

Climate change and the future of hydropower in Iran: Challenges, opportunities, and prospects for solar and wind energy development

Maryam Adami¹ , Tarahom Mesri Gundoshmian² 

1. Corresponding Author, PhD student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: m.adami.71534@gmail.com
2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: mesrigtm@gmail.com

Article Info

Article type:
Review Article

Article history:

Received 30 Apr 2026
Revised 21 Jun 2026
Accepted 25 Jun 2026
Published 30 Jun 2026

Keywords:

Wind Energy,
Solar Energy,
Hydropower,
Climate Change.

ABSTRACT

Objective: This study aims to assess the vulnerability of Iran's hydropower dams to climate change impacts and to investigate the potential and feasibility of their gradual replacement with renewable energy sources, particularly solar and wind.

Method: This research employed a narrative review and analytical approach by examining the existing literature, technical reports, and climate change scenarios. The study evaluated the impacts of climate change on Iran's hydropower generation, assessed the potential for solar and wind energy development, and analyzed international experiences in integrating renewable energy resources into power systems.

Findings: The results indicate that, under different climate change scenarios, Iran's hydropower generation is projected to decline by 9% to 91%, reducing its share of the country's total electricity generation from approximately 15% to less than 8%. In contrast, with nearly 300 sunny days per year, Iran possesses substantial renewable energy potential, including more than 56.5 GW of solar power capacity and approximately 20,443 GWh of wind energy potential. Furthermore, international experiences demonstrate that integrating hydropower plants with solar and wind energy systems can mitigate the risks associated with drought and climate variability. Nevertheless, implementing this approach in Iran faces significant economic, technical, regulatory, and social challenges.

Conclusion: Diversifying Iran's energy portfolio through the expansion of renewable energy resources, reforming support policies and subsidy mechanisms, removing investment barriers, and promoting integrated hydro-solar-wind energy systems can provide an effective strategy for enhancing energy security and reducing the vulnerability of the electricity sector to climate change.

Cite this article: Adami M, Mesri Gundoshmian T. (2026). Climate change and the future of hydropower in Iran: Challenges, opportunities, and prospects for solar and wind energy development. *Water Resources and Climate Change*. 2(2), 15-28. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.16589.1038>.

Introduction

Hydropower is one of the world's most important renewable energy sources, playing a vital role in electricity generation while reducing dependence on fossil fuels and greenhouse gas emissions. Owing to its high efficiency and operational flexibility, it contributes significantly to power system reliability. However, because hydropower depends directly on water availability, it is highly vulnerable to changes in precipitation, river discharge, and reservoir storage. As climate change intensifies, maintaining the long-term sustainability of hydropower systems has become an increasing challenge.

Iran is among the countries where climate change has aggravated water scarcity through rising temperatures, prolonged droughts, and declining precipitation. These changes have reduced river flows and reservoir storage, leading to lower hydropower generation and increasing pressure on conventional electricity production. At the same time, Iran possesses abundant solar and wind resources that provide valuable opportunities to diversify the national energy mix and strengthen energy security. Integrating hydropower with solar and wind energy therefore represents a promising strategy for improving the resilience of the electricity sector under changing climatic conditions.

Although numerous studies have investigated the impacts of climate change on hydropower or evaluated renewable energy resources, these issues have generally been addressed separately. An integrated assessment that links hydropower vulnerability with the potential of solar and wind energy, while considering the technical, economic, and policy challenges of the energy transition, remains limited, particularly in the context of Iran.

Accordingly, this review examines the impacts of climate change on Iran's hydropower sector and evaluates the potential of solar and wind energy to complement hydropower and enhance the resilience of the national electricity system. The review addresses the following research questions:

1. How has climate change affected the performance of hydropower systems in Iran?
2. To what extent have declining river flows and reservoir storage reduced hydropower generation?
3. What opportunities do solar and wind energy offer for complementing or partially replacing hydropower under Iran's climatic conditions?
4. What technical, economic, institutional, and policy challenges must be addressed to facilitate this energy transition?

Unlike previous studies that have generally focused on either hydropower vulnerability or renewable energy development in isolation, this review adopts an integrated perspective by linking climate-induced reductions in hydropower generation to the development potential of solar and wind energy. By synthesizing recent scientific evidence, evaluating renewable energy opportunities, and discussing implementation challenges in the Iranian context, this study

provides a comprehensive framework to support future research and inform energy and water management policies aimed at strengthening climate resilience and long-term energy security.

Method

This study employs a structured narrative review based on a systematic literature search and qualitative synthesis. The methodology was designed to identify, evaluate, and integrate the existing body of knowledge on the impacts of climate change on hydropower systems and the potential role of solar and wind energy in enhancing energy resilience in Iran.

(a) Literature Search

A comprehensive literature search was conducted using major international scientific databases, including Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and Google Scholar, together with relevant Persian databases such as Magiran and the Scientific Information Database (SID). The search covered publications from 2000 to 2025, with particular emphasis on studies published during the last decade.

The search strategy combined keywords related to climate change, hydropower, renewable energy, solar energy, wind energy, water–energy nexus, and Iran using appropriate Boolean operators.

(b) Study Selection

Studies were selected according to predefined eligibility criteria. Publications were included if they:

- investigated the impacts of climate change on hydropower systems;
- evaluated the potential of solar or wind energy, particularly in arid and semi-arid regions;
- examined water–energy interactions in Iran or regions with comparable climatic conditions; or
- were published in peer-reviewed journals or issued as official reports by recognized national or international organizations.

Studies focusing exclusively on engineering aspects of dams without considering climate impacts, lacking sufficient methodological information, or published in non-peer-reviewed sources were excluded.

The literature selection process consisted of three sequential stages: (1) title and abstract screening, (2) full-text assessment, and (3) final eligibility evaluation. After removing irrelevant publications, 31 international studies and 12 Persian-language reports and peer-reviewed publications were included in the final review.

(c) Data Analysis

Because the selected studies employed diverse methodologies—including climate models, hydrological simulations, and energy system analyses—a quantitative meta-analysis was not appropriate. Instead, a qualitative thematic synthesis was conducted to identify common findings, differences, and research gaps. The analysis focused on five major themes:

1. Climate change impacts on hydropower performance;
2. Changes in river discharge and reservoir storage in Iran;
3. Solar and wind energy potential under Iranian climatic conditions;
4. International experiences in integrating hydropower with renewable energy; and
5. Technical, economic, institutional, and policy challenges associated with the energy transition.

(d) Study Limitations

Several limitations should be acknowledged. First, relatively few studies have simultaneously examined hydropower vulnerability and renewable energy transition within the Iranian context, limiting the availability of integrated evidence. Second, publicly available data on recent hydropower generation in Iran remain limited, requiring the use of official national reports where appropriate. Finally, some international studies reviewed were conducted under climatic and socio-economic conditions different from those of Iran; therefore, their findings should be interpreted cautiously when applied to the Iranian context.

Results

(i) Climate Change Has Significantly Reduced Hydropower Performance in Iran

The reviewed studies consistently demonstrate that climate change has substantially affected the performance of Iran's hydropower sector through declining precipitation, reduced river discharge, and lower reservoir storage. Across different climate scenarios, hydropower generation is projected to decrease by approximately 9% to 91%, resulting in a considerable decline in the contribution of hydropower to the national electricity supply.

The magnitude of these impacts varies among river basins and climate scenarios. Studies conducted on the Dez, Karun, and Marun basins consistently report reductions in reservoir inflow, hydropower generation, and system reliability under future climate conditions. In addition to climatic factors, human-induced pressures on water resources further intensify these reductions. Collectively, the reviewed evidence indicates that both climate change and increasing water demand have considerably reduced the operational reliability of hydropower plants in Iran. [4-10]

(ii) Solar and Wind Energy Offer Significant Opportunities for Energy Diversification

The reviewed literature highlights Iran's substantial renewable energy potential, particularly for solar and wind power development. Owing to extensive solar radiation and favorable climatic conditions, large-scale deployment of photovoltaic systems could significantly compensate for the decline in hydropower generation. Likewise, several regions, especially in northwestern Iran, possess considerable wind energy resources suitable for utility-scale electricity production.

National development plans also emphasize expanding renewable electricity capacity over the coming years. Moreover, international experiences demonstrate that integrating hydropower with solar and wind energy can improve power system flexibility, reduce vulnerability to drought, and enhance long-term energy security. Hybrid renewable systems have therefore emerged as an effective strategy for increasing the resilience of electricity systems under climate change. [11-16].

(iii) Major Challenges Limit the Transition toward Renewable Energy

Despite the significant renewable energy potential, several barriers continue to hinder the large-scale deployment of solar and wind power in Iran. Economic constraints—including investment limitations, high initial costs, and inadequate financial incentives—remain among the most important obstacles. Technical challenges such as the limited development of smart grids, electricity storage systems, and reduced photovoltaic efficiency under dust storms further restrict renewable energy expansion.

Institutional and policy-related barriers, including fossil fuel subsidies, regulatory instability, and insufficient long-term planning, also slow the transition process. Furthermore, limited public awareness and social acceptance create additional challenges for renewable energy projects in some regions.

Overall, the reviewed evidence suggests that although Iran possesses abundant renewable energy resources, realizing this potential requires coordinated technological, economic, institutional, and policy reforms. Without addressing these barriers, renewable energy development may not be sufficient to compensate for the projected decline in hydropower generation under future climate conditions. [1-3].

Conclusion

This review examined the impacts of climate change on Iran's hydropower sector and the potential of solar and wind energy to strengthen the country's energy resilience. The reviewed evidence indicates that declining precipitation, rising temperatures, and reduced river discharge have significantly weakened hydropower generation, with future projections suggesting substantial reductions in electricity production and a declining contribution of hydropower to the national energy mix.

At the same time, Iran possesses considerable solar and wind energy resources that could complement hydropower and improve energy security under changing climatic conditions. International experience shows that integrating hydropower with renewable energy systems offers a practical pathway for reducing climate-related risks and enhancing the flexibility of electricity systems.

However, achieving this transition will require coordinated policy reforms, investment incentives, modernization of electricity infrastructure, and the gradual removal of institutional and economic barriers. Overall, this review suggests that strengthening Iran's energy security depends not on replacing hydropower entirely, but on developing an integrated and diversified renewable energy system in which hydropower, solar, and wind energy operate as complementary resources. Future research should focus on optimizing hybrid renewable energy systems under future climate scenarios.

Declarations

Ethical Approval

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

Competing interests

Conflict of Interest – None

Availability of data and materials

Data will be made available on the request.

Authors Contributions

Maryam Adami performed the calculations. Tarahom Mesri Gudoshmian approved the analytical methods. Tarahom Mesri Gudoshmian supervised the findings of this work, Maryam Adami discussed the results, and Tarahom Mesri Gudoshmian contributed to the final version of the paper.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

تغییر اقلیم و آینده برق آبی در ایران: چالش‌ها، فرصت‌ها و چشم‌انداز توسعه انرژی‌های خورشیدی و بادی

مریم آدمی^۱؛ ترجمه مصری گندشمین^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: m.adami.71534@gmail.com

۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mesrigtm@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	هدف: هدف از تحقیق حاضر، آسیب‌شناسی عملکرد سدهای برق آبی ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم و بررسی ظرفیت و امکان جایگزینی تدریجی آن‌ها با انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹	روش: این پژوهش با استفاده از روش مروری-تحلیلی و با بررسی مطالعات، گزارش‌ها و سناریوهای تغییر اقلیم، اثرات تغییر اقلیم بر تولید برق آبی ایران و ظرفیت توسعه انرژی‌های خورشیدی و بادی را ارزیابی کرده و تجارب جهانی در زمینه تلفیق منابع تجدیدپذیر را مورد تحلیل قرار داده است.
کلیدواژه‌ها: انرژی بادی، انرژی خورشیدی، برق آبی، تغییر اقلیم.	یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهند که تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، تولید برق آبی ایران بین ۹ تا ۹۱ درصد کاهش یافته و سهم آن از کل تولید برق کشور از حدود ۱۵ درصد به کم‌تر از ۸ درصد خواهد رسید. در مقابل، ایران با حدود ۳۰۰ روز آفتابی در سال، ظرفیت تولید بیش از ۵۶/۵ گیگاوات انرژی خورشیدی و ۲۰۴۴۳ گیگاوات‌ساعت انرژی بادی را دارا است. همچنین، تجربه کشورهای مختلف بیانگر آن است که تلفیق نیروگاه‌های برق آبی با منابع خورشیدی و بادی، ریسک ناشی از خشک‌سالی و نوسانات اقلیمی را کاهش می‌دهد؛ هرچند توسعه این رویکرد در ایران با چالش‌های اقتصادی، فنی، قانونی و اجتماعی همراه است.
	نتیجه‌گیری: تنوع‌بخشی به سبد انرژی کشور از طریق توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، اصلاح سیاست‌های حمایتی و یارانه‌ای، رفع موانع سرمایه‌گذاری و بهره‌گیری از سامانه‌های ترکیبی برق آبی-خورشیدی-بادی، می‌تواند راه‌کاری مؤثر برای افزایش امنیت انرژی و کاهش آسیب‌پذیری بخش برق در برابر تغییر اقلیم باشد.

استناد: آدمی مریم، مصری گندشمین ترجمه. تغییر اقلیم و آینده برق آبی در ایران: چالش‌ها، فرصت‌ها و چشم‌انداز توسعه انرژی‌های خورشیدی و بادی.

منابع آب و تغییر اقلیم، ۱۴۰۵؛ ۲(۲): ۱۵-۲۸. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.16589.1038>

۱- مقدمه

نیروگاه‌های برق‌آبی به‌عنوان یکی از پایه‌های اصلی تأمین انرژی پاک در جهان، همواره نقشی کلیدی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کرده‌اند. براساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ (IPCC) [۱]، انرژی برق‌آبی با راندمانی بیش از ۸۵ درصد، یکی از کم‌هزینه‌ترین فناوری‌های تولید برق محسوب می‌شود. با این حال، وابستگی شدید این نیروگاه‌ها به جریان پایدار رودخانه‌ها و تراز آب مخازن، آنها را در برابر پدیده‌ی تغییر اقلیم به‌شدت آسیب‌پذیر ساخته است. در ایران، نیروگاه‌های برق‌آبی پتانسیل تأمین حدود ۱۵ درصد از برق کشور را دارند، اما کاهش شدید تراز آب مخازن در سال‌های اخیر، تولید برق در سطح نامی را با مانع جدی مواجه ساخته است [۲]. برای نمونه، تراز آب سد کارون در سال آبی جاری نسبت به سال قبل ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش یافته و حجم آب این مخزن از ۱۴/۸ میلیارد مترمکعب در سال آبی گذشته به ۹/۸ میلیارد مترمکعب در سال جاری رسیده است. شکل ۱ کاهش حجم آب مخزن سدهای کارون، دز و کرخه را در سال‌های آبی به‌خوبی نشان می‌دهد [۲ و ۳].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد نیروگاه‌های برق‌آبی در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. در منطقه‌ی مدیترانه، تحقیقات نشان می‌دهند که تولید برق‌آبی تا پایان قرن بیست‌ویکم ممکن است به‌طور چشمگیری کاهش یابد. در اروپا، برآوردها حاکی از کاهش حدود ۶ درصدی تولید برق‌آبی تا دهه‌ی ۲۰۷۰ است، هرچند این روند در کشورهای مختلف متفاوت است. در آمریکای شمالی، ذوب زود هنگام برف در کوهستان‌های راکی، جریان تابستانی رودخانه‌ها را تهدید کرده و تولید برق‌آبی را با مخاطره مواجه ساخته است [۱]. در خصوص ایران، پژوهش‌های صورت‌گرفته تصویر

هشداردهنده‌ای ترسیم می‌کنند. ترابی حقیقی و همکاران در مطالعه‌ای جامع بر روی ۸۶ سد و نیروگاه برق‌آبی در ایران، مفهوم آب سراب^۲ را برای برآورد تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی بر ورودی مخازن معرفی کرده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که از مجموع ۱۷۲۹ مترمکعب بر ثانیه آب سراب، سهم فعالیت‌های انسانی ۷۰۵ مترمکعب بر ثانیه و سهم کسری بارش ۱۰۲۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است. این یافته حاکی از آن است که بخش قابل توجهی از سرمایه‌گذاری‌های راه‌بردی ایران در مدیریت منابع آب در ۶۰ سال گذشته با ناکارآمدی مواجه شده است [۴]. عسگری و همکاران با استفاده از پنج مدل گردش عمومی جو^۳ (GCM) از مجموعه CMIP6، تأثیر تغییر اقلیم بر تولید برق‌آبی سد دز را بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان می‌دهند که تحت سناریوی بدبینانه SSP585، ورودی مخزن و تولید برق‌آبی به‌ترتیب ۸/۶ و ۱۳/۸ درصد در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ کاهش خواهند یافت [۵]. گلفام و آشفته با استفاده از مدل‌سازی تلفیقی WEAP-LEAP در حوضه‌ی مارون نشان دادند که در نظر گرفتن پیوند آب-انرژی، ظرفیت واقعی تولید برق‌آبی را به‌ترتیب ۷۸، ۸۹ و ۹۱ درصد تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن پیوند آب-انرژی کاهش می‌دهد. هم‌چنین، شاخص قابلیت اطمینان تولید برق‌آبی در این سناریوها به‌ترتیب ۱۹، ۳۱ و ۱۳ درصد کاهش می‌یابد [۶]. در مطالعه‌ای دیگر بر روی سد کارون ۴، محققان نشان دادند که دما در دوره ۲۰۶۱-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۴) به‌ترتیب ۱/۹۵ و ۲/۳۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 افزایش خواهد یافت. هم‌چنین، جریان ورودی به مخزن به‌طور متوسط ۱۹ و ۴۳ درصد کاهش یافته و تولید برق سالانه نسبت به ظرفیت نامی نیروگاه ۹ و ۱۸ درصد کاهش خواهد یافت [۷]. گلفام و آشفته با تلفیق مدل‌های WEAP و LEAP و استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره OPA مبتنی بر

^۳- General Circulation Model^۱- Intergovernmental Panel on Climate Change^۲- Mirage Water

(۲) کاهش دبی رودخانه‌ها و تراز مخازن تا چه اندازه تولید برق‌آبی را با مخاطره مواجه کرده است؟

(۳) انرژی‌های خورشیدی و بادی چه ظرفیت‌هایی برای جایگزینی یا مکمل‌سازی با برق‌آبی در ایران دارند؟

(۴) چالش‌های پیاده‌سازی این جایگزینی در شرایط بومی ایران چیست؟

نوآوری مقاله‌ی حاضر در پنج محور اساسی خلاصه می‌شود:

اول: ارائه‌ی نخستین تحلیل تلفیقی سازمان‌دهی‌شده در ایران که هم‌زمان «آسیب‌شناسی کمی کاهش تولید برق‌آبی ناشی از تغییر اقلیم» را با «پتانسیل‌سنجی مکمل‌سازی و جایگزینی انرژی خورشیدی و بادی» در یک چارچوب یکپارچه ترکیب می‌کند؛ در حالی که پژوهش‌های پیشین یا فقط به آسیب‌شناسی سدها پرداخته‌اند یا به‌طور مجزا پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر را بررسی کرده‌اند و ارتباط سازمان‌دهی‌شده‌ای بین این دو حوزه را ترسیم نکرده‌اند.

دوم: کمی‌سازی هم‌زمان تأثیر کاهش تراز مخازن بر ناترازی شبکه‌ی برق کشور و ارائه‌ی یک چارچوب عددی-تحلیلی بومی برای برآورد ظرفیت جایگزینی انرژی خورشیدی و بادی به‌ازای هر واحد کاهش تولید برق‌آبی در شرایط اقلیمی متفاوت ایران.

سوم: به‌کارگیری رویکرد نوین تصمیم‌گیری چندشاخصه که برای نخستین بار معیارهای «پایداری آب»، «پایداری انرژی» و «هزینه-زمان اجرا» را در اولویت‌بندی گزینه‌های جایگزین با یکدیگر تلفیق می‌کند و بر اساس آن، سناریوهای بهینه‌ی گذار انرژی را معرفی می‌نماید.

چهارم: ارائه‌ی چارچوب سیاستی-اجرایی مرحله‌ای برای گذار از برق‌آبی به انرژی‌های تجدیدپذیر که موانع فنی، اقتصادی، زیرساختی، قانونی و اجتماعی ایران را به‌صورت هم‌زمان مدنظر قرار داده و قابلیت پیاده‌سازی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت را دارد.

پنجم: به‌روزرسانی و ترکیب هم‌زمان یافته‌های جدیدترین پژوهش‌های بین‌المللی (۲۰۲۴-۲۰۲۶) با

نظریه D-number، ۱۱ سناریوی پیوند آب-انرژی را در حوضه مارون اولویت‌بندی کردند. نتایج نشان دادند که مهم‌ترین شاخص در ارزیابی سناریوها، شاخص پایداری بخش انرژی با وزن ۰/۱۴۲ بود و بهترین سناریو، سناریوی WEN7 با وزن نهایی ۰/۱۸۹ کاهش ۵ درصدی سطح زیرکشت ذرت دانه‌ای و سبزیجات و افزایش ۱۰ درصدی سطح زیرکشت علوفه معرفی شد [۸].

با وجود انبوه پژوهش‌ها درباره‌ی کاهش کارایی سدهای برق‌آبی در اثر تغییر اقلیم در ایران، کم‌تر مطالعه‌ای به‌طور نظام‌مند به بررسی فرصت‌های جایگزینی این نیروگاه‌ها با انرژی‌های خورشیدی و بادی پرداخته است. بیش‌تر تحقیقات موجود، یا فقط به آسیب‌شناسی سدها اکتفا کرده‌اند یا به‌طور مجزا به پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند، بدون آن‌که ارتباط سازمان‌دهی‌شده بین این دو مقوله ترسیم شود. به‌ویژه، جایگزینی که بتواند هم‌زمان چالش کم‌آبی و ناترازی انرژی را در دوره‌ی تغییر اقلیم پوشش دهد، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است.

مقاله‌ی مروری حاضر با چهار هدف اصلی تدوین شده است: نخست، شناسایی و تحلیل تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد و تولید سدهای برق‌آبی ایران با تأکید بر کاهش بارش و دبی رودخانه‌ها؛ دوم، کمی‌سازی میزان کاهش تولید برق‌آبی ناشی از کاهش تراز مخازن در دو دهه‌ی اخیر و بررسی پیامدهای آن بر ناترازی شبکه‌ی برق کشور؛ سوم، ارزیابی ظرفیت‌های انرژی خورشیدی و بادی برای جایگزینی یا مکمل‌سازی با برق‌آبی در شرایط اقلیمی و جغرافیایی ایران، با استناد به تجارب موفق جهانی و قابلیت‌های بومی؛ چهارم، شناسایی موانع اجرایی (از جمله هزینه‌ها، زیرساخت‌ها و چالش‌های فنی) و ارائه‌ی راه کارهای سیاستی و مدیریتی برای تسهیل گذار از برق‌آبی به انرژی‌های تجدیدپذیر در دوره‌ی تغییر اقلیم. سؤالات اصلی پژوهش عبارت‌اند از:

(۱) تغییر اقلیم چگونه بر عملکرد سدهای برق‌آبی ایران تأثیر گذاشته است؟

داده‌های بومی وزارت نیرو و ساتبا (۱۴۰۳-۱۴۰۴) که تصویری به‌روز و منطبق بر شرایط کنونی ایران از بحران برق‌آبی و فرصت‌های جایگزینی ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌صورت مقاله‌ی مروری با رویکرد سازماندهی‌شده و تحلیلی، تدوین شده است. با توجه به ماهیت مروری، این مقاله شامل گردآوری، ارزیابی و ترکیب یافته‌های پژوهش‌های پیشین در حوزه‌ی پیوند آب-انرژی، تغییر اقلیم و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. روش‌شناسی این مقاله در چهار مرحله‌ی اصلی طراحی و اجرا شده است:

۲-۱- جستجوی سازماندهی‌شده منابع

جستجوی منابع علمی با استفاده از کلیدواژه‌های تخصصی در پایگاه‌های داده‌ی معتبر انجام شد. کلیدواژه‌های اصلی شامل ترکیبی از واژگان زیر بودند:

- گروه اول (تغییر اقلیم و برق‌آبی):

Climate Change, Hydropower, Dam, Reservoir Inflow, Drought, Precipitation Reduction

- گروه دوم (انرژی‌های تجدیدپذیر):

Solar Energy, Wind Energy, Renewable Energy, Energy Transition, Alternative Energy

- گروه سوم (مطالعات موردی ایران):

: Iran, Dez Dam, Karun Dam, Maroon Basin, Hydropower Plants in Iran

پایگاه‌های داده‌ی مورد استفاده:

Web of Science (WoS), Scopus

ScienceDirect, GoogleScholar و پایگاه‌های داخلی

مانند Magiran و SID (برای منابع فارسی).

بازه‌ی زمانی جستجو:

مطالعات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ (با تأکید بر مقالات ۱۰ سال اخیر) مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۲- معیارهای ورود و خروج مطالعات

معیارهای ورود^۴:

- مطالعاتی که به‌طور مستقیم به تأثیر تغییر اقلیم بر تولید برق‌آبی پرداخته باشند.
- پژوهش‌هایی که پتانسیل‌سنجی انرژی خورشیدی یا بادی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک بررسی کرده باشند.
- مقالاتی که به تحلیل پیوند آب-انرژی^۵ در ایران یا مناطق مشابه اقلیمی پرداخته باشند.
- مقالات چاپ‌شده در مجلات معتبر با ضریب تأثیر^۶ مناسب.
- گزارش‌های رسمی وزارت نیرو و سازمان‌های بین‌المللی معتبر مانند IPCC, JHA, IRENA.

معیارهای خروج^۷:

- مطالعاتی که فقط به جنبه‌های مهندسی سدها بدون توجه به اقلیم پرداخته باشند.
- مقالات غیرمرتبط با حوزه‌ی انرژی یا آب.
- مطالعات فاقد داده‌های کمی یا قابل‌استناد.
- مقالات منتشرشده در مجلات غیرمعتبر یا بدون داوری همتا.

۲-۳- فرآیند غربالگری و انتخاب مقالات

پس از جستجوی اولیه، در مجموع ۱۲۷ مقاله از پایگاه‌های بین‌المللی و ۳۴ گزارش و مقاله‌ی فارسی شناسایی شدند. فرآیند غربالگری در سه مرحله انجام گرفت:

^۶- Impact Factor

^۷- Exclusion Criteria

^۴- Inclusion Criteria

^۵- Water-Energy Nexus

- دسترسی به آمار به‌روز تولید برق‌آبی سدهای ایران با محدودیت مواجه بود و از گزارش‌های قابل‌دسترس وزارت نیرو و سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده شده است.
- برخی از مقالات خارجی ممکن است شرایط اقلیمی متفاوتی با ایران داشته باشند که در تعمیم‌پذیری نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند.

۳- تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد سدهای برق‌آبی؛ مروری بر شاخص‌ها و شواهد

۳-۱- شاخص‌های کلیدی آسیب‌پذیری برق‌آبی در برابر تغییر اقلیم

تولید برق‌آبی به‌طور مستقیم به دو عامل اصلی وابسته است: دبی رودخانه و تراز مخزن سد. تغییر اقلیم از طریق تغییر در الگوی بارش، افزایش دما و ذوب زود هنگام برف، هر دو عامل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شاخص‌های کلیدی که در مطالعات مختلف برای ارزیابی این آسیب‌پذیری استفاده شده‌اند، عبارت‌اند از:

- شاخص کاهش دبی ورودی به مخزن: میزان تغییرات جریان رودخانه در دوره‌های خشکسالی
- شاخص کاهش تراز آب مخزن: افت سطح آب نسبت به تراز نامی نیروگاه
- شاخص قابلیت‌اطمینان^{۱۰} تولید: درصد زمانی که نیروگاه قادر به تولید در سطح نامی است.
- شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی: ترکیبی از حساسیت سد به تغییرات دما و بارش و ظرفیت سازگاری آن

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که در مناطقی با اقلیم مدیترانه‌ای (مانند ایران)، این شاخص‌ها به‌طور چشمگیری رو به کاهش هستند [۴ و ۶].

۱. مرحله‌ی اول (غربالگری براساس عنوان و چکیده): ۸۹ مقاله به‌دلیل عدم تطابق با اهداف پژوهش حذف شدند.

۲. مرحله‌ی دوم (بررسی متن کامل): از ۷۲ مقاله‌ی باقی مانده، ۴۱ مقاله به‌دلیل عدم تناسب کامل با سؤالات پژوهش یا کیفیت پایین حذف شدند.

۳. مرحله‌ی سوم (ارزیابی نهایی): در نهایت، ۱۶ مقاله‌ی بین‌المللی و ۸ منبع فارسی (شامل گزارش‌ها و مقالات علمی-پژوهشی) برای تحلیل نهایی انتخاب شدند.

۲-۴- روش تحلیل و ترکیب یافته‌ها

با توجه به تنوع مطالعات از نظر روش‌شناسی (برخی با مدل‌های اقلیمی مانند GCM و برخی با مدل‌های هیدرولوژیکی مانند WEAP-LEAP، یافته‌ها به‌صورت تحلیل محتوای کیفی^۸ و با رویکرد ترکیب موضوعی^۹ دسته‌بندی و تفسیر شدند. محورهای اصلی تحلیل عبارت بودند از:

- (الف) شاخص‌های آسیب‌پذیری سدهای برق‌آبی در برابر تغییر اقلیم
- (ب) میزان کاهش دبی رودخانه‌ها و تراز مخازن در ایران
- (پ) پتانسیل و ظرفیت انرژی خورشیدی و بادی در مناطق مختلف ایران
- (ت) تجارب جهانی در جایگزینی برق‌آبی با انرژی‌های تجدیدپذیر
- (ث) موانع و چالش‌های اجرایی گذار انرژی در ایران

۲-۵- محدودیت‌های روش‌شناسی

- به‌دلیل محدود بودن پژوهش‌های داخلی با رویکرد تلفیقی (برق‌آبی و تجدیدپذیرها)، بخشی از تحلیل‌ها بر اساس داده‌های بین‌المللی و تعمیم آنها به شرایط ایران انجام شده است.

^{۱۰}- Reliability Index

^۸- Qualitative Content Analysis

^۹- Thematic Synthesis

۲-۳- تأثیر تغییر اقلیم بر تولید برق آبی در جهان

در سطح جهانی، پژوهش‌ها حاکی از تأثیرات متفاوت اما به‌طور عمده منفی تغییر اقلیم بر تولید برق آبی است. در منطقه‌ی مدیترانه، تحقیقات نشان می‌دهد که تولید برق آبی تا پایان قرن بیست‌ویکم ممکن است به‌طور چشمگیری کاهش یابد. در اروپا، برآوردها حاکی از کاهش حدود ۶ درصدی تولید برق آبی تا دهه‌ی ۲۰۷۰ است، هرچند این روند در کشورهای مختلف متفاوت است. در آمریکای شمالی، ذوب زود هنگام برف در کوهستان‌های راکی، جریان تابستانی رودخانه‌ها را تهدید کرده و تولید برق آبی را با مخاطره مواجه ساخته است [۱]. با این حال، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مناطق خشک و نیمه‌خشک (از جمله خاورمیانه و شمال آفریقا) بیش‌ترین آسیب را از تغییر اقلیم متحمل خواهند شد.

۳-۳- شواهد تأثیر تغییر اقلیم بر سدهای ایران

پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر سدهای ایران پرداخته‌اند که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود:

(الف) مطالعه‌ی ترابی حقیقی و همکاران: این پژوهش که در مجله‌ی International Journal of Water Resources Development منتشر شده، بر روی ۸۶ سد و نیروگاه برق آبی در ایران، مفهوم «آب سراب» را برای برآورد تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی بر ورودی مخازن معرفی کرده است. نتایج نشان می‌دهند که از مجموع ۱۷۲۹ مترمکعب بر ثانیه «آب سراب»، سهم فعالیت‌های انسانی ۷۰۵ مترمکعب بر ثانیه و سهم کسری بارش ۱۰۲۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است. این یافته حاکی از آن است که بخش قابل‌توجهی از سرمایه‌گذاری‌های راه‌بردی ایران در مدیریت منابع آب در ۶۰ سال گذشته با ناکارآمدی مواجه شده است و تغییر اقلیم سهم بیش‌تری در این ناکارآمدی داشته است [۴].

(ب) مطالعه عسگری و همکاران بر روی سد دز:

این پژوهش که در مجله‌ی Climatic Change منتشر شده، با استفاده از پنج مدل گردش عمومی جو (GCM) از مجموعه CMIP6، تأثیر تغییر اقلیم بر تولید برق آبی سد دز را بررسی کرده است. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهند که تحت سناریوی بدبینانه SSP585، ورودی مخزن و تولید برق آبی به‌ترتیب ۶/۸ و ۱۳/۸ درصد در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ کاهش خواهند یافت [۵].

(پ) مطالعه گلفام و آشفته در حوضه مارون:

این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی تلفیقی WEAP- LEAP نشان داد که در نظر گرفتن پیوند آب-انرژی، ظرفیت واقعی تولید برق آبی را به‌ترتیب ۷۸، ۸۹ و ۹۱ درصد تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن پیوند آب-انرژی کاهش می‌دهد. همچنین، شاخص قابلیت‌اطمینان تولید برق آبی در این سناریوها به‌ترتیب ۱۹، ۳۱ و ۱۳ درصد کاهش می‌یابد [۶].

(ت) مطالعه سد کارون ۴:

پژوهش‌ها بر روی سد کارون ۴ نشان می‌دهد که در دوره ۲۰۴۱-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۴) به‌ترتیب ۱/۹۵ و ۲/۳۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 افزایش خواهد یافت. همچنین، جریان ورودی به مخزن به‌طور متوسط ۱۹ و ۴۳ درصد کاهش یافته و تولید برق سالانه نسبت به ظرفیت نامی نیروگاه ۹ و ۱۸ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین در حوضه کارون، کاهش دبی ماهانه در ماه می (اردیبهشت-خرداد) برای دوره نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۵) حدود ۳۵ درصد و برای دوره آینده (۲۰۹۹-۲۰۷۵) حدود ۶۱ درصد پیش‌بینی شده است [۷].

موجود، دبی رودخانه‌ی کارون در ایستگاه‌های هیدرومتری طی دهه‌ی اخیر به‌طور میانگین ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش یافته است که بخش قابل‌توجهی از آن به کاهش بارش و بخشی نیز به برداشت‌های بالادست و اجرای طرح‌های انتقال آب مرتبط است [۴].

۴-۲- کاهش تولید برق‌آبی سدهای مهم ایران

سد کارون (نیروگاه‌های کارون ۱، ۲، ۳ و ۴): مجموعه نیروگاه‌های برق‌آبی کارون با ظرفیت اسمی حدود ۲۰۰۰ مگاوات، یکی از بزرگ‌ترین تأمین‌کنندگان برق‌آبی کشور محسوب می‌شود. با این حال، در سال‌های اخیر و به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۲۵، تراز آب مخازن این سدها به‌شدت کاهش یافته است. براساس گزارش‌های رسمی، حجم آب مخزن سد کارون از ۱۴/۸ میلیارد مترمکعب در سال‌های گذشته به ۹/۸ میلیارد مترمکعب در سال جاری رسیده است که نشان‌دهنده‌ی کاهش حدود ۳۰ تا ۴۰ درصدی است همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، کاهش تراز آب مخازن سدهای کارون، دز و کرخه در سال‌های اخیر با افت محسوس تولید برق‌آبی همراه بوده است [۴، ۵ و ۶].

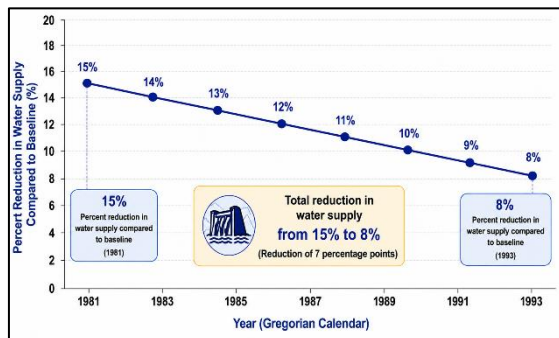


Figure 2. Declining trend of reservoir water level and hydropower generation in major Iranian dams (Karun, Dez, and Karkheh) over recent years

شکل ۲- روند کاهشی تراز آب مخازن و تولید برق‌آبی در سدهای مهم ایران (کارون، دز و کرخه) در سال‌های اخیر

(ث) مطالعه‌ی انتقال آب بین حوضه‌ای در حوضه‌ی کارون بزرگ:

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اجرای کامل پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای در حوضه کارون، تأثیر چشمگیری بر تولید انرژی برق‌آبی دارد. انرژی قطعی^{۱۱} تولیدی توسط سدهای حوضه کارون و دز در شرایط انتقال کامل آب، حدود ۱۸ درصد نسبت به شرایط موجود کاهش می‌یابد [۹]. کاهش حجم آب مخزن سدهای کارون، دز و کرخه در سال‌های آبی در شکل ۱ ارائه شده است.

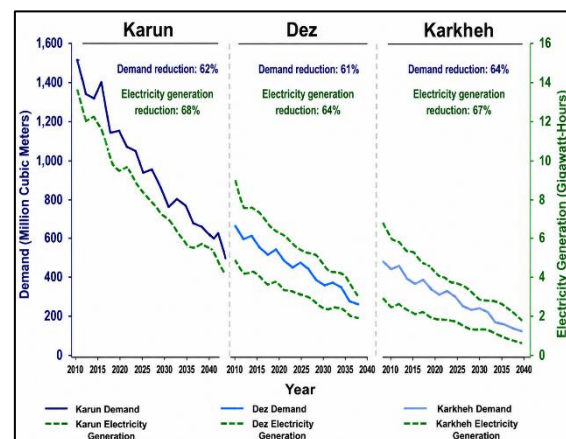


Figure 1. Reduction in water volume of the Karun, Dez, and Karkheh dam reservoirs during the water years

شکل ۱- کاهش حجم آب مخزن سدهای کارون، دز و کرخه در سال‌های آبی

۴- واکاوی وضعیت سدهای ایران در دو دهه‌ی اخیر

۴-۱- روند تغییرات بارش و دبی رودخانه‌ها در ایران

براساس گزارش‌های سازمان هواشناسی کشور، متوسط بارش سالانه ایران در دو دهه‌ی اخیر نسبت به میانگین بلندمدت (۱۹۶۱-۲۰۱۱) حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش بارش، به‌ویژه در حوضه‌های آبریز اصلی کشور (از جمله حوضه‌ی کارون، دز و کرخه) محسوس بوده و منجر به کاهش چشمگیر دبی رودخانه‌ها و تراز مخازن سدها شده است [۲]. براساس داده‌های

^{۱۱} Firm Energy

سد دز:

نیروگاه برق آبی سد دز با ظرفیت اسمی ۵۲۰ مگاوات، یکی از قدیمی ترین و مهم ترین نیروگاه های برق آبی ایران است. تحقیقات نشان می دهند که تحت سناریوی بدبینانه تغییر اقلیم، ورودی مخزن این سد تا ۸/۶ درصد و تولید برق آبی آن تا ۱۳/۸ درصد در دوره ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ کاهش خواهد یافت [۵]. در شرایط فعلی نیز کاهش محسوس تراز آب این سد، تولید برق آن را به طور قابل توجهی کاهش داده است.

سد کرخه:

سد کرخه با ظرفیت اسمی ۴۰۰ مگاوات، در سال های اخیر با کاهش شدید تراز آب مواجه بوده است. براساس گزارش های وزارت نیرو، تراز آب این سد در تابستان ۱۴۰۳ به کم ترین مقدار خود در ۲۰ سال گذشته رسید و تولید برق آن به کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت اسمی کاهش یافت [۲].

۳-۴- تأثیر کاهش تولید برق آبی بر شبکه ی برق کشور

کاهش تولید برق آبی در ایران، به ویژه در فصول گرم سال که مصرف برق به اوج خود می رسد، تأثیر مستقیمی بر ناترازی شبکه ی برق کشور داشته است. براساس گزارش شرکت مدیریت شبکه ی برق ایران، سهم برق آبی از کل تولید برق کشور در سال ۱۴۰۰ حدود ۱۵ درصد بود که این میزان در سال ۱۴۰۳ به کمتر از ۸ درصد کاهش یافته است. این کاهش، فشار مضاعفی بر نیروگاه های حرارتی (گازی و بخاری) وارد کرده و منجر به افزایش مصرف سوخت های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه ای شده است [۱۰].

۴-۴- مقایسه ی وضعیت ایران با کشورهای منطقه

در منطقه ی خاورمیانه، ایران یکی از بزرگ ترین تولیدکنندگان برق آبی محسوب می شود. با این حال، کشورهایی مانند ترکیه با سرمایه گذاری گسترده بر روی

انرژی های خورشیدی و بادی، توانسته اند وابستگی خود به برق آبی را کاهش دهند. به عنوان مثال، سهم برق آبی در ترکیه از ۳۰ درصد در سال ۲۰۱۰ به کمتر از ۲۰ درصد در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است، در حالی که سهم انرژی خورشیدی و بادی در همین دوره از ۵ درصد به بیش از ۲۵ درصد افزایش یافته است همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، سهم انرژی خورشیدی و بادی در ترکیه از ۵ درصد در سال ۲۰۱۰ به بیش از ۲۵ درصد در سال ۲۰۲۴ رسیده است، در حالی که این سهم در ایران هم چنان کمتر از ۲ درصد است [۲ و ۱۱]. در مقابل، ایران با وجود پتانسیل بالای خورشیدی و بادی، هم چنان به برق آبی به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر خود متکی است و این اتکا در شرایط خشک سالی، آسیب پذیری شبکه را به شدت افزایش داده است [۲].

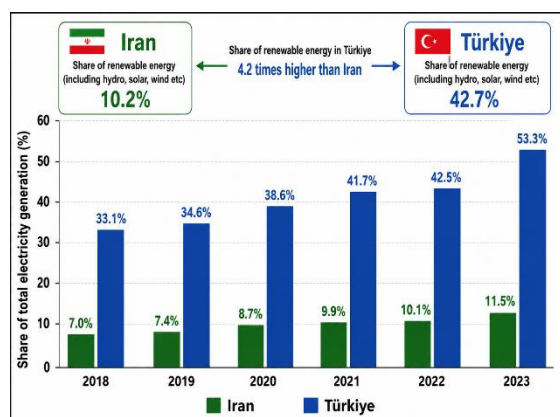


Figure 3. Comparison of renewable energy share (including hydropower, solar, and wind) in Iran and selected regional countries (e.g., Turkey)

شکل ۳- مقایسه سهم انرژی های تجدیدپذیر (شامل برق آبی، خورشیدی و بادی) در ایران و کشورهای منتخب منطقه (مانند ترکیه)

۵- فرصت های جایگزینی انرژی خورشیدی و بادی با

برق آبی

۵-۱- پتانسیل انرژی خورشیدی در ایران

ایران با برخورداری از متوسط ۳۰۰ روز آفتابی در سال و تابش بالا در مناطق مرکزی و جنوبی، یکی از

می‌تواند نیاز برق این منطقه را در سال ۲۰۵۰ (حدود ۳۷ تراوات‌ساعت) پوشش دهد شکل ۵ پتانسیل قابل‌توجه انرژی بادی را در استان‌های شمال غربی ایران (آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل) نشان می‌دهد که می‌تواند نقش مؤثری در تأمین انرژی پایدار کشور ایفا کند [۱۴]. براساس برآوردها، برای شش استان با پتانسیل بالای بادی، یک توربین بادی مدل Vestas V47 به‌طور متوسط سالانه ۴,۴۲۹,۴۱۷ کیلووات‌ساعت انرژی تولید می‌کند [۱۳] و [۱۴].

اگرچه در حال حاضر سهم انرژی بادی در بخش کشاورزی ایران تنها ۱/۴۸ درصد است، اما با نصب توربین‌های بیش‌تر، این منبع می‌تواند سهم قابل‌توجهی از نیاز انرژی کشور را تأمین کند [۱۳].

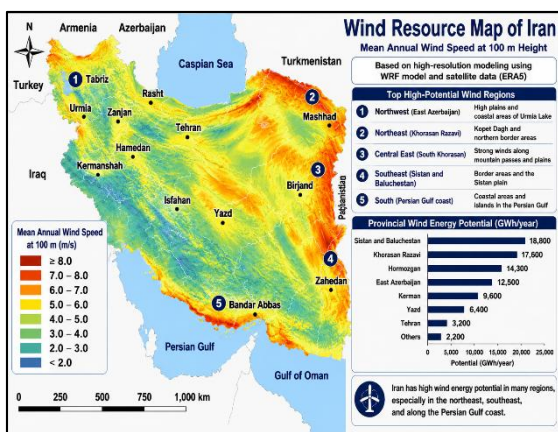


Figure 5. Wind energy potential in northwestern Iran (East Azerbaijan, West Azerbaijan, and Ardabil provinces), with estimated annual generation capacity of 20,443 GWh/year

شکل ۵- پتانسیل انرژی بادی در شمال غرب ایران (استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل) با ظرفیت تولید سالانه برآوردی ۲۰,۴۴۳ گیگاوات‌ساعت در سال

۵-۳- ظرفیت نصب‌شده و اهداف آتی

براساس گزارش وزارت نیرو، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر (به‌جز برق‌آبی) در سبد انرژی ایران در سال ۱۴۰۳ حدود ۱ درصد بوده است [۲]. با این حال، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی (ساتبا) با همکاری سازمان ملل متحد و آژانس بین‌المللی انرژی‌های

مستعدترین کشورهای جهان برای توسعه انرژی خورشیدی محسوب می‌شود [۱۲]. مطالعات نشان می‌دهند که اگر تنها ۵/۱ درصد از اراضی کشاورزی هر استان به نصب پنل‌های فتوولتائیک اختصاص یابد، بیش از ۶۵/۵ گیگاوات انرژی تولید خواهد شد که این مقدار از کل سوخت مصرفی بخش کشاورزی (۲۵/۸۹۹ گیگاوات) فراتر خواهد رفت [۱۳].

شکل ۴ پتانسیل بالای انرژی خورشیدی را در استان‌های مختلف ایران به‌خوبی به تصویر کشیده است [۱۲ و ۱۳]. براساس یک مطالعه جامع با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP، FAHP، TOPSIS و فازی)، انرژی خورشیدی به‌عنوان اولویت اول انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران شناسایی شده است و پس از آن به‌ترتیب انرژی بادی و برق‌آبی در اولویت‌های بعدی قرار گرفته‌اند [۱۲]. این یافته نشان می‌دهد که پتانسیل خورشیدی ایران نه‌تنها قابل‌رقابت با برق‌آبی است، بلکه در بسیاری از شاخص‌ها از آن پیشی می‌گیرد.

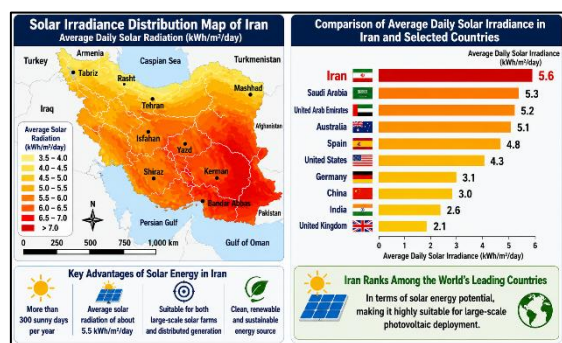


Figure 4. Solar energy potential map of Iran, showing the number of sunny days and annual solar irradiation across different provinces

شکل ۴- نقشه پتانسیل انرژی خورشیدی ایران، نشان‌دهنده تعداد روزهای آفتابی و تابش سالانه در استان‌های مختلف

۵-۲- پتانسیل انرژی بادی در ایران

ایران دارای کریدورهای بادی متعددی در استان‌های شمال غربی، شرقی و مرکزی است. مطالعه‌ای در شمال غرب ایران (استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل) نشان داد که پتانسیل انرژی بادی در این منطقه به‌تنهایی حدود ۲۰,۴۴۳ گیگاوات‌ساعت در سال است که

و بادی، کارآیی سامانه انرژی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۸].

۵-۵- قابلیت‌های بومی ایران برای گذار از برق‌آبی

با وجود چالش‌های متعدد، ایران از قابلیت‌های قابل توجهی برای گذار از برق‌آبی به سمت انرژی خورشیدی و بادی برخوردار است:

- پتانسیل بالای خورشیدی و بادی: همان‌طور که اشاره شد، ایران یکی از بهترین مناطق جهان از نظر تابش خورشیدی و کریدورهای بادی است [۱۲، ۱۳ و ۱۴].
- زیرساخت‌های موجود: شبکه برق کشور و نیروگاه‌های موجود، امکان اتصال نیروگاه‌های خورشیدی و بادی را فراهم می‌کنند.
- تجربه بین‌المللی: همکاری با سازمان ملل و IRENA، امکان بهره‌مندی از تجارب جهانی و جذب سرمایه‌گذاری خارجی را فراهم کرده است [۱۵].
- ظرفیت‌های قانونی: تصویب قوانین حمایتی مانند خرید تضمینی برق تجدیدپذیر و معافیت‌های مالیاتی، می‌تواند محرک مناسبی برای سرمایه‌گذاری باشد.

با این حال، تحقق این گذار نیازمند رفع موانعی است که در بخش بعدی به آنها پرداخته خواهد شد.

۶- چالش‌های پیاده‌سازی و موانع پیش‌روی گذار انرژی در ایران

۶-۱- چالش‌های اقتصادی و مالی

- هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بالا

تجدیدپذیر (IRENA)، هدف‌گذاری کرده است که ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر ایران تا سال ۲۰۳۰ به ۳۰،۰۰۰ مگاوات برسد [۱۵]. این هدف نشان‌دهنده عزم جدی برای گذار از برق‌آبی به سمت منابع خورشیدی و بادی است، هرچند تحقق آن نیازمند رفع موانع متعدد خواهد بود.

۵-۴- تجارب جهانی در جایگزینی برق‌آبی با انرژی‌های خورشیدی و بادی

بحران‌های اخیر در کشورهای وابسته به برق‌آبی، اهمیت تنوع‌بخشی به سبد انرژی را به خوبی نشان داده است. اکوادور که در سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۲۴ با دو فصل خشک‌سالی متوالی مواجه شد و تولید برق‌آبی آن به شدت کاهش یافت، به اجرای خاموشی‌های روزانه تا ۱۲ ساعت مجبور شد [۱۶]. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اگر اکوادور پیش از این بحران، سرمایه‌گذاری گسترده‌ای بر روی انرژی خورشیدی و بادی انجام داده بود، نه تنها می‌توانست کسری تولید برق‌آبی را جبران کند، بلکه با بهره‌گیری از هم‌افزایی سال‌های خشک^{۱۲}، سطح مخازن سدها را در دوره‌های بحرانی حفظ می‌کرد. این مفهوم نشان می‌دهد که در سال‌هایی که بارش کاهش می‌یابد، پتانسیل خورشیدی و بادی به طور معمول در اوج خود قرار دارد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای برق‌آبی باشد.

در سطح جهانی، کشورهای مختلفی از جمله چین، ژاپن و قبرس، پروژه‌های تلفیقی برق‌آبی و خورشیدی-بادی را با موفقیت به اجرا درآورده‌اند. در این پروژه‌ها، از ظرفیت ذخیره‌سازی سدها برای جبران نوسانات تولید خورشیدی و بادی استفاده می‌شود و در عین حال، انرژی خورشیدی و بادی نیز در دوره‌های خشک‌سالی، جایگزین برق‌آبی می‌گردند [۱۷]. هم‌چنین، کتابی با عنوان «Hydropower and Renewable Energies: Synergistic Integration for Future Energy Systems» (۲۰۲۵) به طور جامع به بررسی مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی این تلفیق پرداخته و نشان داده است که ترکیب برق‌آبی با خورشیدی

^{۱۲} - Extreme-Year Synergy

تجدیدپذیر آماده نیست و ظرفیت ذخیره‌سازی نیز بسیار محدود است [۱۱].

- گردوغبار و کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در بسیاری از مناطق مستعد انرژی خورشیدی در ایران (مانند استان‌های مرکزی و جنوبی)، پدیده‌ی گردوغبار باعث کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی راندمان پنل‌های خورشیدی می‌شود. شست‌وشوی مداوم پنل‌ها نیز هزینه‌های نگهداری را افزایش داده و در مناطق خشک، خود به مصرف آب اضافی منجر می‌شود که خود یک چالش زیست‌محیطی جدید است [۱۳ و ۱۹].

- نیاز به زمین‌های وسیع نیروگاه‌های خورشیدی و بادی به زمین‌های وسیعی نیاز دارند. در شرایطی که بسیاری از اراضی مستعد ایران به کشاورزی اختصاص یافته یا از نظر زیست‌محیطی حساس هستند، تأمین زمین برای پروژه‌های بزرگ، یک چالش جدی محسوب می‌شود [۱۲].

۳-۶- چالش‌های قانونی و نهادی

- نبود یکپارچگی در سیاست‌گذاری مسئولیت توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران بین چند نهاد (وزارت نیرو، ساتبا، سازمان حفاظت محیط زیست و سازمان برنامه و بودجه) تقسیم شده است و گاهی تداخل وظایف و نبود هماهنگی، فرآیند اجرای پروژه‌ها را با تأخیر مواجه می‌کند [۲۰].
- نبود برنامه‌ی بلندمدت و پایدار قوانین و مقررات مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران اغلب کوتاه‌مدت و ناپایدار هستند و در هر دولت، تغییر می‌کنند. این عدم ثبات قانونی، ریسک سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد و انگیزه‌ی بخش خصوصی را کاهش می‌دهد [۲۰].

- یارانه‌های سوخت فسیلی یارانه‌های سنگین دولت به سوخت‌های فسیلی (بنزین، گازوئیل و گاز طبیعی)، هزینه‌ی تمام‌شده‌ی تولید برق از این منابع را به‌طور مصنوعی پایین نگه داشته و

اگرچه هزینه‌ی تولید انرژی خورشیدی و بادی در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری کاهش یافته است، اما تأمین مالی احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ همچنان نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه‌ی قابل‌توجهی است. براساس برآوردها، دستیابی به هدف ۳۰،۰۰۰ مگاوات ظرفیت تجدیدپذیر تا سال ۲۰۳۰، نیازمند سرمایه‌گذاری حدود ۵۰ تا ۶۰ میلیارد دلاری است که تأمین آن با توجه به محدودیت‌های مالی دولت و تحریم‌های بین‌المللی، چالش‌برانگیز خواهد بود [۱۵ و ۱۹].

- عدم تناسب قیمت تمام‌شده با نرخ خرید تضمینی هرچند دولت نرخ‌های خرید تضمینی برق تجدیدپذیر را تصویب کرده است، اما این نرخ‌ها اغلب با هزینه‌ی تمام‌شده‌ی واقعی تولید انرژی خورشیدی و بادی در مناطق مختلف ایران هماهنگی ندارد. این موضوع، انگیزه‌ی سرمایه‌گذاری بخش خصوصی را کاهش داده و بسیاری از پروژه‌ها را از نظر اقتصادی غیرقابل‌سازد [۱۹].
- تحریم‌ها و محدودیت‌های تأمین مالی بین‌المللی تحریم‌های اقتصادی، دسترسی ایران به منابع مالی بین‌المللی و همچنین واردات تجهیزات پیشرفته (مانند پنل‌های کارآمد و اینورترها) را با مشکل مواجه کرده است. بسیاری از تأمین‌کنندگان بزرگ تجهیزات تجدیدپذیر، به دلیل تحریم‌ها، از همکاری با ایران خودداری می‌کنند و این موضوع، کیفیت و راندمان پروژه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۰].

۲-۶- چالش‌های فنی و زیرساختی

- نبود شبکه‌ی هوشمند و ذخیره‌سازی انرژی یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه‌ی انرژی خورشیدی و بادی، نوسان‌پذیری تولید آنها است. برای جبران این نوسانات، نیاز به سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی (مانند باتری‌های بزرگ‌مقیاس یا تلمبه‌ذخیره‌ای) و شبکه‌های هوشمند است. در حال حاضر، زیرساخت‌های شبکه‌ی برق ایران برای پذیرش سهم بالای انرژی‌های

جایگزینی آنها با انرژی‌های خورشیدی و بادی تدوین شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییر اقلیم از طریق کاهش بارش، افزایش دما و کاهش دبی رودخانه‌ها، عملکرد سدهای برق‌آبی ایران را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. سدهای کارون، دز و کرخه همگی با کاهش تراز آب و افت تولید برق مواجه هستند، به گونه‌ای که تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، تولید برق‌آبی ایران بین ۹ تا ۹۱ درصد کاهش خواهد یافت و سهم آن از کل تولید برق کشور از ۱۵ درصد به کمتر از ۸ درصد رسیده است. این موضوع، تأثیر مستقیمی بر ناترازی شبکه‌ی برق کشور و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی داشته است. در مقابل، ایران با برخورداری از متوسط ۳۰۰ روز آفتابی در سال و کربدورهای بادی متعدد، یکی از مستعدترین کشورهای جهان برای توسعه‌ی انرژی خورشیدی و بادی محسوب می‌شود و پتانسیل تولید بیش از ۵۶/۵ گیگاوات انرژی خورشیدی و ۲۰،۴۴۳ گیگاوات‌ساعت انرژی بادی در سال را داراست. تجارب جهانی نشان می‌دهد که تلفیق برق‌آبی با خورشیدی و بادی، نه تنها ریسک خشک‌سالی را کاهش می‌دهد، بلکه کارآیی کل سامانه انرژی را افزایش می‌دهد. با این حال، گذر از برق‌آبی به سمت انرژی خورشیدی و بادی در ایران با موانع متعددی مواجه است. چالش‌های اقتصادی (هزینه‌های بالا، تحریم‌ها و نرخ‌های خرید تضمینی نامناسب)، فنی (نبود شبکه‌ی هوشمند و گردوغبار)، قانونی (نبود سیاست پایدار و یارانه‌های سوخت فسیلی) و اجتماعی (عدم آگاهی عمومی)، همگی دست‌به‌دست هم داده‌اند تا سرعت گذار انرژی در ایران به مراتب کمتر از کشورهای مشابه مانند ترکیه باشد.

پیشنهادهای

- ایجاد صندوق سرمایه‌گذاری سبز برای تأمین مالی پروژه‌ها.
- بازنگری نرخ خرید تضمینی برق تجدیدپذیر متناسب با هزینه‌ی واقعی.

انرژی‌های تجدیدپذیر را در رقابت با سوخت‌های فسیلی ناموفق کرده است. به عنوان مثال، هزینه‌ی تولید هر کیلووات‌ساعت برق خورشیدی در ایران حدود ۵ تا ۷ سنت است، در حالی که هزینه‌ی تولید برق از گاز طبیعی با احتساب یارانه‌ها، کمتر از ۲ سنت تمام می‌شود [۲].

۴-۶- چالش‌های اجتماعی و پذیرش عمومی

- عدم آگاهی و نگرش منفی
بسیاری از مردم و حتی برخی از مدیران صنعتی، اطلاعات کافی درباره‌ی مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر ندارند و همچنان به منابع سنتی اتکا دارند. این نگرش، پذیرش پروژه‌های خورشیدی و بادی را با مانع مواجه می‌کند [۱۳].
- مخالفت‌های محلی
برخی پروژه‌های بادی و خورشیدی با مخالفت جوامع محلی به دلیل نگرانی از مناظر بصری، سر و صدا یا تغییر کاربری اراضی مواجه شده‌اند [۱۲ و ۲۱].

۵-۶- مقایسه‌ی چالش‌های ایران با کشورهای موفق

کشورهایی مانند چین، آلمان و حتی ترکیه، با اتخاذ سیاست‌های حمایتی بلندمدت، ایجاد صندوق‌های سرمایه‌گذاری سبز، حذف تدریجی یارانه‌های سوخت فسیلی و ارائه‌ی تسهیلات مالی مناسب، توانسته‌اند بر بسیاری از این موانع غلبه کنند. در مقابل، فقدان چنین اقداماتی در ایران، توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر را با سرعتی بسیار پایین‌تر از کشورهای مشابه پیش برده است [۱۱، ۱۵ و ۲۲]. به عنوان مثال، ترکیه با وجود شرایط اقلیمی و اقتصادی مشابه با ایران، سهم انرژی خورشیدی و بادی را از ۵ درصد در سال ۲۰۱۰ به بیش از ۲۵ درصد در سال ۲۰۲۴ رسانده است، در حالی که این سهم در ایران هم‌چنان کمتر از ۲ درصد است [۱۱ و ۲۳].

۷- نتیجه‌گیری

مقاله‌ی مروری حاضر با هدف آسیب‌شناسی سدهای برق‌آبی ایران در دوره‌ی تغییر اقلیم و بررسی فرصت‌های

نویسندگان کلیه اصول اخلاقی مرتبط با انجام و انتشار پژوهش علمی را رعایت کرده‌اند. تمام مراحل گردآوری، تحلیل و ارائه داده‌ها مطابق با استانداردهای اخلاق پژوهش انجام شده و هیچ‌گونه جعل، تحریف یا استفاده نادرست از منابع صورت نگرفته است.

مشارکت نویسندگان

مریم آدمی محاسبات را انجام داد و ترجم مصری گندشمین در نسخه نهایی مقاله مشارکت داشت.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی یا سازمانی در انجام این پژوهش وجود ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

- ارائه تسهیلات کم‌بهره و معافیت‌های مالیاتی به سرمایه‌گذاران.
- جذب سرمایه‌گذاری خارجی از طریق همکاری با نهادهای بین‌المللی.
- توسعه شبکه‌ی هوشمند برق برای مدیریت نوسانات تولید.
- سرمایه‌گذاری بر سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی.
- استفاده از فناوری‌های کاهش اثر گردوغبار بر پنل‌ها.
- احداث نیروگاه‌های خورشیدی شناور بر روی مخازن سدها.
- تصویب قانون جامع انرژی‌های تجدیدپذیر با افق ۲۰ ساله.
- ایجاد نهاد متولی واحد و هماهنگ‌کننده.
- اصلاح تدریجی یارانه‌های سوخت فسیلی.
- الزام دستگاه‌های دولتی و صنایع به تأمین بخشی از برق از انرژی‌های تجدیدپذیر.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

References

- [1] IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press; 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- [2] Ministry of Energy of Iran. *Report on the status of water resources and hydropower generation in the country*. Tehran: Ministry of Energy of Iran; 2025. [In Persian].
- [3] Trend News Agency. Iran's hydropower output dips amid ongoing drought [Internet]. Baku: Trend News Agency; 2025 Apr 16. <https://www.trend.az/capital/energy/2025/04/16/iran-hydropower-drought.html>.
- [4] Torabi Haghighi A, Mazaheri M, Amiri S, Ghadimi S, Noori R, Oussalah M, et al. Water or mirage? Nightmare over dams and hydropower across Iran. *International Journal of Water Resources Development*. 2024; 40(2): 234-251. <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2238844>.
- [5] Asgari E, Norouzi Nazar MS, Baaghideh M, Entezari A, Shourian M. Possible changes in future reservoir inflow and hydropower production potential under CMIP6 GCMs projections for the Dez Dam, Western Iran. *Climatic Change*. 2024;177 (12): 181. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03837-9>.
- [6] Golfam P, Ashofteh PS. Evaluation of the effect of the water-energy nexus on the performance of the water-energy supply system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025; 32(7): 4040-4060. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35928-0>.
- [7] AminiNaghani F, Mirabbasi Najafabadi R, Zamani R, Nasr Esfahani MA. Investigation of climate change effect on hydropower energy generation by Karun 4 Dam. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 2021; 11(4): 236-251. <https://doi.org/10.22059/JIWE.2021.312998.1007335>. [In Persian].

- [8] Golfam P, Ashofteh PS. Prioritization of water-energy nexus scenarios using the development of D-number theory in multi-criteria analysis method. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025; 32(11): 6550-6573. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35924-4>.
- [9] Abdi-Dehkordi M, Bozorg-Haddad O. System dynamics modeling for assessment of inter-basin water transfer impacts on hydropower generation in the Big Karun Basin, Iran. *Sustainable Water Resources Management*. 2025; 11: 92. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01234-5>.
- [10] Iran Power Grid Management Company. Annual performance report of Iran's electricity industry [Internet]. Tehran: Iran Power Grid Management Company; 2024. [In Persian].
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Energy Statistics 2024*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2024. Available from: <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024>.
- [12] Soltani A, Imani MA, Imani MS. Comprehensive strategic assessment of Iran's renewable energy potentials through a hybrid multi-criteria decision-making approach. *Renewable Energy*. 2025; 256: 123896. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123896>.
- [13] Shadidi B, Nayerifard T, Lak M. Prospects of renewable energy in the agricultural sector of Iran: a roadmap for a sustainable future. *International Journal of Ambient Energy*. 2025. <https://doi.org/10.1080/01430750.2025.2461234>.
- [14] Safarianzengir V, Fatahi A, Amiri Doumari S. Feasibility and zoning of establishing solar power stations to produce sustainable energy from the Environment in Northwestern Iran. 2022. *Frontiers in Energy Research*. 10: 819577. doi:10.3389/fenrg.2022.819577.
- [15] United Nations in Iran (UN Iran). *Report of the Meeting on Enhancing the Role of Renewable Energy in National Energy Supply in the Islamic Republic of Iran*. Tehran: United Nations in Iran; 2024.
- [16] Sterl S, Pineda LE, Mast T, Rodríguez Y, Muñoz P, Thierry W. Variable renewables fortify Ecuador's power system against recurrences of drought-driven energy crises. *Nature Water*. 2026; 4: 571-585. <https://doi.org/10.1038/s44221-026-00123-4>.
- [17] Rauf Q, Yanpin L, Ashraf A. Integrating renewables: Insights from global pumped hydro storage case studies. In: *2025 9th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*. Singapore; 2025: 1-10. doi:10.1109/ICGEA64602.2025.11009747.
- [18] Zheng S, Taylor RM, Wu W, Nilsen B, Zhao G, editors. *Hydropower and Renewable Energies: Synergistic Integration for Future Energy Systems*. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 487. Singapore: Springer; 2025. doi:10.1007/978-981-97-9184-2.
- [19] Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA). *Annual performance report*. Tehran: Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA); 2024. [In Persian].
- [20] Research Center of the Islamic Consultative Assembly. *Investigating the obstacles to the development of renewable energy in Iran* [Internet]. Tehran: Research Center of the Islamic Consultative Assembly; 2024. (In Persian). Available from: *Official website of the Research Center of the Islamic Consultative Assembly*.
- [21] Iran Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agriculture (ICCIMA). *Investment challenges in renewable energy*. Tehran: Iran Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agriculture; 2024. [In Persian].
- [22] Kalhori M, Ashofteh P-S, Moghadam SH. Development of the multi-objective invasive weed optimization algorithm in the integrated water resources allocation problem. *Water Resources Management*. 2023; 37: 4433-4458. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03564-3>.
- [23] Kalhori M, Tadayon M, Kahrizi E, Ghiasvand M. Analysis and monitoring of water resources and drought using a combination of GRACE, MODIS, and Landsat 8 satellite images (case study: Hamedan City). *Water Resources and Climate Change*. 2025;1(1):62-74. <https://doi.org/10.22091/WRCC.2025.11390.1007>. [In Persian].