخانه آبدهی مناسبی داشته و جریان رودخانه در مخزن ذخیره می‌شود)، می‌توان تغییرات رسوب معلق در دوره آتی را مورد بررسی قرار داد.

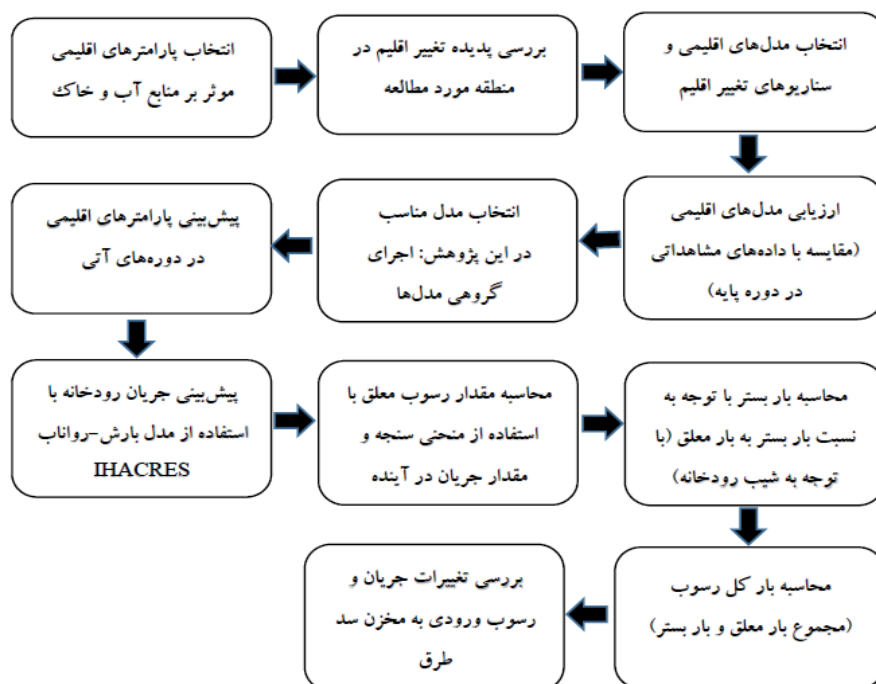
شکل (۷) میزان رسوب معلق ورودی به مخزن را در دوره آتی تحت دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 نشان می‌دهد. تغییرات رسوب معلق مشابه تغییرات جریان ورودی به



شکل ۶- منحنی سنجه رسوب (الف) فصل زمستان، (ب) فصل بهار



شکل ۷- بار معلق رسوب در ماه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۷۶-۲۰۵۶ نسبت به دوره پایه



شکل ۸- نمودار مراحل انجام پژوهش

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده اگرچه برای مقایسه نتایج پژوهش‌های مختلف، لازم است دارای شرایط نسبتاً یکسانی از نظر شرایط اقلیمی، حوضه آبریز و ... باشند، و در مورد تحقیق حاضر این امکان وجود نداشت، ولی برای اینکه از نظر کیفی و جواب‌های نرم افزار، مقایسه مناسبی

انجام شود، نتایج تحقیق حاضر با نتایج ۴ تحقیق دیگر مورد مقایسه قرار گرفت که در جدول (۹) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود روند تغییرات دما و بارش در تحقیقات مختلف مشابه می‌باشند.

جدول ۹- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام‌شده

ردیف	نویسندگان	موضوع پژوهش	مدل‌های استفاده شده	سناریوهای استفاده شده			نتایج	
				خوش‌بینانه	متوسط	بدبینانه	پارامتر بررسی شده	تغییرات نسبت به دوره پایه
۱	مطالعه حاضر	پیش‌بینی تغییرات رسوب ورودی به مخزن سد طرق در آینده تحت تاثیر پدیده تغییر اقلیم (با در نظر گرفتن فصل زمستان و بهار) دوره آتی: ۲۰۷۶-۲۰۵۶	مدل بارش-رواناب: IHACRES مدل اقلیمی: اجرای گروهی پنج مدل منتخب	RCP2.6	-	RCP8.5	دما	RCP2.6, RCP8.5: روند افزایشی
							بارش	RCP2.6: روند افزایشی RCP8.5: روند کاهش
							رواناب	RCP2.6: ۱۴ درصد افزایش RCP8.5: ۲۲ درصد کاهش
							دبی رسوب	RCP2.6: ۱۲ درصد افزایش RCP8.5: ۲۵ درصد کاهش
۲	Sohrabian et al. (2015)	بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز گالیکش دوره آتی: ۲۰۳۰-۲۰۱۱	مدل بارش-رواناب: IHACRES مدل اقلیمی: Hadcm3	B1	A1B	A2	دما	A2, A1B, B1: روند افزایشی
							بارش	A2, A1B, B1: روند کاهش
							رواناب	A2, A1B, B1: روند کاهش میزان تغییرات به ترتیب: ۰.۷/۹۴، ۶/۳۷، ۴/۴۳ درصد
							دبی رسوب	-
۳	Nazari et al (2016)	ارزیابی تغییرات رواناب حوضه آبریز سد اکباتان در همدان تحت تاثیر تغییر اقلیم دوره آتی: ۲۰۶۵-۲۰۴۵	مدل بارش-رواناب: IHACTES مدل اقلیمی: HADCM.MPEH5 3 و IPCM4	B1	-	A1	دما	A1, B1: روند افزایشی
							بارش	A1, B1: روند کاهش
							رواناب	A1, B1: روند کاهش میزان تغییرات به ترتیب: ۱۷/۲، ۱۹/۴ درصد
							دبی رسوب	-
۴	Ghazavi et al (2019)	بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی آینده بر آورد رسوب معلق حوزه آبخیز شهرکرد دوره آتی: ۲۰۶۵-۲۰۴۵	مدل هیدرولوژیکی: SWAT مدل اقلیمی: Hadcm3	B1	A1B	A2	دما	A2, A1B, B1: روند افزایشی
							بارش	A2, A1B, B1: روند افزایشی
							رواناب	-
							دبی رسوب	A2, A1B, B1: روند کاهش طی ماه‌های بهمن، اسفند و اردیبهشت
۵	Aghabeygi et al. (2020)	ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر رسوب معلق در تعدادی از حوزه‌های آبخیز استان اردبیل دوره آتی: ۲۰۳۰-۲۰۱۱	مدل بارش-رواناب: IHACTES مدل اقلیمی: LARS-WG	-	A1B	-	دما	A1B: روند افزایشی
							بارش	A1B: روند کاهش
							رواناب	A1B: روند کاهش میزان تغییرات: ۱۶ درصد
							دبی رسوب	A1B: روند کاهش میزان تغییرات: ۴۷ درصد

نتیجه‌گیری

MICRO-ESM-CHEM, IPSL-CS5A-IR.GFDL-ESM2M, MRI-CGCM3 و اجرای آن‌ها تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره آتی ۲۰۷۶-۲۰۵۶ استفاده شد. کارایی هر یک از مدل‌های اقلیمی و اجرای گروهی آن‌ها، با مقایسه مقادیر

در پژوهش حاضر تغییرات مقدار رسوب ورودی به مخزن سد طرق تحت تاثیر پدیده تغییر اقلیم پیش‌بینی شد. جهت بررسی پدیده تغییر اقلیم از برون‌داد پنج مدل اقلیمی BCC-CSM-1-

۲۰۷۶-۲۰۵۶ تحت دو سناریوی تغییر اقلیم استفاده شد. نتایج نشان داد تغییرات رواناب ورودی تحت تاثیر تغییرات دما و بارش در دوره آتی تحت سناریوی RCP2.6 به میزان ۱۴ درصد افزایش یافته و تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۲۲ درصد کاهش می‌یابد که نتایج بدست آمده تحت سناریوی RCP8.5 با دستاورد پژوهش‌های (Sohrabian et al. (2015)، (Ghorbani et al. (2016) و (Nazari et al. (2016) مطابقت دارد.

جهت پیش‌بینی تغییرات زمانی رسوب معلق از منحنی سنج رسوب استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی رسوب در دوره آتی نشان داد که به طور متوسط با گذشت زمان، تحت سناریوی RCP2.6 میزان رسوب تحت تأثیر تغییرات پارامترهای اقلیمی و رواناب، ۱۲ درصد افزایش یافته و تحت سناریوی RCP8.5 رسوب ورودی به مخزن به ترتیب حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد که نتایج حاصل تحت سناریوی RCP8.5 با نتایج حاصل از پژوهش (Ghazavi et al. (2019) مطابقت دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Adem, A.A., Tilahun, S.A., Ayana, E.K., Worqlul, A.W., Assefa, T.T., Dessu, S.B., & Melesse, A.M. (2016). Climate Change Impact on Sediment Yield in the Upper Gilgel Abay Catchment, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Springer International Publishing Switzerland*, 615-644.
- Chiew, F.H.S., Whetton, P.H., McMahon, T.A., & Pittock, A.B. (1995). Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 167, 121-147.
- Ghorbani, Kh., Sohrabian, E., Salarijazi, M., & Abdolhoseini, M. (2016). Prediction of climate change impact on monthly river discharge trend using IHACRES hydrological model (case study: Galikesh watershed). *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 5(4), 19-34. (In Farsi)
- Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3383-3390.
- Feng, J., Fu, C. (2012). A multi-ensemble of regional climate simulation from RMIP for Asia. Report of key laboratory of regional climate-environment for east Asia. START regional center for temperature east Asia. *Institute of Atmospheric Physics (CAS)*, 1-38.
- Ghazavi, R., Ghafari, A., & Dokhani, S. (2018). Modelling the Future Impacts of Climate Change on Watershed Suspended Sediment Transport. *Journal of Watershed Management Research*, 10, 271-283.
- Hawkins, E., Osborne, T.M., Kit Ho, Ch., & Challinor, A.J. (2013). Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 19-31.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., & Maskell, K. (1995). The Science of Climate Change. *Contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 588 p.
- Li, Zh., Huang, G., Wang, X., Han, J., & Fan, Y. (2016). Impact of future Climate change on river discharge based on hydrological inference: A case study of the Grand River Watershed in Ontario, Canada. *Science of The Total Environment*, 548-549, 198-210.
- Mitchell, T.D. (2003). Pattern Scaling: An Examination of Accuracy of the Technique for Describing Future Climates. *Climatic Change*, 60, 217-242.
- Mosaffaie, J. (2016). Application of artificial neural network, multiple-regression and index-flood techniques in regional flood frequency estimation. *International Journal of Water*, 10(4), 328-342.
- Nazari, P., Kardavany, H., Farajirad, P., & Abdolreza, A. (2016). Assessment of Runoff Changes under Climate Change Scenarios in the Dam Basin of Ekbatan, Hamedan Iran. *Journal of Climatology and Weather Forecasting*, 4 (2), 1-10.
- Semenov, M., Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41: 1-14.
- Sohrabian, E., Meftah halghi, M., Ghorbani, Kh., Golian, S., & Zakerinia, M. (2015). Effects of

مدل شده و مشاهده شده ارزیابی شد. در بررسی نتایج آماره‌های محاسبه شده برای اجرای منفرد هر یک از مدل‌ها و اجرای گروهی آن‌ها مشاهده شد که اجرای گروهی مدل‌ها می‌تواند باعث افزایش دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی و یا به عبارت دیگر کاهش عدم قطعیت‌های مربوطه در مقایسه با استفاده از تنها یک مدل، شود که این نتایج با دستاورد پژوهش‌های (Feng and Fu (2012) و (Semenov and Stratonovitch (2010) منطبق می‌باشد. میزان بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی RCP2.6 دارای روندی افزایشی و تحت سناریوی RCP8.5 دارای روندی کاهشی است. با توجه به نتایج بدست آمده میزان دمای متوسط در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم دارای روندی افزایشی می‌باشد. جهت شبیه‌سازی جریان ماهانه از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان ماهانه در منطقه مورد مطالعه دارد. همچنین از مدل بارش-رواناب IHACRES جهت پیش‌بینی رواناب ورودی به مخزن سد طرق در دوره آتی

- climate change on the discharge basin hydrology model (case study: Galikesh Watershed in Golestan). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(2), 111-125. (In Farsi)
- Stocker, T., Dahe, Q., Plattner, G., Tignor, M., & Midgley, P. (2010). IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. *National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado, USA*, 115 p.
- Vardian, F., Shahedi, K., Habibnezhad Roshan, M., & Zarei, M. (2014). Evaluation of rainfall-runoff IHACRES model to simulate daily and monthly streamflow in Navroud catchment, Guilan province. *Iranian Water Research Journal*, 8(15), 229-233. (In Farsi)
- Zare, M., Mohammady, M., & Pradhan, B. (2017). Modeling the effect of land use climate change scenarios on future soil loss rate in kasilian watershed of northern Iran. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 76, 1-15.
- Zarei, M., Ghanbarpour, M.R., Habibnezhad Roshan, M., & Shahedi, K. (2009). Stream flow simulation using IHACRES Rainfall-Runoff model (case study: Kasilian cathment). *Iranian Journal of watershed management science and engineering*, 3(8), 11-20. (In Farsi)