

Research Paper

River Discharge Changes in Eastern Watersheds of Mazandaran Province under the Impact of Climate Change

Faeze Jafari¹, Hamidreza Moradi²  and Ali Bagheri³

1- Ph.D. Student in Watershed Management, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, (Corresponding Author: hrmoradi@modares.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Water Management and Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 22 January, 2023

Accepted: 18 December, 2023

Extended Abstract

Background: Climate change directly impacts hydrological components, water resources, and watershed outflow. Calculating the amount of possible changes in rainfall and runoff will play an important role in the policy-making and planning of water resources under climate change conditions. In this research, runoff simulation in the eastern watersheds of Mazandaran province (Talar, Tajan, Nekarood, and Babolrood) was investigated under the impact of climate change in the future period (2021-2040).

Methods: In this research, one of the atmospheric-ocean general circulation models, named HadGEM2, was used under climate scenarios (RCP 2.6 and RCP 8.5) to investigate climate change. The Lars-WG model was used for the downscaling of climate data during three stages of data calibration, data evaluation, and meteorological data generation for the future period. This purpose was achieved using the daily data of rainfall, maximum and minimum temperatures, and sunshine hours of the selected stations of four watersheds in the current period (1997-2016), and the model was implemented for the base period. After ensuring the ability of the Lars-WG model to simulate meteorological data by comparing the data produced by the HadGEM2 model and the observational data of the base period, this model was implemented to generate future data using climate scenarios (RCP 2.6 and RCP 8.5). The daily values of the climate data of rainfall, maximum and minimum temperatures and sunshine hours were produced and simulated for the next 40 years (2021- 2060). Runoff simulation in the future period and the effect of climate change on runoff were investigated with the IHACRES hydrological model, which is a continuous conceptual-dynamic model for simulating rainfall-runoff at the watershed scale, using climate scenarios. For this purpose, the daily data of rainfall, mean temperature, and discharge of the current period (1997-2016) in four watersheds were introduced into the IHACRES software. Then, the 1997-2008 and 2009-2016 periods were selected for calibration and validation, respectively, to determine the ability of the IHACRES model to simulate future runoff. After calibration and validation, the climate data produced by the HadGEM2 model were introduced into IHACRES, and the daily series of discharge was predicted for the future period (2021-2040). Then, the annual average of the observed discharges in the current period and the simulated discharges in the future period under the RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios, as well as the 20-year average runoff in the stations in the future period, were compared and evaluated with the observation period.

Results: The results of the climate change investigation showed that mean monthly minimum and maximum temperatures in all months of the future period would increase in all four watersheds in both scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5 compared to the current period (1997-2016). Compared to the current period, the mean monthly rainfall in both scenarios does not have a constant trend and is different in various months. The results of the runoff simulation show that the changes in the discharge of the watersheds under the effect of climate change are not constant compared to the discharge of the current period. This could be attributed to the inconsistency of the trend of changes in the precipitation of the future period compared to the current period. Despite the increase in the average rainfall, the discharge will decrease in some years in the future period, which can probably be related to the increase in temperature in the future period due to climate change. Despite the decrease in the average rainfall of that year, the increase in discharge could be caused by, for example, the possibility of heavy rains or showers in that year, thereby increasing the amount of discharge. Compared to the current period, the 20-year mean of the



Copyright © 2024 Jafari et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which allows users to read, copy, distribute and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

predicted discharge has decreased in the selected stations (Talar, Tajar, and Nekarood watersheds) in the future period for both scenarios. In the station considered for the Babolrood watershed, however, this value has increased in the RCP 2.6 scenario compared to the current period. In the Polsefid station of the Talar watershed, the simulated discharge under the RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios was equal to 6.18 and 6.12 m³/s, respectively, which shows a decrease compared to the observed discharge of 7.41 m³/s. In the Soleimantange station of the Tajar watershed, the predicted discharge under the RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios was equal to 7.33 and 7.29 m³/s, respectively, which has decreased compared to the observed discharge of 9.82 m³/s. In the Sefidchah station of the Nekarood watershed, the simulated discharge under the RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios was equal to 3.85 and 3.72 m³/s, which reveals a decline compared to the observed discharge of 4.10 m³/s. In the Babol station of the Babolrood watershed, however, the discharge under the RCP 2.6 scenario was predicted to be equal to 11.40 m³/s, which has increased compared to the discharge (11.34 m³/s) during the observation period. Under the RCP 8.5 scenario, it was simulated with a value of 11.22 m³/s, less than the observed discharge.

Conclusion: In general, the impact of climate change on water resources is one of the major challenges facing water resources planners and can have serious consequences for ecosystems and communities. Based on the findings of the research and the importance of climate change effects on the hydrological conditions of the watersheds in the study area, it is necessary to apply appropriate policies for the sustainable management of water resources.

Keywords: Calibration, Climate Change, IHACRES Hydrological Model, Lars-WG Downscaling Model, Runoff Simulation

How to Cite This Article: Jafari, F., Moradi, H., & Bagheri, A. (2024). River Discharge Changes in Eastern Watersheds of Mazandaran Province under the Impact of Climate Change. *J Watershed Manage Res*, 15(1), 14-28.
DOI: [10.61186/jwmr.15.1.14](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.1.14)



مقاله پژوهشی

تغییرات دبی جریان حوزه‌های آبخیز شرق استان مازندران تحت تاثیر تغییر اقلیم

فائزه جعفری^۱، حمیدرضا مرادی^۲ و علی باقری^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
 ۲- استاد، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، (نویسنده مسؤول: hmradi@modares.ac.ir)
 ۳- دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۲۷
 صفحه: ۱۴ تا ۲۸

چکیده مسبوط

مقدمه و هدف: تغییر اقلیم به صورت مستقیم روی مؤلفه‌های هیدرولوژیک و منابع آبی تاثیرگذار است و جریان خروجی از حوضه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. محاسبه میزان تغییرات احتمالی در مقادیر بارش و رواناب نقش مهمی در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آب در شرایط تغییر اقلیم خواهد داشت. در این پژوهش شبیه‌سازی رواناب حوزه‌های آبخیز شرق استان مازندران (تالار، تجن، نکارود و بابل‌رود) تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره زمانی آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: برای بررسی تغییر اقلیم، از یکی از مدل‌های گردش عمومی جوی- اقیانوسی با نام HadGEM2 تحت سناریوهای اقلیمی (RCP 2.6 و RCP 8.5) استفاده شده است. برای ریزمقیاس نمایی داده‌های اقلیمی از مدل Lars-WG طی سه مرحله کالیبره کردن داده‌ها، ارزیابی داده‌ها و تولید داده‌های هواشناسی برای دوره آتی استفاده شد. برای این منظور از داده‌های روزانه بارش، بیشینه و کمینه دما و ساعات آفتابی ایستگاه‌های منتخب چهار حوضه در دوره فعلی (۱۹۹۷-۲۰۱۶) استفاده و مدل برای دوره پایه اجرا شد. پس از اطمینان از توانایی مدل Lars-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی از طریق مقایسه داده‌های تولید شده توسط مدل HadGEM2 و داده‌های مشاهداتی موجود در دوره پایه، این مدل جهت تولید داده‌های آتی با استفاده از سناریوهای اقلیمی (RCP 2.6 و RCP 8.5) اجرا شد و مقادیر روزانه داده‌های اقلیمی بارش، بیشینه و کمینه دما و ساعات آفتابی ۴۰ سال آینده (۲۰۲۱-۲۰۶۰) تولید و شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی جریان در دوره آتی و بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب، از مدل هیدرولوژیکی IHACRES که یک مدل پیوسته مفهومی-دینامیکی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در مقیاس حوضه است، با استفاده از سناریوهای اقلیمی استفاده شد. به این منظور، داده‌های بارش، دمای میانگین و دبی روزانه دوره فعلی (۱۹۹۷-۲۰۱۶) چهار حوضه وارد نرم‌افزار IHACRES شد. سپس دو دوره زمانی ۱۹۹۷-۲۰۰۸ و ۲۰۰۹-۲۰۱۶ به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی به منظور تعیین عملکرد مدل IHACRES در توانایی شبیه‌سازی دبی دوره آتی انتخاب شد. پس از واسنجی و اعتبارسنجی، داده‌های اقلیمی تولید شده توسط مدل HadGEM2 وارد IHACRES شد و سری روزانه دبی برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پیش‌بینی شد. سپس میانگین سالانه دبی‌های مشاهداتی در دوره فعلی و دبی‌های شبیه‌سازی شده در دوره آتی تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 و همچنین متوسط ۲۰ ساله رواناب در ایستگاه‌ها در دوره آتی با دوره مشاهداتی مقایسه و ارزیابی شد.

یافته‌ها: یافته‌های حاصل از بررسی تغییر اقلیم نشان داد در هر چهار حوضه، میانگین ماهانه دمای کمینه و دمای بیشینه در تمامی ماه‌های سال دوره آتی در هر دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 نسبت به دوره فعلی (۱۹۹۷-۲۰۱۶) افزایش یافت. میانگین ماهانه بارش در هر دو سناریو نسبت به دوره فعلی روند ثباتی ندارد و در ماه‌های مختلف متفاوت است. یافته‌های حاصل از پیش‌بینی رواناب نشان داد تغییرات دبی حوضه‌ها تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به دبی دوره فعلی، ثابت نیست که دلیل آن می‌تواند ثابت نبودن روند تغییرات بارش دوره آتی نسبت به دوره فعلی باشد. همچنین در برخی سال‌ها در دوره آماری آتی علم، رغم افزایش میانگین بارش، دبی در دوره آینده کاهش می‌یابد که احتمالاً دلیل آن، توان، به افزایش دما در دوره آتی، بر اثر تغییر اقلیم ارتباط داد. اما در مورد افزایش دبی، علم، رغم کاهش میانگین بارش آن سال، یکی از دلایل آن می‌تواند امکان رخداد بارش‌های با شدت بالا یا رگباری در آن سال موردنظر باشد که باعث افزایش میزان دبی شده است. متوسط ۲۰ ساله دبی پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های منتخب حوضه تالار، تجن و نکارود در دوره آتی برای هر دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 نسبت به دوره فعلی کاهش داشته است، اما در ایستگاه منتخب حوضه بابل‌رود، این مقدار در سناریو RCP 2.6 نسبت به دوره فعلی افزایش داشته است. در ایستگاه پل سفید در حوضه تالار، دبی شبیه‌سازی شده تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۶/۱۸ و سناریو RCP 8.5 برابر با ۶/۱۲ متر مکعب بر ثانیه به دست آمده که در مقایسه با دبی مشاهداتی که برابر با ۷/۴۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، کاهش نشان می‌دهد. در ایستگاه سلیمان تنگه در حوضه تجن دبی پیش‌بینی شده تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۷/۳۳ و سناریو RCP 8.5 برابر با ۷/۲۹ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده که در مقایسه با دبی مشاهداتی که برابر با ۹/۸۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، کاهش یافته است. در ایستگاه سفیدچاه در حوضه نکارود دبی شبیه‌سازی شده تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۳/۸۵ و سناریو RCP 8.5 برابر با ۳/۷۲ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده که در مقایسه با دبی مشاهداتی که برابر با ۴/۱۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، کاهش می‌یابد. اما در ایستگاه بابل در حوضه بابل‌رود، دبی تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۱۱/۴۰ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی شد که نسبت به دبی دوره مشاهداتی که برابر با ۱۱/۳۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، افزایش یافته است، در صورتی که دبی تحت سناریو RCP 8.5 با مقدار برابر با ۱۱/۲۲ مترمکعب بر ثانیه کمتر از دبی مشاهداتی شبیه‌سازی شد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی تاثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب یکی از چالش‌های پیش‌روی برنامه‌ریزان منابع آب است و می‌تواند پیامدهای جدی را متوجه اکوسیستم‌ها و جوامع کند. بر اساس یافته‌های پژوهش و اهمیت آثار تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی حوضه‌های منطقه مطالعاتی، اعمال سیاست‌های مناسب به منظور مدیریت پایدار منابع آب ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، شبیه‌سازی رواناب، مدل ریزمقیاس نمایی Lars-WG، مدل هیدرولوژیکی IHACRES، واسنجی

مقدمه

دوره‌های آتی و لزوم بهره‌برداری بهینه از منابع آب و پیش‌بینی وضعیت آینده آن برای استفاده نسل‌های آتی، استفاده از روش‌های پیش‌بینی وضعیت منابع آب، مورد تایید قرار گرفته است (Alami et al., 2014). در راستای مدیریت حوزه‌های آبخیز و جلوگیری از بروز ناسازگاری در اقدامات انجام شده در

با توجه به شواهد و مطالعات بین‌المللی هیئت بین دولتی تغییر اقلیم^۱ (IPCC)، به نظر می‌رسد که پدیده تغییر اقلیم می‌تواند آثار بالقوه‌ای در وضعیت منابع آب داشته باشد (IPCC, 2013). بنابراین با توجه به آثار زیان‌بار پدیده تغییر اقلیم در

نسبت به دوره پایه حاشی از داهش رواناب در هر سه سناریو بوده است. در مطالعه صورت گرفته توسط ما و همکاران (Ma et al., 2015) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی حوضه چو در آسیای مرکزی پرداخته شد. آن‌ها برای بررسی اثر تغییر اقلیم از ۵ مدل GCM تحت سه سناریو (RCP 2.6)، (RCP 4.5) و (RCP 8.5) استفاده کردند.

داخلاتویی و همکاران (Dakhlaoui et al., 2017) به ارزیابی توانایی مدل‌های بارش-رواناب مفهومی (IHACRES، HBV و GR4J) تحت تغییرات اقلیمی در شمال تونس پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که سه مدل هیدرولوژیکی تحت تغییر اقلیم به‌طور مشابه رفتار می‌کنند. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2019) به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب در دوره آتی تا سال ۲۱۰۰ پرداختند. از روش SDSM و مدل canESM2 و سناریوهای (RCP 2.6)، (RCP 4.5) و (RCP 8.5) جهت بررسی تغییر اقلیم و از مدل IHACRES به‌منظور مدل‌سازی بارش-رواناب، استفاده نمودند. نتایج نشان داد دما و بارش در دوره آتی روند افزایشی خواهند داشت و دبی در سناریوهای (RCP 2.6)، (RCP 4.5) و (RCP 8.5) به‌ترتیب ۲۶، ۲۸ و ۳۳ درصد افزایش می‌یابد.

محققان در پژوهش‌هایی به مقایسه مدل‌های هیدرولوژیکی در مدیریت منابع آب در مقیاس‌های مختلف پرداختند. از جمله می‌توان به مطالعات انجام شده توسط ژو و همکاران (Zhu et al., 2020) با موضوع برآورد دبی آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی IHACRES، SIMHYD و GR4J و تحقیق صورت گرفته توسط یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) با عنوان مقایسه مدل‌های هیدرولوژیکی XAJ، HBV، SIMHYD، IHACRES و GR4J در شرایط تغییر اقلیم و پژوهش انجام شده توسط کومار پاول و همکاران (Kumar Paul et al., 2021) با موضوع مقایسه مدل IHACRES با سایر مدل‌های هیدرولوژیکی از جمله GR4J و HBV در مقیاس‌های جهانی، قاره‌ای، کشوری و حوضه‌ای اشاره نمود. یانگ و همکاران (Yang et al., 2022) به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر میزان رواناب با استفاده از مدل‌های XAJ، HBV، SIMHYD، IHACRES و GR4J با در نظر گرفتن دوره‌ها و شرایط واسنجی متفاوت در دو حوضه با شرایط ایستا و غیرایستا از نظر اقلیم پرداختند. نتایج نشان داد برای حوضه‌های با روابط غیرایستای بارش-رواناب دوره واسنجی طولانی‌تری نیاز است.

مقدم و همکاران (Moghadam et al., 2023) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با مقایسه روش‌های داده کاوی، توزیعی و ANN در دوره آتی ۲۰۹۹-۲۰۴۰ پرداختند. آن‌ها از مدل‌های ریزمقیاس‌سازی LARS-WG، GlimGEN و GP و سناریوهای تغییر اقلیمی (RCP 2.6)، (RCP 4.5) و (RCP 8.5) و مدل‌های IHACRES و SWAT استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل LARS-WG با توجه به ضرایب R، RMSE، MAE و NSE بالاترین عملکرد را در بین مدل‌های ریزمقیاس‌سازی دارد. در بین مدل‌های IHACRES، SWAT و ANN، مدل IHACRES بهترین عملکرد را جهت

شرایط موجود، قابلیت شبیه‌سازی جریان خروجی از منطقه را داشته باشد (Yang et al., 2014). به دلیل تاثیر عوامل مختلف بر رفتار هیدرولوژیک یک حوزه آبخیز، برای شناخت و ارزیابی آن، اغلب از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Amiri & Rodbari Mousavi, 2016). مدل‌های هیدرولوژیکی متفاوت، برای شبیه‌سازی بارش-رواناب طراحی شده است (Ahmadpour et al., 2020). با توجه به این که یکی از اصلی‌ترین بخش‌های متاثر از تغییر اقلیم، بخش منابع آب به‌خصوص تغییر در میزان رواناب رودخانه‌ها است، لذا در این زمینه پژوهش‌های بسیاری انجام شده است.

کیان‌پناه و همکاران (Keyhanpanah et al., 2017) در پژوهشی به مدل‌سازی جریان خروجی زیرحوضه‌های کارون بزرگ در شرایط اقلیمی آینده پرداختند. در این پژوهش، دما و بارش برای سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ و ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۶ و ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ تحت دو سناریو A2 و B1 ریزمقیاس‌سازی شدند و سپس رواناب تحت مدل IHACRES شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی رواناب نشان داد در حوضه‌های مطالعه شده میزان رواناب دوره‌های آتی تحت هر دو سناریو، در فصل بهار و تابستان، کاهش و در پاییز و زمستان، افزایش خواهد یافت. میردشتوان و همکاران (Mirdashtovan et al., 2018) برای شبیه‌سازی جریان سطحی در حوضه دریاچه ارومیه از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریو A2 و B2 با استفاده از روش SDSM برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ با کاربست مدل هیدرولوژیکی IHACRES به این نتیجه رسیدند که جریان سطحی در دوره آتی به‌میزان ۲۴/۶ درصد تحت سناریو A2 افزایش و به‌میزان ۴/۶ درصد تحت سناریو B2 کاهش می‌یابد. آقایی و همکاران (Aghabeigi et al., 2019)، در مطالعه‌ای در برخی حوضه‌های اردبیل آثار تغییر اقلیم بر رواناب را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES بررسی کردند، نتایج نشان داد میزان بارش کاهش و دما افزایش می‌یابد. دبی متوسط کاهش و تعداد وقایع دبی اوج افزایش خواهد یافت. در پژوهشی که توسط بابل حکمی و همکاران (Babolhakami et al., 2020) در حوضه نکارود انجام شد، نتایج نشان داد که طی دوره‌های آتی میانگین آورد سالانه رودخانه نکا تحت سناریوهای اقلیمی (RCP 2.6)، (RCP 4.5) و (RCP 8.5) بین ۱۵ تا ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2020) به برآورد رواناب حوزه آبخیز گرگان‌رود منطقه آق‌قلا با استفاده از مدل IHACRES تحت سه سناریو (RCP 2.6)، (RCP 4.5) و (RCP 8.5) تغییر اقلیم پرداختند. نتایج نشان داد بارش و رواناب در دوره مدل‌سازی شده آینده تحت سناریوهای (RCP 2.6) و (RCP 4.5) روند کاهشی و تحت سناریو (RCP 8.5) روند جزئی افزایشی خواهد داشت. قسمی و همکاران (Qesmi et al., 2020) به بررسی و شبیه‌سازی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه شیرین واقع در استان فارس تحت سه سناریو (RCP 2.6)، (RCP 4.5) و (RCP 8.5) با استفاده از مدل IHACRES در دوره‌های آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ پرداختند. نتایج نشان دهنده افزایش دما و کاهش بارش در منطقه بود. بر اساس

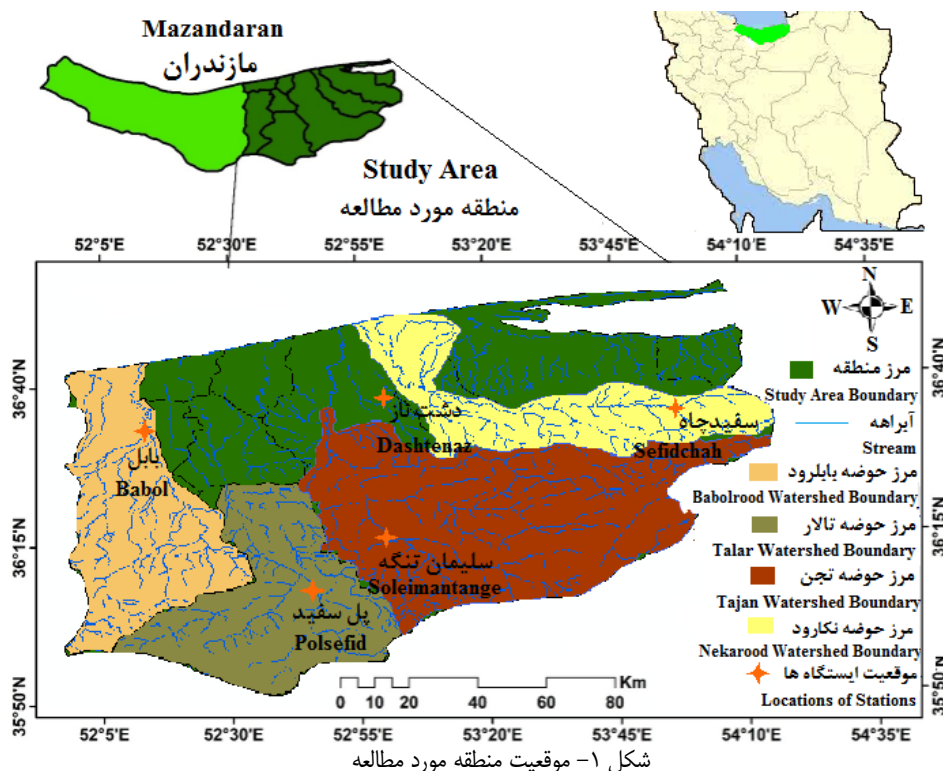
RCP 2.6 و RCP 8.5 در دوره آتی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES است.

مواد و روش‌ها منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه، حوزه‌های آبخیز شرق مازندران شامل چهار حوضه نکارود، تاجن، تالار و بابل‌رود به وسعت ۱۱۸۷۳ کیلومتر مربع، می‌باشد. این منطقه بین طول جغرافیایی ۵۲° ۲۸' تا ۵۴° ۱۰' و عرض جغرافیایی ۳۵° ۵۶' تا ۳۶° ۵۶' واقع شده است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. میانگین بارش سالانه ۶۵۵/۸۵ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن برابر با ۱۵/۸۸ °C می‌باشد. حداکثر ارتفاع منطقه مورد مطالعه ۳۸۹۰ متر و حداقل ارتفاع ۲۶- متر از سطح دریاهای آزاد می‌باشد (Meteorological Organization of Mazandaran Province).

شبیه‌سازی رواناب داشت. نتایج همچنین کاهش در میزان رواناب را در همه سناریوها در دوره آتی نشان داد.

تغییر اقلیم افزایش دما و پدیده‌های حدی اقلیمی نظیر سیل را به همراه خواهد داشت (Koutroulis et al., 2013). با توجه به مرور منابع نتیجه گرفته می‌شود که برآورد بارش و رواناب دوره آتی در هر منطقه مطالعاتی با توجه به اقلیم خاص آن محدوده، نتیجه متفاوتی را نشان داده است. با توجه به این موضوع که در استان مازندران وقوع سیل هرساله خسارات زیادی به زمین‌های کشاورزی و مسکونی وارد می‌کند (Shahiri Tabarestani and Zokaei, 2020)، لذا بررسی تغییر اقلیم و تاثیر آن بر دما، بارش و رواناب در محدوده مطالعاتی ضرورت می‌یابد؛ تا امکان برنامه‌ریزی منابع آب بر اساس پیش‌بینی دبی جریان فراهم شود. هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب در چهار حوزه آبخیز نکارود، تاجن، تالار و بابل‌رود تحت تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Location of the study area

می‌باشد و نیروی واداشت تابشی تا انتهای قرن ۲۱ به حدود ۸/۵ وات بر مترمربع خواهد رسید (IPCC, 2013).

برای ریزمقیاس نمایی^۱ داده‌ها از نرم‌افزار Lars-WG طی سه مرحله کالیبره کردن داده‌ها، ارزیابی داده‌ها و تولید داده‌های هواشناسی برای دوره آتی استفاده شد. برای این منظور از داده‌های روزانه بارش، بیشینه و کمینه دما و ساعات آفتابی ایستگاه‌های دشت‌ناز، بابل، پل سفید و سفیدچاه در سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ استفاده شده است. پس از پردازش و مرتب‌سازی داده‌ها و تهیه فایل‌های ورودی، مدل برای دوره پایه اجرا شد. پس از اطمینان از توانایی نرم‌افزار Lars-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی از طریق مقایسه داده‌های تولید

روش پژوهش

مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی

در پژوهش حاضر، جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب در آینده، ابتدا پارامترهای اقلیمی این دوره شبیه‌سازی شدند. در این تحقیق از خروجی‌های یکی از مدل‌های گردش عمومی جوی- اقیانوسی با نام HadGEM2 جهت بررسی تغییرات بارندگی و دما تحت سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه و بدبینانه (RCP 2.6 و RCP 8.5) در محدوده مطالعاتی استفاده شد. در سناریو RCP 2.6 کل واداشت تابشی تا سال ۲۰۵۰ حدود ۳ وات بر مترمربع می‌رسد و بعد از آن رو به کاهش می‌گذارد. سناریو RCP 8.5 به‌طور مداوم در حال افزایش

شده توسط مدل HadGEM2 و داده‌های مشاهداتی موجود در دوره پایه، این مدل جهت تولید داده‌های آبی با استفاده از سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه و بدبینانه اجرا شد و مقادیر روزانه داده‌های اقلیمی بارش، بیشینه و کمینه دما و ساعات آفتابی ۴۰ سال آینده (۲۰۲۱-۲۰۶۰) تولید و شبیه‌سازی شد.

شبیه‌سازی بارش-رواناب

برای شبیه‌سازی جریان در دوره آبی و بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب، مدل IHACRES که یک مدل پیوسته مفهومی-دینامیکی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در مقیاس حوضه است و توسط Jakeman and Hornberger (1993) توسعه یافته، با استفاده از سناریوهای اقلیمی مدنظر قرار گرفت.

مدل هیدرولوژیکی IHACRES

مدل IHACRES، یک مدل عددی مبتنی بر هیدروگراف و مولفه‌های جریان ناشی از بارش، تبخیر و تعرق و جریان دبی است. هدف اصلی IHACRES توصیف رفتار هیدرولوژیک حوضه با استفاده از کمترین پارامتر ممکن است و برای اجرا به مجموعه‌ای سه‌گانه از داده‌ها (بارش، دما و دبی) در هر واحد زمانی نیاز دارد (Croke & Jakeman, 2008).

چارچوب مدل‌سازی IHACRES براساس مدل‌های خطی و غیرخطی است. مدل کاهشی غیرخطی، بارندگی را با در نظر گرفتن نسبت نفوذ و تبخیر به بارش موثر تبدیل می‌کند. به‌منظور به‌دست آوردن بارش موثر، شاخص رطوبتی حوضه یا شاخص رطوبت پیشین و شاخص اشباع حوضه برای هر گام زمانی محاسبه می‌شود. در مدل خطی، تبدیل بارش موثر به رواناب با استفاده از روابط خطی زیر محاسبه می‌شود (Abushandi & Merkel, 2013).

$$u_k = [c (\varphi_k - I)]^p r_k \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن C ضریب تعادل حجم بارش، I آستانه شاخص رطوبت خاک، p فاکتور واکنش غیرخطی و r_k بارش مشاهداتی می‌باشد. φ_k شاخص رطوبت خاک است که با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد.

$$\varphi_k = r_k + \left[1 - \frac{1}{\tau_k}\right] \varphi_{k-1} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن τ_k برابر شدت خشکی خاک و به‌عنوان تابعی از دما است که با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\tau_k = \tau_w \exp(f (T_{ref} - T_k) * 0.062) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن τ_k شدت خشکی مینا، f تابع تعدیل دما (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات)، T_{ref} دمای مرجع و T_k دما در بازه زمانی موردنظر هستند. بعد از محاسبه بارش موثر، هیدروگراف واحد کل با استفاده از بخش خطی در مدل محاسبه می‌گردد.

تبدیل بارش موثر به رواناب (بخش خطی): بخش خطی دارای سه پارامتر τ_q ، τ_s ، α_s می‌باشد. ترکیب دو مؤلفه جریان سریع X_k^q و جریان آهسته X_k^s منجر به تولید رواناب x_k می‌شود که با استفاده از روابط ۴ تا ۶ محاسبه می‌گردد. که در آن به‌ترتیب، ثابت زمانی جریان سریع و α_s و β_s به‌ترتیب ثابت زمانی جریان آهسته هستند.

$$x_k = X_k^{(q)} + X_k^{(s)} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$X_k^{(q)} = -\alpha_q X_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \quad \text{رابطه ۵}$$

$$x_k = -\alpha_s X_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k \quad \text{رابطه ۶}$$

این ضرایب با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند.

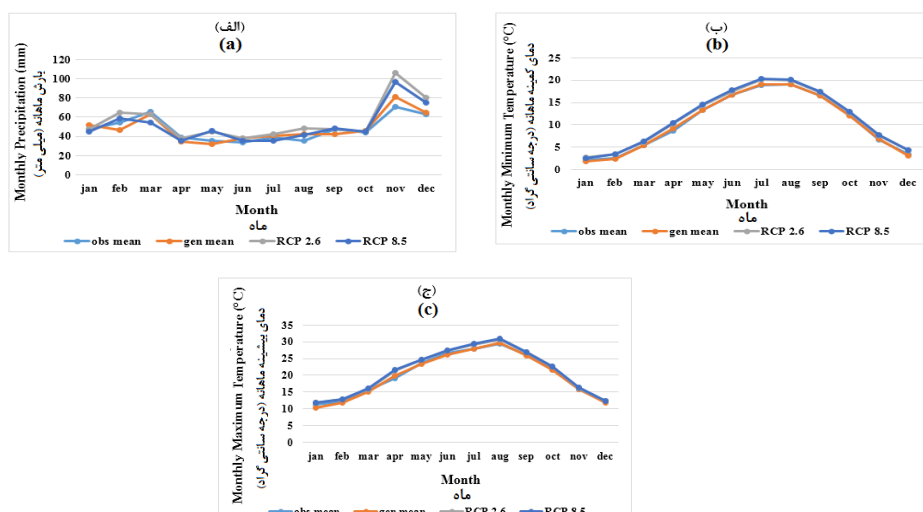
$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \quad \text{رابطه ۸}$$

نتایج و بحث

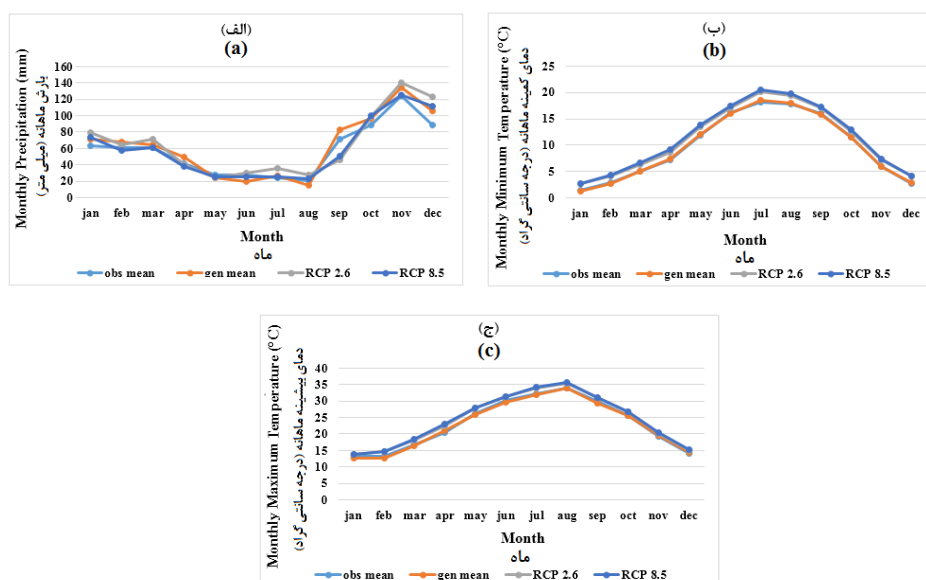
مدل‌سازی تغییر اقلیم

شکل‌های ۲ تا ۵ مقایسه پارامترهای اقلیمی کمینه و بیشینه دمای ماهانه و میانگین ماهانه بارش در دوره پایه و شبیه‌سازی شده را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج حاصل از بررسی تغییر اقلیم نشان داد در ایستگاه‌های منتخب در هر چهار حوضه، میانگین ماهانه دمای کمینه و دمای بیشینه در تمامی ماه‌های سال دوره آبی در هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه نسبت به دوره فعلی (۱۹۹۷-۲۰۱۶) افزایش می‌یابد. این میزان طی سناریوهای مختلف متفاوت است. میانگین ماهانه بارش در دوره آبی در ایستگاه‌های منتخب در هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه نسبت به دوره فعلی روند ثابتی ندارد و در ماه‌های مختلف متفاوت است و در بعضی از ماه‌ها بیشتر و یا کمتر برآورد شد.



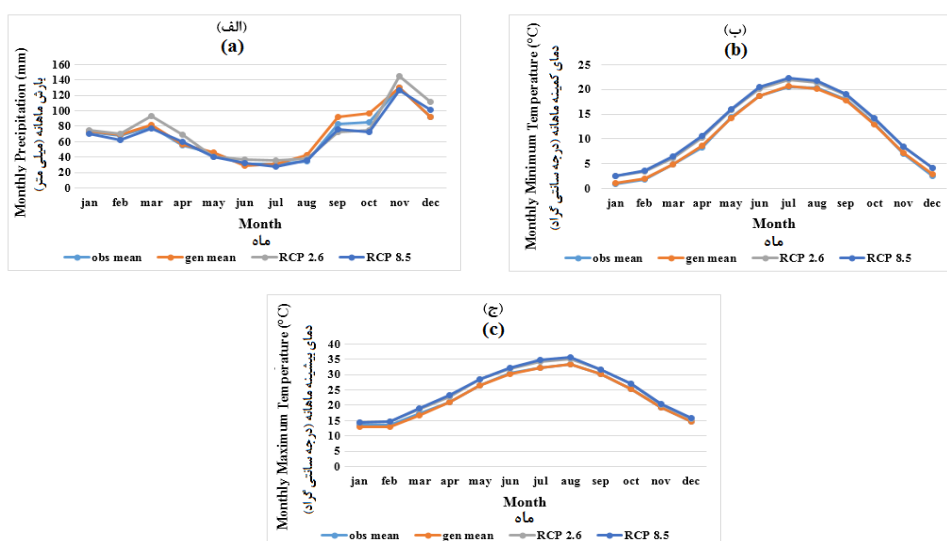
شکل ۲- مقایسه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و شبیه‌سازی شده در ایستگاه پل سفید (الف: میانگین ماهانه بارش، ب: دمای کمینه ماهانه، ج: دمای بیشینه ماهانه)

Figure 2. Comparison of climate parameters for the current and simulated period in Polsefid station (a. mean monthly precipitation, b. Mean Monthly Minimum Temperature, c. Mean Monthly Maximum Temperature)



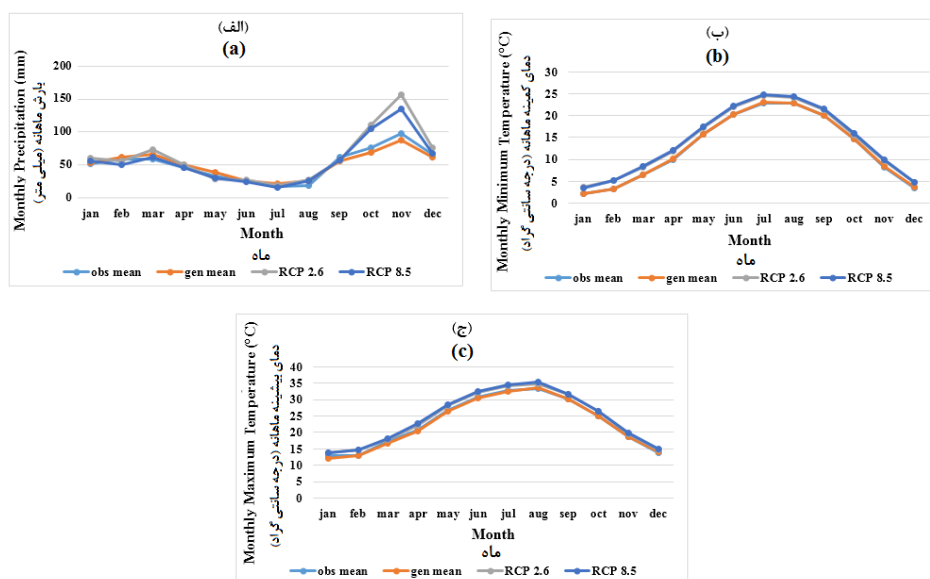
شکل ۳- مقایسه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و شبیه‌سازی شده در ایستگاه بابل (الف: میانگین ماهانه بارش، ب: دمای کمینه ماهانه، ج: دمای بیشینه ماهانه)

Figure 3. Comparison of climate parameters for the current and simulated period in Babol station (a. mean monthly precipitation, b. Mean Monthly Minimum Temperature, c. Mean Monthly Maximum Temperature)



شکل ۴- مقایسه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و شبیه‌سازی شده در ایستگاه دشت ناز (الف: میانگین ماهانه بارش، ب: دمای کمینه ماهانه، ج: دمای بیشینه ماهانه)

Figure 4. Comparison of climate parameters for the current and simulated period in Dashte Naz station (a. mean monthly precipitation, b. Mean Monthly Minimum Temperature, c. Mean Monthly Maximum Temperature)



شکل ۵- مقایسه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و شبیه‌سازی شده در ایستگاه سفیدچاه (الف: میانگین ماهانه بارش، ب: دمای کمینه ماهانه، ج: دمای بیشینه ماهانه)

Figure 5. Comparison of climate parameters for the current and simulated period in Sefidchah station (a. mean monthly precipitation, b. Mean Monthly Minimum Temperature, c. Mean Monthly Maximum Temperature)

بنابراین هر چهار حوضه روند تقریباً مشابهی از نظر تغییرات دما و بارش تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره فعلی نشان دادند. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از معیارهای خطای میانگین مربعات^۱، خطای جذر میانگین مربعات^۲، میانگین قدر مطلق خطا^۳ و ضریب تعیین^۴ در دوره پایه در جدول ۱ آورده شده است.

بنابراین هر چهار حوضه روند تقریباً مشابهی از نظر تغییرات دما و بارش تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره فعلی نشان دادند. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از

1- Mean Squared Error (MSE)
4- Coefficient of Determination

2- Root Mean Square Error (RMSE)

3- Mean Absolute Error (MAE)

جدول ۱- ارزیابی عملکرد مدل در دوره پایه با استفاده از معیارهای مختلف

Table 1. Evaluation of model performance using different criteria for the current period

ایستگاه Station	دمای حداکثر Maximum Temperature				دمای حداقل Minimum Temperature				بارش Precipitation			
	R	MAE	RMSE	MSE	R	MAE	RMSE	MSE	R	MAE	RMSE	MSE
دشت‌ناز Dashte Naz	0.97	3.35	5.24	27.48	0.99	0.23	0.31	0.10	0.99	0.17	0.20	0.04
بابل Babol	0.98	7.71	8.60	73.96	0.99	0.33	0.40	0.16	0.99	0.15	0.18	0.03
پل سفید Polsefid	0.91	4.57	5.15	26.59	0.99	0.34	0.42	0.18	0.99	0.17	0.23	0.05
سفیدچاه Sefidchah	0.96	4.94	5.53	30.63	0.99	0.26	0.33	0.11	0.99	0.10	0.12	0.01

شد و سری روزانه دبی برای دوره آتی پیش‌بینی شد. مراحل انجام شده در ادامه ارائه شده است.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES از آمار دوره ۱۹۹۷-۲۰۰۸ به عنوان دوره واسنجی و ۲۰۰۹-۲۰۱۶ به عنوان دوره اعتبارسنجی استفاده شد. دوره زمانی ۲ سال (۷۳۰ روز) به عنوان گرم کردن مدل تعیین شد.

در این پژوهش، به منظور ارزیابی عملکرد مدل از آماره ضریب تعیین استفاده شد. نتایج عملکرد مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار آماره ضریب تعیین بین صفر تا یک می‌باشد و اگر از ۰/۶ بیشتر باشد نشان می‌دهد متغیرهای مستقل تا حد زیادی توانسته‌اند تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند. بر اساس جدول ۲ مشاهده می‌شود مقادیر به دست آمده برای ضریب تعیین بالاتر از ۰/۶ می‌باشد. این معیار برای همه حوضه‌های مورد مطالعه در دوره واسنجی بالاتر از دوره اعتبارسنجی به دست آمده است و به صورت میانگین در حوزه آبخیز تجن نسبت به بقیه حوضه‌ها میزان بالاتری را دارا است.

با توجه به معیارهای محاسبه شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود میزان سه معیار محاسبه شده مربوط به خطا در مورد پارامتر دمای حداقل، در ایستگاه سفیدچاه و در مورد پارامتر دمای حداکثر، در ایستگاه دشت‌ناز نسبت به بقیه ایستگاه‌ها کمتر و در مورد پارامتر بارش، ایستگاه‌های دشت‌ناز و پل سفید دارای خطای کمتری نسبت به بقیه ایستگاه‌ها هستند. در ضمن میزان ضریب تعیین به دست آمده مربوط به پارامترهای دمای حداقل و حداکثر در همه ایستگاه‌ها بالاتر از میزان آن برای معیار بارش است.

شبیه‌سازی بارش - رواناب

به منظور شبیه‌سازی، داده‌های بارش روزانه، دمای متوسط روزانه و دبی روزانه دوره آماری (۱۹۹۷-۲۰۱۶) چهار ایستگاه به همراه مساحت هر کدام از حوضه‌ها وارد نرم‌افزار IHACRES شد.

سپس دو دوره زمانی برای واسنجی و اعتبارسنجی به منظور تعیین عملکرد مدل IHACRES در توانایی شبیه‌سازی دبی دوره آتی انتخاب شد. پس از اطمینان از عملکرد مدل، داده‌های اقلیمی تولید شده توسط مدل HadGEM2 وارد IHACRES

جدول ۲- نتایج عملکرد مدل با استفاده از آماره ضریب تعیین در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 2. Performance results of model using coefficient of determination criterion for the calibration and validation period

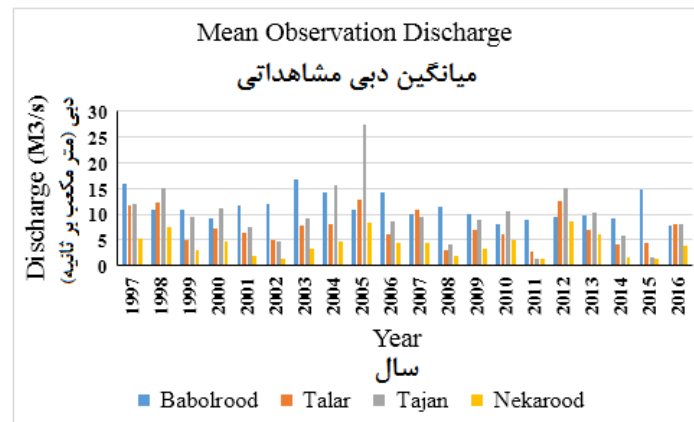
حوضه Watershed	دوره آماری Statistical Period	آماره R2 R2 Statistics
بابل‌رود Babolrood	واسنجی calibration	0.69
	اعتبارسنجی validation	0.66
تالار Talar	واسنجی calibration	0.72
	اعتبارسنجی validation	0.68
تجن Tajan	واسنجی calibration	0.74
	اعتبارسنجی validation	0.70
نکارود Nekarood	واسنجی calibration	0.71
	اعتبارسنجی validation	0.67

ایستگاه‌های منتخب، برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد. سپس میانگین سالانه دبی‌های مشاهده‌ای در دوره فعلی ۱۹۹۷-۲۰۱۶ و دبی‌های شبیه‌سازی شده در دوره آتی تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 و همچنین متوسط ۲۰ ساله رواناب در ایستگاه‌ها در دوره آتی با دوره مشاهده‌ای مقایسه و

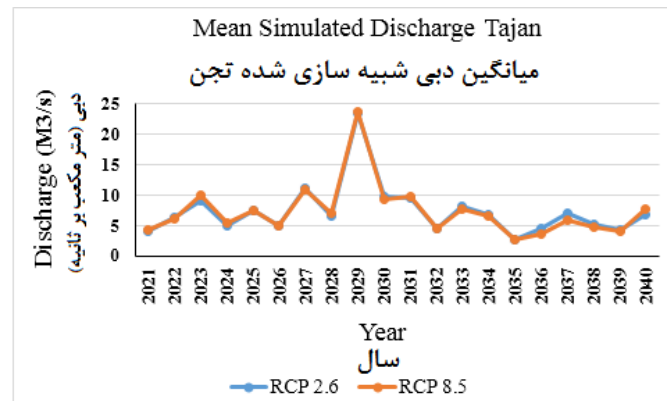
شبیه‌سازی بارش - رواناب برای دوره آتی

پس از واسنجی مدل IHACRES، برای هریک از سناریوهای اقلیمی، دما و بارش تولید شده توسط مدل اقلیمی HadGEM2 وارد مدل IHACRES شده و سری روزانه رواناب رودخانه‌های تجن، بابل‌رود، تالار و نکارود در

ارزیابی شد. شکل ۶ مقادیر دبی مشاهداتی در چهار حوضه مورد مطالعه و شکل های ۷ تا ۱۰ مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی شده در دوره آتی تحت دو سناریو مختلف در حوضه ها را نشان می دهد. مقادیر میانگین ۲۰ ساله دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره آتی در جدول ۳ ارائه شده است.



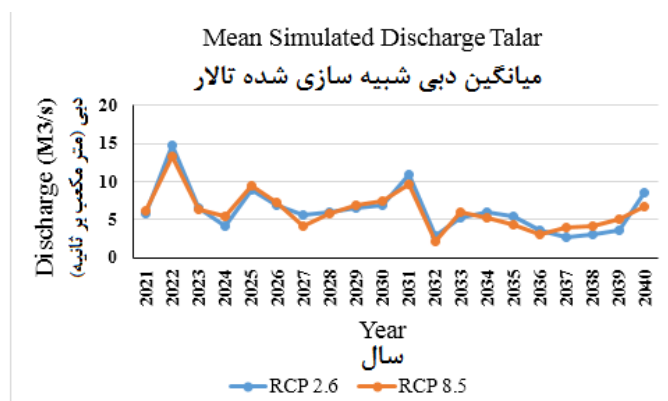
شکل ۶- میانگین سالانه دبی مشاهداتی در حوضه های منطقه مطالعاتی
Figure 6. Annual mean observation discharge in watersheds of the study area



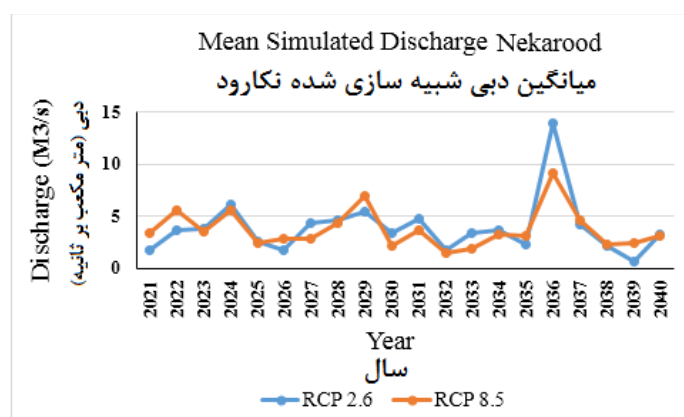
شکل ۷- مقایسه دبی شبیه سازی شده تحت دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 در حوضه تاجن
Figure 7. Comparison of simulated discharge under RCP 2.6 and RCP 8.5 climate scenarios in Tajan watershed

جدول ۳- مقایسه میانگین ۲۰ ساله دبی مشاهداتی دوره تاریخی و دبی شبیه سازی شده در دوره آتی
Table 3. Comparison of 20-years mean observed discharge for historical period and simulated discharge for future period

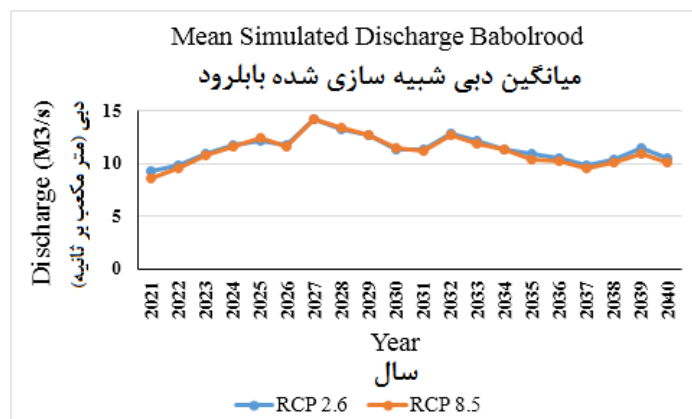
میانگین دبی مشاهداتی دوره تاریخی (مترمکعب بر ثانیه) Mean observed discharge for historical period (M3/s)	میانگین دبی شبیه سازی شده در دوره آتی (مترمکعب بر ثانیه) Mean simulated discharge for future period (M3/s)		ایستگاه Station	حوضه Watershed
	RCP 8.5	RCP 2.6		
11.34	11.22	11.40	بابل رود Babol	بابل رود Babolrood
7.41	6.12	6.18	پل سفید Polsefid	تالار Talar
9.82	7.29	7.33	سلیمان تنگه Soleimantange	تاجن Tajan
4.10	3.72	3.85	سفیدچاه Sefidchah	نکارود Nekarood



شکل ۸- مقایسه دبی شبیه‌سازی شده تحت دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 در حوضه تالار
Figure 8. Comparison of simulated discharge under RCP 2.6 and RCP 8.5 climate scenarios in Talar watershed



شکل ۹- مقایسه دبی شبیه‌سازی شده تحت دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 در حوضه نکارود
Figure 9. Comparison of simulated discharge under RCP 2.6 and RCP 8.5 climate scenarios in Nekarood watershed



شکل ۱۰- مقایسه دبی شبیه‌سازی شده تحت دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 در حوضه بابلرود
Figure 10. Comparison of simulated discharge under RCP 2.6 and RCP 8.5 climate scenarios in Babolrood watershed

در حوضه تجن دبی پیش‌بینی شده دوره آبی در سال‌های ششم، هفتم، دهم، ۱۱، ۱۲، ۱۵ و ۱۹م بیشتر از دوره فعلی است. در سال سوم دبی مشاهداتی از دبی شبیه‌سازی شده سناریو RCP 2.6 بیشتر و از سناریو RCP 8.5 کمتر است و در بقیه سال‌ها دبی دوره مشاهداتی نسبت به دوره آبی بیشتر است. در حوضه تالار دبی پیش‌بینی شده دوره آبی در سال‌های دوم، سوم، پنجم، ششم، دهم، ۱۵م بیشتر از دوره فعلی است.

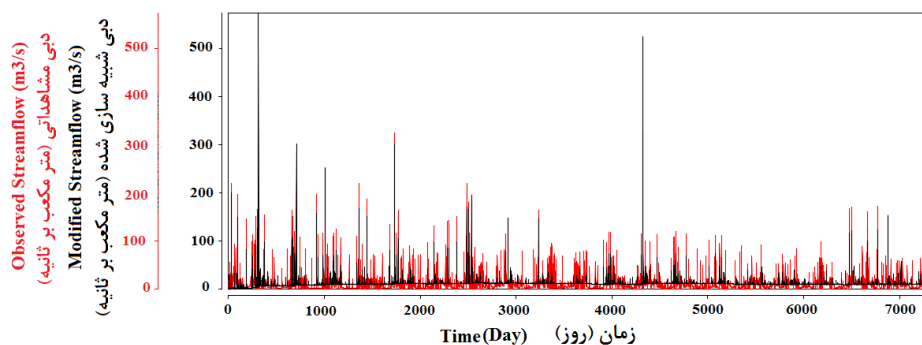
همان‌طور که از شکل‌های ۷ تا ۱۰ مشاهده می‌شود در حوضه بابلرود دبی دوره مشاهداتی در سال‌های اول، دوم، ششم، هفتم، هشتم، دهم و ۱۹م بیشتر از سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 و در سال‌های سوم و ۱۷م میزان دبی مشاهداتی کمتر از سناریو RCP 2.6 و بیشتر از سناریو RCP 8.5 است و در بقیه سال‌ها دبی در شرایط تغییر اقلیم تحت هر دو سناریو نسبت به دوره فعلی افزایش یافته است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد تغییرات دبی حوضه‌ها تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به دبی دوره فعلی، ثابت نیست که دلیل آن می‌تواند ثابت نبودن روند تغییرات بارش دوره آتی نسبت به دوره فعلی باشد. همان‌گونه که از نتایج جدول ۳ ملاحظه می‌شود، متوسط ۲۰ ساله دبی پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های منتخب حوضه تالار، تجن و نکارود در دوره آتی برای هر کدام از سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه کاهش داشته است، اما در ایستگاه در نظر گرفته شده برای حوضه بابل‌رود، این مقدار در سناریو RCP 2.6 نسبت به دوره تاریخی افزایش داشته است.

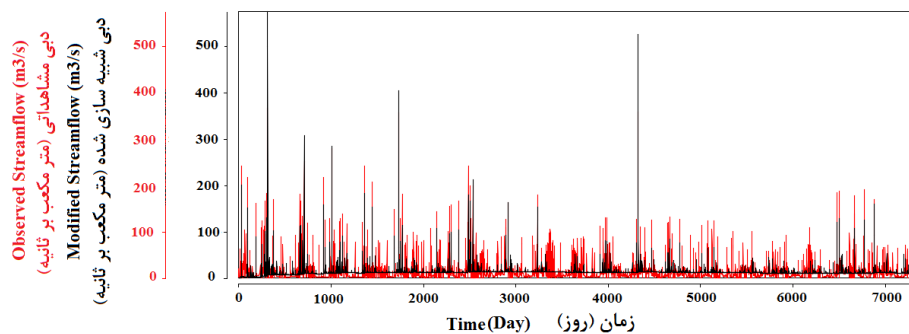
شکل‌های ۱۱ تا ۱۸ نمودارهای مربوط به مقایسه دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 را برای هر چهار حوضه نشان می‌دهد.

سال‌های ۱۹ام دبی مشاهداتی از دبی شبیه‌سازی شده سناریو RCP 2.6 بیشتر و از سناریو RCP 8.5 کمتر است و در سال ۲۰ام میزان دبی، مشاهداتی کمتر از سناریو RCP 2.6 و بیشتر از سناریو RCP 8.5 است و در بقیه سال‌ها دبی دوره مشاهداتی نسبت به دبی شبیه‌سازی شده دوره آتی بیشتر است.

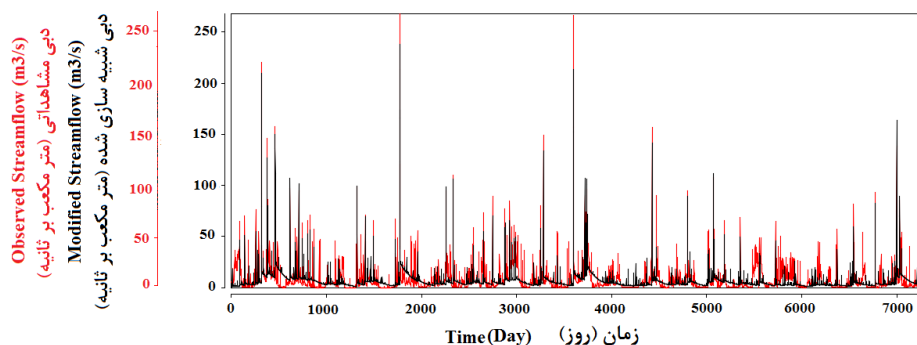
در حوضه نکارود دبی پیش‌بینی شده دوره آتی در سال‌های سوم، چهارم، پنجم، ششم، ۱۵، ۱۶ و ۱۸ام بیشتر از دوره فعلی است. در سال‌های هفتم و ۱۱ام دبی مشاهداتی از دبی شبیه‌سازی شده سناریو RCP 2.6 کمتر و از سناریو RCP 8.5 بیشتر است. در سال ۱۹ام دبی مشاهداتی از دبی شبیه‌سازی شده سناریو RCP 2.6 بیشتر و از سناریو RCP 8.5 کمتر است و در بقیه سال‌ها دبی دوره مشاهداتی نسبت به دوره آتی بیشتر است.



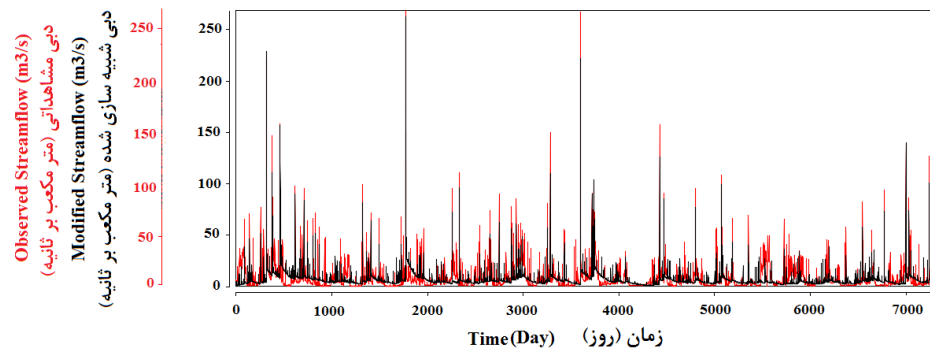
شکل ۱۱- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (بابل‌رود، RCP 2.6)
Figure 11. Comparison of observed and simulated discharge (Babolrood, RCP 2.6)



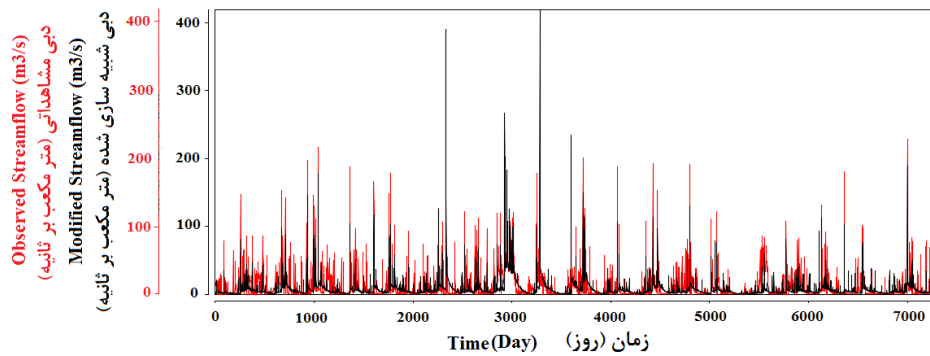
شکل ۱۲- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (بابل‌رود، RCP 8.5)
Figure 12. Comparison of observed and simulated discharge (Babolrood, RCP 8.5)



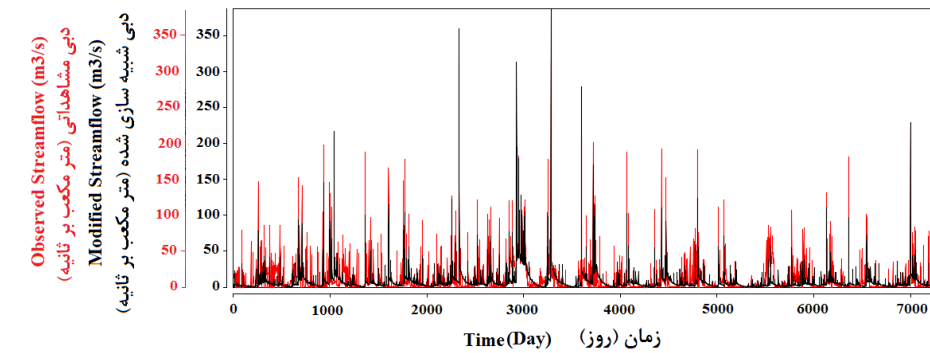
شکل ۱۳- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (تالار، RCP 2.6)
Figure 13. Comparison of observed and simulated discharge (Talar, RCP 2.6)



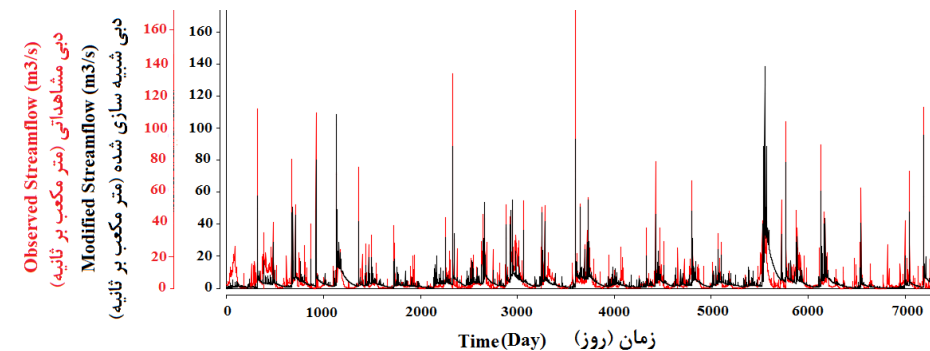
شکل ۱۴- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (تالار، RCP 8.5)
Figure 14. Comparison of observed and simulated discharge (Talar, RCP 8.5)



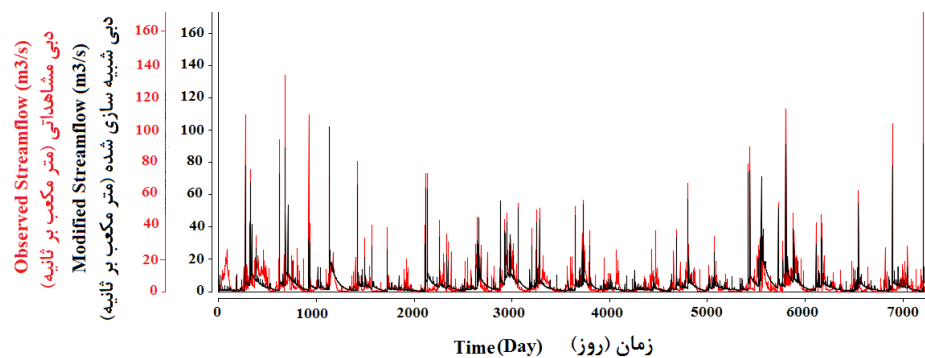
شکل ۱۵- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (تجن، RCP 2.6)
Figure 15. Comparison of observed and simulated discharge (Tajan, RCP 2.6)



شکل ۱۶- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (تجن، RCP 8.5)
Figure 16. Comparison of observed and simulated discharge (Tajan, RCP 8.5)



شکل ۱۷- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (نکارود، RCP 2.6)
Figure 17. Comparison of observed and simulated discharge (Nekarood, RCP 2.6)



شکل ۱۸- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (نکارود، RCP 8.5)
Figure 18. Comparison of observed and simulated discharge (Nekarood, RCP 8.5)

همان‌گونه که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، مدل در شبیه‌سازی دبی‌های بیشینه دقت کمتری داشته و دبی‌های کمینه را با دقت بالاتری پیش‌بینی کرده است. در این پژوهش، چگونگی تغییرات میزان رواناب در دوره آتی در حوزه‌های آبخیز شرق مازندران، تحت شرایط تغییر اقلیم شبیه‌سازی و با رواناب دوره تاریخی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد متوسط ۲۰ ساله دبی پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های سه حوضه تالار، تجن و نکارود در شرایط تغییر اقلیم برای هرکدام از سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه کاهش داشته است، در ایستگاه پل سفید در حوضه تالار، دبی شبیه‌سازی شده تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۶/۱۸ و سناریو RCP 8.5 برابر با ۶/۱۲ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده که در مقایسه با دبی مشاهداتی که برابر با ۷/۴۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، کاهش نشان می‌دهد. در ایستگاه سلیمان تنگه در حوضه تجن دبی پیش‌بینی شده تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۷/۳۳ و سناریو RCP 8.5 برابر با ۷/۲۹ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده که در مقایسه با دبی مشاهداتی که برابر با ۹/۸۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، کاهش یافته است. در ایستگاه سفیدچاه در حوضه نکارود دبی شبیه‌سازی شده تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۳/۸۵ و سناریو RCP 8.5 برابر با ۳/۷۲ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده که در مقایسه با دبی مشاهداتی که برابر با ۴/۱۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، کاهش می‌یابد. اما در ایستگاه بابل در حوضه بابل‌رود، دبی تحت سناریو RCP 2.6 برابر با ۱۱/۴۰ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی شد که نسبت به دبی دوره مشاهداتی که برابر با

۱۱/۳۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، افزایش یافته است، در صورتی که دبی تحت سناریو RCP 8.5 با مقدار برابر با ۱۱/۲۲ مترمکعب بر ثانیه کمتر از دبی مشاهداتی شبیه‌سازی شد. همان‌گونه که در بخش نتایج ذکر گردید چگونگی تغییرات سالانه دبی‌ها نسبت به دوره فعلی ثابت نیست. همچنین در برخی سال‌ها در دوره آماری آتی علی‌رغم افزایش میانگین بارش، دبی در دوره آینده کاهش می‌یابد که احتمالاً دلیل آن را می‌توان به افزایش دما در دوره آتی بر اثر تغییر اقلیم ارتباط داد. اما در مورد افزایش دبی علی‌رغم کاهش میانگین بارش آن سال، یکی از دلایل آن می‌تواند امکان رخداد بارش‌های با شدت بالا یا رگباری در آن سال موردنظر باشد که باعث افزایش میزان دبی شده است. با توجه به ثابت نبودن تغییرات دبی سالانه شبیه‌سازی شده دوره آتی نسبت به دوره فعلی اگر معیار مقایسه، نتایج میانگین ۲۰ ساله دبی پیش‌بینی شده حوضه‌ها مدنظر قرار گیرد، نتایج پژوهش حاضر با نتایج به‌دست آمده با نتایج مطالعات آقا بیگم، و همکاران (Aghabeigi et al., 2019)، بابل حکیمی و همکاران (Babolhakami et al., 2020) و قشمی و همکاران (Qesmi et al., 2020) هم‌راستا و با نتایج حاصل از پژوهش‌های میردشتیان و همکاران (Mirdashtovan et al., 2018) و احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2020) متفاوت است. دلیل احتمالی این هم‌راستا نبودن می‌تواند به‌علت تفاوت در اقلیم و فیزیوگرافی مناطق مختلف مطالعاتی و روش‌ها و مدل‌های استفاده شده برای ریز مقیاس‌سازی و همچنین برخی پارامترهای مدل بارش-رواناب در این پژوهش‌ها باشد.

References

- Abushandi, E., & Merkel, B. (2013). Modeling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Journal of Water Resource Manaaement*. 27. 2391-2409. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0293-4>
- Aghabeigi, N., Esmali Ouri, A., Mostafa zadeh, R., & Golshan, M. (2019). The effects of climate change on runoff using IHACRES hvdrologic model in some of watersheds. Ardabil province. *Irriation & Water Enaineerina*. 10(38). 176-187 (In Persian). 10.22125/IWE.2019.100750
- Ahmadi, M., Dadashi Roudhari, A., & Devrmaiai, A. (2020). Runoff estimation using IHACRES model based on CHIRPS satellite data and CMIP5 models (case study: Gorganroud basin-Aa Oala area). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(3), 659-671 (In Persian). 10.22059/IJSWR.2019.289144.668316
- Ahmadi, M., Motamedvaziri, B., Ahmadi, H., Moeini, A., & Zehtabiyani, GH. (2019). Assessment of climate change impact on surface runoff, statistical downscaling and hydrological modelling. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 114, 102800. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.09.002>

- Ahmadnour, A., Mirhashemi, H., & Haghighat iou, P. (2020). Evaluation of classical. conceptual IHACRES and hvbrid ARMA-ANN models in simulation and prediction of daily discharge of Maroun river. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(3), 727-736 (In Persian). DOI: 10.22059/ijswr.2019.290549.668344
- Alami, M.T., Aghabalae, B., Ahmadi, M. H., & Farzin, S. (2014). Ontimum allocation of water resources by using system dynamics. *Water Engineering*, 7(23), 99-110 (In Persian).
- Amiri, E., & Rodbari Mousavi, M. (2016). Evaluation of IHACRES hydrological model for simulation of daily flow (case studv: Polrood and Shalmanrood rivers). *Iranian Journal of Ecohydroloav*. 3(4). 533-543 (In Persian). 10.22059/IJE.2016.60356
- Babolhakami, A., Gholami Sefidkouhi, M., & Emadi, A. (2020). Assessing the impact of climate change on drought and forecasting Neka river basin runoff in future periods. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 7(2), 291-302 (In Persian).
- Croke, B.F., & Jakeman, A.J. (2008). Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semiarid regions. *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*, 41-48.
- Dakhlaoui, H., Ruelland, D., Trambalay, Y., & Bargaoui, Z. (2017). Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models under climate variability in northern Tunisia. *Journal of Hydrology*, 550, 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.032>
- IPCC. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovern-mental panel on climate change intergovernmental panel on climate change (IPCC). Cam-bridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jakeman, A. J., & Hornberger, G.M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research*. 29(8). 2637-2649.
- Kevhannanah. M., Zare Bidaki. R., & Bazrafshan. J. (2017). Flow modelling in Great Karun Sub-basins in terms of future climate. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(4), 1033- 1047 (In Persian). [10.22059/IJE.2017.229255.502](https://doi.org/10.22059/IJE.2017.229255.502)
- Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., & Jacob, D. (2013). Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of hydrology*, 479, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.055>
- Kumar Paul, P., Zhang, Y., Ma, M., Mishra, A., Panigrahy, N., & Singh, R. (2021). Selecting hydrological models for developing countries: perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. *Journal of Hydrology*, 600, 126561. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126561>
- Ma, C., Sun, L., Liu, S., Shao, M., & Luo, Y. (2015). Impact of climate change on the streamflow in the glacierized chu river basin. central asia. *Journal of Arid Land*, 7(4), 501-513. <https://doi.org/10.1007/s40333-015-0041-0>
- Meteorological Organization of Mazandaran Province.
- Mirdashtovan. M., Malekian. A., & Mohseni Saravi. M. (2018). Stream flow simulation using statistical downscaling of climatic data: Urmia Lake basin. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5(2), 419-431 (In Persian). [10.22059/IJE.2017.232662.586](https://doi.org/10.22059/IJE.2017.232662.586)
- Moghadam, H., Ashofteh, P., & Loaiciga, H.A. (2023). Investigating the performance of data mining, lumped, and distributed models in runoff projected under climate change. *Journal of Hvdrolaav*. 617. 128992. <https://doi.org/10.1016/i.ihvdrol.2022.128992>
- Qesmi. R., Mirabhasi Naiafabadi. R., & Nasr Esfahani. M. (2020). Simulation of Shirin (Azam Jareh) river runoff in climate change conditions using IHACRES model. *Iranian Water Research Journal*. 14(4). 87-98 (In Persian).
- Shahiri Tabarestani. E., & Zokaei. M. S. (2020). Assessment of Flood Hazard using Analytic Hierarchy Process Method (AHP) in Mazandaran Province, Iran. *Environment and Water Engineering*, 6(4), 331-344. <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.235593.1370>
- Yang, T.H., Ho, J.Y., Hwang, G.D., & Lin, G.F. (2014). An indirect approach for discharge estimation: a combination among micro-genetic algorithm, hydraulic model, and in situ measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 39, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.07.003>
- Yang, W., Chen, H., Xu, C-Y., Huo, R., Chen, J., & Guo, S. (2020). Temporal and spatial transferabilities of hydrological models under different climates and underlying surface conditions. *Journal of Hydrology*, 591, 125276. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125276>
- Yang, W., R. Xia, H. Chen, M. Wang & C-Y. Xu. (2022). The impact of calibration conditions on the transferability of conceptual hydrological models under stationary and nonstationary climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 613, 128310. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128310>
- Zhu, R., Croke, B., & Jakeman, A. (2020). Diffuse groundwater recharge estimation confronting hydrological modelling uncertainty. *Journal of Hydrology*, 584, 124642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124642>