

Assessment of Climate Change Impact on Surface Water Resources of the Karun Basin and Hydropower Generation at Shahid Abbaspour Dam under RCP Scenarios

Gholam Ali Mozaffari^{1*} , Hossein Behzadi Karimi², Forough Mohammadi Ravari³

1. *Corresponding Author, Professor of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran*
 Email: gmozafari@yazd.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7418-8737>
 2. *PhD in Hydrology, Yazd University, Yazd, Iran*
 3. *PhD student in Climatology, Yazd University, Yazd, Iran*

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 29 October 2024 Revised: 08 June 2025 Accepted: 13 July 2025 Published: 22 December 2025 Keywords: Climate change, Artificial Neural Network (ANN), Surface water resources, Hydropower energy, Karun River Basin, Shahid Abbaspour Dam.	Global warming, caused by the increase in greenhouse gas concentrations in recent decades, has led to significant changes in climatic parameters, which can impact surface water resources and, consequently, hydropower production. The Karun basin, as one of the most important sources of water supply and hydropower generation in the country, plays a crucial role due to its large reservoir dams. This study evaluates the impact of climate change on the surface water resources of the Karun basin and hydropower generation at the Shahid Abbaspour Dam under future scenarios of RCP emissions. For this purpose, an Artificial Neural Network (ANN) model was used to simulate and predict hydro-climatic data and hydropower generation. The simulation results indicate that, in future periods, the annual hydropower production will vary between a 2.5% increase and a 22.3% decrease compared to the baseline period. Furthermore, under the optimistic scenario (RCP2.6), the changes in hydropower energy show a non-significant increase, while under the pessimistic scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), a significant decrease in energy production is confirmed. These results suggest that climate change could have considerable negative effects on surface water resources and hydropower production in the future, highlighting the need for water resource management and long-term planning.
How to Cite: Mozaffari, G. A. , Behzadi Karimi, H. and Mohammadi Ravari, F. (2025). Assessment of Climate Change Impact on Surface Water Resources of the Karun Basin and Hydropower Generation at Shahid Abbaspour Dam under RCP Scenarios. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 14(46), 75-104.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.50099.2076 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The extensive use of fossil fuels has led to the escalation of greenhouse gas emissions and subsequent climate change, posing serious threats to human life and natural ecosystems. Renewable energy sources, especially hydropower, offer a viable solution to mitigate these impacts. Hydropower plants are particularly favored due to their environmental and economic benefits; however, their performance is highly dependent on hydrological conditions, which are vulnerable to climate change. In Iran, the Shahid Abbaspour Dam plays a critical role in supplying hydropower and ensuring the stability of the regional energy network. Therefore, this study aims to assess the impacts of climate change on surface water resources and hydropower production in the Karun Basin under RCP scenarios.

DATA AND METHODOLOGY

The study area is the Karun River Basin, a major source of water and hydropower production in Iran. To predict future climate impacts, hydro-climatic outputs from the HadGEM2-ES model under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios were utilized for the periods 2021–2040, 2041–2060, and 2061–2080. Input data including reservoir inflow, outflow, and storage volume, with various time delays, were fed into a Multilayer Perceptron (MLP) Artificial Neural Network. Based on model performance evaluation metrics, the MLP11 configuration was selected for final simulations due to its superior predictive accuracy (Table 1).

Table 1: Input scenarios to the neural network for modeling hydroelectric energy of Shahid Abbaspour Power Plant (Source: Authors)

Input Function	Model Number
Hydropower (t)={ Qt(in) }	MLP1
Hydropower (t)={ Qt(out) }	MLP2
Hydropower (t)={ V(t) }	MLP3
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt(out), V(t) }	MLP4
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt-1(in), Qt-2(in) }	MLP5
Hydropower (t)={ Qt(out), Qt-1(out), Qt-2(out) }	MLP6
Hydropower (t)={ V(t), V(t-1), V(t-2) }	MLP7
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt-1(in), Qt-2(in), Qt(out), Qt-1(out), Qt-2(out) }	MLP8
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt-1(in), Qt-2(in), V(t), V(t-1), V(t-2) }	MLP9
Hydropower (t)={ Qt(out), Qt-1(out), Qt-2(out), V(t), V(t-1), V(t-2) }	MLP10
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt-1(in), Qt(out), Qt-1(out), V(t), V(t-1) }	MLP11
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt-1(in), Qt-2(in), Qt(out), Qt-1(out), V(t), V(t-1) }	MLP12
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt-1(in), Qt-2(in), Qt(out), Qt-1(out), Qt-2(out), V(t), V(t-1) }	MLP13
Hydropower (t)={ Qt(in), Qt-1(in), Qt-2(in), Qt(out), Qt-1(out), Qt-2(out), V(t), V(t-1), V(t-2) }	MLP14

To select the best neural network model, the values of goodness-of-fit criteria in both the training and testing phases for the fourteen models used are presented in Table 1. As observed, the MLP11 model with six input variables-including inflow, outflow, and reservoir volume (current and one-month lagged)-demonstrated superior performance in hydropower energy modeling. This model yielded the highest values of correlation coefficient and coefficient of determination, as well as the lowest root mean square error (RMSE) in both the training and testing phases, and was therefore selected as the optimal model.

RESULTS AND DISCUSSION

Simulation results indicated that in future periods, hydropower production would vary between a 2.5% increase and a 22.3% decrease compared to the historical baseline. Under the RCP2.6 scenario, annual

hydropower production exhibited an insignificant upward trend, while under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, a significant downward trend was detected. The greatest declines in energy production are projected for May and July, whereas the highest increases are expected in February. Seasonal analysis revealed more severe reductions in energy production during spring and summer seasons. Trend analysis over 60 years using the Mann-Kendall and Sen's slope tests confirmed a statistically significant decline in hydropower production under the RCP8.5 scenario.

CONCLUSION

This study underscores that climate change could exert substantial adverse effects on hydropower production at the Shahid Abbaspour Dam, particularly under pessimistic emission scenarios. Consequently, long-term planning and integrated water and energy resource management are essential to mitigate the potential impacts of climate change and to ensure sustainable hydropower production.

REFERENCES

References [in Persian]

- Aref, M. R., & Alijani, B. (2018). Investigating temperature and precipitation changes in the Yazd-Ardakan watershed using SDSM under future climate change conditions. *Journal of Drylands*, 8(1), 89–101.[In Persian]
Azizi, G. (2004). *Climate change*. Ghoomes Publishing, Tehran.[In Persian]

References [in English]

- Ellabban, O., Abu-Rub, H. and Blaabjerg, F. (2014). "Renewable energy resources: Current status, prospects, and their enabling technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 39: 748–764.
International Energy Agency (2013). *Energy Policy Highlights*, France: 114.
IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
Jung, II.W. and Chang, H. (2010). Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Willamette River Basin, Oregon, USA. *Hydrological processes*. 25: 258–277.
Madani, K. and Lund, J.R. (2010). Estimated Impacts of Climate Warming on California's High Elevation Hydropower.
Majone, B., Bovolo, C.I., Bellin, A., Blenkinsop, S. and Fowler, H.J. (2012). Modelling the impact of future climate change on water resources for the Gallego river basin (Spain). *Water Resources Research*, Vol.48, W01512.
Minville, M., Brissette, F., Krau, S. and Leconte, R. (2009). Adaptation to Climate Change in the Management of a Canadian Water-Resources System Exploited for Hydropower. *Water Resources Management*, Vol 23, 2965–2986.
Pilesjo, p. and Al-Juboori, s.s. (2016). Modelling the Effects of Climate Change on Hydroelectric Power in Dokan, Iraq. *Journal of Energy and Power Engineering*, 5(2-1): 7-12.
Raje, D. and Mujumdar, P.P. (2010). Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change" *Advances in Water Resources*, Vol 33, 312–326.
Sun, L., Zhou, X. and Gu, A. (2022). Effects of Climate Change on Hydropower Generation in China Based on a WEAP Model. *Sustainability*, 14(9):5467.
Tiezzi, R.O., Vieira, N.D.B., Simões, A.F., Filho, H.F., Viana, E., Mouette, D. and Domingues, M.S. (2018). Impacts of Climate Change on Hydroelectric Power Generation – A Case Study Focused in the Paranapanema Basin, Brazil. *Journal of Sustainable Development*; Vol. 11, PP:140-149.
Vicuna, S., Dracup, J.A. and Dale, L. (2011). Climate change impacts on two high-elevation hydropower systems in California, *Climate Change*, Vol. 109, pp. 151-169.
Wagner, T., Theme, M., Schuppel, A., Gobiet, A., Stigler, A. and Birk, S. (2017). Impacts of climate change on stream flow and hydropower generation in the Alpine region. *Journal of Environ Earth Sci* 76:4, PP:1-22.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۴

ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی حوضه کارون و تولید برق آبی سد شهید عباسپور تحت سناریوهای RCP

غلامعلی مظفری^{۱*}، حسین بهزادی کریمی^۲، فروغ محمدی راوری^۳

۱. استاد اقلیم شناسی دانشگاه یزد، یزد ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: gmozafari@yazd.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7418-8737>

۲. دانش آموخته دکترای آب و هواشناسی دانشگاه یزد، یزد ایران

۳. دانشجوی دکتری تخصصی اقلیم‌شناسی دانشگاه یزد، یزد ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، تأمین انرژی، سناریوهای انتشار، حوضه آبریز کارون، سد شهید عباسپور.	گرمایش جهانی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر باعث تغییرات قابل توجهی در فراسنج‌های اقلیمی شده است که می‌تواند منابع آب سطحی و به تبع آن تولید انرژی برق آبی را تحت تأثیر قرار دهد. حوضه آبریز کارون به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب و تولید برق آبی در کشور، به واسطه وجود سدهای مخزنی بزرگ از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی حوضه آبریز کارون و تولید برق آبی سد شهید عباسپور در دوره‌های آتی تحت سناریوهای انتشار RCPs ارزیابی شد. برای این منظور از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) جهت مدل‌سازی و پیش‌نمایی داده‌های هیدرو-اقلیمی و تولید انرژی برق آبی استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در دوره‌های آتی، میزان تولید انرژی برق آبی در محدوده ۲/۵ درصد افزایش تا ۲۲/۳ درصد کاهش نسبت به دوره پایه متغیر خواهد بود. همچنین، تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6)، تغییرات انرژی برق آبی روند افزایشی غیرمعنی‌دار داشت، درحالی‌که تحت سناریوهای بدبینانه (RCP4.5 و RCP8.5)، کاهش معنی‌دار تولید انرژی برق آبی تأیید شد. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی می‌تواند اثرات منفی قابل توجهی بر منابع آب سطحی و تولید انرژی برق آبی در آینده داشته باشد و مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی بلندمدت در این زمینه ضروری است.
استناد: مظفری، غلامعلی، بهزادی کریمی، حسین و محمدی راوری، فروغ. (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی حوضه کارون و تولید برق آبی سد شهید عباسپور تحت سناریوهای RCP. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴(۴۶)، ۷۵-۱۰۴	
© نویسنده / نویسندگان ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان DOI: 10.22111/jneh.2025.50099.2076	

مقدمه

در دنیای کنونی، سوخت‌های فسیلی شامل نفت و گاز به‌عنوان انرژی‌های تجدیدناپذیر (NRES)^۱ شناخته می‌شوند و از جمله منابع اصلی تولید انرژی به‌شمار می‌روند. این منابع به‌ویژه در جوامع در حال توسعه، تأمین‌کننده بخش عمده‌ای از نیازهای انرژی بشر هستند. با این حال، نگرانی‌های جدی در مورد کاهش یا نابودی این ذخایر و همچنین افزایش مصرف انرژی به‌دلیل رشد فزاینده جمعیت وجود دارد. به‌علاوه، بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده فراوان از سوخت‌های فسیلی، منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای (GHG)^۲ از جمله دی‌اکسید کربن، گرم شدن کره زمین، ذوب شدن یخ‌های قطبی، بروز بیماری‌های جدید، تخریب جنگل‌ها، وقوع طوفان‌های غیرمعمول، بارش‌های شدید و خشکسالی‌های مداوم شده است که به‌عنوان تغییرات آب‌وهوایی شناخته می‌شود و حیات بر روی زمین را با تهدید مواجه کرده است. به منظور کاهش اثرات تغییر اقلیم، بشریت اقداماتی گسترده در راستای تأمین انرژی آینده خود از منابع پایدار و تجدیدپذیر انجام داده است. انرژی‌های تجدیدپذیر (RES)^۳ به انرژی‌هایی اطلاق می‌شود که از منابعی مانند نور خورشید، باد، باران، جزر و مد، امواج و زمین‌گرایی به‌دست می‌آید و در مقیاس زمانی انسانی به طور طبیعی تجدید می‌شوند. این منابع به‌دلیل کربن خنثی بودن (انتشار صفر کربن) به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای تأمین نیازهای انرژی در آینده به‌شمار می‌آیند (الابان^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه استفاده از منابع آبی برای راه‌اندازی نیروگاه‌های برق‌آبی^۵، به‌دلیل مزایای چشمگیرشان نسبت به سایر انواع نیروگاه‌ها، اهمیت فراوانی دارند. این نیروگاه‌ها به‌دلیل هزینه نسبتاً پایین تأمین انرژی از نیروی آب، عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای و انعطاف‌پذیری بالا در تولید انرژی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های محبوب در سطح جهانی شناخته می‌شوند (مدنی و لوند^۶، ۲۰۱۰). با این حال، عملکرد این نیروگاه‌ها در آینده به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار خواهد گرفت؛ چرا که تولید برق‌آبی به‌شدت وابسته به شرایط هیدرولوژیکی منطقه است که به نوبه خود تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی قرار دارد. تغییرات اقلیمی می‌تواند منجر به کاهش میزان بارش و تغییر در نقطه پیک رواناب ناشی از ذوب برف شود که به کاهش میزان رواناب منجر خواهد شد. به تبع آن، جریان ورودی به مخزن نیروگاه نیز تغییر خواهد کرد و این تغییرات تأثیر مستقیم بر پتانسیل تولید برق‌آبی خواهد گذاشت. همچنین، افزایش دما ممکن است نرخ تبخیر از سطح آب مخزن را افزایش دهد که این امر منجر به کاهش حجم فعال مخزن و در نتیجه ناتوانی در تأمین نیازهای حداقلی، به‌ویژه در تولید انرژی می‌شود. بنابراین، پیش‌نمایی عوامل اقلیمی، نخستین گام در تعیین میزان تولید برق و تأمین انرژی آبی در آینده خواهد بود. بررسی داده‌های اقلیمی گذشته نشان می‌دهد که اقلیم زمین در دوره‌های مختلف زمانی، از چند دهه تا چند میلیون سال، دستخوش تغییرات قابل‌توجهی بوده است. بنابراین، انتظار می‌رود که اقلیم آینده با اقلیم کنونی متفاوت باشد (عزیزی، ۱۳۸۳). بر اساس تعریف هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC)^۷، تغییر اقلیم^۸ به معنای تغییر غیرقابل بازگشت در متوسط شرایط جوی یک منطقه در مقایسه با روندهای مشاهده‌شده و ثبت‌شده در یک دوره زمانی بلندمدت است. عامل اصلی این به معنای تغییر غیرقابل بازگشت در

¹ Non-Renewable Energy Sources

² Greenhouse Gas Emissions

³ Renewable Energy Sources

⁴ Ellabban & et al

⁵ Hydroelectric Powerplant

⁶ Madani and Lund

⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁸ Climate Change

متوسط شرایط جوی یک منطقه در مقایسه با روندهای مشاهده شده و ثبت شده در یک دوره زمانی بلندمدت است. عامل اصلی این تغییرات، فعالیت‌های انسانی است که باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای همچون دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن و هالوکربن‌ها می‌شود که با ماندگاری طولانی مدت در جو، به تغییرات اقلیمی دامن می‌زنند. گرمایش جهانی، به عنوان یکی از اصلی‌ترین نمودهای تغییرات اقلیمی در قرن حاضر، به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است و بسیاری از مشکلات محیط‌زیستی ریشه در افزایش دمای زمین دارند (عارف و علیجانی، ۱۳۹۷). براساس ششمین گزارش هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC)، در تمامی سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، دمای سطح جهانی تا اواسط قرن ۲۱ افزایش می‌یابد و در سناریوهای با انتشار بالای آلاینده‌ها، گرم‌تر شدن کره زمین (بیش از ۲ درجه سلسیوس) در طول نیمه دوم قرن ادامه خواهد یافت (IPCC, 2021). میزان افزایش دما در صد سال آینده به مراتب بیشتر از تغییرات دمایی است که طی ۱۰,۰۰۰ سال گذشته رخ داده است. تغییرات اقلیمی به طور جهانی در حال افزایش است و تأثیرات مهمی بر دمای هوا، وقایع حدی بارندگی، سطح آب دریا و سایر مسائل مرتبط با محیط‌زیست دارد. در دهه‌های اخیر، تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب به ویژه در مناطق خشک جهان به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل شده است. پیش‌نمایی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات در میانگین پارامترهای اقلیمی مانند دما و بارندگی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر منابع آب در آینده بگذارد. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که کاهش یا افزایش ۱۰ درصدی در میزان بارش می‌تواند به تغییر ۱۵ تا ۲۵ درصدی جریان رودخانه‌ها منجر شود. در حالی که افزایش ۲ درجه سلسیوس در دما معمولاً باعث کاهش ۵ تا ۱۲ درصدی جریان‌های سطحی خواهد شد (جونگ و چانگ^۱، ۲۰۱۰). انرژی آبی یا هیدرولیکی، یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی پایدار است که قابلیت تبدیل انرژی جنبشی آب به انرژی الکتریکی را دارد. در نیروگاه‌های برق آبی، از طریق هدایت آب به سمت توربین‌ها و برخورد آن با پره‌های توربین، حرکت چرخشی ایجاد می‌شود که با به کار انداختن مولدها، برق تولید می‌گردد. میزان انرژی تولیدی در این نیروگاه‌ها به طور مستقیم به حجم آب موجود در مخازن سدها وابسته است. هرچه حجم آب بیشتر باشد، امکان استفاده از تعداد بیشتر و بزرگ‌تر توربین‌ها و ژنراتورها فراهم می‌شود و در نتیجه تولید برق افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، کاهش حجم آب در مخازن منجر به کاهش قابل توجه تولید انرژی برق آبی خواهد شد. به دلیل راندمان بالا، هزینه‌های پایین و عدم تولید آلودگی، انرژی برق آبی به عنوان یک منبع پاک و پایدار، مورد توجه ویژه قرار دارد و یکی از گزینه‌های کلیدی برای تأمین انرژی در آینده، به خصوص در کشورهای در حال توسعه به شمار می‌رود. با این حال، وابستگی بالای این نوع انرژی به جریان آب، آن را به شدت در مقابل تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر کرده است. تغییرات اقلیمی و اثرات ناشی از آن، مانند تغییر در زمان و مکان بارش و رواناب، چالش‌های مهمی برای دستیابی به تولید انرژی پایدار در این نیروگاه‌ها ایجاد کرده است (IPCC, ۲۰۰۷). تغییر اقلیم از دو طریق بر تولید انرژی برق آبی اثر می‌گذارد: نخست، به صورت مستقیم از طریق تغییر در حجم و الگوی بارش که بر جریان رودخانه‌ها تأثیر می‌گذارد و دوم، به صورت غیرمستقیم با افزایش یا کاهش تقاضای برق در شبکه که به دلیل تغییرات دمای هوا و افزایش نیاز به مصرف انرژی رخ می‌دهد (ماران و همکاران^۲، ۲۰۱۴). همچنین، نوسانات آب‌وهوایی با اثر گذاشتن بر ابعاد مختلف هیدرولوژی منطقه، در نهایت بر عملکرد مخازن و میزان تولید برق نیروگاه‌ها تأثیر خواهند گذاشت. پس می‌بایست در طراحی و نگهداری نیروگاه‌های برق آبی به مسئله تغییر اقلیم توجه کافی شود؛ زیرا ارزیابی نحوه اثرگذاری پدیده تغییر اقلیم بر منابع آب مناطق مختلف می‌تواند برای توسعه پایدار هر پروژه

¹ Jung and Chang² Maran & et al

استفاده‌کننده از منابع آب در بلندمدت مهم باشد (شرستا^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). در این راستا، پژوهش‌های متعددی در این موضوع انجام شده است که در ادامه به مواردی از آن اشاره خواهد شد.

مین ویل^۲ و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی راه‌کارهای سازگاری با تغییر اقلیم در مدیریت سیستم منابع آب کانادا با تکیه بر نیروی برق‌آبی پرداختند. هدف مطالعه ایشان، ارزیابی کفایت نیروگاه و قابلیت اعتماد مخزن به واسطه تغییر در رژیم هیدرولوژیکی بود. آنان از مدل‌های هواشناسی سیستم کانادا (CRCM) و سناریوی انتشار A2 به‌منظور مدل‌سازی تغییرات اقلیمی و برای مدل‌سازی رژیم‌های هیدرولوژیکی از مدل توزیع‌شده به نام Hydrotel استفاده کردند. نتایج نشان داد که متوسط تولید برق‌آبی سالانه در دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ به میزان ۱/۸ درصد کاهش خواهد یافت و در بازه زمانی ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ به ترتیب، افزایشی برابر با ۹/۳ درصد و ۱۸/۳ درصد خواهد داشت.

راچی و مومدار^۳ (۲۰۱۰)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی عملکرد مخزن چندمنظوره هیراکود واقع در رودخانه ماهانادی^۴ در هند به کمک مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی پرداختند. در این پژوهش از معیارهای عملکردی RRV (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) و سیاست‌های بهره‌برداری استاندارد و بهینه (SOP و SDP) برای بررسی عملکرد مخزن استفاده شده است. آن‌ها برای مدل‌سازی تغییر اقلیم از سه مدل و سه سناریو (A2، B1 و A1B) و در دو بازه زمانی ۲۰۴۵-۲۰۶۵ و ۲۰۷۵-۲۰۹۵ استفاده کردند. نتایج نشان داد که ذخیره ماهانه در تمامی سناریوهای آینده کاهش می‌یابد که به دلیل اثر هیدرولوژیکی تغییر اقلیم است. تغییر اقلیم اثر منفی روی تولید برق به‌خصوص در ماه‌های موسمی دارد.

ویکونا^۵ و همکاران (۲۰۱۱)، پژوهشی روی دو نیروگاه برق‌آبی در کالیفرنیا انجام دادند. در این پژوهش برای پیش‌نمایی آینده تغییر اقلیم از مدل هیدرولوژیکی VIC^۶ استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی تأثیر نسبتاً کمی بر عملکرد هر دو نیروگاه دارد؛ به این دلیل که این نیروگاه‌ها دارای مخزن بوده و انعطاف‌پذیری بیشتری در مقابل اثرات تغییر اقلیم داشته‌اند. طبق پیش‌نمایی‌ها، بیشترین تأثیر بر ظرفیت تولید این دو سیستم برق‌آبی در زمان اوج تقاضای انرژی در ماه‌های تابستان است و این میزان کاهش تولید برای هر دو نیروگاه به‌طور متوسط حداکثر ۰/۶ درصد خواهد بود.

مَجون^۷ و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهشی به بررسی اثر تغییر اقلیم روی حوضه آبریز رودخانه گالیگو در اسپانیا به کمک مدل‌های RCMS و سناریوی انتشار SRA2 پرداختند و میزان تولید انرژی برق‌آبی را پیش‌نمایی نمودند. همه مدل‌ها، افزایش میانگین سالانه دما در حدود ۳ درجه سلسیوس و کاهش بارش در حوضه را پیش‌نمایی کردند. همچنین، نتایج نشانگر کاهش در میزان آب قابل‌دسترس برای آبیاری و انرژی برق‌آبی تولیدی به‌واسطه کاهش فصلی تراز مخزن بود. سازمان انرژی ایالات متحده آمریکا^۸ (۲۰۱۳)، در پژوهشی میزان تولید انرژی در چند نیروگاه برق‌آبی، طی دوره‌های آینده را پیش‌نمایی کرده است. مدل گردش عمومی استفاده‌شده در این ارزیابی مدل جامع CCSM3 و

¹ Shrestha & et al

² Minville & et al

³ Raje and Mujumdar

⁴ Mahanadi River

⁵ Vicuna & et al

⁶ Variable Infiltration Capacity (VIC) hydrological model

⁷ Majone & et al

⁸ U.S. Department of Energy

سناریوی انتشار A1B بوده است. علاوه بر این، در این مطالعه از مدل ریزمقیاس‌نمایی منطقه‌ای RegCM3 و مدل هیدرولوژیکی VIC بهره گرفته شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در منطقه بونویل^۱، میزان تولید برق‌آبی برای دوره زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۹، حدود ۳/۳ درصد نسبت به مشاهدات تاریخی (۱۹۸۹ تا ۲۰۰۸) افزایش خواهد یافت. همچنین، میانگین تغییر تولید سالانه برای کل منطقه غرب آمریکا، افزایش ۲۰ درصدی را در دوره‌های آبی نسبت به دوره مشاهداتی نشان می‌دهد. ارزیابی انجام‌شده برای منطقه جنوب غربی آمریکا، کاهش ۷/۷ درصدی تولید برق و برای منطقه جنوب شرقی، میزان تولید انرژی برق‌آبی در دوره زمانی آینده نسبت به دوره مشاهداتی بدون تغییر پیش‌نمایی کرده شده است.

ماران^۲ و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تولید انرژی برق‌آبی در منطقه واله - آئوستا واقع در شمال غربی ایتالیا پرداختند. در این مطالعه، پیش‌نمایی‌های اقلیمی با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی ECHAM تحت سناریوی انتشار A1B انجام شد. به‌منظور افزایش دقت مکانی و زمانی داده‌های اقلیمی، فرآیند ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از دو مدل اقلیمی منطقه‌ای REMO و RegCM صورت گرفت. در ادامه، جهت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی منطقه، از مدل بارش - رواناب TOPKAPI بهره گرفته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تحت تأثیر تغییر اقلیم و کاهش جریان‌های سطحی، میزان تولید انرژی برق‌آبی در منطقه مورد مطالعه در آینده با کاهش حدود ۱۰ درصدی مواجه خواهد شد. این در حالی است که مطالعات مرتبط در حوضه آبریز رودخانه توسه در ایتالیا نشان‌دهنده افزایش تولید انرژی برق‌آبی به‌دلیل افزایش بارش و به‌تبع آن افزایش جریان رودخانه بوده است. این یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیرپذیری متفاوت مناطق مختلف از تغییرات اقلیمی بر مبنای شرایط هیدروکلیماتولوژی محلی می‌باشد.

پیل‌سجو و الجوبوری^۳ (۲۰۱۶)، در مطالعه‌ای به مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر نیروگاه‌های برق‌آبی در منطقه دُخان عراق پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که در مجموع تا سال ۲۰۵۰ تولید انرژی حاصل از نیروگاه‌های برق‌آبی در منطقه مورد مطالعه در حدود ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت. براساس ۱۲ مدل گردش عمومی جو GCMs و تحت سناریوی A1B، میزان تغییرات رواناب بین ۵ تا ۱۰ درصد و تولید برق در نیروگاه دُخان، ۴۰-۲۰ مگاوات کاهش می‌یابد که تأثیر منفی بر بخش انرژی و آینده تولید برق در عراق خواهد داشت.

واگنر^۴ و همکاران (۲۰۱۷) اثر تغییرات اقلیمی بر روی جریان رودخانه و تولید انرژی برق‌آبی در منطقه آلپ را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، چهار شبیه‌سازی اقلیمی اصلاح‌شده از پروژه ENSEMBLES براساس سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A1B انتخاب شد. این شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان ورودی برای مدل بارش - رواناب پارامتریک (Lumped-parameter rainfall-runoff model) در مقیاس ماهانه استفاده گردید. همچنین، برای محاسبه تغییرات بلندمدت تولید برق نیروگاه‌های آبی، از مدل تولید برق که با داده‌های رواناب حاصل از مدل هیدرولوژیکی تغذیه شده، استفاده گردید. نتایج نشان داد که در سناریوهای مختلف، تغییرات پیش‌نمایی‌شده در تولید سالانه انرژی برق‌آبی در محدوده یک درصد است، اما ممکن است این تغییرات مثبت یا منفی باشد بسته به سناریوی اقلیمی مورد استفاده در این مطالعه، تغییرات اقلیمی باعث تغییرات فصلی در جریان رودخانه‌ها به‌ویژه در فصل زمستان شده است.

¹ Bonneville Region

² Maran & et al

³ Pilesjo and Al-Juboori

⁴ Wagner & et al

که معمولاً تقاضای بیشتری برای انرژی در این فصل وجود دارد. به‌طور کلی، اثرات تغییرات اقلیمی بر تولید برق آبی در منطقه آلپ معمولاً مثبت ارزیابی شده است؛ زیرا تغییرات بیشتر در فصل زمستان رخ می‌دهند که هم‌راستا با نیاز بالاتر انرژی در این فصل است. علاوه بر این، نتایج نشان‌دهنده تنوع قابل توجهی در پیش‌نمایی‌های اقلیمی است که به دلیل تفاوت‌های مدل‌های شبیه‌سازی و عدم قطعیت در داده‌ها به وجود آمده است.

تیزی^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی تأثیر تغییرات اقلیمی بر روی تولید انرژی برق آبی در حوضه آبریز پاراناپانما^۲ برزیل را مورد مطالعه قرار دادند. براساس سناریوهای آبی تغییر اقلیم به‌ویژه تغییرات بارش و جریان آب، با استفاده از روش ریاضی رطوبت خاک، مدل SMAP^۳ انتخاب شد. سپس جریان آب در مدل HidroLab شبیه‌سازی شد و در نهایت تولید انرژی برق آبی پیش‌نمایی گردید. نتایج نشان داد که ناهنجاری‌های منفی بارندگی و تأثیر مستقیم آن بر جریان رودخانه می‌تواند منجر به از دست دادن ظرفیت تولید برق آبی شود؛ به‌طوری‌که تلفات جدی در منطقه مورد مطالعه بیشتر از مقدار پیش‌نمایی شده است. در سناریوی B2، دامنه کاهش برق تولیدی از ۴/۵ درصد تا ۱۰/۳ درصد و مقدار کاهش جریان از ۵/۹ تا ۱۰/۲ درصد متغیر است. همچنین، تحت سناریوی A2، دامنه تلفات برق تولیدی از ۷/۸ تا ۱۳/۶ درصد و دامنه کاهش جریان از ۸/۸ تا ۱۲/۵ درصد هست.

فان^۴ و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌نمایی تغییرات انرژی برق آبی در چین، تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) ارائه‌شده در پنجمین گزارش هیئت بین‌الدول تغییرات آب‌وهوایی (IPCC) پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در سطح ملی، تأثیر عوامل اقلیمی بر تولید برق آبی قابل توجه است. در مقایسه با سال ۲۰۱۱، کل تغییرات تولید برق آبی ناشی از عوامل آب‌وهوایی تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 به ترتیب ۱۵۳/۲۹، ۶۷/۴۹ و ۲۲/۱۰ میلیارد کیلووات ساعت است. نتایج همچنین بیانگر این است که انرژی برق آبی در برابر تغییرات آب‌وهوایی حساس و آسیب‌پذیر است که منجر به عدم قطعیت‌های زیادی برای توسعه آن در آینده می‌شود.

سون^۵ و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تولید برق آبی در کشور چین براساس مدل WEAP پرداختند. براساس نتایج حاصله، تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در طول دوره پیش‌نمایی، تولید برق آبی در مقایسه با دوره پایه، ابتدا در دهه ۲۰۳۰ کاهش‌یافته و سپس در دهه ۲۰۷۰ افزایش خواهد یافت؛ درحالی‌که خطر تولید بیش‌ازحد انرژی برق آبی در استان‌های جنوب غربی، حوضه رودخانه یانگ تسه و نیروگاه‌های بزرگ برق آبی متمرکز خواهد بود.

با توجه به تغییرات اقلیمی جهانی، تأثیرات آن بر منابع آب و تولید انرژی برق آبی در ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مطرح می‌شود. به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، نوسانات تغییر اقلیم می‌تواند به‌طور چشمگیری بر الگوهای بارش، رواناب و در نهایت تولید برق آبی تأثیر بگذارد. این مسئله اهمیت زیادی در طراحی سیاست‌های پایدار منابع آب و انرژی دارد. در این راستا، بسیاری از مطالعات داخلی به تحلیل و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی و تولید انرژی برق آبی پرداخته‌اند:

¹ Tiezzi & et al

² Paraná-Paranapanema Basin

³ Soil Moisture Active Passive

⁴ Fan & et al

⁵ Sun & et al

شاهی ترازکی و صولتی تبار (۱۳۹۷)، در پژوهشی اثر تغییر اقلیم را بر نزولات جوی، جریان ورودی، تولید انرژی برق آبی و تأمین آب مصارف پایاب سد دز مطالعه کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که دما برای تمام فصول افزایش یافته است و افزایش بارش در فصل پاییز و کاهش آن در سایر فصول به وقوع پیوسته است. همچنین، مقدار رواناب سالانه ورودی به سد دز ۱۷ درصد و میزان تولید انرژی برق آبی در حدود ۱۳ درصد نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

عسکری و همکاران (۱۳۹۹)، در پژوهشی به ارزیابی عملکرد نیروگاه برق آبی دز در مواجهه با تغییر اقلیم پرداختند. نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های انتخابی و سناریوهای اقلیمی حاکی از افزایش دمای حداقل و حداکثر در تمام ماه‌های سال و کاهش میانگین بارش منطقه در دوره آینده است. پس از اطمینان یافتن از صحت مدل هیدرولوژیکی و خروجی مدل‌های GCM، مدل SWAT تحت سناریوهای مختلف اجرا شد. خروجی‌ها بیانگر کاهش چشمگیر دبی رودخانه دز در آینده هست. مقدار این کاهش در سناریوی RCP4.5 بین ۴۹ تا ۵۲ درصد و در سناریوی RCP8.5 و به‌ویژه در دهه پایانی قرن ۲۱ بیشتر تا ۶۴ درصد خواهد بود. در نهایت برای بررسی اثر کاهش دبی رودخانه بر توان تولید انرژی نیروگاه برق آبی از مدل MODSIM استفاده شد. نتایج برای دو سناریو موردبررسی حکایت از کاهش ۵۷ تا ۶۰ درصدی تولید انرژی برق آبی برای دهه‌های آینده دارد که تأییدی بر آسیب‌پذیری جدی این نوع از نیروگاه‌ها در برابر شرایط تغییر اقلیم است.

امینی ناغانی و همکاران (۱۴۰۰)، اثر تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برق آبی سد کارون ۴ را بررسی کردند. پیش‌نمایی‌های اقلیمی بیانگر افزایش میانگین بلندمدت سالانه دما و کاهش میانگین بارش سالانه تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۲۹-۲۰۵۰ میلادی است. نتایج مدل‌سازی بارش - رواناب حاکی از کاهش میانگین سالانه جریان ورودی به مخزن سد به میزان ۲۱ و ۳۴ درصد به ترتیب تحت دو سناریوی مورد مطالعه هست. همچنین، انرژی برق آبی استحصالی از سد در دوره آتی به میزان ۱۷ و ۳۱ درصد به ترتیب تحت دو سناریوی حد وسط و بدبینانه کاهش خواهد یافت.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر منابع آب و انرژی نشان می‌دهد که تغییر اقلیم می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر حجم آب مخازن سدها و در نتیجه تولید انرژی برق آبی داشته باشد. با توجه به اهمیت انرژی برق آبی در تأمین بخشی از نیازهای انرژی کشور، ضرورت دارد که اثرات تغییرات اقلیمی در برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های آبی، به‌ویژه در تولید برق، مورد توجه قرار گیرد. در نظر گرفتن این عامل می‌تواند به بهبود پایداری و کارایی این طرح‌ها در بلندمدت کمک کند و از کاهش تولید انرژی برق آبی در آینده جلوگیری نماید.

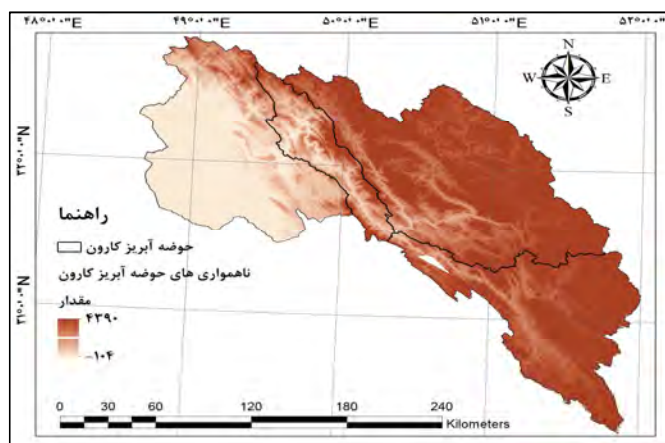
با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر منابع آب و انرژی، واضح است که تغییر اقلیم می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر حجم آب مخازن سدها و در نتیجه تولید انرژی برق آبی داشته باشد. در بسیاری از مناطق جهان، از جمله ایران، سدها به‌عنوان یکی از منابع اصلی تولید انرژی برق آبی شناخته می‌شوند. از این‌رو، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر این منابع حیاتی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که وابستگی زیادی به تولید انرژی برق آبی دارند، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. این پژوهش تلاش دارد تا شکاف‌های دانشی موجود در ارزیابی دقیق اثرات تغییرات اقلیمی بر تولید برق آبی را پر کند، به‌ویژه با توجه به تنوع اقلیمی و هیدرولوژیکی مناطق مختلف ایران، انتخاب سد شهید عباسپور به‌عنوان مطالعه موردی در این پژوهش به‌دلیل ویژگی‌های خاص این سد، از جمله اهمیت آن در تأمین انرژی در استان خوزستان و نقش آن در پایداری شبکه برق منطقه‌ای، ضروری است. این سد

یکی از مهم‌ترین منابع تأمین انرژی برق‌آبی در منطقه است و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر آن می‌تواند به‌طور مستقیم بر برنامه‌ریزی‌های آینده و مدیریت منابع آبی و انرژی در این منطقه تأثیر بگذارد. به‌علاوه، انتخاب این سد به‌عنوان مطالعه موردی، امکان تحلیل دقیق‌تر اثرات تغییرات اقلیمی در یک بستر محلی و واقعی را فراهم می‌کند که نتایج آن می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر سدهای مشابه در مناطق مختلف کشور مورد استفاده قرار گیرد.

داده‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه:

حوضه آبریز کارون بزرگ واقع در جنوب غرب ایران، شامل بیشتر مساحت استان چهارمحال و بختیاری، بخش‌های بزرگی از استان‌های لرستان و خوزستان و بخش‌هایی از استان‌های مرکزی، اصفهان، کهگیلویه و بویراحمد و فارس است و متشکل از رودخانه‌های دز و کارون بوده که در داخل ارتفاعات زاگرس میانی قرار داشته و با حوضه‌های کرخه، دریاچه نمک، زاینده‌رود، بختگان - مهارلو و زهره - جراحی هم‌مرز هست. مساحت این حوضه، ۶۷۲۵۷ کیلومتر مربع هست و ۶۷ درصد آن در مناطق کوهستانی و کوهپایه و ۳۳ درصد آن را دشت‌های مرتفع تشکیل داده است (سالنامه آماری آب کشور، ۱۳۹۴). محدوده مورد مطالعه در این پژوهش تحت عنوان حوضه آبریز کارون در مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۷ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۰۴ دقیقه و ۵۰ ثانیه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۴۹ دقیقه و ۳۵ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه آبریز کارون ۳۸۱۰۴ کیلومتر مربع بوده که حدود ۵۷ درصد از سطح حوضه آبریز کارون بزرگ را شامل می‌شود. ارتفاع منطقه مورد مطالعه از ۴۳۹۰ متر در نواحی کوهستانی شمال حوضه تا ۱۰۴ متر پایین‌تر از سطح دریا در نواحی پست و هموار غربی متغیر است. براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، جمعیت ساکن در شهرستان‌های وابسته به منابع آبی این حوضه بالغ بر ۳,۸ میلیون نفر برآورد شده است. مساحت اراضی کشاورزی بهره‌بردار از منابع آب این حوضه حدود ۴۴۰ هزار هکتار است که سهم عمده‌ای از تولید محصولات زراعی و باغی منطقه را تأمین می‌کند. طبق گزارش شرکت مدیریت منابع آب ایران، حجم میانگین سالانه آب تنظیم‌شده توسط سد شهید عباسپور حدود ۶,۵ میلیارد مترمکعب است که به تفکیک شامل ۴۸ درصد برای مصارف کشاورزی، ۱۲ درصد برای شرب، ۹ درصد برای صنعت و ۳۱ درصد برای تولید انرژی برق‌آبی و تأمین نیازهای زیست‌محیطی می‌باشد. این آمار بیانگر اهمیت بالای حوضه در تأمین نیازهای اساسی جمعیت منطقه است و ضرورت ارزیابی دقیق تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب و تولید انرژی در این محدوده را روشن می‌سازد. این حوضه یکی از مناطق مهم کشور از نظر منابع آبی و انرژی است و در تأمین آب مورد نیاز برای کشاورزی، صنعت، شرب و محیط‌زیست نقش حیاتی دارد. این منطقه یکی از مناطق کلیدی در تولید برق‌آبی کشور است و سدهای بزرگ مانند سد شهید عباسپور و سد دز در این حوضه قرار دارند. تولید انرژی برق‌آبی در این منطقه به تأمین بخشی از نیازهای برق کشور کمک می‌کند و از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار است. جمعیت تحت تأثیر این حوضه، شامل بسیاری از شهرستان‌های مهم استان‌های خوزستان و چهارمحال و بختیاری، به‌ویژه در مناطق پایین‌دست رودخانه‌ها، از منابع آب این حوضه برای تأمین آب شرب، کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی استفاده می‌کنند. این حوضه در نواحی با اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد که باعث تأثیرات متنوعی بر منابع آب و تولید برق‌آبی می‌شود (سالنامه آماری آب کشور، ۱۳۹۴).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده‌ها و روش پژوهش

حوضه آبریز کارون با وجود سدهای مخزنی بزرگ، نقش اساسی در ذخیره‌سازی آب و تولید انرژی برق‌آبی ایفا می‌کند. در این پژوهش به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید برق‌آبی سد شهید عباسپور و بررسی تأثیرات آن بر منابع آب سطحی حوضه آبریز کارون در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای انتشار RCPs پرداخته شد. به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌نمایی منابع آب سطحی و انرژی برق‌آبی سد شهید عباسپور از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بهره گرفته شد. بدین‌صورت که داده‌های هیدرو - اقلیمی تولیدشده با تأخیرهای زمانی مختلف به‌عنوان ورودی به مدل هیدرولوژیکی شبکه عصبی منتخب داده شد و جریان ورودی، خروجی و حجم مخزن در دوره‌های آتی و سری‌های زمانی مربوط به دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰) با استفاده از خروجی مدل HadGEM2-ES تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی گردید. سپس داده‌های پیش‌نمایی شده یادشده با اعمال تأخیر زمانی به‌عنوان اطلاعات ورودی به مدل هیدرولوژیکی شبکه عصبی معرفی شد و مقادیر انرژی برق‌آبی به‌عنوان برون‌داد توسط شبکه برآورد گردید. همچنین، برای انتخاب مدل شبکه عصبی مناسب برای شبیه‌سازی انرژی برق‌آبی در نیروگاه شهید عباسپور، پس از نرمال‌سازی پارامترهای موجود، از ۲۰ سال داده‌های ماهانه متغیرهای هیدرولوژیکی مورد مطالعه (دبی ورودی، دبی خروجی و حجم مخزن)، ۷۰ درصد داده‌ها جهت آموزش و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون مدل‌ها در دوره‌های مشاهده‌ای استفاده شد. برای آموزش و آزمون داده‌ها از شبکه عصبی چندلایه پیش‌خور (MLP) با الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا (BP) با تابع عضویت تانژانت هیپربولیک (H-T) در لایه پنهان و تابع عضویت خطی (Linear) در لایه خروجی بهره گرفته شد. جهت تعیین بهترین ترکیب عوامل مؤثر در مدل‌سازی و پیش‌نمایی انرژی برق‌آبی، ۱۴ سناریو از ترکیب‌های متفاوت داده‌های ورودی، وارد شبکه عصبی شدند که در جدول ۱ آمده است که در آن Hydropower انرژی برق‌آبی، $Q(in)$ دبی ورودی، $Q(out)$ دبی خروجی، V حجم مخزن سد و t نشان‌دهنده زمان کنونی و $t-1$ و $t-2$ به ترتیب گام‌های تأخیر یک و دومانه است.

حوضه آبریز کارون با وجود سدهای مخزنی بزرگ، نقش اساسی در ذخیره‌سازی آب و تولید انرژی برق‌آبی ایفا می‌کند. در این پژوهش، تأثیر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید برق‌آبی سد شهید عباسپور و تأثیر آن بر منابع آب سطحی حوضه کارون در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای انتشار RCPs مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل‌سازی و

پیش‌نمایی منابع آب سطحی و انرژی برق‌آبی سد شهید عباسپور، از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) استفاده شد. در این فرآیند، داده‌های هیدرو - اقلیمی تولیدشده با تأخیرهای زمانی مختلف به‌عنوان ورودی به مدل هیدرولوژیکی شبکه عصبی داده شدند. سپس جریان ورودی، خروجی و حجم مخزن در دوره‌های آتی (دوره‌های آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰، میانه ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و دور ۲۰۶۱-۲۰۸۰) با استفاده از خروجی مدل HadGEM2-ES تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی گردید. این مدل یکی از مدل‌های معتبر پروژه CMIP است که در بسیاری از مطالعات جهانی و منطقه‌ای به‌دلیل دقت بالا در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، مورد استفاده قرار گرفته است (Salvi et al., 2013; Nikbakht et al., 2020). HadGEM2-ES با پشتیبانی از سناریوهای استاندارد IPCC شامل RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، امکان تحلیل جامع تغییرات اقلیمی در افق‌های زمانی مختلف را فراهم می‌سازد (IPCC, 2014; 2021). از سوی دیگر، داده‌های خروجی این مدل قابلیت بالایی برای ریزمقیاس‌نمایی آماری از طریق مدل‌هایی مانند LARS-WG دارند (Semenov & Stratonovitch, 2010) و در پژوهش‌های مشابه داخلی نیز کارایی آن تأیید شده است (Ebrahimi et al., 2019; Abbaspour et al., 2021). بر این اساس و با توجه به نظر کارشناسان حوزه تغییر اقلیم، مدل HadGEM2-ES به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و تولید انرژی برق‌آبی در این پژوهش به‌کار گرفته شد. پس از آن، داده‌های پیش‌نمایی‌شده با تأخیر زمانی به‌عنوان ورودی به مدل هیدرولوژیکی شبکه عصبی معرفی شدند و مقادیر انرژی برق‌آبی به‌عنوان خروجی توسط شبکه برآورد گردید. برای انتخاب مدل شبکه عصبی مناسب برای شبیه‌سازی انرژی برق‌آبی، از ۲۰ سال داده‌های ماهانه متغیرهای هیدرولوژیکی شامل دبی ورودی (Q(in))، دبی خروجی (Q(out)) و حجم مخزن (V) استفاده شد. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون مدل‌ها در دوره مشاهداتی مورد استفاده قرار گرفت. شبکه عصبی چندلایه پیش‌خور (MLP) با الگوریتم یادگیری پس‌انتشار خطا (BP) و تابع عضویت تانژانت هیپربولیک (H-T) در لایه پنهان و تابع عضویت خطی در لایه خروجی به‌کار گرفته شد. برای تعیین بهترین ترکیب عوامل مؤثر در مدل‌سازی انرژی برق‌آبی، ۱۴ سناریو از ترکیب‌های مختلف داده‌های ورودی به شبکه عصبی وارد شد که جزئیات آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: سناریوهای ورودی به شبکه عصبی برای مدل‌سازی انرژی برق‌آبی نیروگاه شهید عباسپور (منبع: نویسندگان)

شماره مدل	تابع ورودی
MLP1	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}) \}$
MLP2	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{out}) \}$
MLP3	$\text{Hydropower}(t) = \{ V(t) \}$
MLP4	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_t(\text{out}), V(t) \}$
MLP5	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_{t-1}(\text{in}), Q_{t-2}(\text{in}) \}$
MLP6	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{out}), Q_{t-1}(\text{out}), Q_{t-2}(\text{out}) \}$
MLP7	$\text{Hydropower}(t) = \{ V(t), V(t-1), V(t-2) \}$
MLP8	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_{t-1}(\text{in}), Q_{t-2}(\text{in}), Q_t(\text{out}), Q_{t-1}(\text{out}), Q_{t-2}(\text{out}) \}$
MLP9	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_{t-1}(\text{in}), Q_{t-2}(\text{in}), V(t), V(t-1), V(t-2) \}$
MLP10	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{out}), Q_{t-1}(\text{out}), Q_{t-2}(\text{out}), V(t), V(t-1), V(t-2) \}$
MLP11	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_{t-1}(\text{in}), Q_t(\text{out}), Q_{t-1}(\text{out}), V(t), V(t-1) \}$
MLP12	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_{t-1}(\text{in}), Q_{t-2}(\text{in}), Q_t(\text{out}), Q_{t-1}(\text{out}), V(t), V(t-1) \}$
MLP13	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_{t-1}(\text{in}), Q_{t-2}(\text{in}), Q_t(\text{out}), Q_{t-1}(\text{out}), Q_{t-2}(\text{out}), V(t), V(t-1) \}$
MLP14	$\text{Hydropower}(t) = \{ Q_t(\text{in}), Q_{t-1}(\text{in}), Q_{t-2}(\text{in}), Q_t(\text{out}), Q_{t-1}(\text{out}), Q_{t-2}(\text{out}), V(t), V(t-1), V(t-2) \}$

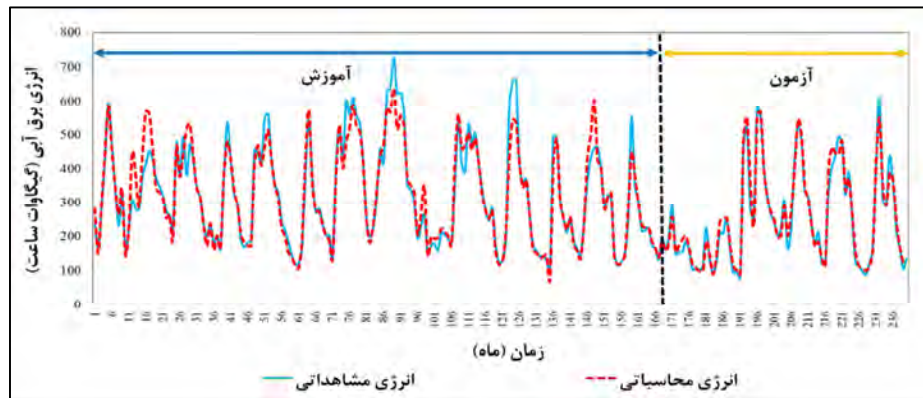
جهت انتخاب بهترین مدل شبکه عصبی، مقادیر معیارهای نیکویی برازش در دو مرحله آموزش و آزمون، برای چهارده مدل مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل MLP11 با شش ورودی که شامل: دبی ورودی، دبی خروجی و حجم مخزن (کنونی و یک ماه تأخیر) است به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون با بالاترین مقدار ضریب همبستگی و ضریب تبیین و کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا به‌عنوان مدل منتخب، نتایج بهتری را در مدل‌سازی انرژی برق‌آبی ارائه داده است.

جدول ۲: ارزیابی عملکرد مدل‌های شبکه عصبی جهت شبیه‌سازی انرژی برق‌آبی با استفاده از معیارهای نیکویی برازش

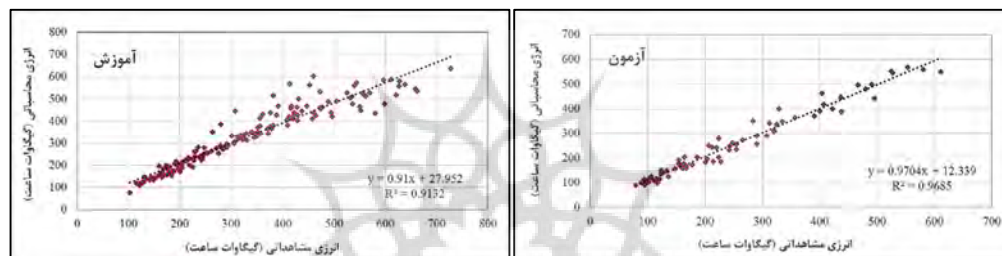
شماره مدل	الگوریتم یادگیری	تابع انتقال لایه پنهان	تابع انتقال لایه خروجی	ساختار شبکه	آموزش (TRAIN)			آزمون (TEST)		
					RMSE	R ²	R	RMSE	R ²	R
MLP1	BP	H-T	Linear	۱-۱-۱	۰/۷۹	۰/۶۲۰	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۶۲۱	۰/۷۹
MLP2	BP	H-T	Linear	۱-۲-۱	۰/۹۳	۰/۸۶۴	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۸۶۴	۰/۹۳
MLP 3	BP	H-T	Linear	۱-۳-۱	۰/۶۵	۰/۴۲۳	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۴۲۳	۰/۶۵
MLP4	BP	H-T	Linear	۳-۲-۱	۰/۹۶	۰/۹۱۰	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۱۰	۰/۹۶
MLP5	BP	H-T	Linear	۳-۳-۱	۰/۸۷	۰/۷۵۶	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۷۵۶	۰/۸۷
MLP6	BP	H-T	Linear	۳-۳-۱	۰/۹۴	۰/۸۹۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۸۹۰	۰/۹۴
MLP7	BP	H-T	Linear	۳-۲-۱	۰/۷۰	۰/۴۸۲	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۴۸۲	۰/۷۰
MLP8	BP	H-T	Linear	۶-۵-۱	۰/۹۵	۰/۹۰۱	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰۱	۰/۹۵
MLP9	BP	H-T	Linear	۶-۱-۱	۰/۹۱	۰/۸۳۰	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۸۳۰	۰/۹۱
MLP10	BP	H-T	Linear	۶-۲-۱	۰/۹۵	۰/۹۰۹	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰۹	۰/۹۵
MLP11	BP	H-T	Linear	۶-۵-۱	۰/۹۶	۰/۹۱۳	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۱۳	۰/۹۶
MLP12	BP	H-T	Linear	۷-۳-۱	۰/۹۵	۰/۹۰۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰۵	۰/۹۵
MLP13	BP	H-T	Linear	۸-۲-۱	۰/۹۵	۰/۹۰۹	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰۹	۰/۹۵
MLP14	BP	H-T	Linear	۹-۸-۱	۰/۹۵	۰/۹۰۶	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰۶	۰/۹۵

یافته‌های پژوهش

شکل ۲، نمودار سری زمانی ماهانه انرژی برق‌آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده و شکل ۳ نمودار پراکنش انرژی برق‌آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل شبکه عصبی منتخب (MLP11) در مرحله آموزش و آزمون طی دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵) را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل MLP11 توانسته است با دقت بالایی انرژی برق‌آبی را پیش‌نمایی کند. در شکل ۲، مشاهده می‌شود که تطابق قابل‌توجهی میان سری‌های زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده وجود دارد، به‌طوری‌که ضریب تبیین مدل در مرحله آموزش و آزمون به‌ترتیب ۰/۹۱۳ و ۰/۹۶۸ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب مدل در شبیه‌سازی دقیق مقادیر انرژی برق‌آبی است. در شکل ۳ نیز نمودار پراکنش داده‌ها نشان می‌دهد که مقادیر انرژی برق‌آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده تقریباً به خط یگانگی نزدیک هستند که این امر نشان‌دهنده دقت بالای پیش‌نمایی‌های مدل در هر دو مرحله آموزش و آزمون است. تطابق این دو نمودار به وضوح مؤید صحت و دقت مدل شبکه عصبی MLP11 در شبیه‌سازی انرژی برق‌آبی در نیروگاه شهید عباسپور است.

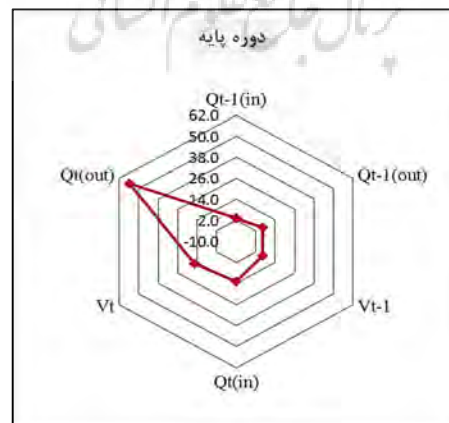


شکل ۲: سری زمانی انرژی برق آبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل MLP11 در مرحله آموزش و آزمون



شکل ۳: نمودار پراکنش انرژی برق آبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل MLP11 در مرحله آموزش و آزمون

در نمودار راداری، اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی مدل MLP11 برای مدل‌سازی انرژی برق آبی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دبی خروجی کنونی با ۷/۵۵ درصد بیشترین اهمیت را دارد. این امر منطقی است، زیرا دبی خروجی مستقیم‌ترین تاثیر را بر میزان تولید انرژی برق آبی دارد. پس از آن، حجم مخزن و دبی ورودی کنونی به ترتیب با ۶/۱۵ و ۱۳ درصد اهمیت قرار دارند. اهمیت بالای این دو پارامتر نیز از آن جهت است که حجم مخزن و دبی ورودی، هر دو نقش کلیدی در ذخیره و تأمین انرژی برق آبی ایفا می‌کنند. همچنین، تأخیر یک‌ماهه در دبی ورودی و خروجی و حجم مخزن، اثرات آنی تغییرات هیدرولوژیکی را در پیش‌نمایی‌های کوتاه‌مدت به‌خوبی مدل کرده است (شکل ۴).



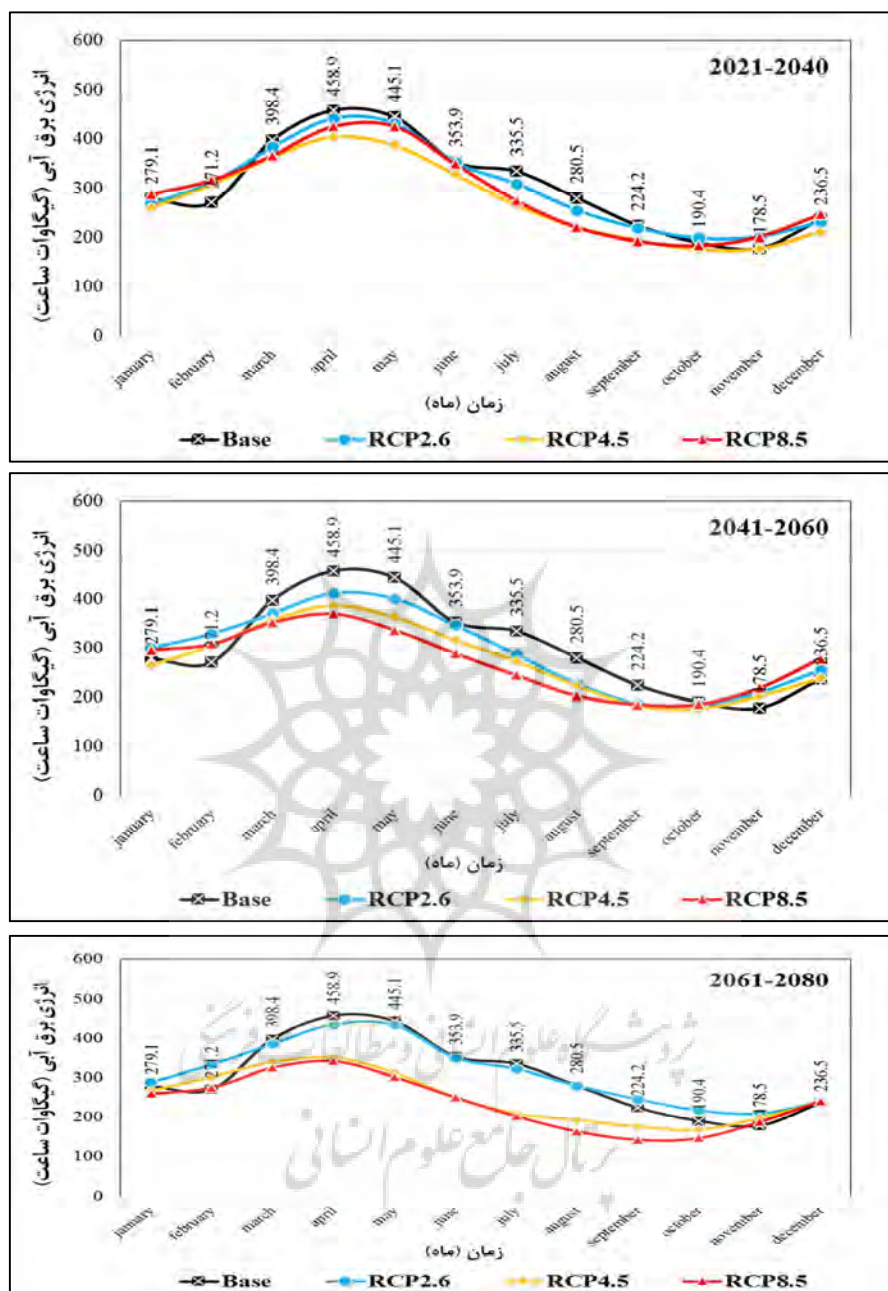
شکل ۴: نمودار راداری درصد اهمیت پارامترهای ورودی به مدل MLP11 برای مدل‌سازی انرژی برق آبی

میانگین بلندمدت ماهانه تولید انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره پایه و دوره های آتی تحت سناریوهای انتشار RCPs در شکل ۵ بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که در دوره پایه، بیشترین تولید انرژی برق آبی در ماه های آوریل و می (اوایل بهار) و کمترین میزان آن در ماه های اکتبر، نوامبر و دسامبر (پاییز) رخ داده است. به عبارتی، زمانی که دبی ورودی و حجم آب در حداکثر مقدار خود قرار دارند، تولید انرژی نیز به اوج خود می رسد، درحالی که در ماه هایی که این مقادیر کاهش می یابند، تولید انرژی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. بنابراین، ارتباط مستقیم بین تولید انرژی در این نیروگاه و دبی ورودی، خروجی و حجم آب مخزن سد مشهود است. تغییرات ماهانه میانگین تولید انرژی برق آبی در نیروگاه شهید عباسپور طی دوره های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰، و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵) و تحت سناریوهای انتشار RCPs نیز در شکل ۶ و جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که در هر سه دوره آینده و تحت هر سه سناریوی واداشت تابشی، تولید انرژی در ماه های مارس تا آگوست به دلیل کاهش دبی ورودی و خروجی و حجم مخزن، بین ۰٫۱ تا ۴۱٫۷ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می یابد. این کاهش ناشی از کاهش بارش ها و افزایش دما در بهار و تابستان است. همچنین، تولید انرژی در ماه های ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر، بسته به سناریو و دوره زمانی، بین ۰٫۷ تا ۲۳ درصد افزایش می یابد که دلیل آن افزایش دبی خروجی و حجم مخزن در این ماه ها است. افزایش بارش ها در پاییز و زمستان و همچنین ذوب برف در اوایل بهار، عامل اصلی افزایش دبی و حجم مخزن و در نتیجه تولید انرژی بیشتر در این بازه های زمانی است. در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، تحت هر سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، بیشترین کاهش تولید انرژی در ماه جولای و بیشترین افزایش آن در ماه فوریه رخ خواهد داد. در دوره میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰)، تحت سناریوی بدبینانه RCP8.5، کاهش قابل توجه تولید انرژی در ماه های می، جولای و آوریل مشاهده می شود، درحالی که بیشترین افزایش تولید تحت سناریوی خوش بینانه RCP2.6 در فوریه رخ خواهد داد. در دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰) و تحت سناریوی RCP8.5، کاهش انرژی در ماه های می و جولای به اوج خود می رسد و بیشترین افزایش تولید انرژی در فوریه و تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 ثبت خواهد شد. این نتایج نشان می دهند که در هر سه دوره آینده، بیشترین کاهش تولید انرژی برق آبی در اواسط بهار و اوایل تابستان (می و جولای) و بیشترین افزایش آن در اواسط زمستان (فوریه) رخ خواهد داد. دامنه تغییرات از کاهش ۴۱٫۷ درصدی در ماه آگوست تا افزایش ۲۳ درصدی در فوریه متغیر است. همچنین، میزان تغییرات در دوره آینده دور نسبت به دوره های نزدیک و میانه بیشتر خواهد بود.

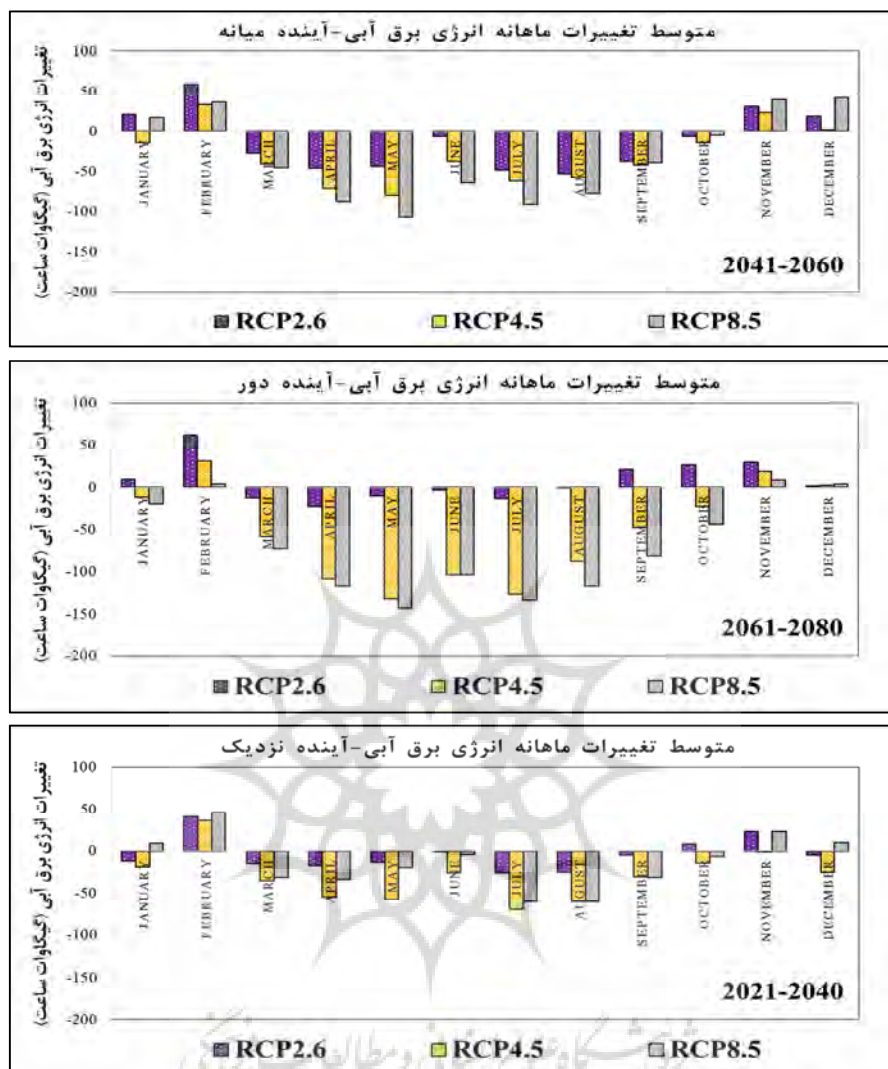
در شکل ۵، میانگین بلندمدت ماهانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره پایه و دوره های آتی و تحت سناریوهای انتشار RCPs نشان داده شده است. براساس نتایج حاصله، در دوره پایه، بیشترین میزان تولید انرژی برق آبی در اوایل فصل بهار (ماه های آوریل ۴۵۸ و می ۴۴۵ گیگا وات در ساعت) و کمترین مقدار تولید انرژی در طول فصل پاییز (ماه های اکتبر ۱۹۰، نوامبر ۱۷۸ و دسامبر ۲۳۶ گیگا وات در ساعت) مشاهده می شود؛ یعنی در ماه هایی که حداکثر دبی و حجم آب اتفاق می افتد، انرژی برق آبی نیز به بیشترین میزان تولید خود خواهد رسید و بالعکس در ماه هایی که دبی و حجم مخزن سد به حداقل مقدار خود در طول سال آبی می رسد، شاهد کاهش چشمگیر تولید انرژی خواهیم بود. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که میزان تولید انرژی در نیروگاه برق آبی شهید عباسپور ارتباط مستقیمی با دبی ورودی، دبی خروجی و حجم آب مخزن دارد. در شکل ۶ و جدول ۳، متوسط تغییرات بلندمدت ماهانه تولید انرژی در نیروگاه شهید عباسپور طی دوره های ۲۰۶۱-۲۰۸۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و

۲۰۲۱-۲۰۴۰ و تحت الگوهای انتشار RCPs نسبت به دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵) نشان داده شده است. براساس نتایج حاصله در هر سه دوره آتی و تحت هر سه سناریوی واداشت تابشی، مقدار انرژی برق آبی در ماه‌های مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای و آگوست (تحت هر سه سناریوی مورد مطالعه)، ماه سپتامبر (به جز آینده دور و تحت سناریوی حد پایین) و ماه اکتبر (به جز آینده نزدیک و دور، تحت سناریوی حد پایین) از ۰/۱ تا ۴۱/۷ درصد نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت که علت آن، افت قابل ملاحظه دبی ورودی و خروجی و به تبع آن کم شدن حجم آب در مخزن سد شهید عباسپور به دلیل کاهش بارش‌ها بین ۱،۹ تا ۲۸ درصد (بیشترین افت مربوط به دوره آینده دور و تحت سناریوی RCP8.5 می‌باشد) و افزایش دما بین ۱،۶ تا ۳،۶ درجه سلسیوس در در فصول بهار و تابستان است. این افزایش در دوره آینده دور و تحت سناریوی RCP8.5 به اوج خود می‌رسد. این روند افزایشی دما، همراه با کاهش بارش، تأثیر مستقیمی بر کاهش رواناب سطحی و کاهش سطح ذخیره سد داشته و به افت محسوس در تولید انرژی برق آبی منجر شده است. همچنین، میزان انرژی در ماه‌های ژانویه (در دوره آینده نزدیک، تحت سناریو RCP8.5، در دوره آینده میانه، تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و در دوره آینده دور، تحت سناریو RCP2.6)، فوریه (در هر سه دوره و تحت هر سه سناریو)، نوامبر و دسامبر (در دوره آینده نزدیک، تحت سناریو RCP8.5 و در دوره آینده میانه و دور تحت هر سه سناریوی انتشار) از ۰/۷ تا ۲۳ درصد افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش دبی خروجی و حجم مخزن سد در دوره‌های زمانی آینده هست. بنابراین، وقوع بارش‌های بیش از حد نرمال در اواسط پاییز و اوایل زمستان و نیز افزایش دما و تبخیر و تعرق در طول زمستان و اوایل بهار که موجب افزایش رواناب ناشی از ذوب برف خواهد شد، عامل اصلی در افزایش دبی و حجم مخزن و در نتیجه تولید بیشتر انرژی در نیروگاه برق آبی شهید عباسپور هست. در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و براساس هر سه الگوی واداشتی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، بیشترین میزان کاهش انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در ماه جولای به ترتیب برابر با ۶۹/۶ و ۶۰/۴ گیگاوات ساعت و بیشترین مقدار افزایش تولید انرژی در ماه فوریه به میزان ۴۱/۲، ۳۶/۶ و ۴۵/۹ گیگاوات ساعت رخ خواهد داد.

در دوره آینده میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و تحت سناریوی بدبینانه (RCP8.5)، حداکثر کاهش انرژی برق آبی به ترتیب در ماه‌های می، جولای و آوریل به مقدار ۱۰۷/۱، ۹۰/۹ و ۸۷/۸ گیگاوات ساعت و بیشترین میزان تولید انرژی تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6) در ماه فوریه برابر با ۵۸/۸ و بعد از آن تحت سناریوی بدبینانه، به ترتیب در ماه‌های دسامبر و نوامبر به مقدار ۴۲/۲ و ۴۰/۱ گیگاوات ساعت مشاهده می‌شود. در دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰) و تحت سناریوی حد بالا (RCP8.5)، بیشترین مقدار کاهش تولید انرژی به ترتیب در ماه‌های می و جولای به میزان ۱۴۲/۸، ۱۳۳/۳ گیگاوات ساعت مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین میزان افزایش انرژی برق آبی در ماه فوریه و تحت سناریوهای حد پایین و حد وسط (RCP2.6 و RCP4.5) به ترتیب برابر با ۶۲/۵ و ۳۱/۸ گیگاوات ساعت به وقوع خواهد پیوست. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در هر سه دوره زمانی آینده و براساس هر سه سناریوی مورد مطالعه، بیشترین میزان کاهش انرژی برق آبی در اواسط بهار (ماه می) و اوایل تابستان (جولای) و بیشترین مقدار افزایش انرژی در اواسط زمستان (فوریه) رخ خواهد داد. دامنه تغییرات انرژی برق آبی در نیروگاه شهید عباسپور از ۴۱/۷- درصد در ماه آگوست (در دوره آینده دور و تحت سناریو RCP8.5) تا ۲۳+ درصد در ماه فوریه (در دوره آینده دور و تحت سناریو RCP2.6) متغیر است. بنابراین، میزان تغییرات انرژی برق آبی در دوره آینده دور بیش از دوره‌های آینده نزدیک و میانه خواهد بود.



شکل ۵: متوسط بلندمدت ماهانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره پایه و دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs



شکل ۶: متوسط تغییرات ماهانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs نسبت به دوره پایه

جدول ۳: تغییرات ماهانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs نسبت به دوره پایه (برحسب درصد)

انرژی برق آبی												ماه (میلادی)
December	November	October	September	August	July	June	May	April	March	February	January	
۲۳۶/۵	۱۷۸/۵	۱۹۰/۴	۲۲۴/۲	۲۸۰/۵	۳۳۵/۵	۳۵۳/۹	۴۴۵/۱	۴۵۸/۹	۳۹۸/۴	۲۷۱/۲	۲۷۹/۱	میانگین ماهانه انرژی برق آبی در دوره پایه (GWh)
-۲/۲	۱۳/۱	۴/۵	-۲/۳	-۸/۹	-۷/۶	-۰/۳	-۲/۹	-۳/۶	-۳/۷	۱۵/۲	-۳/۹	RCP2.6
-۱۰/۵	-۰/۴	-۷/۲	-۱۳/۵	-۲۱/۳	-۲۰/۷	-۷/۱	-۱۲/۹	-۱۲	-۸/۷	۱۳/۵	-۶/۷	RCP4.5
۴/۳	۱۳	-۳/۴	-۱۴	-۲۱/۵	-۱۸	-۱/۱	-۴/۳	-۷/۳	-۷/۸	۱۶/۹	۳/۲	RCP8.5

درصد تغییرات
انرژی برق آبی
(۲۰۲۱-۲۰۴۰)

ماه (میلادی)		January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
درصد تغییرات انرژی برق آبی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)	RCP2.6	۷/۷	۲۱/۷	-۶/۷	-۱۰	-۹/۸	-۱/۷	-۱۴/۳	-۱۸/۹	-۱۶/۶	-۳/۲	۱۷/۵	۷
	RCP4.5	-۴/۹	۱۲/۴	-۱۰	-۱۵/۶	-۱۸/۱	-۱۰/۵	-۱۸/۶	-۲۰/۴	-۱۸/۵	-۷/۱	۱۳/۴	۰/۷
	RCP8.5	۶/۲	۱۳/۸	-۱۱/۳	-۱۹/۱	-۲۴/۱	-۱۸/۲	-۲۷/۱	-۲۷/۴	-۱۷/۳	-۲/۴	۲۲/۴	۱۷/۸
ماه (میلادی)		January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
درصد تغییرات انرژی برق آبی (۲۰۶۱-۲۰۸۰)	RCP2.6	۳/۶	۲۳	-۳/۲	-۴/۹	-۲/۳	-۰/۹	-۳/۸	-۰/۱	۹/۶	۱۴	۱۶/۹	۰/۹
	RCP4.5	-۴	۱۱/۷	-۱۴/۸	-۲۳/۵	-۲۹/۶	-۲۹/۲	-۳۷/۶	-۳۱/۴	-۲۱/۵	-۱۱/۷	۱۰/۸	۱/۱
	RCP8.5	-۷	۱/۶	-۱۸/۳	-۲۵/۴	-۳۲/۱	-۲۹/۳	-۳۹/۷	-۴۱/۷	-۳۶/۶	-۲۳/۱	۴/۹	۱/۹

رنگ آبی: درصد افزایش انرژی برق آبی در هر سناریو

رنگ نارنجی: درصد کاهش انرژی برق آبی در هر سناریو

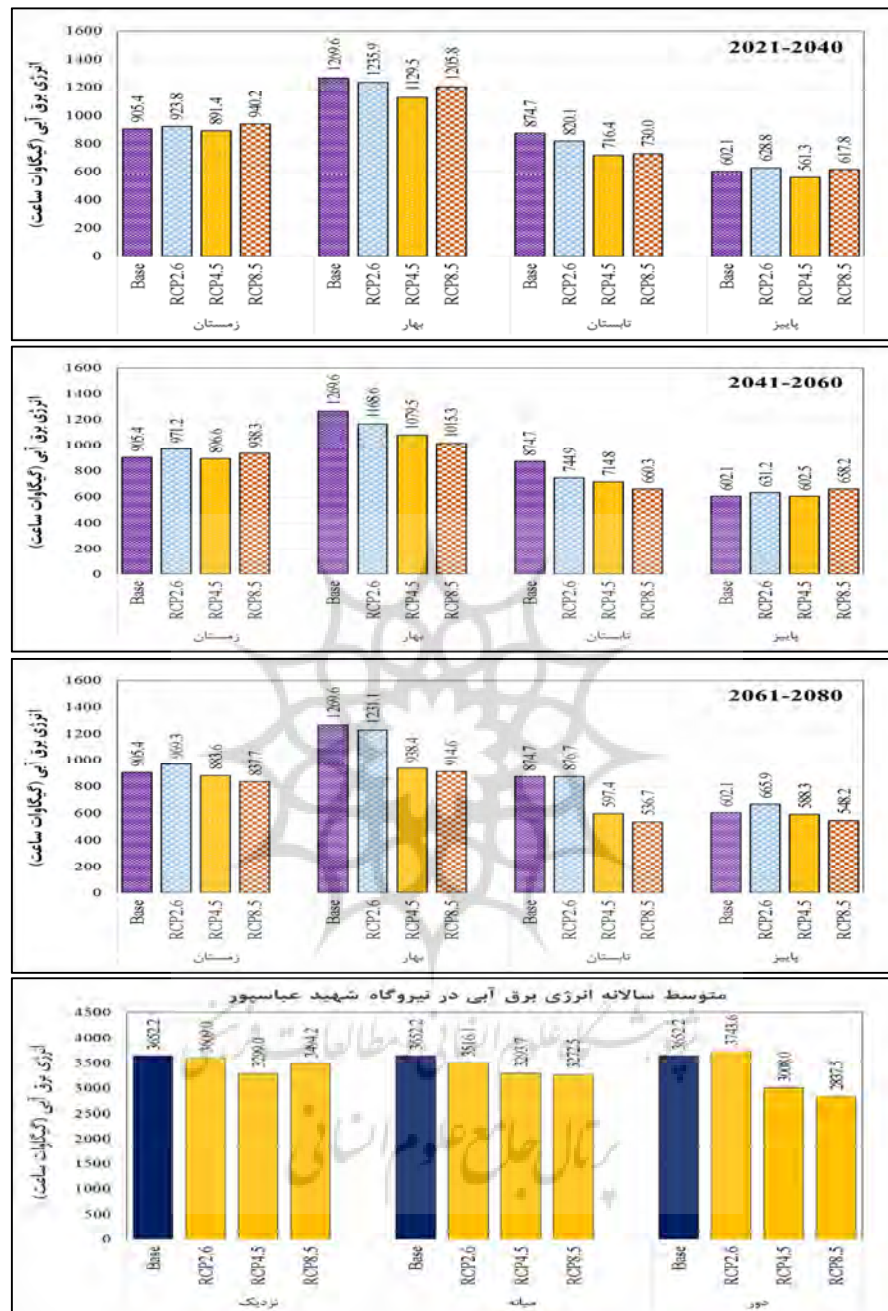
تغییرات فصلی و سالانه تولید انرژی برق آبی در نیروگاه شهید عباسپور طی دوره‌های آبی و تحت سناریوهای مختلف واداشت تابشی در جدول ۴ و شکل ۷ بررسی شده است. در دوره آینده نزدیک (۲۰۴۱-۲۰۶۰) در فصول بهار و تابستان، تحت هر سه سناریو و در فصول پاییز و زمستان تحت سناریو RCP4.5، مقدار انرژی برق آبی از ۱/۶ تا ۱۸/۱ درصد کاهش می‌یابد؛ در حالی که بر اساس سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 میزان انرژی از ۲ تا ۴/۵ درصد در فصول پاییز و زمستان افزایش خواهد یافت. در دوره آینده میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰) در فصول بهار و تابستان و تحت هر سه سناریوی مورد مطالعه و در فصل زمستان (تحت سناریو RCP4.5)، مقدار انرژی برق آبی از ۱ تا ۲۴/۵ درصد کاهش می‌یابد؛ اما در فصل پاییز تحت هر سه الگوی انتشار و در فصل زمستان (براساس دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5) میزان انرژی از ۰/۱ تا ۹/۳ درصد افزایش خواهد یافت. در دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰)، براساس سناریوهای حد وسط و حد بالا (سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5)، تولید انرژی در همه فصول کاهش می‌یابد که این مقدار کاهش از ۲/۳ تا ۳۸/۶ درصد متغیر است. تحت سناریو حد پایین (RCP2.6) در فصول زمستان، تابستان و پاییز میزان انرژی برق آبی در نیروگاه شهید عباسپور از ۰/۲ تا ۱۰/۶ درصد افزایش خواهد یافت. براساس نتایج حاصله، بیشترین مقدار کاهش انرژی در دوره آینده نزدیک (تحت سناریو RCP4.5) در فصل تابستان به میزان ۱۵۸/۳ گیگاوات و در دوره آینده میانه و دور (تحت سناریو RCP8.5) در فصل بهار به ترتیب برابر با ۲۵۴/۲ و ۳۵۵ گیگاوات ساعت پیش‌نمایی می‌شود. همچنین در هر سه دوره آبی، بیشترین میزان افزایش انرژی برق آبی در فصل زمستان مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که حداکثر مقدار انرژی تولیدی در دوره آینده نزدیک (تحت سناریوی حد بالا)، آینده میانه و دور (تحت سناریوی حد پایین) به ترتیب برابر با ۳۴/۸، ۶۵/۷ و ۶۳/۸ گیگاوات ساعت رخ خواهد داد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در هر سه دوره زمانی آینده و تحت هر سه الگوی واداشتی مورد مطالعه، دامنه تغییرات فصلی انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور از ۳۸/۶- درصد در فصل تابستان (دوره آینده دور و تحت سناریو RCP8.5) تا ۱۰/۶+ درصد در فصل پاییز (دوره آینده دور و تحت سناریو RCP2.6) متغیر خواهد بود. به‌جز سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6) در دوره آینده دور که متوسط سالانه انرژی در نیروگاه برق آبی شهید عباسپور به مقدار ۹۴/۱ گیگاوات ساعت (برابر با ۲/۵ درصد) نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد، در دیگر دوره‌های زمانی آینده و تحت سناریوهای مورد بررسی، مقدار

انرژی تولیدی نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت؛ به طوری که تحت الگوهای واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک، مقدار کاهش انرژی به ترتیب برابر با ۱/۲، ۹/۷ و ۴/۳ درصد، در دوره آینده میانه به ترتیب به میزان ۳/۷، ۹/۸ و ۱۰/۴ درصد و در دوره آینده دور (تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5) به ترتیب به مقدار ۱۷/۶ و ۲۲/۳ درصد خواهد بود. همان طور که ملاحظه می شود کمترین میزان کاهش انرژی سالانه در دوره آینده نزدیک و تحت سناریوی خوش بینانه (RCP2.6) برابر با ۴۳/۲ گیگاوات ساعت و بیشترین مقدار کاهش انرژی برق آبی در دوره آینده دور و تحت سناریوی بدبینانه (RCP8.5) به مقدار ۸۱۴/۷ گیگاوات ساعت رخ خواهد داد. تغییرات سالانه تولید انرژی برق آبی در نیروگاه شهید عباسپور طی دوره های زمانی آینده و براساس سناریوهای مورد مطالعه، رابطه مستقیم با میزان تغییرات دبی ورودی، دبی خروجی و حجم مخزن سد دارد؛ به طوری که با کاهش ۲۶/۶ درصدی حجم مخزن در دوره آینده دور و تحت سناریوی RCP8.5، مقدار انرژی تولیدی ۲۲/۳ درصد کاهش خواهد یافت و در دوره آینده نزدیک و تحت سناریوی RCP2.6 با افزایش ۱/۹ درصدی حجم مخزن سد، میزان تولید انرژی برق آبی ۲/۵ درصد افزایش می یابد. براساس نتایج حاصله، دامنه تغییرات انرژی برق آبی در نیروگاه شهید عباسپور در دوره آینده دور و تحت سناریوهای مورد بررسی بیش از دوره های آینده نزدیک و میانه خواهد بود.

جدول ۴: تغییرات فصلی و سالانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره های آتی و تحت سناریوهای انتشار RCPs نسبت به دوره پایه (برحسب درصد)

آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)					
فصلی و سالانه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه
متوسط انرژی برق آبی در دوره پایه (GWh)	۹۰۵/۴	۱۲۶۹/۶	۸۷۴/۷	۶۰۲/۱	۳۶۵۲/۲
درصد تغییرات انرژی برق آبی	RCP2.6	۲	-۲/۷	-۶/۳	۴/۵
	RCP4.5	-۱/۶	-۱۱	-۱۸/۱	-۶/۸
	RCP8.5	۳/۸	-۵	-۱۶/۵	۲/۶
آینده میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰)					
فصلی و سالانه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه
درصد تغییرات انرژی برق آبی	RCP2.6	۷/۳	-۷/۹	-۱۴/۸	۴/۸
	RCP4.5	-۱	-۱۵	-۱۸/۳	۰/۱
	RCP8.5	۳/۶	-۲۰	-۲۴/۵	۹/۳
آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰)					
فصلی و سالانه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه
درصد تغییرات انرژی برق آبی	RCP2.6	۷	-۳	۰/۲	۱۰/۶
	RCP4.5	-۲/۴	-۲۶/۱	-۳۱/۷	-۲/۳
	RCP8.5	-۷/۵	-۲۸	-۳۸/۶	-۸/۹

رنگ آبی: درصد افزایش انرژی برق آبی در هر سناریو
رنگ نارنجی: درصد کاهش انرژی برق آبی در هر سناریو



شکل ۷: متوسط بلندمدت فصلی و سالانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره پایه و دوره های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs

به منظور تحلیل روند تغییرات سالانه تولید انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره آبی، از آزمون های من - کندال و شیب سب برای بررسی سری زمانی ۶۰ ساله (۲۰۲۱-۲۰۸۰) استفاده شده است. نتایج این تحلیل ها در جدول ۵ و شکل ۸ ارائه شده اند. بر اساس این نتایج، روند تغییرات سالانه تولید انرژی برق آبی تحت سناریوی

RCP2.6 با ضریب من - کندال ۰,۶۱ و شیب سن ۲,۲۵۴ گیگاوات ساعت افزایشی است، اما این روند از نظر آماری معنادار نیست. در سناریوی انتشار RCP4.5، روند تغییرات انرژی برق آبی نزولی است که با ضریب من - کندال ۱,۸۶- و شیب سن ۷,۶۰۵- گیگاوات ساعت در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است. همچنین، تحت سناریوی RCP8.5 (سناریوی حد بالا)، ضریب من - کندال ۴,۲۷- و شیب سن ۱۵,۹۹۰- گیگاوات ساعت نشان‌دهنده روند کاهشی معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. بر اساس پیش‌نمایی‌ها، کاهش انرژی برق آبی در نیروگاه شهید عباسپور طی ۶۰ سال آینده، تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۴۵۶,۳ و ۹۵۹,۴ گیگاوات ساعت خواهد بود. با توجه به آماره شیب سن، می‌توان نتیجه گرفت که در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰، شیب نزولی تولید انرژی برق آبی تحت سناریوی RCP8.5 تندتر از سناریوی RCP4.5 است، به‌طوری‌که نشان‌دهنده کاهش شدیدتر تولید انرژی در سناریوی بدبینانه است.

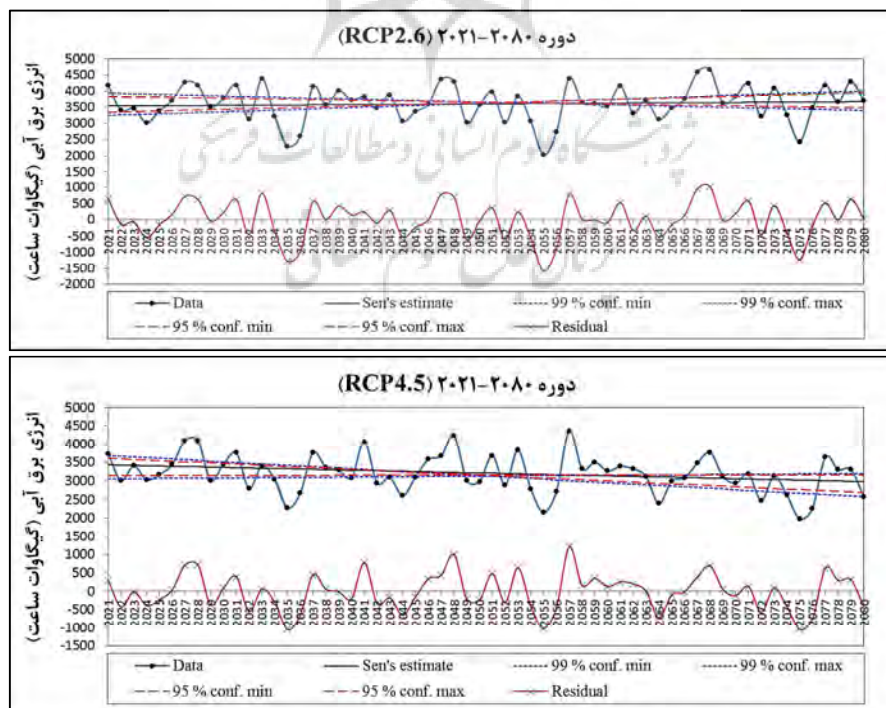
جدول ۵: نتایج حاصل از تحلیل روند تغییرات سالانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ و تحت سناریوهای

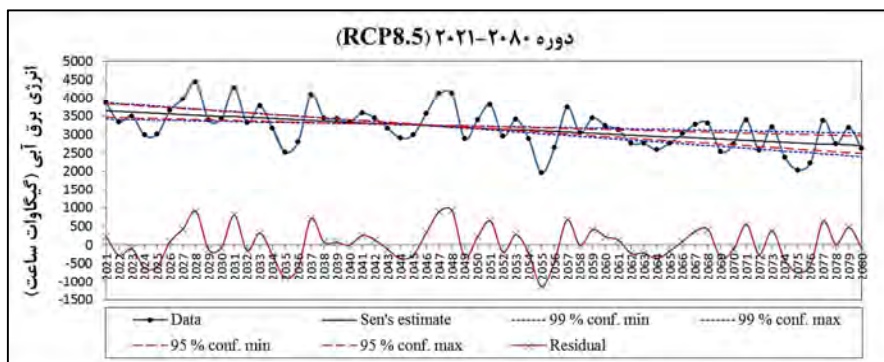
انتشار RCPs

سناریوهای انتشار RCPs			آماره	دوره آتی
RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6		
-۴/۲۷	-۱/۸۶	۰/۶۱	من کندال	(۲۰۲۱-۲۰۸۰)
-۱۵/۹۹۰	-۷/۶۰۵	۲/۲۵۴	شیب سن	
روند کاهشی معنی‌دار	روند کاهشی معنی‌دار	روند افزایشی غیر معنی‌دار	معنی‌داری روند	

روندهای معنی‌دار در سطوح ۵ و ۱ درصد به ترتیب با * و ** مشخص شده است.

واحد شیب سن برای انرژی برق آبی، گیگاوات ساعت است.

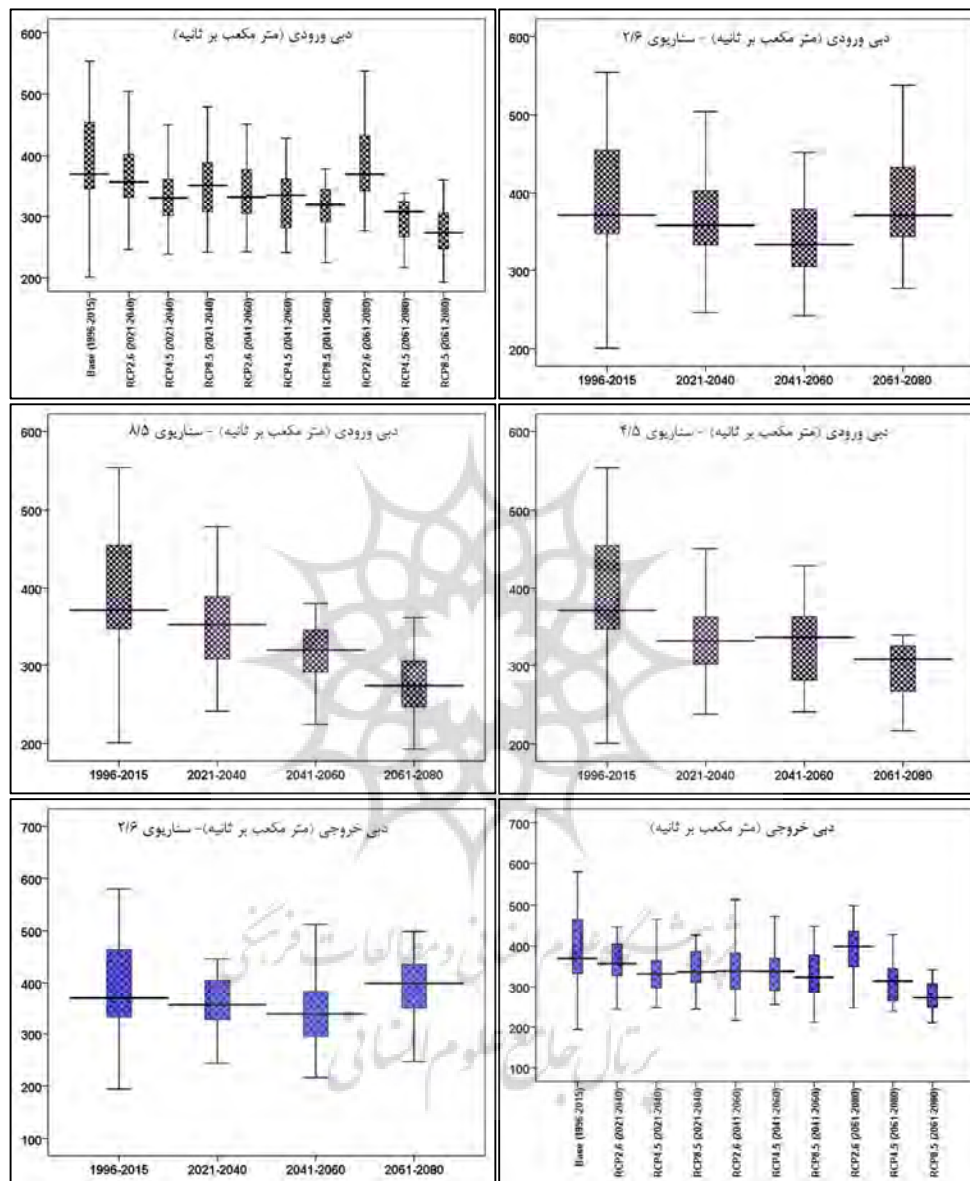


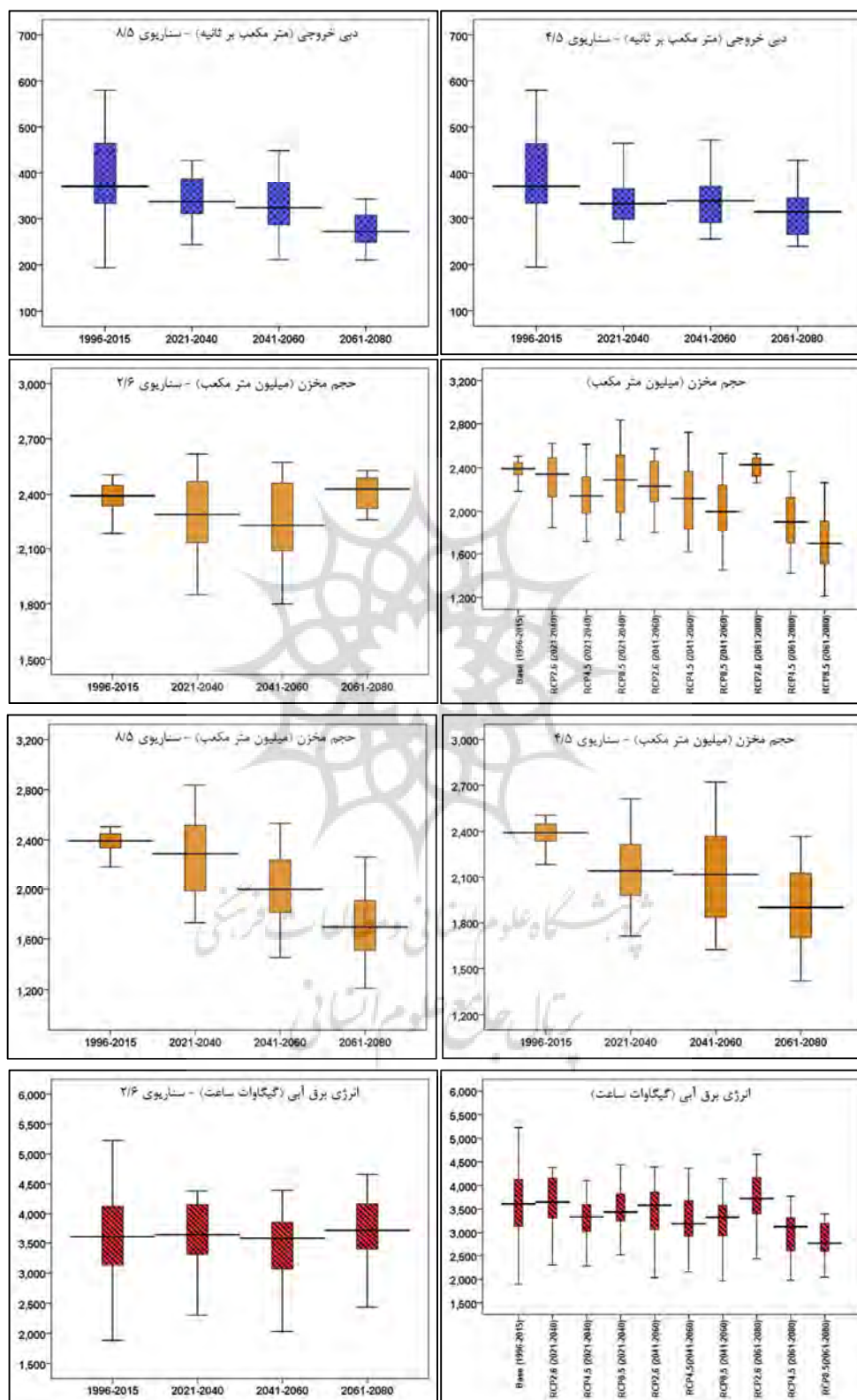


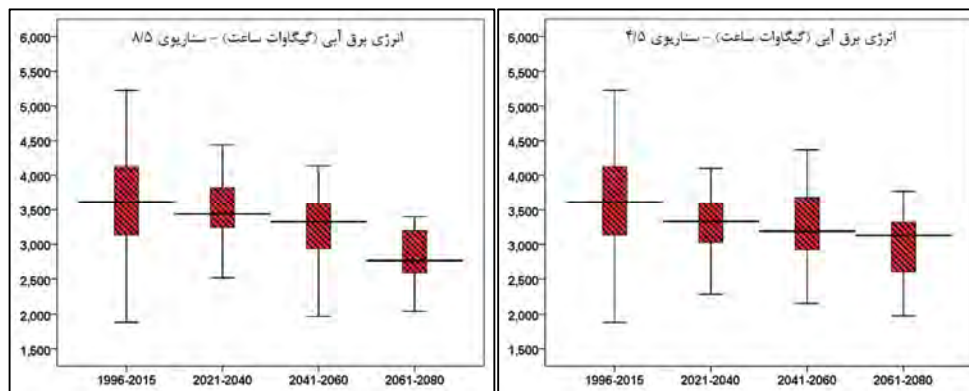
شکل ۸: نمودار شیب روند تغییرات سالانه انرژی برق آبی نیروگاه شهید عباسپور در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ و تحت سناریوهای انتشار RCPs براساس آماره شیب سین

در این پژوهش، به منظور تحلیل عدم قطعیت پارامترهای دبی ورودی، دبی خروجی، حجم مخزن و تولید انرژی برق آبی در سد شهید عباسپور، از نمودار جعبه‌ای بیست‌ساله در دوره‌های زمانی آبی و تحت سناریوهای مختلف انتشار نسبت به دوره پایه استفاده شده است (شکل ۹). نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی پیش‌نمایی می‌کند که در هر سه دوره آبی و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، مقدار دبی ورودی نسبت به دوره پایه به‌طور میانگین بین ۱۲ تا ۳۵ درصد کاهش خواهد یافت و دبی خروجی نیز در همین بازه، کاهش ۹ تا ۳۰ درصدی را تجربه خواهد کرد. بیشترین عدم قطعیت در این دو پارامتر در سناریوی RCP8.5 در دوره آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) مشاهده می‌شود، درحالی‌که کمترین تغییرات مربوط به سناریوی RCP2.6 در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) است. همچنین نتایج مدل‌سازی پیش‌بینی می‌کند که حجم مخزن سد در اغلب سناریوها و دوره‌ها نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. کاهش حجم مخزن در برخی سناریوها تا ۴۰ درصد نیز گزارش شده است. تنها استثنا مربوط به سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6 در دوره آینده دور است که افزایش جزئی حدود ۴ درصدی در حجم آب مخزن پیش‌بینی می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر اقلیم، به‌ویژه در سناریوهای حد وسط و حد بالا، تأثیرات قابل‌ملاحظه‌ای بر منابع هیدرولوژیکی و توان ذخیره‌سازی سد خواهد داشت که مستقیماً عملکرد تولید انرژی برق آبی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی، دبی ورودی سد شهید عباسپور در دوره آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه به میزان تا ۵۱٫۶ مترمکعب بر ثانیه کاهش خواهد یافت (کاهش معادل بیش از ۳۰٪) و در سناریوی RCP4.5 نیز این کاهش به حدود ۲۶ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. در مقابل، در سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6، کاهش دبی ورودی تنها ۶ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است. در مورد دبی خروجی سد نیز، در دوره آینده دور و تحت RCP8.5 کاهش تا ۵۲ درصد ثبت شده و در سناریوهای RCP4.5 و RCP2.6 این کاهش به ترتیب تا ۴۳٫۲ درصد و حدود ۲۰ درصد برآورد شده است. پیش‌بینی حجم مخزن نشان می‌دهد که در دوره آینده دور، در سناریوی RCP8.5 کاهش تا ۴۳٫۶ درصد نسبت به دوره پایه رخ خواهد داد. این کاهش در سناریوی RCP4.5 معادل ۳۵٫۱ درصد و در RCP2.6 معکوس بوده و افزایش ۱٫۹ درصدی در حجم آب مخزن دیده می‌شود. در خصوص تولید انرژی برق آبی نیز، در سناریوی RCP8.5 در دوره آینده دور، کاهش انرژی تا ۳۸٫۶ درصد گزارش شده است؛ درحالی‌که در سناریوی RCP4.5 این مقدار حدود ۳۱٫۷ درصد و در RCP2.6 تقریباً بدون تغییر یا با افزایش جزئی ۰٫۹ درصدی همراه است. به‌طور کلی، بیشترین عدم قطعیت و کاهش در تمامی پارامترهای کلیدی در دوره آینده دور

و تحت سناریوی RCP8.5 مشاهده می‌شود، درحالی که نتایج سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6 در همه دوره‌ها نسبتاً پایدارتر و همراه با کمترین افت در دبی، حجم مخزن و انرژی برق آبی است.







شکل ۹: نمودار جعبه‌ای بیست‌ساله دبی ورودی، دبی خروجی، حجم مخزن و انرژی برق‌آبی سد شهید عباسپور در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs نسبت به دوره پایه

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم یک پدیده پیچیده جهانی است که به تغییرات پارامترهای اقلیمی یک منطقه در مقایسه با الگوهای قابل‌انتظار بر اساس داده‌های مشاهده‌ای در یک افق زمانی بلندمدت اشاره دارد. پس از انقلاب صنعتی، افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌طور چشمگیری شدت یافته و این امر به تغییرات دمایی در جو زمین و اختلال در توازن انرژی جهانی منجر شده است. این تغییرات باعث گرمایش جهانی و بروز تغییر اقلیم می‌شود که اثرات آن بر دما و بارش می‌تواند منابع آب سطحی و عملکرد نیروگاه‌های برق‌آبی را تحت تأثیر قرار دهد، زیرا انرژی برق‌آبی به‌طور کامل وابسته به شرایط هیدرولوژیکی منطقه است که به‌طور حتم تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرد. حوضه آبریز کارون با وجود سدهای مخزنی بزرگ، نقش اساسی در ذخیره‌سازی آب و تولید انرژی برق‌آبی ایفا می‌کند. به‌همین دلیل، در این پژوهش به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید برق‌آبی سد شهید عباسپور و بررسی تأثیرات آن بر منابع آب سطحی حوضه آبریز کارون در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار RCPs پرداخته شد. به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌نمایی منابع آب سطحی و انرژی برق‌آبی سد شهید عباسپور از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بهره گرفته شد. بدین‌صورت که داده‌های هیدرو - اقلیمی تولیدشده با تأخیرهای زمانی مختلف به‌عنوان ورودی به مدل هیدرولوژیکی شبکه عصبی منتخب داده شد و جریان ورودی، خروجی و حجم مخزن در دوره‌های آبی و سری‌های زمانی مربوط به دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰) با استفاده از خروجی مدل HadGEM2-ES تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی گردید. سپس داده‌های پیش‌نمایی‌شده یادشده با اعمال تأخیر زمانی به‌عنوان اطلاعات ورودی به مدل هیدروالکتریکی شبکه عصبی معرفی شد و مقادیر انرژی برق‌آبی به‌عنوان برون‌داد توسط شبکه برآورد گردید. نتیجه‌گیری این پژوهش به‌طور جامع نشان‌دهنده تأثیرات عمیق تغییرات اقلیمی بر تولید انرژی برق‌آبی نیروگاه شهید عباسپور است. نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) که برای شبیه‌سازی روندهای آینده به کار رفته، پیش‌نمایی می‌کند که در سناریوهای بدبینانه (RCP8.5) و حد وسط (RCP4.5)، تولید انرژی به‌طور قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت. به‌ویژه در دوره آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱)، کاهش انرژی برق‌آبی به میزان ۲۲٫۳ درصد پیش‌نمایی شده که ناشی از افت دبی ورودی و حجم مخزن به‌واسطه کاهش بارش‌ها و افزایش دما است. این کاهش انرژی

به‌خصوص در ماه‌های بهار و تابستان، زمانی که تقاضای آب و انرژی بالاست، تأثیرات منفی بیشتری خواهد داشت. در عوض، در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6)، تولید انرژی افزایش اندکی را نشان می‌دهد، به‌ویژه در ماه‌های پاییز و زمستان، که ناشی از افزایش بارش‌ها و بالارفتن دبی ورودی به مخزن سد است. این نشان می‌دهد که مدیریت بهینه منابع آبی در این فصول می‌تواند به بهبود تولید انرژی کمک کند. در سناریوی متعادل (RCP4.5)، روند تغییرات سالانه انرژی نزولی و در سطح اطمینان ۵ درصد معنی‌دار است، درحالی‌که تحت سناریوی بدبینانه (RCP8.5)، روند کاهشی انرژی به تأیید آماره من‌کندال در سطح ۱ درصد می‌رسد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاهش گازهای گلخانه‌ای تحت سناریو RCP2.6 نمی‌تواند به افزایش منابع آب سطحی و تولید انرژی برق‌آبی در دوره‌های آینده نزدیک و میانه منجر شود. حداقل یک بازه زمانی ۴۰ ساله لازم است تا با کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای به سطح ppm450، جریان ورودی به مخزن سد بهبود یابد. همچنین، بررسی عدم قطعیت‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین عدم قطعیت در پارامترهای هیدرولوژیکی و تولید انرژی به‌ویژه در دوره‌های آینده دور و تحت سناریوهای بدبینانه و حد وسط وجود دارد. این نکته اهمیت مدیریت پایدار منابع آب و انرژی را در مواجهه با تغییرات اقلیمی بیشتر می‌کند. بنابراین، برای کاهش تأثیرات منفی احتمالی و بهبود کارایی نیروگاه‌ها، ضروری است که در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌ها به عوامل تغییر اقلیم توجه ویژه‌ای شود. این کار نه‌تنها به حفظ منابع انرژی کمک می‌کند، بلکه به دستیابی به توسعه پایدار و مدیریت بهتر منابع آبی نیز منجر خواهد شد. نتایج این مطالعه با پژوهش‌های گذشته هم‌خوانی دارد. به‌طورمثال، عسکری و همکاران (۱۳۹۹) به کاهش ۵۷ تا ۶۰ درصدی تولید انرژی برق‌آبی در نیروگاه دز تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 اشاره کرده‌اند. همچنین، امینی ناغانی و همکاران (۱۴۰۰) کاهش ۱۷ و ۳۱ درصدی انرژی تولیدی در سد کارون ۴ را تحت سناریوهای مختلف گزارش کردند.

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم جهانی است که با تغییر در الگوهای دما و بارش، منابع آب سطحی و در نتیجه تولید انرژی برق‌آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش، با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و تحت سناریوهای انتشار مختلف (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5)، تأثیر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید برق‌آبی نیروگاه شهید عباسپور در حوضه آبریز کارون طی دوره‌های آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، به‌ویژه در دوره آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱)، به دلیل کاهش میانگین بارش سالانه تا ۲۸٪ و افزایش دما تا ۳٫۶ درجه سلسیوس، رواناب سطحی و در نتیجه دبی ورودی به مخزن سد به‌شدت کاهش یافته و کاهش تولید انرژی برق‌آبی تا ۳۸٫۶ درصد مشاهده شده است. از سوی دیگر، در سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6، تغییرات اقلیمی در دوره آینده نزدیک منجر به افزایش انرژی تولیدی در برخی ماه‌های پاییز و زمستان شد که با نتایج مطالعات (Safavi et al. (2016) و Tavakoli & Rahimikhoob (2020) در خصوص انتقال زمانی بارش‌ها و افزایش موقت رواناب در برخی ماه‌های سرد، هم‌راستا است. همچنین، کاهش حجم مخزن در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 با مقدار حداکثری ۴۳٫۶٪، به‌خوبی با یافته‌های مطالعاتی همچون (Abbaspour et al. (2019) و Nikbakht et al. (2020) که به افت منابع آبی در جنوب غرب ایران اشاره داشته‌اند، مطابقت دارد. آزمون روند نشان داد که روند تغییرات تولید انرژی برق‌آبی در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب در سطح اطمینان ۵٪ و ۱٪ کاهشی و معنادار است؛ مشابه نتایج (Gohari et al. (2013) که تأکید کرده‌اند روندهای دمایی و بارشی در ایران منجر به کاهش پتانسیل هیدروالکتریک خواهد شد. این یافته‌ها علاوه بر تطابق با

مطالعات داخلی مانند عسکری و همکاران (۱۳۹۹) درباره نیروگاه دز (با کاهش ۵۷ تا ۶۰ درصدی انرژی) و امینی ناغانی و همکاران (۱۴۰۰) در سد کارون ۴، در سطح منطقه‌ای نیز با نتایج پژوهش‌هایی در ترکیه و عراق (Pilsou & Al-Joubouri, 2016) هم‌راستا است که تغییر اقلیم را تهدیدی جدی برای آینده انرژی برق‌آبی در خاورمیانه می‌دانند. در نهایت، نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که در صورت تداوم روند کنونی انتشار گازهای گلخانه‌ای، منابع آب و انرژی با کاهش شدید مواجه خواهند شد. بر این اساس، مدیریت یکپارچه منابع آب، افزایش بهره‌وری سدها، اصلاح الگوهای مصرف و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله راه‌کارهای کلیدی برای سازگاری با پیامدهای تغییر اقلیم در مناطق حساس و خشک مانند جنوب غرب ایران به‌شمار می‌روند.

منابع

- امینی ناغانی، فهیمه؛ میرعباسی نجف‌آبادی، رسول؛ زمانی، رضا؛ نصرافهانی، محمدعلی. (۱۴۰۰). بررسی اثر تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برق‌آبی سد کارون چهار، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال یازدهم، شمار ۴۴، صص: ۲۵۱-۲۳۶.
- سالنامه آماری آب کشور ۱۳۹۱-۱۳۹۰ (۱۳۹۴)، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفای وزارت نیرو، تهران.
- سالنامه آماری نیروگاه‌های برق‌آبی کشور (۱۳۹۸)، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، تهران.
- ترازکی، شاهی؛ صولتی‌تبار، عبدالرحیم. (۱۳۹۷). تغییر اقلیم و مدیریت تطبیقی سد دز، تولید انرژی برق‌آبی و تأمین مصارف پایاب با بهره‌گیری از پویایی سیستم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، مؤسسه آموزش عالی آل طه، تهران.
- عارف، محمدرضا؛ علیجانی، بهلول. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات دما و بارش حوزه آبخیز یزد - اردکان با SDSM تحت شرایط تغییر اقلیم آینده، نشریه خشک بوم، دوره ۸، شماره ۱، صص: ۸۹-۱۰۱.
- عزیزی، قاسم. (۱۳۸۳). تغییر اقلیم، نشر قومس، تهران.
- عسکری، الهه؛ باعقیده، محمد؛ حسینی، مجید؛ انتظاری، علیرضا؛ کامیار، اصغر. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های برق‌آبی در مواجهه با تغییر اقلیم (مطالعه موردی: نیروگاه سد دز)، پایان‌نامه دکتری، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H. and Blaabjerg, F. (2014). "Renewable energy resources: Current status, prospects, and their enabling technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 39: 748-764.
- International Energy Agency (2013). *Energy Policy Highlights*, France: 114.
- IPCC. (2007). *Summary for policymakers climate change: The physical science basis*, Contribution of working group I to the fourth assessment report. Cambridge University Press, 881p.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- 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, R.K. & Meyer, L.A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp., 2014.
- Jung, II.W. and Chang, H. (2010). Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Willamette River Basin, Oregon, USA. *Hydrological processes*. 25: 258-277.
- Madani, K. and Lund, J.R. (2010). Estimated Impacts of Climate Warming on California's High Elevation Hydropower.
- Majone, B., Bovolo, C.I., Bellin, A., Blenkinsop, S. and Fowler, H.J. (2012). Modelling the impact of future climate change on water resources for the Gallego river basin (Spain). *Water Resources Research*, Vol.48, W01512.
- Maran, S., Volonterio, M. and Gaudard, L. (2014). Climate change impacts on hydropower in an alpine catchment, *Environmental Science & Policy*, Vol. 43, pp. 15-25.
- Minville, M., Brissette, F., Krau, S. and Leconte, R. (2009). Adaptation to Climate Change in the Management of a Canadian Water-Resources System Exploited for Hydropower. *Water Resources Management*, Vol 23, 2965-2986.
- Pilesjo, p. and Al-Juboori, s.s. (2016). Modelling the Effects of Climate Change on Hydroelectric Power in Dokan, Iraq. *Journal of Energy and Power Engineering*, 5(2-1): 7-12.
- Raje, D. and Mujumdar, P.P. (2010). Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change" *Advances in Water Resources*, Vol 33, 312-326.
- Shrestha, S., Khatiwada, M., Babel, M.S. and Parajuli, K. (2014). Impact of climate change on river flow and hydropower production in Kulekhani hydropower project of Nepal, *Environmental Processes*, Vol. 1, pp. 231-250.

- Sun, L., Zhou, X. and Gu, A. (2022). Effects of Climate Change on Hydropower Generation in China Based on a WEAP Model. *Sustainability*, 14(9):5467.
- Tiezzi, R.O., Vieira, N.D.B., Simões, A.F., Filho, H.F., Viana, E., Mouette, D. and Domingues, M.S. (2018). Impacts of Climate Change on Hydroelectric Power Generation – A Case Study Focused in the Paranapanema Basin, Brazil. *Journal of Sustainable Development*; Vol. 11, PP:140-149.
- U.S. Department of Energy. (2013). Effects of Climate Change on Federal Hydropower, Report to Congress, United States Department of Energy, Washington, DC 20585.
- Vicuna, S., Dracup, J.A. and Dale, L. (2011). Climate change impacts on two high-elevation hydropower systems in California, *Climate Change*, Vol. 109, pp. 151-169.
- Wagner, T., Theme, M., Schuppel, A., Gobiet, A., Stigler, A. and Birk, S. (2017). Impacts of climate change on stream flow and hydropower generation in the Alpine region. *Journal of Environ Earth Sci* 76:4, PP:1-22.

