

Investigating the Effect of Climate Change Based on Different Scenarios on the Runoff and Inflow to Nahand Dam Reservoir

M Salimi¹, M Sattari^{2*}, J Parsa³

Received: November 11, 2022

Accepted: February 12, 2023

Revised: February 5, 2023

Published online: December 22, 2023

1-M.Sc., Dept. of Water Sci. and Engin. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.

2-Associ. Prof. Dept. of Water Sci. and Engin. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.

3-Assist. Prof. Dept. of Water Sci. and Engin. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.

*Corresponding Author, Email: mtsattar@gmail.com

Abstract

Background and Objectives

The industrialization of societies and increasing greenhouse gases have caused climate change and seriously threatened human life. Change in rainfall is one of the essential effects of climate change. Changes in precipitation have affected surface runoff and underground water sources; water resources management becomes more complex and complicated in such conditions. The most reliable tool for investigating the effects of climate change on different systems is the use of climate variables simulated by coupled atmosphere-ocean general circulation models. These models can simulate climate parameters (temperature, precipitation) for future periods. Nevertheless, the main weakness of these models is their low spatial resolution and the simplifications they consider for climate processes. Microscale exponentials are used to cover the weakness of spatial resolution. In this research, the climate was investigated using the fifth report of the International Panel on Climate Change and the CanESM2 model and the application of the SDSM model. This research aims to investigate the effect of climate change on the temperature and precipitation of the Nahand Basin and its effect on the runoff entering the Nahand dam.

Methodology

In this research, the daily temperature and precipitation data of the Nahand basin in the period (1981-2005) were used as the base period to generate climate parameters (temperature and precipitation) using the CanESM2 climate model and RCPs release scenarios in future periods. Furthermore, for the exponential microscale, SDSM statistical model was used. Microscale statistical methods are based on creating a link between surface observations and atmospheric variables such as geopotential height, temperature, and humidity in the base period. By establishing a suitable statistical relationship between predicting and predicted variables, it is possible to achieve suitable relationships for predicting climate variables in future periods under the influence of the climate change phenomenon. The SDSM model is a multivariate regression model for climate data generation using statistical microscale methods developed by Wilby and Dawson in 2002. Nahand dam is one of the drinking water sources of Tabriz. Therefore, determining the incoming runoff to the tank can help in the optimal management of the system and decision-making by the relevant managers. To simulate the runoff entering the reservoir in future periods, IHACRES integrated conceptual model was used for rainfall-runoff simulation. The main goal of the IHACRES model is to determine the hydrological behavior of the basin using a small number of parameters. This model includes two parts (modules) interconnected, nonlinear and linear. In the nonlinear part, the observed precipitation is converted into adequate precipitation with the help of the station temperature. In the linear part, adequate precipitation is converted into flow.

Findings



Based on the results of the temperature assessment in both the near future (2021-2060) and the far future (2061-2100) and under all emission scenarios, it is increasing, and the temperature increase in the far future is more than soon. The lowest and highest temperature increase is related to the RCP 2.6 scenario soon, a period

of 0.17°C, and the RCP 8.5 scenario in the far future period to the extent of 1.01°C compared to the base period (1981-2005). By examining the trend of changes in the average precipitation in the coming periods, it can be seen that the precipitation, contrary to the temperature, is decreasing in all scenarios, so that the lowest and the highest decrease, respectively, related to the RCP 2.6 scenario in the future period is close to 7.23 mm and The RCP 4.5 scenario will be 25.77 mm in the far future period compared to the base period. The runoff will decrease in future periods under all scenarios. The lowest and highest decrease in the order of the near future (2021-2060) under the RCP 2.6 scenario is 0.08 m³s⁻¹ (8.51%), and the far future (2061-2100) under the RCP 4.5 scenario is 0.08 m³ s⁻¹ It is 0.18 (19.15%).

Conclusion

In this research, the climate change of future cycles was evaluated using the CanESM2 climate model and the exponential microscale of the SDSM model. The SDSM model evaluation shows that this model has simulated temperature and precipitation well in the base period. The results indicate an increase in temperature in all scenarios in the future, and the increase in the distant future (2061-2100) will be more significant than soon (2021-2060). Also, precipitation will decrease in both future periods under all scenarios. The results of the study of the effect of climate change on the runoff entering the Nahand dam show that the runoff will decrease under the influence of this phenomenon.

Keywords: Climate change, Exponential microscale SDSM, IHACRES precipitation-runoff model, Nahand Dam, Runoff.

بررسی اثر تغییر اقلیم بر اساس سناریوهای مختلف بر رواناب و جریان ورودی به مخزن سد نهند

محسن سلیمی^۱، محمدتقی ستاری^{۲*}، جواد پارسا^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mtsattar@gmail.com

چکیده

صنعتی شدن جوامع و افزایش روز افزون گازهای گلخانه‌ای باعث تغییر اقلیم شده و به صورت جدی زندگی بشر را تهدید می‌کند. تغییر در میزان بارش یکی از اثرات مهم تغییر اقلیم است. تغییر در بارش بر روی رواناب‌های سطحی و منابع آب زیرزمینی تأثیر گذاشته و در چنین شرایطی مدیریت منابع آب به مراتب سخت‌تر و پیچیده‌تر می‌شود. در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد نهند با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) و گزارش پنجم (AR5) هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) با مدل اقلیمی CanESM2 تحت سناریوهای انتشار RCPs مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به کمک مدل بارش-رواناب IHACRES با استفاده از داده‌های دما، بارش و رواناب رودخانه نهند به ارزیابی اثر مستقیم تغییر اقلیم بر روی پارامترهای اقلیمی دما و بارش و تأثیر غیرمستقیم آن‌ها بر روی رواناب ورودی به مخزن سد نهند در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) پرداخته شد. براساس نتایج، به‌طور کلی میانگین دما در هر دو دوره آینده افزایش خواهد یافت، به‌طوری که تحت سناریوی RCP 8.5 تا $1/01^{\circ}\text{C}$ افزایش دما را تا سال ۲۱۰۰ شاهد خواهیم بود و میانگین بارش نیز براساس تمامی سناریوها کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل از شبیه-سازی رواناب در دوره‌های آتی نشان می‌دهد که در هر دو دوره آتی رواناب تحت تمامی سناریوهای انتشار کاهش خواهد یافت، به‌طوری که متوسط رواناب سالانه ورودی به مخزن سد نهند تا سال ۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه (۲۰۰۱-۲۰۱۴) از ۸٪/۵ تحت سناریوی RCP 2.6 تا ۱۹/۱۵٪ تحت سناریوی RCP 4.5، با کاهش روبه‌رو خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس نمایی SDSM، رواناب، سد نهند، مدل بارش-رواناب IHACRES.

مقدمه

(۲۰۱۰). بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه در چند دهه اخیر نشان می‌دهد که تغییر اقلیم تاثیر قابل توجهی بر وضعیت بارش و دما و پارامترهای متاثر از آنها همچون رواناب داشته است (جوان و همکاران ۲۰۱۳، اونیل و همکاران ۲۰۱۷، میو و همکاران ۲۰۲۰).

معتبرترین ابزار برای بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر سامانه‌های مختلف، استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی جفت شده جوی-اقیانوسی (AOGCM)^۱ است (غریب‌دوست و همکاران ۲۰۱۷). این مدل‌ها قادرند پارامترهای جوی و اقیانوسی را برای یک دوره بلندمدت با استفاده از سناریوهای تایید شده هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم مدل‌سازی نمایند (میچل ۲۰۰۳). اما ضعف عمده این مدل‌ها قدرت تفکیک مکانی کم و نیز ساده‌سازی‌هایی است که برای فرآیندهای اقلیمی در نظر می‌گیرند (ویبلی و همکاران ۱۹۹۹). برای پوشش ضعف قدرت تفکیک پایین، لازم است که خروجی این مدل‌ها قبل از استفاده در تحقیقات بررسی اثرات تغییر اقلیم، ریزمقیاس شوند (جانسون و همکاران ۱۹۹۶). یکی از روش‌های ریزمقیاس‌سازی مدل‌های اقلیمی، ریزمقیاس‌نمایی آماری است. در روش‌های آماری می‌توان در مدت کوتاهی، ریزمقیاس‌نمایی را برای یک منطقه یا ایستگاه مشخص در چندین دهه انجام داد. امروزه استفاده از انواع مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مانند SDSM^۲، LARS-WG^۳، CLIMGEN و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی رفتار اقلیم در نقاط مختلف جهان رایج است. به جهت این‌که پارامتر رواناب جزء خروجی مدل‌های گردش عمومی نیست، لذا باید از مدل‌های برآورد بارش-رواناب جهت برآورد آن استفاده کرد. در رابطه با تغییر اقلیم و مدل‌سازی بارش-رواناب مطالعات زیادی صورت

گرمایش جهانی^۱، یکی از چالش‌هایی است که در سال‌های اخیر بیش از پیش افکار عمومی را به خود جلب کرده و در صورت ادامه رفتارهای غلط از جمله استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی، می‌تواند به تهدید جدی برای زندگی بشر تبدیل شود. یکی از اثرات گرمایش جهانی، تغییر اقلیم^۲ است. پدیده گرمایش جهانی و تغییر اقلیم حاصل از آن، با تغییر در دما و بارش اثرات قابل توجهی بر سامانه‌های مختلف نظیر منابع آب، کشاورزی و محیط زیست دارد. به گونه‌ای که می‌تواند به‌عنوان تهدیدی بزرگ بر سامانه‌های آبی در سراسر جهان قلمداد شود. این تهدیدات برای مناطق مختلف زمین متفاوت می‌باشد (توانگر و همکاران ۲۰۱۹). بر اساس گزارش IPCC^۳، غلظت گازهای گلخانه‌ای از سال ۱۷۵۰ میلادی به طور چشمگیری افزایش یافته است، که عمدتاً به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند احتراق سوخت‌های فسیلی است. گزارش‌های IPCC نشان می‌دهد که میانگین دمای سطح جهانی °C ۰/۶ در طول قرن بیستم افزایش یافته است (هوتون و همکاران ۲۰۰۲). همچنین پیش‌بینی-ها نشان می‌دهند که تغییر اقلیم در قرن ۲۱ ادامه می‌یابد و افزایش مداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای این اثرات را تشدید خواهد کرد (استیل‌دان و همکاران ۲۰۰۸). تغییر اقلیم باعث تغییر در خصوصیات بارش شامل شدت، مدت، شکل و زمان بارش در مناطق مختلف کره زمین می‌شود که این مسئله می‌تواند چرخه هیدرولوژی حوضه‌های آبریز و فرآیندهای فرسایش خاک و رسوب-گذاری در مخازن سدها را نیز تحت تاثیر قرار دهد. همچنین باعث تغییر در حجم، زمان و مدت رواناب شود که پیامد این اتفاق در عرصه مدیریت منابع آب، تغییرات بسیاری را به وجود خواهد آورد (کمال و مساح‌بوانی

1- Global Warming

2- Climate Change

3- Intergovernmental Panel on Climate Change

4- Atmosphere-Ocean General Circulation

5- Statistical Down Scaling Model

اصلاح منحنی فرمان با هدف حداقل کردن میزان کمبودها در شرایط تغییر اقلیم در دوره آتی، شاخص تامین آب کاهش می‌یابد. میزان شاخص تامین حدود ۱/۷ تا ۵/۷ درصد کاهش در شرایط رخداد سناریوهای A2, B1 و A1B بوده است. آقابیگی و همکاران (۲۰۱۹) اثر تغییر اقلیم بر رواناب در زیر حوضه‌های استان اردبیل را با مدل IHACRES ارزیابی کردند. نتایج نشان داد در طی دوره‌ی آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۰) دبی متوسط به‌طور کلی ۱۶٪ کاهش یافته و نیز تعداد وقایع دبی اوج لحظه‌ای افزایش می‌یابد.

برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، لازم است امکان وقوع شرایط مختلف در آینده بر روی پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی را بررسی کرد. یکی از دلایلی که می‌تواند این پارامترها را تحت تأثیر قرار دهد، اثر تغییر اقلیم است. در این تحقیق با کاربرد خروجی مدل گردش عمومی CanESM2 که یکی از معتبرترین مدل از مدل‌های اقلیمی است و در حوضه‌ی دریاچه ارومیه برای مطالعات مختلف به کار گرفته شده و نتایج مطلوبی ارائه کرده است، استفاده شده و همچنین با استفاده از مدل SDSM تحت سناریوهای انتشار RCP 2.6, 4.5 و RCP 8.5 ریزمقیاس شده و به کمک مدل یکپارچه مفهومی IHACRES به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد نهند پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه و داده‌های مورد مطالعه

حوضه آبریز نهندچای منطقه‌ای کوهستانی از زیرحوضه‌های شرقی حوضه دریاچه ارومیه بوده که رودخانه نهند زهکش اصلی منطقه می‌باشد. این رودخانه یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه آجی‌چای بوده و از ارتفاعات کسبه و مشک‌عنبر سرچشمه می‌گیرد و به منظور تأمین آب شرب تبریز، سدی خاکی بر روی آن

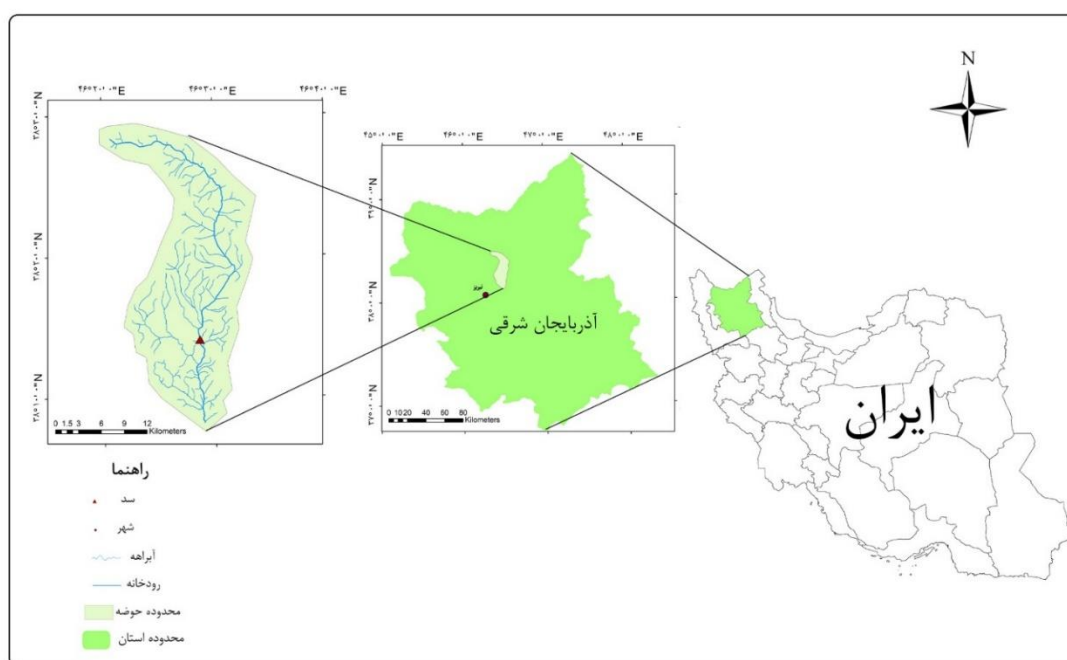
گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: آشفته و مساح‌بوانی (۲۰۰۹) تأثیر ناشی از تغییر اقلیم بر روی دما و بارش را در حوضه آیدوغموش تحت سناریوی A2 با هفت مدل AOGCM (مدل‌های گزارش TAR^۱) برای دوره آینده (۲۰۶۹-۲۰۴۰) بررسی کردند، نتایج حاکی از افزایش ۱°C تا ۶°C دما و همچنین محدوده تغییرات بارش ۸۰- تا ۱۰۰٪ خواهد بود. کیا و کریمی (۲۰۲۱) اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش را با مدل اقلیمی CanESM2 تحت دو سناریوی انتشار RCP 2.6 و RCP 8.5 بررسی کردند، نتایج نشان می‌دهند که در سناریوی بدبینانه، دمای میانگین، حداکثر و حداقل، نسبت به دوره پایه به ترتیب ۰/۹۶°C، ۱/۱۳ و ۰/۹۱ افزایش و بارش ۱۵/۱٪ (۷/۴mm) با کاهش روبه‌رو خواهد بود. محمود و بابل (۲۰۱۴) تنش‌های دمایی شدید تحت تأثیر تغییر اقلیم را با سناریوهای A2 و B2 و مدل ریزمقیاس-نمایی آماری SDSM در رودخانه جیلوم^۲ (واقع در پاکستان و هند) بررسی کردند، نتایج عملکرد مدل SDSM نشان داد؛ نتایج حاصل از سری‌های زمانی فصلی و ماهانه بسیار بهتر از سری‌های زمانی روزانه است و نیز عملکرد مدل با داده‌های NECP بهتر از A2 و B2 است. خان و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی به بررسی عدم قطعیت خروجی سه مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG، SDSM و ANN پرداختند. نتایج نشان داد، مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM نتایج بهتری نسبت به مدل LARS-WG و این مدل نتایج بهتری نسبت به روش ANN را ارائه می‌کند. نوری و مساح‌بوانی (۲۰۱۷) اثرات تغییر اقلیم را با مدل‌های گردش عمومی جو (AOGCM) تحت سه سناریوی انتشار B1, A2 و A1B و با مدل بارش-رواناب IHACRES جریان ورودی به مخزن سد دز را در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۷) شبیه‌سازی کردند، نتایج کاربرد متدولوژی پیشنهادی در تعیین منحنی فرمان سد دز در استان خوزستان، نشان داد که علیرغم

1- Third Assessment Report

2- Jhelum

تازه‌کند قرار دارد. در این مطالعه داده‌های مشاهداتی دما و بارش از ایستگاه هواشناسی در بازه زمانی (۲۰۱۴-۱۹۸۱) و داده‌های مشاهداتی دبی از ایستگاه هیدرومتری واقع در این حوضه در بازه زمانی (۲۰۲۰-۲۰۰۰) از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ و مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است.

احداث شده است. حوضه آبریز رودخانه نهندچای بین عرض جغرافیایی $38^{\circ} 13'$ تا $38^{\circ} 29'$ و طول شرقی $20^{\circ} 46'$ تا $26^{\circ} 33'$ با حداکثر ارتفاع ۲۸۲۰m و حداقل ارتفاع ۱۴۴۹m و مساحتی برابر $346/6 \text{ km}^2$ در شمال شرق تبریز واقع گردیده است. مساحت حوضه آبریز این رودخانه در بالاست سد نهند و در محل ورودی سد نهند (ایستگاه هیدرومتری نهند)، 229 km^2 است. سد نهند در فاصله ۴۳km شمال شهر تبریز، در نزدیکی روستای



شکل ۱- محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود در منطقه مورد مطالعه.

سال آماری	ارتفاع ایستگاه (متر)	مختصات جغرافیایی	کد ایستگاه	نام ایستگاه
		عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	
۱۹۸۱-۲۰۱۴	۱۶۳۰	$38/09$	$46/29$	ایستگاه هواشناسی نهند
۲۰۰۰-۲۰۲۰	۱۴۷۰	$38/11$	$46/28$	ایستگاه هیدرومتری سد نهند

$290/25 \text{ mm}$ است که فروردین و اردیبهشت پر بارش-ترین ماه‌های سال در این حوضه می‌باشد. در این مطالعه از داده‌های میانگین دمای روزانه و بارش روزانه مربوط به ایستگاه‌های معرف حوضه استفاده شده است.

میانگین دمای سالانه این حوضه $7/5^{\circ} \text{C}$ می‌باشد که بیشینه دمای آن حدود 28°C در ماه‌های تیر و مرداد و کمینه دمای آن حدود $21/6^{\circ} \text{C}$ در ماه بهمن به ثبت رسیده است. میانگین بارش سالانه در سطح حوضه

مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM^۱

و مقایسه‌های ارائه شده توسط مدل، متغیرهای پیش-بینی‌کننده را برای مدل انتخاب کند. در مرحله بعد مدل با توجه به متغیرهای انتخاب شده، کالیبره می‌شود و پس از آن صحت‌سنجی مدل کالیبره شده با تولید داده‌های تاریخی و مقایسه آن‌ها با داده‌های مشاهداتی انجام و در صورت صحت و اسنجی‌ها، داده‌های اقلیمی برای دوره یا دوره‌های آینده توسط مدل تولید می‌شود (ویلی و همکاران ۲۰۰۲). برای واسنجی مدل از ۷۵٪ داده‌ها و برای صحت‌سنجی ۲۵٪ از داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای پیش‌بینی بارش و دمای آینده از داده‌های NCEP و مدل گردش عمومی جهانی CanESM2 با سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 از سایت کانادایی^۲ بر اساس طول عرض جغرافیایی ایستگاه نهند و نیز داده‌های مشاهداتی این ایستگاه استفاده شد. طبق سناریوی RCP 2.6 واداشت تابشی تا اواسط این قرن به $3/1 \text{ W m}^{-1}$ رسیده و سپس تا سال ۲۱۰۰ به میزان $2/1 \text{ W m}^{-1}$ کاهش می‌یابد و سناریوی RCP 4.5 که در آن واداشت ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار $4/5 \text{ W m}^{-1}$ ثابت می‌ماند، همچنین طبق سناریوی RCP 8.5 واداشت تابشی به میزان $8/5 \text{ W m}^{-1}$ و غلظت گاز دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm تا سال ۲۱۰۰ خواهد رسید (چونگ‌های و یانگ ۲۰۱۲).

مدل‌های پیش‌بینی رواناب

مدل SDSM توانایی تولید رواناب برای آینده را ندارد و تنها برای تولید پارامترهای روزانه دما، بارش، تابش خورشیدی و غیره برای دوره‌های مد نظر آینده کاربرد دارد. از مدل بارش-رواناب برای شبیه‌سازی رواناب با استفاده از پارامترهای تولیدی مدل SDSM برای آینده می‌توان استفاده کرد. لذا در این تحقیق به منظور برآورد رواناب در دوره‌های آتی از مدل IHACRES استفاده گردید.

مدل‌های گردش عمومی جو، سلول محاسباتی درشتی دارند و به همین علت شرایط کوهساری، پوشش سطحی و شرایط اقلیمی یکسانی را برای یک شبکه با ابعاد چند صد کیلومتری در نظر می‌گیرند. این درحالی است که برای پیش‌بینی دما و بارش در مقیاس محلی و ارزیابی تغییرات و اثرات آن‌ها بر منابع آب، کشاورزی و انرژی نیازمند سناریوهایی با وضوح زیاد هستیم (لوپز ۲۰۰۸). روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری بر پایه به وجود آوردن پیوند بین مشاهدات سطحی و متغیرهای جوی همانند ارتفاع ژئوپتانسیلی، تاوایی و رطوبت در دوره پایه استوارند. با برقراری ارتباط آماری مناسب بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی‌شونده، می‌توان به روابط مناسب برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم دست یافت (دیبیکه و همکاران ۲۰۰۵). مدل SDMS، یک مدل رگرسیونی چندمتغیره برای تولید داده‌های آب و هوایی با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری است که توسط ویلی و داوسون در سال ۲۰۰۲ توسعه داده شده است. این مدل از پرکاربردترین ابزارهای آماری ریزمقیاس‌نمایی است که کاربرد بسیاری در مطالعات هواشناسی، هیدرولوژیکی، جغرافیایی و زیست‌محیطی دارد. مدل SDMS از روش‌های آماری رگرسیونی به منظور عملیات ریزمقیاس کردن استفاده می‌کند. در این مدل، ابتدا روابط بین پیش‌بینی‌کننده‌ها (خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی) و پیش‌بینی‌شونده‌ها (داده‌های تاریخی ایستگاه‌های هواشناسی) مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد و روابط تجربی بین آن‌ها تعیین و به کاربر اعلام می‌گردد. از دیگر فاکتورهایی که مدل خود به کاربر ارائه می‌نماید، همبستگی، واریانس، انحراف معیار داده‌ها و خطای استاندارد است. کاربر باید با تکیه بر تجربه خود

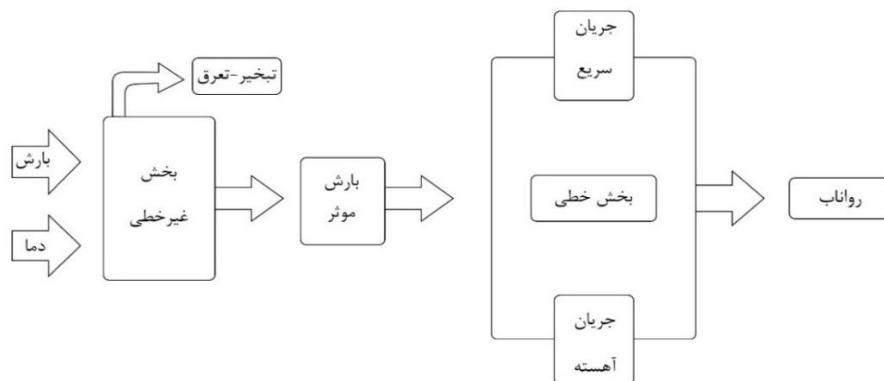
1- Statistical Down Scaling Model

2- <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2>

مدل بارش-رواناب IHACRES^۱

(صادقی و همکاران ۲۰۱۵). مطالعات پیشین اثبات نموده‌اند که پیش‌بینی جریان توسط مدل یکپارچه IHACRES در بسیاری از موارد بهتر از مدل‌های توزیعی است (لیتل‌وود و جکمن ۱۹۹۴، یه و همکاران ۱۹۹۷). هدف اصلی مدل IHACRES تعیین رفتار هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از تعداد کمی از پارامترها است. این مدل مطابق شکل ۲ شامل دو بخش (مدول) به هم پیوسته غیرخطی^۲ و خطی^۳ است. در بخش غیرخطی، بارش مشاهداتی با کمک درجه حرارت ایستگاه به بارش مؤثر تبدیل می‌شود و در بخش خطی، بارش مؤثر به جریان تبدیل می‌گردد.

مدل IHACRES که توسط جیکمن و هورن‌برگر (۱۹۹۳) ارائه شده، یک مدل یکپارچه‌ی مفهومی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب است. مدل IHACRES یک مدل یکپارچه و ترکیبی از روش‌های مفهومی-متریک است که برای اجرا در حوضه‌های بزرگ و اکثر شرایط آب و هوایی از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارد که نیازمند داده‌های پیوسته بارش، دما (یا تبخیر-تعرق) و دبی می‌باشد. این مدل تاکنون برای حوضه‌های با مساحت 450 m^2 تا 10000 km^2 استفاده شده است



شکل ۲- ساختار فرآیند شبیه‌سازی جریان در مدل IHACRES.

در روابط فوق، r_k بارش مشاهداتی، c ضریب تعادل حجم بارش، l آستانه شاخص رطوبت خاک، P فاکتور واکنش غیرخطی، ϕ_k شاخص رطوبت خاک، τ_k شدت خشکی خاک به‌عنوان تابعی از دما، τ_w شدت خشکی خاک مبنا، f فاکتور تعدیل دما (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات)، T_r دمای مرجع و T_k دما در بازه زمانی مورد نظر می‌باشد. پارامتر c در رابطه ۱ به نحوی تعیین می‌شود که حجم بارش مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان بشوند (یعقوبی و مساح‌بوانی ۲۰۱۴).

روابط ۱ تا ۳ برای تبدیل بارش مؤثر (u_k) در بخش غیرخطی به کار گرفته می‌شوند (کروک و جکمن ۲۰۰۸).

$$u_k = r_k [c(\phi_k - l)]^p \quad [1]$$

$$\phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_k}\right) \phi_{k-1} \quad [2]$$

$$\tau_k = \tau_w^{0.062f(T_r - T_k)} \quad [3]$$

1- Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow Data

2-Non-linear loss module

3- Linear unit hydrograph module

$$E = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \frac{O_i - S_i}{O_i} \right|}{N} \times 100 \quad [5]$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad [6]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{N}} \quad [7]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{N} \quad [8]$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad [9]$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [10]$$

$$R - Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \times 100 \quad [11]$$

که در آن‌ها، O_i و S_i به ترتیب معرف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، \bar{O} و \bar{S} میانگین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج مدل SDSM

پس از تعیین پیش‌بینی‌کننده‌های غالب، به تولید داده‌های اقلیمی در دوره‌ی پایه برای واسنجی و صحت-سنجی مدل پرداخته شد. که نتایج آن در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی کارایی مدل CanESM2 برای دمای متوسط و بارش در ایستگاه مورد مطالعه.

پارامتر	دوره	درصد خطا (%)	R^2	RMSE (°C)(mm)	MAE (°C)(mm)
دما	واسنجی	۱۸	۰/۹۶	۱/۶۸	۱/۲۷
	صحت‌سنجی	۱۵	۰/۹۸	۱/۴	۱/۱۴
بارش	واسنجی	۱۹	۰/۹۱	۲/۴	۳/۴۷
	صحت‌سنجی	۲۲	۰/۸۳	۹/۲	۶/۱۴

هیدروگراف واحد با استفاده از بخش خطی مدل (رابطه ۴) پس از محاسبه بارش مؤثر ایجاد می‌گردد. در بخش خطی، دو مؤلفه جریان سریع و آهسته محاسبه می‌شوند. این مؤلفه‌ها می‌توانند به صورت موازی و یا سری متصل باشند. در تحقیقات پیشین، توصیه شده است تا دو فرآیند به صورت موازی استفاده شوند، به جز در مناطق نیمه خشک یا مناطقی که جریان پایه فصلی وجود دارد (گلشن و همکاران ۲۰۱۶). ترکیب مؤلفه‌های جریان سریع و آهسته منجر به ایجاد جریان (X_k) می‌شود.

$$X_k = a^q X_{k-1} - b^q u_{k-1} + a^s X_{k-1} - b^s u_{k-1} \quad [4]$$

a^q و b^q پارامترهای ثابت زمانی برای جریان سریع و a^s و b^s نیز برای جریان آهسته می‌باشند.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این تحقیق برای ارزیابی نتایج مدل SDSM از چهار معیار درصد خطا، ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) و ضریب میانگین مطلق خطا^۲ (MAE) و نیز برای ارزیابی مدل IHACRES از سه معیار ضریب همبستگی^۳ (R)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف^۴ (NSE) و شاخص خطای نسبی^۵ (R-Bias) استفاده شد. این آماره‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

- 1- Root Mean Squared Error
- 2- Mean Absolute Error
- 3- Correlation Coefficient
- 4- Nash-Sutcliffe Efficiency
- 5- Relative Bias

برای بررسی نتایج، تغییرات ایجاد شده تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره‌ی آتی بر روی متغیرهای دما و بارش در حوضه نهند تحت سناریوهای انتشار مختلف نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۰۵) در مقیاس سالانه در قالب جدول‌های ۳ و ۴ مورد مقایسه قرار گرفت. در دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۰۵) متوسط دمای میانگین روزانه $7/42^{\circ}\text{C}$ و متوسط بارش دوره حدود $290/26\text{ mm}$ می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده از ارزیابی مدل CanESM2 برای پیش‌بینی دما و بارش، این مدل با درصد خطا در دوره واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب ۱۸ و ۱۵٪ دما و ۱۹ و ۲۲٪ بارش را پیش‌بینی کرده است. طبق مقادیر جدول ۱ برآورد دما از دقت بیشتری نسبت به بارش برخوردار است، در واقع سری‌های زمانی دما برخلاف سری‌های زمانی بارش، روندی قابل پیش‌بینی-پذیرتر^۱، هموارتر^۲ و تناوبی^۳ دارند؛ لذا می‌توان آن‌ها را به راحتی و به صورت دقیق تخمین زد (دیبیکه و همکاران ۲۰۰۸، علی و همکاران ۲۰۱۸).

جدول ۳- تغییرات میانگین سالانه دمای در حوضه نهند با مدل CanESM2 تحت سناریوهای انتشار برای دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۰۵).

سناریوهای انتشار ($^{\circ}\text{C}$) (درصد)			دوره مورد مطالعه
RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 2.6	(میلادی)
+۰/۲۹ (۳/۹۱)	+۰/۲۳ (۳/۰۹)	+۰/۱۷ (۲/۲۹)	۲۰۲۱-۲۰۶۰
+۱/۰۱ (۱۳/۶۱)	+۰/۳۹ (۵/۲۶)	+۰/۲۱ (۲/۸۳)	۲۰۶۱-۲۱۰۰

جدول ۴- تغییرات میانگین سالانه بارش در حوضه نهند با مدل CanESM2 تحت سناریوهای انتشار برای دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۰۵).

سناریوهای انتشار (mm) (درصد)			دوره مورد مطالعه
RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 2.6	(میلادی)
-۱۵/۹۲ (۵/۵۰)	-۱۸/۲۲ (۶/۲۴)	-۷/۲۳ (۲/۵۰)	۲۰۲۱-۲۰۶۰
-۱۷/۶۴ (۶/۰۸)	-۲۵/۷۷ (۸/۸۹)	-۹/۸۳ (۳/۳۹)	۲۰۶۱-۲۱۰۰

است. با بررسی روند تغییرات میانگین بارش در دوره-های آتی مطابق جدول ۴، مشاهده می‌شود که بارش برخلاف دما در تمامی سناریوها کاهش است، به طوری که کمترین و بیشترین کاهش به ترتیب مربوط سناریوی RCP 2.6 در دوره آینده نزدیک به میزان $7/23\text{ mm}$ و سناریوی RCP 4.5 در دوره آینده دور به میزان mm ۲۵/۷۷ نسبت به دوره پایه خواهد بود.

مطابق جدول ۳، مشاهده می‌شود که دما در هر دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) و تحت تمامی سناریوهای انتشار، افزایشی بوده و افزایش دما در آینده دور بیشتر از آینده نزدیک است. کمترین و بیشترین افزایش دما به ترتیب مربوط به سناریوی RCP 2.6 در دوره آینده نزدیک به میزان $0/17^{\circ}\text{C}$ و سناریوی RCP 8.5 در دوره آینده دور به میزان $1/01^{\circ}\text{C}$ نسبت به دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۰۵)

1- Deterministic

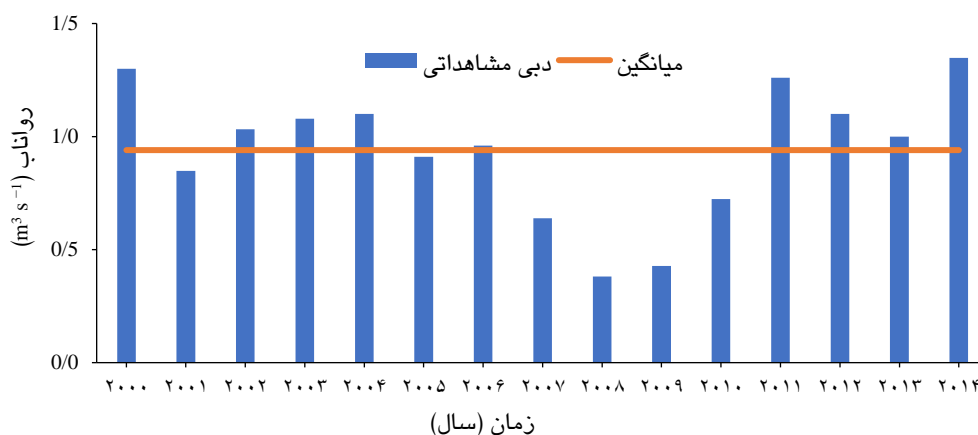
2- Smoother

3- Periodic

نتایج مدل IHACRES

که شامل دوره های ترسالی و خشک سالی می شود. همچنین سری رواناب رودخانه نهند، حول خط میانگین $0.94 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ نوسان دارد. چون در سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ میزان نوسانات رواناب نزدیک به میانگین نوسانات است، برای واسنجی (کالیبراسیون) مدل انتخاب شد.

مطابق شکل ۳، در بررسی سری زمانی رواناب، مشاهده می شود که بیشترین مقدار رواناب مربوط به سال ۲۰۱۴ و کمترین مقدار مربوط به سال ۲۰۰۸ بوده



شکل ۳- سری زمانی رواناب رودخانه نهند در دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۱۴)

مدل خوب توصیف می گردد (موتوالو و همکاران ۱۹۹۹). پس مطابق جدول ۵، با توجه به معیار ارزیابی NSE به دست آمده هم در دوره واسنجی و هم در دوره صحت سنجی، مدل IHACRES به صورت رضایت بخش، رواناب ورودی به مخزن سد نهند را شبیه سازی کرده است. با توجه به معیار ارزیابی R-Bias مشخص گردید که به طور کلی، مدل جریان محاسباتی را کمتر از جریان مشاهده ای شبیه سازی کرده است، مقدار این خطا بر اساس پیشنهاد موریاسی و همکاران (۲۰۰۷)، بهتر است، تا ۲۵٪ ($R\text{-Bias} = \pm 25$) باشد. میزان مثبت این معیار، نشان دهنده بیشتر بودن مقدار مشاهداتی نسبت به داده های شبیه سازی و مقدار منفی، نتیجه کمتر بودن آن می باشد.

به منظور استفاده از مدل IHACRES برای شبیه سازی رواناب ورودی مخزن سد نهند در دوره آبی تحت شرایط تغییر اقلیم، ابتدا مدل در دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۱۴) واسنجی و صحت سنجی شد. بدین منظور بهترین دوره برای واسنجی (کالیبراسیون) انتخاب گردید. مطابق جدول ۵ مدل IHACRES با ضریب تعیین بالای ۰/۸۶ در دوره واسنجی و ضریب تعیین بالای ۰/۷۵ در دوره صحت سنجی به طور قابل قبولی توانست الگوی تغییرات جریان در حوضه مورد مطالعه را شبیه سازی کند، اگر مقدار NSE برابر یک باشد (یا هر چه به یک نزدیک تر باشد)، نشان دهنده این است که تناسب بالایی بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده وجود دارد. اگر این مقدار بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، نتایج مدل رضایت بخش خواهد بود. و اگر بیش از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه سازی

جدول ۵- معیارهای ارزیابی کارایی مدل IHACRES برای برآورد رواناب ورودی به مخزن سد نهند در ایستگاه مورد مطالعه.

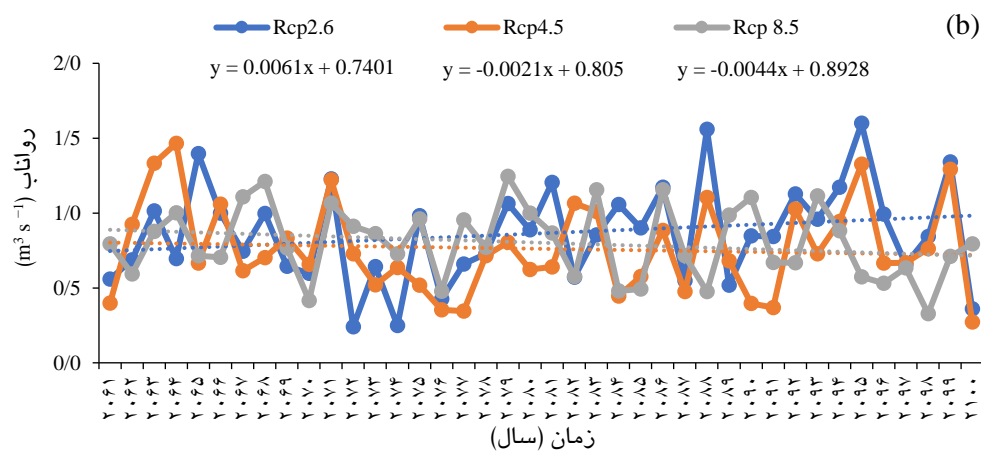
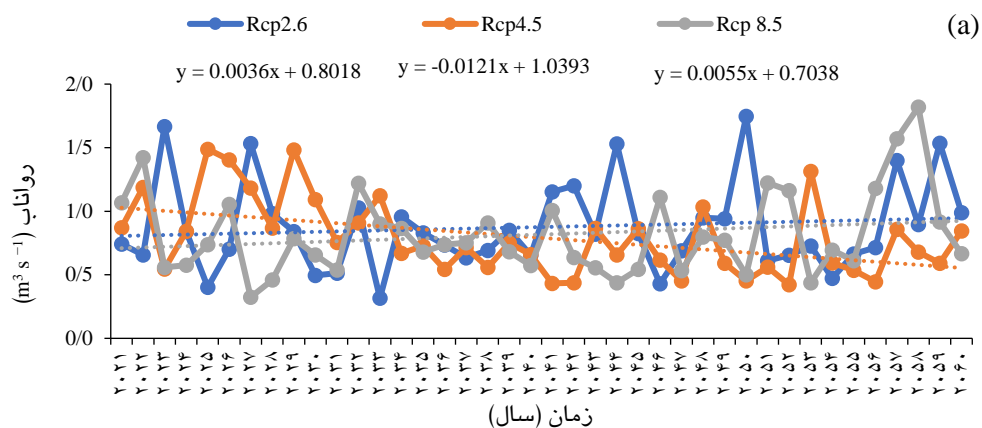
دوره	R	NSE	R - Bias (%)
واسنجی	۰/۹۱	۰/۷۴	-۳/۸
صحت سنجی	۰/۸۶	۰/۵۱	-۲۵

است. لازم به ذکر است که میانگین رواناب در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۲۰۰) به میزان $0.94 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ است. روند تغییرات سری زمانی رواناب در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۲۱-۲۱۰۰) در شکل ۴ نشان داده شده است

با معرفی متغیرهای اقلیمی دما و بارش حاصل از پیش‌بینی دوره‌های آتی با مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP به مدل IHACRES، رواناب ورودی به مخزن سد نهند در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۲۱-۲۱۰۰) پیش‌بینی شد، که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده

جدول ۶- تغییرات میانگین سالانه رواناب ورودی به مخزن سد نهند در دوره‌های آتی.

سناریوهای انتشار ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) (درصد)			دوره مورد مطالعه (میلادی)
RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 2.6	
-۰/۱۲ (۱۲/۷۷)	-۰/۱۵ (۱۵/۹۶)	-۰/۰۸ (۸/۵۱)	۲۰۲۱-۲۰۲۰۶۰
-۰/۱۴ (۱۴/۸۹)	-۰/۱۸ (۱۹/۱۵)	-۰/۰۸ (۸/۵۱)	۲۰۲۱-۲۱۰۰



شکل ۴- تغییرات سالانه رواناب تحت سناریوهای RCP در دوره آینده نزدیک (a) و آینده دور (b).

رودخانه‌ها که به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تأمین آب برای نیازها محسوب می‌شوند را آسیب‌پذیر کرده است. هدف از تحقیق حاضر برآورد میزان تأثیر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به سد نهند از طریق رودخانه نهند می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از مقادیر روزانه میانگین دما و بارش حوضه نهند در سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۵ به‌عنوان دوره پایه به مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM معرفی شد و با استفاده از مدل اقلیمی CanESM2 از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) تحت سناریوهای انتشار RCPs این پارامترها (بارش و دما) برای دوره‌های آبی تولید گردید که نتایج حاکی از افزایش دما در تمامی سناریوها در دوره‌های آبی دارد و افزایش در دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) بیشتر از آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) خواهد بود. همچنین بارش نیز در هر دو دوره آینده تحت همه سناریوها کاهش پیدا خواهد کرد. نتایج حاصل از بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد نهند نشان می‌دهد که رواناب تحت تأثیر این پدیده کاهش پیدا خواهد کرد، به طوری که تحت سناریو RCP 4.5 رواناب به میزان ۱۹/۱۵٪ در دوره آینده دور کاهش خواهد یافت. با توجه به تأمین آب شرب شهر تبریز از سد نهند و با عنایت به اینکه پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش جمعیت این شهر در سال‌های آبی می‌باشد، ضروری است برای سال‌های آبی تمهیدات جدی در خصوص جبران کاهش جریان ورودی به مخزن سد انجام گیرد و از منابع جایگزین برای تأمین آب شرب شهر تبریز همراه با مدیریت مصرف و تقاضا استفاده شود.

مطابق جدول ۶، مشاهده می‌شود که میانگین رواناب در دوره‌های آبی تحت همه سناریوها کاهش خواهد یافت. کمترین و بیشترین کاهش به ترتیب مربوط به آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) تحت سناریوی RCP 2.6 به میزان $0.08 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (۸٪/۵۱) و آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) تحت سناریوی RCP 4.5 به میزان $0.18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (۱۹٪/۱۵) است. مطابق شکل ۴ (a)، سری زمانی متوسط سالانه رواناب ورودی به مخزن سد نهند در طی ۴۰ سال آبی (آینده نزدیک) تحت مدل اقلیمی CanESM2 و سناریوی های گزارش پنجم RCP، مشخص می‌شود که مقدار رواناب در کل طول دوره آینده نزدیک دارای نوسانات زیادی است. این نوسانات برای سناریوی های RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب با شیب ۰/۳۶ و ۰/۵۵٪، در حال افزایش است، در حالی که تحت سناریوی RCP 4.5 شیب به میزان ۱/۲۱٪ کاهش است. همچنین مطابق شکل ۴ (b)، مقدار رواناب در طول دوره آینده دور دارای نوسانات زیادی است؛ با این حال در سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 روند این نوسانات نشان‌دهنده شیب کاهش محسوسی است و تحت سناریوی RCP 2.6 شیب افزایشی مشاهده می‌گردد. به‌گونه‌ای که رگرسیون خطی بین زمان و رواناب سالانه برای سناریوی RCP 2.6 با شیب ۰/۶۱٪ افزایشی و برای سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب با شیب ۰/۲۱ و ۰/۴۴٪ در حال کاهش است.

نتیجه‌گیری کلی

امروزه افزایش جمعیت و از طرفی تأثیر تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی نظیر بارش و رواناب منابع مورد استفاده

- Aghabeigi N, Asmaali-Ouri A, Mostafazadeh R and Golshan M, 2019. The effects of climate change on runoff using IHACRES hydrologic model in some of watersheds, Ardabil Province. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 10 (2): 178-189 (In Persian with English abstract).
- Ali NMS, Güven A and Al-Juboori AM, 2018. Statistical downscaling of precipitation and temperature using gene expression programming. *Journal of Advanced Physics* 7(4): 518-521.

- Ashofteh PS and Massah AR, 2009. Impact of climate change uncertainty on temperature and precipitation of Aidoghmoush basin in 2040-2069 period. *Water and Soil Science* 19(12): 85-98 (In Persian with English abstract).
- Chong-Hai XU and Ying X, 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 5(6): 527-533.
- Croke BFW and Jakeman AJ, 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions. *Hydrological Modelling in Arid and Semi-arid Areas* 54:41-48.
- Dibike YB and Coulibaly P, 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology* 307(1-4): 145-163.
- Dibike YB, Gachon P, St-Hilaire A, Ouarda TB and Nguyen VTV, 2008. Uncertainty analysis of statistically downscaled temperature and precipitation regimes in Northern Canada. *Theoretical and Applied Climatology* 91(1): 149-170.
- Gharibdoust M, Ghorbani MA and Hosseinizadeh A, 2017. The Impact of climate change Effects on rainfall-runoff in the Sufi-Chai Basin. *Irrigation Sciences and Engineering* 40(2): 89-101 (In Persian with English abstract).
- Golshan M, Esmali Ouri A, Shahedi K and Jahanshahi A, 2016. Performance evaluation of SWAT and IHACRES models to simulate runoff in Khorramabad watershed. *Water and Soil Science* 26(2-1): 29-42 (In Persian with English abstract).
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguier M, Van der Linden PJ, Dai X, Maskell K and Johnson CA, 2002. *Climate Change: The scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Jakeman AJ and Hornberger GM, 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research* 29(8): 2637-2649.
- Javan K, Saleh FN and Shahraiyni HT, 2013. The influences of climate change on the runoff of Gharehsoo River Watershed. *American Journal of Climate Change* 2(4): 296-305.
- Johnson GL, Hanson CL, Hardegree SP and Ballard EB, 1996. Stochastic weather simulation: Overview and analysis of two commonly used models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 35(10): 1878-1896.
- Kamal AR and Massah Bavani AR, 2010. Climate change and variability impact in basin's runoff with interference of tow hydrology models uncertainty. *Journal of Water and Soil* 24(5): 920-931 (In Persian with English abstract).
- Khan MS, Coulibaly P and Dibike A, 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology* 319(1-4): 357-382.
- Kia E and Karimi V, 2021. Investigation of temperature and rainfall parameters of Haraz River Basin affected by climate change. *Journal of Natural Environmental Hazards* 9(26): 145-160.
- Littlewood IG and Jakeman AJ, 1994. A new method of rainfall-runoff modelling and its applications in catchment hydrology. *Computational Mechanics Publications* 72: 143-171.
- Lopes P, 2008. Assessment of climate change statistical downscaling methods: Application and comparison of two statistical methods to a single site in Lisbon (Doctoral dissertation, FCT-UNL).
- Mahmood R and Babel MS, 2014. Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum river basin. *Weather and Climate Extremes* 5(6): 56-66.
- Mitchell TD, 2003. Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates. *Climatic Change* 60(3): 217-242.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD and Veith TL, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900.
- Motovilov YG, Gottschalk L, Engeland K and Rodhe A, 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 98: 257-227.
- Myo HT, Zin WW, Shwe KP, San ZMLT, Kawasaki A and Acierto RA, 2020. Projecting the impact of climate change on temperature, precipitation, and discharge in the Bago river basin. *Journal of Disaster Research* 15(3): 324-334.

- Nouri N and Massah Bavani AR, 2017. E-evaluation impact of climate change on operation rule curves of dam (Case study: Dez dam). *Iran-Water Resources Research* 13(2): 127-139 (In Persian with English abstract).
- O'Neill BC, Oppenheimer M, Warren R, Hallegatte S, Kopp RE, Pörtner HO, ... and Yohe G, 2017. IPCC reasons for concern regarding climate change risks. *Nature Climate Change* 7(1): 28-37.
- Sadeghi SH, Ghasemieh H and Sadatinegad SJ, 2015. Performance evaluation of the IHACRES hydrological model in wet areas (Case study: Navrud basin, Guilan). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 19(73): 73-83 (In Persian with English abstract).
- Steele-Dunne S, Lynch P, McGrath R, Semmler T, Wang S, Hanafin J and Nolan P, 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology* 356(1-2): 28-45.
- Tavangar S, Moradi HR and Massah Bavani AR, 2019. Climate change effect on the rainfall amount and intensity in the southern coast of the Caspian Sea. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 10(2): 190-204 (In Persian with English abstract).
- Wilby RL, Hay LE and Leavesley GH, 1999. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology* 225(1-2): 67-91.
- Wilby RL, Dawson CW and Barrow EM, 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling and Software* 17(2): 145-157.
- Yaghoubi M and Massah Bavani AR, 2014. Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins. *Journal of the Earth and Space Physics* 40(2): 153-172 (In Persian with English abstract).
- Ye W, Bates BC, Viney NR, Sivapalan M and Jakeman AJ, 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research* 33(1): 153-166.