

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره سه، خرداد ماه ۹۹

رفتار جریان ورودی به سد سیمره در مواجهه با اثرات تغییر اقلیم

محمدرضا گودرزی^{*۱}

goodarzi6mr@gmail.com

حامد واقعی^۲

میررحیم موسوی^۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۸

چکیده

زمینه و هدف: اهمیت حفظ محیط زیست سبب شده است تا کشورهای مختلف از منابع تجدیدپذیر و پاک در تولید برق بهره ببرند. این امر توسعه نیروگاه‌های برق‌آبی در نقاط مختلف دنیا را به دنبال داشته است. در ایران هم طرح‌های برق‌آبی مختلفی وجود دارد که طرح سد و نیروگاه سیمره یکی از آن‌ها به‌شمار می‌آید. از آنجا که پدیده‌ی تغییر اقلیم می‌تواند سبب بروز تغییرات در شرایط هیدرولوژیکی مناطق مختلف و به تبع آن عملکرد طرح‌های آبی شود، این پژوهش تلاش می‌کند تا به بررسی اثرات این پدیده بر رفتار جریان ورودی به سد سیمره بپردازد.

روش بررسی: شرایط اقلیمی در دوره‌ی آتی (۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹) برای منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از مدل HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 و نیز مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به روش ریزمقیاس‌نمایی آماری (مدل SDSM) پیش‌بینی شده است. همچنین این پژوهش از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه استفاده می‌کند.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان‌دهنده‌ی افزایش دمای منطقه در دوره‌ی آتی برای سناریوهای مختلف است، به طوری که بیش‌ترین میزان افزایش دماهای بیشینه و کمینه مربوط به سناریوی RCP8.5 و به ترتیب در حدود ۱/۲ و ۱/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. همچنین پیش‌بینی می‌شود میزان بارش متوسط سالانه‌ی منطقه کاهش یابد. ارزیابی جریان شبیه‌سازی‌شده‌ی رودخانه نیز نشان می‌دهد که میزان جریان ورودی به سد سیمره در دوره‌ی آتی حدود ۵/۲ تا ۱۳/۴ درصد کاهش خواهد داشت.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان‌دهنده‌ی اهمیت و ضرورت در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم در طراحی سازه‌های آبی مهم، نظیر سد و نیروگاه‌های برق‌آبی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، مدل هیدرولوژیکی، سد سیمره.

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه پلی‌تکنیک تورین، تورین، ایتالیا.

۳- استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌ا. بروجردی ره.

The Behavior of Inflow to the Seimareh Dam in the Face of Climate Change Impacts

Mohammadreza Goodarzi^{1*}

goodarzi6mr@gmail.com

Hamed Vagheei²

Mirrahim Mousavi³

Admission Date: May 3, 2017

Date Received: November 6, 2016

Abstract

Background and Objective: The importance of environment protection has caused different countries benefit from renewable and clean sources to generate electricity. This has led to the development of hydropower plants around the world. Also, there are different hydroelectric projects in Iran that the Seimareh Dam & Hydropower Plant is amongst them. Since climate change can alter the hydrologic conditions of different areas and the performance of hydraulic structures, this study aims to examine the impacts of this phenomenon on the inflow to the Seimareh Dam.

Method: Climate conditions in the future period (2040 to 2069) are predicted for the study area using HadCM3 model under A2 and B2 scenarios as well as CanESM2 model under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios by the Statistical DownScaling Method (SDSM model). Also, this study uses HEC-HMS hydrologic model to simulate river flow.

Findings: The results of the present study show that temperature of the area increases in the future period to different scenarios, in such a way that the highest amount of increase for maximum and minimum temperature in the future period has been predicted for RCP8.5 respectively about 1.2 and 1.3 Centigrade. It is predicted that the mean annual amount of rainfall will reduce as well. Also, the assessment of simulated river flow shows that inflow to the Seimareh Dam will decrease about 5.2 to 13.4 percent in the future period.

Discussion and Conclusion: The results of the present study show the importance and necessity of considering the climate change impacts in designing important hydraulic structures such as dams and hydropower plants.

Key words: Climate change, Downscaling, Hydrological model, Seimareh Dam.

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. * (Corresponding Author)

2- Ph.D Student in Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Torino, Turin, Italy.

3- Assistant Professor, Department of Engineering, Ayatollah Ozma Borujerdi University, Borujerd, Iran.

مقدمه

۲۱۰۰ بررسی شد و نتایج به دست آمده، به ترتیب کاهش ۱۴، ۱۸ و ۱۷ درصدی در سه دوره را نشان می‌دهد (۹). Fowler و همکاران در سال ۲۰۰۷ نیز به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب شمال غرب انگلستان پرداختند. نتایج این مطالعه کاهش ۱۸ درصدی منابع آب منطقه در دوره‌ی زمانی ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ را نشان می‌دهد (۱۰). Abbaspour و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی جامع اثرات تغییر اقلیم در کشور ایران پرداختند. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن بود که مناطق خشک کشور، بارش‌های کم‌تر و مناطق مرطوب، بارش‌های بیش‌تر را دریافت می‌کنند (۱۱). در مطالعه‌ی دیگری به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رژیم‌های رواناب در قسمت‌های جنوبی منطقه‌ی آلپ پرداخته شد و پیش‌بینی گردید که حجم رواناب سالانه‌ی رودخانه‌ی Oglio در سال ۲۰۵۰ کاهش ۷ درصدی و در سال ۲۰۹۰ کاهش ۱۳ درصدی را تجربه خواهد کرد. همچنین رواناب سالانه‌ی حوضه‌ی Lys، کاهش ۳ درصدی در سال ۲۰۵۰ و کاهش ۱۴ درصدی در پایان قرن را تجربه خواهد کرد (۱۲). در پژوهش دیگری به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سیلاب حوضه‌ی بختیاری پرداخته شد. نتیجه‌ی شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌ی آتی، کاهش بارش و افزایش حداکثر و حداقل دما بوده است. در مجموع در حوضه به‌طور میانگین تا ۲۰ درصد کاهش بارش مشاهده شد و دمای حداکثر و حداقل به ترتیب با ۱/۵ و ۱ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش پیش‌بینی شدند (۲). Zahabiyoun و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر حوضه‌ی آبریز قره‌سو پرداختند، نتایج این مطالعه نشان داد که دما در اکثر ماه‌ها با افزایش مواجه خواهد شد. همچنین تغییرات بارش بین ۳۰- تا ۳۰+ درصد و تغییرات رواناب تولیدی در دوره‌ی آتی برای ماه‌های مختلف بین ۹۰- تا ۱۲۰+ درصد خواهد بود (۱۳). تحقیقی به‌منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌ی گرگان‌رود انجام شد و پیش‌بینی گردید که برای دوره‌ی زمانی ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ مقدار بارندگی سالانه‌ی حوضه به میزان ۳/۲ تا ۶/۷ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین بررسی نتیجه‌ی تغییرات اقلیمی در بخش آب، کاهش مقدار رواناب سطحی حوضه به میزان ۰/۴ تا ۷/۷ درصد را نشان می‌دهد (۱۴).

طبق گزارش هیات بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ انتشار گازهای گل‌خانه‌ای ناشی از فعالیت انسان با رشد قابل‌توجه اقتصاد و جمعیت، افزایش یافته است (۱). پدیده‌ی تغییر اقلیم که ناشی از افزایش غلظت گازهای گل‌خانه‌ای، به‌ویژه گاز دی‌اکسیدکربن در جو می‌باشد، بر سیستم‌های مختلفی تأثیرگذار می‌باشد که سیستم منابع آب از اصلی‌ترین آن‌ها است، بنابراین این پدیده می‌تواند به‌عنوان عمده‌ترین چالش بشر در دوره‌های آتی قلمداد گردد (۲). افزایش دمای سطح زمین و تغییر در الگوهای بارندگی، پدیده‌های قالب در تغییر اقلیم می‌باشند که این دو تقریباً تمام بخش‌های دیگر چرخه‌ی آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۳). نتایج بررسی‌های جهانی حاکی از آن است که گرمایش جهانی، موجب بحرانی‌تر شدن شرایط منابع آب در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان می‌شود (۴). در سال‌های اخیر وقوع خشک‌سالی‌های متعدد در ایران خطری بسیار جدی برای منابع آب محسوب می‌شود و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب ایران ضروری به‌نظر می‌رسد (۵). پیامدهای پدیده‌ی تغییر اقلیم سبب شده است تا تحقیقات گسترده‌ای پیرامون بررسی اثرات این پدیده بر شرایط هیدرولوژیکی و منابع آب حوضه‌های آبریز نقاط مختلف دنیا انجام شود. در مطالعه‌ای که بر روی رودخانه‌ی میزوری آمریکا صورت گرفت، مشخص شد که تغییر اقلیم موجب کاهش جریان رودخانه به میزان ۶ تا ۳۴ درصد خواهد شد (۶). Nearing و Pruski در سال ۲۰۰۲ اثر تغییر رژیم بارندگی بر رواناب هشت منطقه در ایالات متحده‌ی آمریکا را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که تغییرات میزان بارندگی سالانه حدود ۹/۶- تا ۱۰/۶ درصد و تغییرات میزان رواناب حدود ۲۴/۵- تا ۴۱ درصد می‌باشد (۷). Rosenberg و همکاران در سال ۲۰۰۳ تأثیرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی ۱۸ منطقه‌ی مهم در آمریکا را بررسی نموده و پیش‌بینی کردند که آب‌دهی دوره‌ی آتی در مقایسه با دوره‌ی پایه به میزان ۱۱- تا ۱۵۳ درصد در سال ۲۰۳۰ و ۲۸ تا ۳۴۲ درصد در سال ۲۰۹۵ تغییر داشته‌باشد (۸). در تحقیق دیگری اثرات تغییر اقلیم بر حوضه‌ی آبریز کلرادو در سه دوره‌ی ۳۰ ساله، از سال ۲۰۱۰ تا

1- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

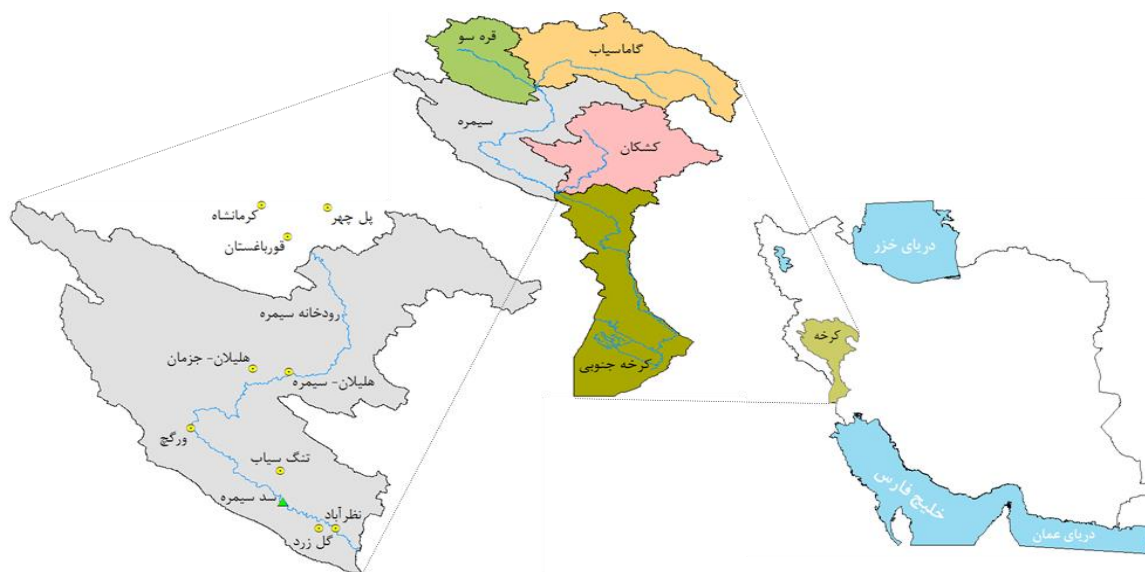
روش تحقیق

منطقه‌ی مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

حوضه‌ی آبریز کرخه به مساحت ۵۰۷۶۴ کیلومتر مربع در غرب کشور قرار دارد و شامل پنج زیرحوضه‌ی گاماسیاب، قره‌سو، سیمره، کشکان و کرخه‌ی جنوبی می‌باشد. در سیمای توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز کرخه سدهای متعددی با هدف اصلی برقی‌آبی، کشاورزی و همچنین سامانه‌های انتقال آب تعریف شده‌است (۱۳). سد سیمره در شمال‌غربی خوزستان و در محدوده‌ی استان ایلام به فاصله‌ی حدود ۴۰ کیلومتری شمال‌غربی دره‌شهر و در ۱۰۶ کیلومتری جنوب‌شرقی ایلام واقع است. مختصات جغرافیایی آن به طول شرقی ۱۲' ۴۷° و عرض شمالی ۱۷' ۳۳° می‌باشد. این طرح بر روی یکی از شاخه‌های رودخانه‌ی کرخه به نام رودخانه‌ی سیمره در تنگه‌ای به نام کفه‌نیلا واقع است. رود سیمره از به‌هم‌پیوستن رودخانه‌های قره‌سو و گاماسیاب تشکیل شده‌است و مهم‌ترین شاخه‌های فرعی آن چرداول و شیروان می‌باشند. شکل (۱) موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه، سد سیمره و ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و دما را نشان می‌دهد.

بدون شک هدف از احداث طرح‌های آبی رساندن این پروژه‌ها به سوددهی در آینده می‌باشد. یکی از عوامل مهم که می‌تواند توسعه‌ی این طرح‌ها را با مشکل مواجه کند، پدیده‌ی تغییر اقلیم است. در واقع این پدیده پس از اثرگذاری روی شرایط هیدرولوژیکی مناطق مختلف، عملکرد طرح‌های آبی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. این در حالی است که متأسفانه در ایران و در زمان طراحی چنین پروژه‌های مهمی به پدیده‌ی تغییر اقلیم توجهی نمی‌شود. از این رو در پژوهش حاضر سعی شده‌است به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر جریان ورودی به سد سیمره در دوره‌ی آتی (۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹) پرداخته شود تا با استفاده از نتایج آن بتوان اهمیت و ضرورت در نظر گرفتن اثرات این پدیده در طراحی و نگهداری طرح‌های آبی را بیان کرد. یکی از مسایل مهم در مدل‌سازی‌های اقلیمی، مسأله‌ی عدم قطعیت سناریوهای انتشار و مدل‌های اقلیمی است. به‌همین جهت در این پژوهش سعی شده‌است که با استفاده از سناریوهای انتشار مختلف و چندین مدل گردش عمومی به مسأله‌ی عدم قطعیت سناریوهای انتشار و مدل‌های اقلیمی نیز توجه کافی شود. در مطالعاتی که پیش از این پیرامون این پدیده صورت گرفته، از سناریوهای انتشار قدیمی استفاده شده‌است. اما در این پژوهش علاوه بر استفاده از سناریوهای قدیمی، از جدیدترین سناریوهای انتشار (RCP^۱) که هیات بین‌الدول تغییر اقلیم به تازگی آن‌ها را طراحی کرده نیز استفاده شده‌است.

1- Representative Concentration Pathway (RCP)



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی، سد سیمره و ایستگاه‌ها

Figure 1. Location of study area, Seimareh Dam, and stations

آماری که در ادامه به آن‌ها اشاره شده‌است، بررسی شود تا پژوهش با دقت قابل قبول انجام گیرد. داده‌های مربوط به آبدهی رودخانه در محل سد سیمره نیز از شرکت مه‌هاب‌قدس تهیه گردیده‌است.

در این پژوهش از داده‌های روزانه‌ی بارش و دمای چندین ایستگاه استفاده شده‌است که جدول (۱) اطلاعات مختلف این ایستگاه‌ها را ارائه می‌دهد. پیش‌بینی بارش و دما برای هر ایستگاه بر اساس داده‌های دوره‌ی مشاهداتی انجام می‌گیرد. احتمال مدل‌سازی ضعیف در ایستگاه‌های فاقد داده‌های ۳۰ ساله سبب شد تا دقت مدل‌سازی ایستگاه‌ها با چندین شاخص

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و دما

Table 1. Information of precipitation and temperature stations

ایستگاه	نوع داده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	دوره	منبع داده
پل چهر	بارش	"۰۰' ۲۶° ۴۷	"۰۰' ۲۰° ۳۴	۱۳۰۶	۱۹۷۱-۲۰۰۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
قورباغستان	بارش	"۰۰' ۱۵° ۴۷	"۰۰' ۱۴° ۳۴	۱۳۰۰	۱۹۷۱-۲۰۰۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
هلیلان-سیمره	بارش و دما	"۰۰' ۱۵° ۴۷	"۰۰' ۴۴° ۳۳	۹۰۰	۱۹۸۹-۲۰۰۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
هلیلان-جزمان	بارش	"۰۰' ۰۶° ۴۷	"۰۰' ۴۶° ۳۳	۹۵۰	۱۹۷۵-۱۹۹۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
تنگ سیاب	بارش	"۲۳' ۱۲° ۴۷	"۲۵' ۲۳° ۳۳	۸۸۰	۱۹۸۳-۲۰۰۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
گل زرد	بارش	"۳۶' ۲۱° ۴۷	"۰۱' ۱۱° ۳۳	۶۸۰	۱۹۹۱-۲۰۰۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
نظرآباد	بارش	"۰۳' ۲۶° ۴۷	"۲۱' ۱۰° ۳۳	۵۵۹	۱۹۸۳-۲۰۰۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
ورگج	بارش	"۰۹' ۴۹° ۴۶	"۲۱' ۳۳° ۳۳	۷۸۳	۱۹۹۲-۲۰۰۰	شرکت مدیریت منابع آب ایران
کرمانشاه	دما	"۰۰' ۰۹° ۴۷	"۰۰' ۲۱° ۳۴	۱۳۱۸/۶	۱۹۷۱-۲۰۰۰	سازمان هواشناسی کشور

مدل‌های گردش عمومی

پیش‌بینی اقلیم آینده به مدل‌های عددی کامپیوتری که به مدل‌های گردش عمومی معروف می‌باشند و اقلیم زمین را شبیه‌سازی می‌کنند، متکی است. مطالعات مدل‌سازی اقلیم در دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی سراسر دنیا انجام می‌شود که هیات بین‌الدول تغییر اقلیم، با همکاری صدها دانشمند و با حمایت سازمان هواشناسی جهانی و برنامه‌ی محیطی سازمان ملل متحد، آن‌ها را در ارزیابی و خلاصه‌سازی مطالعات جهانی در زمینه‌ی تغییر اقلیم، هدایت می‌کند (۱۵). طبق توصیه‌ی هیات بین‌الدول تغییر اقلیم؛ معتبرترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی فرآیندهای موجود در یک سیستم اقلیمی، براساس افزایش گازهای گل‌خانه‌ای طراحی شده‌اند. این مدل‌ها در چند دهه‌ی اخیر با افزایش قدرت رایانه‌ها توسعه‌ی چشم‌گیری یافته‌اند (۱۶ و ۱۷). در این پژوهش سه مدل گردش عمومی CanESM2، CGCM3 و HadCM3 مورد بررسی قرار گرفت. مدل HadCM3 در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس و مدل CanESM2 و CGCM3 توسط مرکز مدل‌سازی و آنالیز اقلیم کانادا طراحی و توسعه یافته‌است. پس از بررسی مدل‌ها توسط شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)^۱، کارایی نش-ساتکلیف (NSE)^۲ و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)^۳، در نهایت دو مدل HadCM3 و CanESM2 که مطابقت بیشتری با منطقه داشتند، برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

سناریوهای انتشار

هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در گزارشات خود از سناریوهای انتشار مختلفی استفاده می‌کند. SRES^۴ نام اختصاری گزارش ویژه‌ای است که توسط این هیات در سال ۲۰۰۰ منتشر شد. سناریوهای انتشار گازهای گل‌خانه‌ای که در گزارش مذکور آمده‌است، برای ارزیابی تصویری از تغییر اقلیم آینده‌ی کره‌ی زمین استفاده می‌شود. این سناریوها در گزارش‌های سوم و

چهارم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم که به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ چاپ شدند مورد استفاده قرار گرفتند. سناریوهای A2 و B2 که در این پژوهش استفاده شده‌اند از این نوع سناریوهای انتشار می‌باشند. سناریوی A2 جهان بسیار ناهمگونی را توصیف می‌کند و توسعه‌ی اقتصادی اصولاً منطقه‌ای و سرانه‌ی رشد اقتصادی و تغییرات فناورانه در مقایسه با سایر سناریوها کندتر می‌باشد. در این سناریو کشورها به‌طور مستقل عمل کرده و به خود متکی هستند، جمعیت دنیا به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد و توسعه‌ی اقتصادی منطقه‌محور است. در سناریوی B2 دنیا همانند سناریوی A2 واگرا بوده، با این تفاوت که دوست‌دار محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود. در این سناریو جمعیت به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، اما سرعت رشد آن نسبت به A2 کم‌تر است، همچنین در این سناریو بر راه‌حل‌های محلی به‌جای در نظر داشتن راه‌حل‌های جهانی برای ثبات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تأکید می‌شود و توسعه‌ی اقتصادی نیز در حد متوسط است (۱۸). هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم خود از سناریوهای جدید RCP به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گل‌خانه‌ای استفاده کرده‌است. سناریوهای جدید دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 هستند که می‌توانند براساس میزان واداشت تابشی^۵، سطح تکنولوژی و وضعیت اجتماعی و اقتصادی منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گل‌خانه‌ای و تغییرات اقلیمی گردند. این سناریوها، سال‌های ۱۸۵۰ تا پایان قرن ۲۱ را پوشش می‌دهند و همچنین تا سال ۲۳۰۰ فرموله شده‌اند. سناریوهای RCP با احتمال تغییرات وسیع در فعالیت‌های انسانی و انتشار گازهای گل‌خانه‌ای در آینده همراه می‌باشند (۱۹). این سناریوها بر اساس نتایج حاصل از برخی فراسنج‌های اجتماعی-اقتصادی، تکنولوژیکی و همچنین میزان غلظت برخی گازها برای دهه‌های آینده طراحی شده‌اند. در سناریوی RCP8.5 میزان غلظت

- 1- Coefficient of determination (R^2)
- 2- Nash & Sutcliffe Efficiency (NSE)
- 3- Root Mean Square Error (RMSE)
- 4- Special Report on Emissions Scenarios (SRES)

5- Radiative Forcing

مدل هیدرولوژیکی

وارد شدن رایانه‌های دیجیتال در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی به دنیای علم هیدرولوژی باعث شد که بسیاری از مسایل پیچیده را بتوان به صورت مدل درآورده و جواب مورد نظر را به دست آورد. در این پژوهش از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شده است. مدل HMS در سال ۱۹۹۸ توسط بخش هیدرولوژی ارتش آمریکا به بازار عرضه شد و هر سال قابلیت جدیدی به آن اضافه می‌شود (۲۴). این مدل یک مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب می‌باشد، در واقع این مدل قادر است پس از دریافت داده‌های بارش و اعمال یک سری تنظیمات مربوط به منطقه مطالعاتی، رواناب تولیدی حوضه را شبیه‌سازی کند. به منظور تعیین میزان رواناب ورودی به سد سیمره، بارش روزانه‌ی ایستگاه‌های منتخب به عنوان داده‌های ورودی در این مدل هیدرولوژیکی لحاظ شد و از رابطه‌ی هارگریوز-سامانی^۳ جهت تعیین میزان تبخیر-تعرق منطقه استفاده گردید. همچنین در این تحقیق از روش هیدروگراف واحد کلارک جهت محاسبه‌ی رواناب و از روش SMA^۴ جهت محاسبه‌ی تلفات استفاده شده است. روش SMA قادر است تغییرات مقدار رطوبت خاک را بین رویدادهای بارندگی در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی کند و با استفاده از یک سری لایه‌های ذخیره‌کننده به صورتی که در شکل (۲) نشان داده شده است، حوضه‌ی آبریز را معرفی نماید.

دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰، به مقدار ۱۳۷۰ ppmv تخمین زده می‌شود، این در حالی است که این میزان غلظت برای سناریوهای RCP6.0, RCP4.5 و RCP2.6 تا سال ۲۱۰۰، به ترتیب به مقدار ۸۵۰، ۶۵۰ و ۴۹۰ ppmv تخمین زده شده است (۲۰). در این پژوهش از سناریوهای RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5 نیز استفاده شده است.

ریزمقیاس‌نمایی

خروجی مدل‌های گردش عمومی به دو روش آماری و دینامیکی ریزمقیاس‌نمایی می‌گردند. در این تحقیق از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM^۱ استفاده شده است. مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM از ابزارهای کمکی برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم محلی می‌باشد، که توسط Wilby و همکاران در سال ۲۰۰۲ توسعه یافت (۲۱). این مدل برای ارزیابی ارتباط بین متغیرهای ریزمقیاس محلی و متغیرهای بزرگ‌مقیاس اتمسفری از داده‌های مستقل مشاهداتی استفاده می‌کند. در ابتدا به منظور واسنجی و ارزیابی مدل، متغیرهای بزرگ‌مقیاس منطقه‌ی مطالعاتی در مقیاس روزانه در دوره‌ی مشاهداتی (متغیرهای حاصل از NCEP^۲) به عنوان متغیرهای مستقل؛ و بارندگی و دماهای بیشینه و کمینه‌ی روزانه‌ی مشاهداتی، به عنوان متغیرهای وابسته به طور جداگانه وارد مدل شده و سپس نتایج به دست آمده از مدل با مقادیر مشاهده شده، مقایسه و نحوه‌ی عملکرد مدل ارزیابی می‌شود. با استفاده از نتایج به دست آمده در دوره‌ی تنظیم مدل و داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل‌های گردش عمومی، سناریوهای بارش و دمای منطقه برای دو دوره‌ی مشاهداتی و آتی تولید می‌شود که با استفاده از آن‌ها می‌توان به تخمین تغییرات اقلیمی در منطقه‌ی مورد مطالعه پرداخت (۲۲ و ۲۳).

3- Hargreaves-Samani

4- Soil Moisture Accounting (SMA)

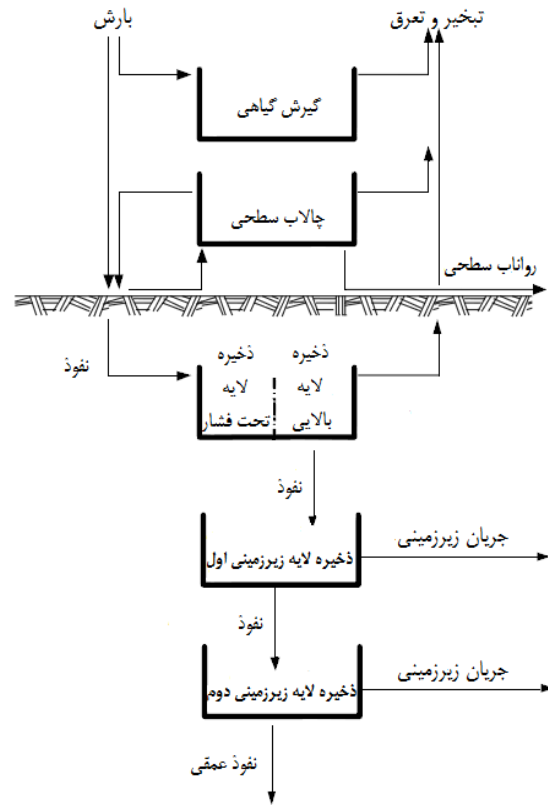
1- Statistical DownScaling Model (SDSM)

2- National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

HadCM3 و CanESM2 که مطابقت بیش‌تری با داده‌های دوره‌ی مشاهداتی داشتند، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین نامطلوب‌بودن نتایج شبیه‌سازی ایستگاه‌های هلیلان-جزمان، گل زرد و ورگچ سبب شد تا از استفاده‌کردن از این ایستگاه‌ها صرف‌نظر شود.

پیش‌بینی دمای آینده

در این پژوهش بررسی دمای آینده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از ایستگاه‌های کرمانشاه و هلیلان-سیمره انجام گرفته‌است. جدول (۲) وضعیت دمای پیشینه‌ی این ایستگاه‌ها را در دوره‌های مشاهداتی و آتی ارایه می‌کند. همان‌طور که از این جدول مشخص است، دمای پیشینه برای همه‌ی سناریوها افزایش داشته‌است. کم‌ترین میزان افزایش دمای پیشینه به مقدار ۰/۲ درجه‌ی سانتی‌گراد مربوط به مدل CanESM2 با سناریوی انتشار RCP2.6 برای ایستگاه کرمانشاه، و بیش‌ترین میزان افزایش دمای پیشینه به مقدار ۱/۲ درجه‌ی سانتی‌گراد مربوط به مدل CanESM2 با سناریوی انتشار RCP8.5 برای ایستگاه هلیلان-سیمره است. در جدول (۳) نیز وضعیت دمای کمینه‌ی این ایستگاه‌ها ارایه شده‌است. دمای کمینه‌ی هر دو ایستگاه نیز در دوره‌ی آتی افزایش داشته‌است؛ کم‌ترین میزان افزایش دمای کمینه به مقدار ۰/۲ درجه‌ی سانتی‌گراد مربوط به مدل CanESM2 با سناریوی انتشار RCP2.6 برای ایستگاه کرمانشاه، و بیش‌ترین میزان افزایش دمای کمینه به مقدار ۱/۳ مربوط به مدل CanESM2 با سناریوی انتشار RCP8.5 برای ایستگاه هلیلان-سیمره است.



شکل ۲- الگوریتم کاری مدل SMA (۲۵)

Figure 2. Conceptual schematic of the SMA algorithm (25)

نتایج و تحلیل نتایج

عملکرد مدل SDSM

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق برای ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی از مدل SDSM استفاده شده‌است. به‌منظور بررسی میزان مطابقت داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی با داده‌های دوره‌ی مشاهداتی از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، کارایی‌نش-ساتکلیف (NSE) و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده‌است. پس از بررسی مقادیر شاخص‌های آماری مذکور و به‌منظور رسیدن به نتایج مطلوب، دو مدل

جدول ۲- میانگین دمای پیشینه‌ی سالانه‌ی ایستگاه‌ها در دوره‌های مشاهداتی و آتی (درجه‌ی سانتی‌گراد)

Table 2. The mean annual maximum temperature of stations in the base and future periods (°C)

دورهی آتی										دورهی مشاهداتی	ایستگاه
HadCM3				CanESM2							
A2		B2		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5			
۲۳/۵	+۱	۲۳/۲	+۰/۷	۲۲/۷	+۰/۲	۲۳/۳	+۰/۸	۲۳/۵	+۱	۲۲/۵	کرمانشاه
۲۷/۳	+۱	۲۷/۱	+۰/۸	۲۶/۶	+۰/۳	۲۷/۱	+۰/۸	۲۷/۵	+۱/۲	۲۶/۳	هلیلان-سیمره

جدول ۳- میانگین دمای کمینهی سالانهی ایستگاهها در دورههای مشاهداتی و آتی (درجهی سانتی گراد)

Table 3. The mean annual minimum temperature of stations in the base and future periods (°C)

دورهی آتی										دورهی مشاهداتی	ایستگاه
HadCM3				CanESM2							
A2		B2		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5			
۷	+۰/۹	۶/۸	+۰/۷	۶/۳	+۰/۲	۷	+۰/۹	۷/۲	+۱/۱	۶/۱	کرمانشاه
۱۰/۶	+۱/۱	۱۰/۳	+۰/۸	۹/۹	+۰/۴	۱۰/۶	+۱/۱	۱۰/۸	+۱/۳	۹/۵	هلیلان-سیمره

تصویرسازی بارش آینده

تحت سناریوی انتشار RCP2.6 بدون تغییر مانده است و بقیه‌ی حالات برای کلیه‌ی ایستگاهها، کاهش میزان بارش را نشان می‌دهند. بررسی وضعیت بارش در دورهی آتی نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان کاهش بارش به مقدار ۱۵/۹ درصد مربوط به ایستگاه تنگ‌سیاب می‌باشد.

بررسی وضعیت بارش آینده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از ۵ ایستگاه پل‌چهر، قورباغستان، هلیلان-سیمره، تنگ‌سیاب و نظرآباد انجام گرفته است. جدول (۴) میزان بارش را برای این ایستگاهها در دورههای مشاهداتی و آتی نشان می‌دهد. با دقت در اطلاعات جدول مشخص می‌گردد که میزان بارش در دورهی آتی فقط برای ایستگاه هلیلان و به‌ازای مدل CanESM2

جدول ۴- میانگین بارش سالانهی ایستگاهها در دورههای مشاهداتی و آتی (میلی‌متر)

Table 4. The mean annual precipitation of stations in the observation and future periods (mm)

دورهی آتی										دورهی مشاهداتی	ایستگاه
HadCM3				CanESM2							
A2		B2		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5			
۳۷۲/۶	-۸/۱٪	۳۸۴/۷	-۵/۱٪	۴۰۱/۱	-۱٪	۳۷۰/۱	-۸/۷٪	۳۶۱	-۱۰/۹٪	۴۰۵/۲	پل‌چهر
۳۶۶/۴	-۷/۹٪	۳۸۲/۹	-۳/۸٪	۳۸۵/۱	-۳/۲٪	۳۶۷/۵	-۷/۶٪	۳۵۲/۲	-۱۱/۵٪	۳۹۷/۹	قورباغستان
۳۳۷/۲	-۳/۸٪	۳۴۵/۶	-۱/۴٪	۳۵۰/۵	-	۳۳۹/۴	-۳/۲٪	۳۲۴/۸	-۷/۳٪	۳۵۰/۵	هلیلان- سیمره
۳۶۶/۱	-۱۴/۳٪	۳۸۱/۷	-۱۰/۶٪	۴۰۳/۳	-۵/۶٪	۳۷۳/۴	-۱۲/۶٪	۳۵۹/۲	-۱۵/۹٪	۴۲۷/۱	تنگ‌سیاب
۳۳۲/۹	-۶/۴٪	۳۴۲/۴	-۳/۷٪	۳۴۷/۵	-۲/۳٪	۳۳۶/۹	-۵/۲٪	۳۳۰	-۷/۲٪	۳۵۵/۵	نظرآباد

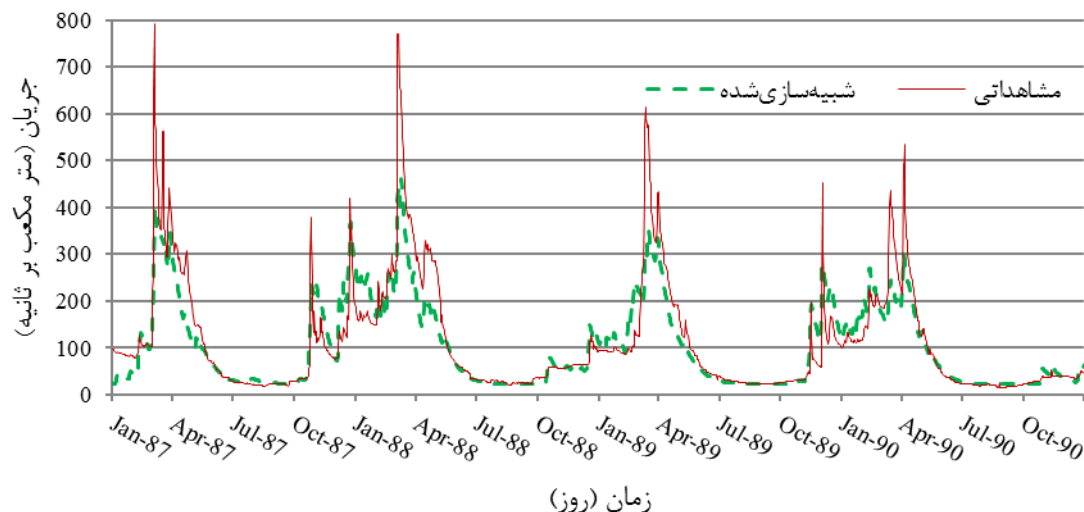
گرفته شده است. به منظور مقایسه‌ی جریان شبیه‌سازی شده با جریان مشاهداتی از دو شاخص ضریب تعیین و کارایی نش-ساتکلیف استفاده شده است. مقدار این دو شاخص برای شبیه‌سازی جریان روزانه در جدول (۵) ارائه شده است. شکل‌های (۳) و (۴) نیز نشان‌دهنده‌ی نتایج واسنجی و ارزیابی مدل می‌باشند.

به منظور تعیین میزان رواناب ورودی به سد سیمره، بارش روزانه‌ی ایستگاه‌های منتخب به‌عنوان داده‌های ورودی در مدل هیدرولوژیکی لحاظ شد و از رابطه‌ی هارگریوز-سامانی جهت تعیین میزان تبخیر-تعرق منطقه استفاده گردید. در این شبیه‌سازی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۰ به‌عنوان دوره‌ی واسنجی و سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۶ به‌عنوان دوره‌ی ارزیابی در نظر

جدول ۵- نتایج واسنجی و ارزیابی مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی جریان روزانه‌ی ورودی به سد سیمره

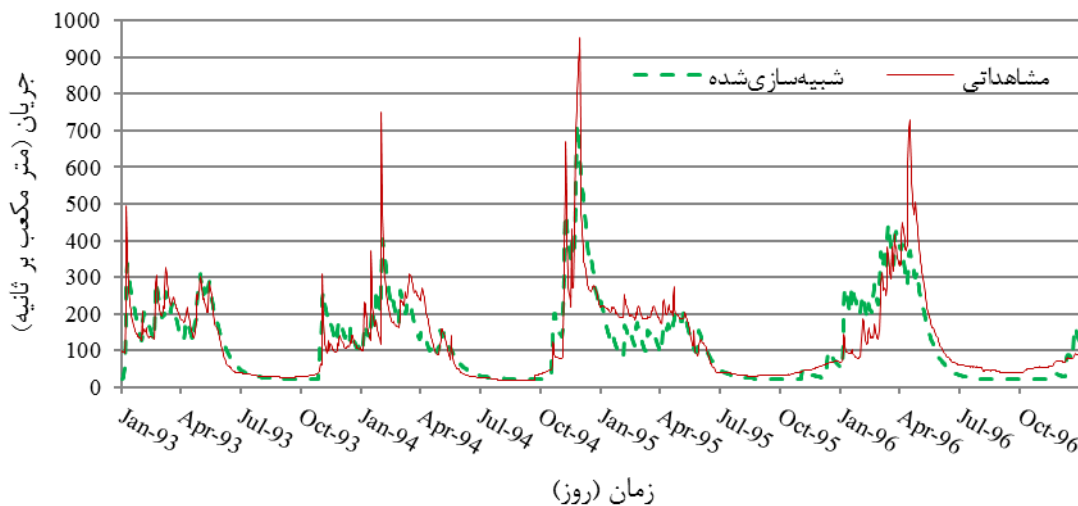
Table 5. The results of calibration and validation of the HEC-HMS model for simulating the daily inflow to Seimareh Dam

دوره‌ی ارزیابی (۱۹۹۳-۱۹۹۶)		دوره‌ی واسنجی (۱۹۸۷-۱۹۹۰)		شاخص
NSE	R ²	NSE	R ²	
۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۸۱	مقدار



شکل ۳- نتایج واسنجی مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی جریان روزانه‌ی ورودی به سد سیمره (۱۹۸۷-۱۹۹۰)

Figure 3. The results of calibration of the HEC-HMS model for simulating the daily inflow to Seimareh Dam (1987-1990)



شکل ۴- نتایج ارزیابی مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی جریان روزانه‌ی ورودی به سد سیمره (۱۹۹۳-۱۹۹۶)

Figure 4. The results of validation of the HEC-HMS model for simulating the daily inflow to Seimareh Dam (1993-1996)

تصویرسازی دبی آینده

مشخص می‌گردد که جریان رودخانه در دوره‌ی آتی به‌ازای کلیه‌ی مدل‌ها و سناریوها با کاهش مواجه خواهد شد و بیش‌ترین میزان کاهش جریان رودخانه مربوط به مدل CanESM2 با سناریوی انتشار RCP8.5 می‌باشد.

جریان رودخانه‌ی سیمره در دوره‌ی آتی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS شبیه‌سازی شد. جدول (۶) جریان متوسط سالانه‌ی رودخانه‌ی سیمره را در محل سد سیمره برای دوره‌ی مشاهداتی ۵۰ ساله (۱۹۵۶ تا ۲۰۰۵) و دوره‌ی آتی (۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹) نشان می‌دهد. با دقت در جدول

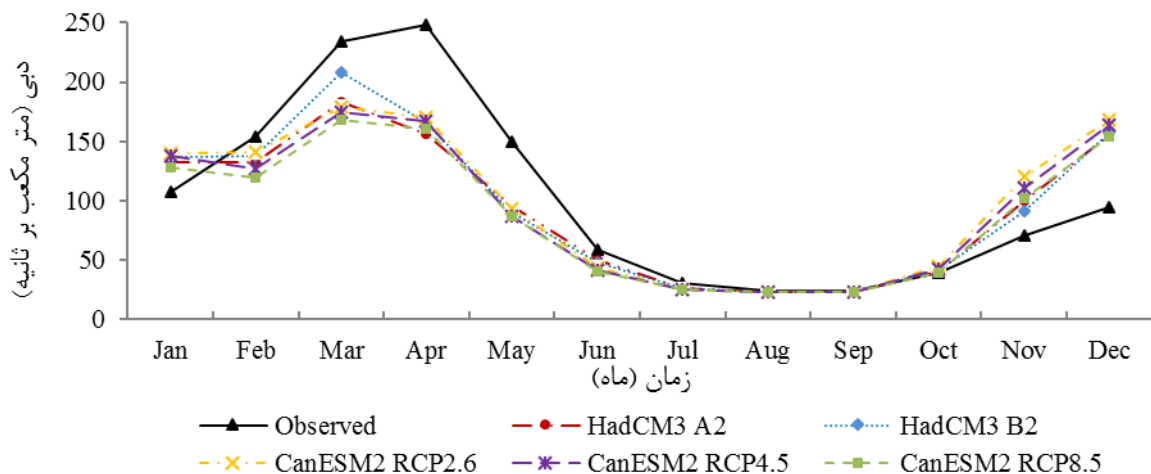
جدول ۶- میانگین جریان سالانه‌ی ورودی به سد سیمره در دوره‌ی مشاهداتی ۵۰ ساله و دوره‌ی آتی (متر مکعب بر ثانیه)

Table 6. The mean annual inflow to Seimareh Dam in the 50-year observation and future periods (m³/s)

دوره آتی										دوره مشاهداتی
HadCM3				CanESM2						
A2		B2		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5		
۹۳	-۹/۵٪	۹۵/۶	-۷/۰٪	۹۷/۵	-۵/۲٪	۹۳/۴	-۹/۱٪	۸۹	-۱۳/۴٪	۱۰۲/۸

طول ماه‌های نوامبر تا ژانویه (اواسط پاییز تا اواسط زمستان) با افزایش و در طول ماه‌های فوریه تا ژوئن (اواسط زمستان تا اوایل تابستان) با کاهش روبه‌رو خواهد شد. همچنین میزان جریان در طول ماه‌های جولای تا اکتبر (اوایل تابستان تا اواسط پاییز) تغییر محسوسی نخواهد داشت.

شکل (۵) نیز جریان ماهانه‌ی رودخانه‌ی سیمره را در محل سد سیمره نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشخص می‌شود که الگوی جریان رودخانه در دوره‌ی آتی نسبت به دوره‌ی مشاهداتی ۵۰ ساله در برخی از ماه‌های سال با تغییراتی مواجه خواهد شد، به‌طوری‌که میزان جریان ورودی به سد سیمره در



شکل ۵- میانگین جریان ماهانه‌ی ورودی به سد سیمره در دوره‌ی مشاهداتی ۵۰ ساله و دوره‌ی آتی

Figure 5. The mean monthly inflow to Seimareh Dam in the 50-year observation and future periods

خلاصه و جمع‌بندی

می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که پدیده‌ی تغییر اقلیم با اثر گذاشتن بر ابعاد مختلف هیدرولوژی منطقه در نهایت بر عملکرد طرح‌های مهم آبی تأثیر خواهد گذاشت، پس می‌بایست در طراحی و نگهداری طرح‌های آبی مختلف به مساله‌ی پدیده‌ی تغییر اقلیم توجه کافی شود؛ زیرا ارزیابی نحوه‌ی اثرگذاری تغییر اقلیم بر منابع آب مناطق مختلف می‌تواند برای توسعه‌ی پایدار هر پروژه‌ی استفاده‌کننده از منابع آب، به‌خصوص طرح‌های مهم نظیر سد و نیروگاه‌های برق آبی در بلند مدت مهم باشد و عملکرد مطلوب‌تر این طرح‌ها را سبب شود.

Reference

1. IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core writing team, Pachauri RK, Meyer LA (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.
2. Hajarizadeh, Z., Fattahi, E., Massah Bavani, A., Naserzadeh, M.H., 2012. Assessing the impacts of climate change on flood hydrograph in future

در این پژوهش آثار ناشی از پدیده‌ی تغییر اقلیم بر رفتار جریان ورودی به سد سیمره با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM بر اساس مدل HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 و نیز مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌ی آتی (۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که اثرات تغییر اقلیم، متغیرهای هیدرولوژیکی در منطقه‌ی مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار خواهد داد. تجزیه و تحلیل داده‌های دما نشان از افزایش دما در دوره‌ی آتی تحت همه‌ی سناریوهای انتشار می‌باشد. همچنین بررسی میانگین بارش سالانه در دوره‌ی آتی تحت سناریوهای مختلف، کاهش میزان بارش را نسبت به دوره‌ی مشاهداتی نشان می‌دهد. بررسی جریان رودخانه در محل سد سیمره برای دوره‌ی آتی تحت سناریوهای مختلف نیز روند کاهشی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که براساس سناریوی RCP8.5، میزان جریان ورودی به سد سیمره در دوره‌ی آتی نسبت به دوره‌ی مشاهداتی ۵۰ ساله (۱۹۵۶ تا ۲۰۰۵) حدود ۱۳/۴ درصد کاهش می‌یابد. پژوهش حاضر ضمن بیان اهمیت اثرات بالقوه‌ی تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی منطقه لزوم توجه به بحث تغییر اقلیم و پیامدهای آن را در مدیریت منابع آب متذکر

- irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 117: 73-96.
9. Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N., Lettenmaier, O., Palmer, R.N., 2004. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Journal of Climate Change* 62: 337-363.
 10. Fowler, H.J., Kilsby, C.G., Stunell, J., 2007. Modeling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences* 11: 1115-1126.
 11. Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S., Yang, H., 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Journal of Water Resources Research* 45, W10434.
 12. Barontini, S., Grossi, G., Kouwen, N., Maran, S., Scaroni, P., Ranzi, R., 2009. Impacts of climate change scenarios on runoff regimes in the Southern Alps. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences* 6: 3089-3141.
 13. Zahabiyoun, B., Goodarzi, M.R., Massah Bavani, A.R., Azamathulla, H.M., 2013. Assessment of climate change impact on the Gharehou river basin using SWAT hydrological model. *Journal of CLEAN – Soil, Air, Water* 41: 601-609.
 14. Azari, M., Moradi, H.R., Saghafian, B., Faramarzi, M., 2013. Assessment of hydrological effects of climate change in Gorganroud river basin. *Journal of Water and Soil* 27(3): 537-547. (In Persian)
 - periods (case study: Bakhtiari basin). *Journal of Geography (Iranian Geographical Association)* 10(34): 5-24. (In Persian)
 3. Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P., 2007. Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western U.S. *Journal of Water Resources Research* 43, W06427.
 4. IPCC 2007. *Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core writing team, Pachauri RK, Reisinger A, (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104p.
 5. Sanikhani, H., Dinpajoh, Y., Pour Yusef, S., Ghavidel, S.Z., Solati, B., 2014. The impacts of climate change on runoff in watersheds (case study: Ajichay watershed in East Azerbaijan province, Iran). *Journal of Water and Soil* 27(6): 1225-1234. (In Persian)
 6. Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F., Stakhiv, E.Z., 1999. Water resources implications of global warming: a U.S. regional perspective. *Journal of Climatic Change* 43: 537-579.
 7. Pruski, F.F., Nearing, M.A., 2002. Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: A computer simulation study. *Journal of Soil and Water Conservation* 57: 7-16.
 8. Rosenberg, N.J., Brown, R.A., Izaurralde, R.C., Thomson, A.M., 2003. Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: I. Climate change scenarios and impacts on

- (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1029-1136.
20. Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M., Van Vuuren, D.P.P., 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Journal of Climatic Change* 109: 213–241.
 21. Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M., 2002. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Journal of Environmental Modelling & Software* 17: 145–157.
 22. Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R., 2012. Coupling statistical and dynamical methods for spatial downscaling of precipitation. *Journal of Climate Change* 114: 509-526.
 23. Wilby, R.L., Dawson, C.W., 2013. The Statistical DownScaling Model: insights from one decade of application. *International Journal of Climatology* 33: 1707-1719.
 24. Alizadeh, A., 2011. Principles of applied hydrology, 32th ed. Imam Reza University, Mashhad.(In Persian)
 25. HEC 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif, 157p.
 15. Khazanehdari, L., Koochi, M., Ghandhari, Sh., Asiaei, M., 2012. Climate change: causes, effects and solutions, 2nd ed. Papoli, Mashhad. (In Persian)
 16. Flato, G.M., Boer, G.J., 2001. Warming asymmetry in climate change simulations. *Journal of Geophysical Research Letters* 28: 195-198.
 17. Wilby, R.L., Charles, S., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L.O., 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Technical report, Data Distribution Center of the IPCC, 27p.
 18. IPCC 2000. IPCC special report emissions scenarios. A special report of IPCC working group III, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, 27 p.
 19. Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M., 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xi Y, Bex V, Midgley PM,