https://doi.org/10.22034/jrenew.2025.226265

سال دوازدهم، شماره دوم، پائیز و زمستان 1404، ص ص 151- 161

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 1403/03/01

تاریخ پذیرش: 403/12/02

محاسبه هزینه برق مصرفی در شرایط نفوذ بالای انرژی خورشیدی و استفاده از سیستم‌های ذخیره در شبکه قدرت ایران

شایسته ابراهیمی‌ذاکر[1]، امیرحسین جوان‌فکر[1]، زهراسادات عادل‌برخوردار[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

2- استادیار، سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* تهران، 167651719، z_adel@sbu.ac.ir

چکیده

سهم بالایی از ظرفیت‌سازی‌های انجام شده بر روی انرژی‌های تجدیدپذیر مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر خورشیدی و بادی است. در کشور ایران با توجه به پتانسیل انرژی خورشیدی موجود، برنامه‌ریزی بلندمدت کشور برای توسعه این منبع انرژی علیرغم ذات تغییرپذیر بالای آن وجود دارد. بکارگیری این منابع تجدیدپذیر، چالش‌ها و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیمی را برای شبکه قدرت بدنبال دارد. یکی از آثار بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیرپذیر متغیر نیاز به جبران تغییرپذیری آنها به کمک سایر نیروگاه‌ها و همچنین ذخیره‌سازها است که باعث افزایش هزینه برق تحویلی به مصرف‌کننده می‌شود. این مقاله به بررسی هزینه تحمیل شده برای تامین برق در نتیجه نفوذ انرژی خورشیدی و استفاده از ذخیره‌سازها می‌پردازد. از آنجایی که برای بررسی اثر یک متغیر، نیاز است سایر متغیرها ثابت نگه‌داشته شوند، فرض شده ضریب بهره‌برداری از نیروگاه‌های تولید منعطف ثابت بماند. چهار سیستم ذخیره‌ساز مورد بررسی قرارگرفته‌اند: سیستم تلمبه‌ذخیره‌ای، باتری، تولید هیدروژن و استفاده از پیل سوختی و ترکیب هیدروژن با گاز در توربین گاز. نتایج حاصل نشان می‌دهند که هزینه همتراز شده برق با لحاظ زنجیره تولید و ذخیره‌سازی در سناریوهای مختلف به ترتیب 0/3، 0/09، 0/42 و 0/89 دلار به ازای کیلووات‌ساعت است. این مقادیر بیانگر آن هستند که نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای و سپس باتری‌های در مقیاس شبکه می‌توانند ذخیره‌سازی انرژی را با کمترین هزینه انجام دهند.

کلیدواژگان: منابع تجدیدپذیر متغیر، ذخیره‌سازی، باتری، هیدروژن، ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای

Calculation of the cost of electricity in the conditions of high penetration of solar energy and the use of storage systems in Iran's power network

Shayesteh Ebrahimizaker[1], Amir Hossein Javanfekr[1], Zahra Adel Barkhordar[2*]

1-MSC student, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 167651719 Tehran, Iran, z_adel@sbu.ac.ir

Received: 21 May 2024 Accepted: 20 February 2025

Abstract

Much of the focus in renewable energy capacity building centers on variable renewable energy sources such as solar and wind. In Iran, long-term plans for harnessing solar energy persist despite its inherent variability. The utilization of these renewables incurs both direct and indirect costs for the power network. Variable renewable energies necessitate compensation for their intermittency through flexible power plants and storage systems. This would further elevate the cost of electricity that is sold to consumers. This study explores the financial implications of solar energy integration and the requisite storage systems as a result of solar energy penetration. Since investigating a variables effect requires to keep others constant, it has been assumed that the utilization factor of flexible production power plants remains constant. Four storage systems are scrutinized: pumped hydro storage, batteries, hydrogen production alongside fuel cells, and hydrogen-gas combination in a gas turbine. The results indicate that the levelized cost of electricity in the four scenarios are $0.3, $0.09, $1.42, and $0.89 per kilowatt-hour, respectively. These values suggest that pumped-storage power plants, followed by grid-scale batteries, can provide energy storage at the lowest cost.

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Keywords: Variable renewable energy, Battery, Energy storage, Hydrogen, Pumped-Hydro storage

1- مقدمه

1-1- انگیزه پژوهش

با توجه به با افزایش جمعیت جهانی، افزایش نیاز به جوامع به انرژی، محدود بودن منابع انرژی فسیلی و کیفیت محیط زیست، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و ارتباط این منابع و رشد اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است [1-3]. در کشورهایی همچون ایران که تقاضای انرژی، بویژه برق، به میزان قابل توجهی افزایش یافته؛ متنوع بودن منابع انرژی امری ضروری به شمار می‌رود و بهره‌برداری از انرژی خورشیدی و بادی، به علت شرایط آب و هوایی و جغرافیایی مناسب، به‌عنوان یک پاسخ موثر به نیازهای انرژی مطرح می‌شود. انرژی خورشیدی امکان تامین انرژی الکتریکی برای مصارف متنوع را فراهم می‌کند. این منبع انرژی تجدیدپذیر با چالش‌هایی نیز همراه است که از اصلی‌ترین آن‌ها تغییرپذیری است. انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر[1]، بعلت عدم دسترسی همیشگی به منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین تاثیرپذیری شدید از تغییرات شرایط جوی، مانند کاهش شدت تابش خورشید یا سرعت وزش باد، با دو نوع تغییرپذیری قابل پیش‌بینی و غیرقابل پیش‌بینی روبرو هستند [4،5].

برای مواجهه با این چالش‌ها و تامین برنامه‌ریزی شده عرضه انرژی در شبکه برق، راهکار ذخیره‌سازی انرژی به میان می‌آید. استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی که می‌توانند انرژی تولیدی از پنل‌های خورشیدی را ذخیره و در زمان‌های نیاز در شبکه برق عرضه کنند، به‌عنوان یک راهکار اساسی پیشنهاد می‌شود. این راهکار بهبود اثربخشی و پایداری تولید انرژی را تضمین می‌کند و به تحقق اهداف پایداری انرژی در کشورها کمک خواهد کرد [6].

انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر در شبکه جایگزین نیروگاه‌های انعطاف‌پذیر که شامل نیروگاه‌های حرارتی هستند خواهند بود. در شرایط افزایش تقاضا این جایگزینی به معنای ظرفیت سازی بر روی نیروگاه‌های تجدیدپذیر و کاهش ظرفیت سازی نیروگاه‌های حرارتی برای تامین رشد تقاضا است. از آنجایی که نیروگاه‌های خورشیدی تنها در طول روز تولید برق داشته و در سایر ساعات فعال نیستند، لذا مسئولیت جبران تغییرات تولید انرژی خورشیدی در شبکه و تامین تراز تولید در شرایط ورود انرژی خورشیدی به شبکه بر عهده نیروگاه‌های تولید منعطف و ذخیره‌سازها خواهد بود. این مسئله عموما منجر به کاهش ساعات تولیدی نیروگاه‌های حرارتی و ضریب ظرفیت آن‌ها و به تبع آن افزایش هزینه همتراز شده انرژی نیروگاه‌های حرارتی تولید منعطف خواهد شد. از طرف دیگر انواع روش‌های ذخیره‌سازی، مشخصات و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم متفاوتی دارند که بکارگیری آن‌ها منجر به افزایش هزینه‌های تمام شده برق خواهد شد.

این افزایش هزینه در ادبیات انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان اثر بکارگیری[2] شناخته شده است که طبق آن در اثر نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر هزینه تولید برق، ناشی از افزایش هزینه تولید سایر نیروگاه‌های موجود در شبکه و همچنین استفاده از ذخیره‌سازها افزایش می‌یابد.

1-2- مروری بر پژوهش های پیشین

مقالات متعددی به بررسی ذخیره‌سازی انرژی و نیاز به سرمایه‌گذاری در این تکنولوژی در صورت نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر، اختصاص یافته‌اند.

امروش و همکاران [7] به تحلیل اقتصادی استفاده از تکنولوژی‌های مختلف ذخیره انرژی در شبکه برق پرداختند. این مقاله به مزایا و اهمیت تقویت انعطاف‌پذیری شبکه برق، کاهش نوسانات توان و امکان ذخیره و توزیع انرژی تولیدی از منابع تجدیدپذیر متغیر اشاره دارد. نتایج این مقاله نشان می‌دهد انواع مختلفی از فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی از جمله نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای، باتری‌ها، ذخیره انرژی هوای فشرده[3] و ذخیره‌سازی هیدروژن در شبکه برق مورد استفاده قرار خواهند گرفت. همچنین این مقاله تاکید بر لزوم کاهش هزینه‌های سیستم‌های ذخیره‌ساز دارد. در مراجع [8-10] نیز به این موضوع اشاره شده است.

هیل و همکاران [11] به کاربرد نوین سیستم‌های ذخیره انرژی باتری در نفوذ و بهره‌برداری از تولید انرژی خورشیدی در شبکه برق پرداختند. آن‌ها با تاکید بر نوسانات شدید تولید برق خورشیدی، بمنظور ذخیره و استفاده سریع از انرژی و تنظیم تغییرات ناگهانی، باتری را بعنوان یکی از راه‌حل‌های کاربردی معرفی می‌کنند. این مقاله به نتایج مثبت ترکیب انرژی خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی پرداخته است که منجر به افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری و همچنین بهبود مدیریت شبکه برق می‌شود. این زمینه در مطالعات دیگری مانند مراجع [12-14] نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

ترهان و سیل [15] استفاده از هیدروژن به عنوان یک ذخیره‌ساز پاک و پایدار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با تاکید بر تغییر منابع انرژی مورد استفاده در تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی به انرژی های تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و بادی، با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقاء پایداری محیط زیست پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین به امکان ذخیره‌سازی انرژی تولیدی از منابع تجدیدپذیر بصورت هیدروژن اشاره دارند. این رویکرد علاوه‌بر مزایای زیست محیطی، به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری اقتصادی نیز منجر می‌شود. همچنین[16] نیز به بررسی این موضوع پرداخته است.

سیسترنس و همکاران [17] نقش ذخیره انرژی الکتریکی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود بهره‌وری از منابع تجدیدپذیر را مورد تحلیل قرار داده‌اند. آن‌ها با استفاده از مدل توسعه ظرفیت تولید با محدودیت‌های تعهد واحدها[4]، تأثیر افزایش ظرفیت ذخیره انرژی بر عملکرد سیستم قدرت و سرمایه‌گذاری در تولید برق را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی انرژی علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، منجر به افزایش کارایی در استفاده از انرژی تجدیدپذیر با هزینه مناسب، کاهش سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های هسته‌ای و گازی و بهبود بهره‌وری از ظرفیت نصب‌شده می‌گردد.

ترکیب کردن هیدروژن با سایر سوخت‌ها با توجه به ارزش حرارتی جرمی قابل توجه هیدروژن و قابلیت آن در کاهش میزان انتشارات احتراق، مورد توجه دانشمندان بوده است.[18،19] کریستلو و همکاران [20] در بررسی ترکیب کردن هیدروژن در گازطبیعی به این نتیجه دست‌یافتند که بعلت کاهش محتوای انرژی منتقل شده در خطوط لوله، لازم است تا دبی گاز عبوری و یا فشار خطوط لوله افزایش یابند. علاوه براین، خطرات و ریسک تردشدن خطوط لوله بواسطه هیدروژن را نیز باید در نظر گرفت. همچنین دیویس و

1 . Variable Renewable Energy (VRE)
2 . Utilization effect
3 . Compressed Air Energy Storage (CAES)
4 . Unit commitment (UC)

همکاران [21،22] با انجام یک مدلسازی سیستمی برای ترکیب کردن هیدروژن با گاز طبیعی دریافتند که تاثیر ترکیب هیدروژن در شبکه گاز، با در نظر گرفتن انواع روش‌های تولید، بسیار اندک بوده و از نظر اقتصادی نیز این عمل مقرون بصرفه نخواهد بود. اوزتر و دینسر [19] با بررسی محتوای حجمی انرژی ترکیب گاز طبیعی و هیدروژن و تاثیر آن نتیجه گرفتند که اگرچه با کاهش محتوای انرژی لازم است تا دبی یا فشار گاز افزایش یابد و از نظر حجمی، ترکیب گاز بیشتری مصرف کرد، اما در مجموع این عمل موجب کاهش مصرف گاز طبیعی و صرفه جویی در این زمینه خواهد شد.

1-3- ضرورت انجام پژوهش مبتی بر چالش های پژوهش های پیشین

در مطالعات پیشین، غالبا بحث و بررسی تکنولوژی‌های تولید و ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی بصورت منفصل و جدا از هم، با در نظر گرفتن تولید یا ذخیره‌سازی انرژی بصورت مجزا و بدون در نظر گرفتن شرایط شبکه برق مورد بررسی بوده است. مطالعاتی که تاثیر نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر بر هزینه‌های غیر مستقیم را بررسی کرده‌اند محدود هستند. به همین منظور در این مقاله تلاش شده است تا با توجه به اهمیت این مسائل، علاوه‌بر در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌سازی در کنار پنل‌های خورشیدی، ملزومات و محدودیت‌های ذخیره‌سازی در شبکه برق نیز لحاظ شوند. همچنین از جمله نوآوری‌های این تحقیق توجه به پروفیل بار و بررسی اثر مهم عدم تطابق میان بار شبکه برق و تولید پنل‌های خورشیدی در کنار محدودیت در مدت زمان ذخیره‌سازی (مشخصا در باتری‌ها) است که در ادبیات موضوع مورد مطالعه نبوده است.

علاوه بر آن در اثر نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر ، معمولا الگوی بار تولیدی سایر نیروگاه ها تغییر می کند و معمولا بخشی از هزینه‌های غیرمستقیم نفوذ انرژی‌های تجدید پذیر در قالب کاهش ساعت تولید بر دوش سایر نیروگاه‌ها قرار بگیرد. در حالی که مطالعات دیگر مربوط به سیستم عرضه برق، تغییرات در برنامه ریزی تولید کل شبکه را در اثر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توضیح می‌دهند؛ مطالعه حاضر اثرات نفوذ انرژی تجدیدپذیر را با ثابت نگه داشتن متغیرهای خاص بررسی می‌کند. به طور مشخص، تاثیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بر ضریب ظرفیت سایر نیروگاه ها جدا شده و فرض شده این ضریب ظرفیت و الگوی تولید سایر نیروگاه‌ها ثابت بماند تا به این ترتیب درک واضح‌تری از هزینه‌های غیرمستقیم مرتبط با یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه از طریق استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی، بدون در نظر گرفتن تأثیر آن بر کاهش تولید سایر نیروگاه‌ها، ارائه شود.

1-4- نوآوری و سهم اصلی مقاله

مطالعه حاضر سعی دارد بخشی از هزینه‌های ناشی از اثر بکارگیری را که ناشی از استفاده از ذخیره‌سازها است، تحت مفروضات مشخصی تخمین بزند. به عبارت دیگر مطالعه حاضر به مطالعه اقتصادی و بررسی انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی برای کمک به شبکه برق در شرایط نفوذ بالای انرژی خورشیدی و جایگزین کردن بخشی از ظرفیت موجود نیروگاه‌های حرارتی می‌پردازد. برای آنکه تنها هزینه ذخیره‌ساز محاسبه شود، نیاز است هزینه تولید نیروگاه‌های تولید منعطف ثابت بماند. به این منظور فرض شده است که الگوی تولید این نیروگاه‌ها در شرایط نفوذ انرژی خورشیدی مشابه شرایط عدم نفوذ انرژی خورشیدی باشد و هرگونه نیاز به تغییر در شرایط نفوذ انرژی خورشیدی توسط ذخیره‌ساز پشتیبانی شود.

1-5- معرفی سازمان دهی و بخش بندی مقاله

این مقاله با بخش مقدمه شروع می‌شود که شامل انگیزه پژوهش، مروری بر پژوهش های پیشین، ضرورت انجام پژوهش، نوآوری و سهم اصلی مقاله و در نهایت معرفی سازمان دهی و بخش بندی مقاله می‌شود.در بخش دوم روش‌شناسی انجام تحلیل به همراه مفروضات اصلی بیان می‌شوند. در بخش سوم سناریوها تعریف و سپس در بخش بعد، نتایج بدست آمده از تحلیل ارائه می‌شود. تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی در بخش بعد آورده خواهد شد. بخش بحث و بررسی به مقایسه و ارزیابی نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با مطالعات دیگر می‌پردازد. در نهایت، جمع‌بندی مقاله به جمع‌بندی یافته‌های مطالعه حاضر و ارائه پیشنهاد برای ادامه کار می‌پردازد.

2- روش شناسی

ذخیره‌سازی انرژی در مواقعی که تولید انرژی بیش از مصرف است و استفاده از آن در زمان‌هایی که تقاضا بر تولید انرژی پیشی می‌گیرد و یا ظرفیت تولید در دسترس نباشد، به‌عنوان یک راهکار مؤثر مطرح است که می‌تواند به قابلیت اطمینان شبکه قدرت کمک کند [17،23،24].

باتری‌های مقیاس شبکه از متداول‌ترین روش‌ها برای ذخیره‌سازی هستند. استفاده از سیستم تلمبه ذخیره‌ای، که روشی سنتی‌تر است، از قابلیت ذخیره انرژی میان‌مدت/ بلندمدت برخوردار است و به عنوان راهکاری برای ذخیره‌سازی بیش از یک روز و حتی ماهانه/ فصلی علاوه‌بر ذخیره‌سازی روزانه معرفی می‌شود. سیستم‌های ذخیره انرژی هیدروژنی نیز، با توجه به قابلیت ذخیره‌سازی هیدروژن و همچنین قابلیت بازتولید سریع انرژی بعنوان یک روش ذخیره‌سازی مطرح شده‌اند [27-24]. ویژگی بارز این سیستم‌ها در قابلیت ذخیره‌سازی از ابعاد روزانه تا بلند مدت است.

در این پژوهش برای تعیین هزینه‌های مرتبط با بکارگیری تکنولوژی‌های مختلف ذخیره‌سازی از هزینه همترازشده استفاده شده است. برای محاسبه هزینه همتراز شده انرژی[1]، ابتدا باید انرژی ذخیره شده در هر سناریو محاسبه گردد. در زمان‌های مازاد تولید، ذخیره‌سازی انجام می‌شود تا در مواقع نیاز مورد استفاده قرار گیرد. این فرآیند با توجه به محدودیت زمان بین ذخیره‌سازی و تزریق به شبکه، به شکلی انجام می‌شود که بین شارژ و دشارژ کمترین بازه زمانی ممکن وجود داشته باشد. در ذخیره‌سازی در میان‌مدت، امکان ذخیره‌سازی برای طول یکسال به نحوی فراهم است که خالص ذخیره‌سازی در بازه زمانی یکساله برابر با صفر شود.

یکی از چالش‌های نفوذ انرژی‌های تجدید پذیر متغیر به شبکه برق تاثیری است که بر تولید و هزینه های سایر نیروگاه‌های می‌گذارند. این هزینه‌ها که به عنوان هزینه‌های به کارگیری نیز از آن یاد می‌شود یکی از موارد چالش برانگیز در نفوذ انرژی‌های تجدید پذیر متغیر است. در این مقاله سعی شده است تا به کمک ذخیره‌سازها در صورت نفوذ انرژی خورشیدی، هزینه، الگوی تولید و ضریب ظرفیت سایر نیروگاه‌ها تغییر نکند. این فرض قوی به کار گرفته شده در محاسبات است که تحلیل نتایج به آن وابسته است. لذا برای هر دو شرایط

1 . Levelized Cost of Energy (LCOE)

ذخیره‌سازی کوتاه مدت و میان‌مدت، الگوی انرژی تولیدی توسط نیروگاه‌های انعطاف پذیر ثابت مانده و تنها ظرفیت نیروگاه‌ها امکان تغییر داشته است.

از آنجایی که پیش‌بینی مقدار تقاضای ساعتی و تولید ساعتی بصورت دقیق با چالش‌هایی همراه است، لذا برای ارزیابی تاثیر نفوذ انرژی خورشیدی در شبکه برق و نیاز به استفاده از ذخیره سازی، از داده‌های تقاضای برق سال 1397 استفاده شده است. با توجه به پتانسیل بالای تولید برق از انرژی خورشیدی در ایران، در این مقاله این منبع تولید انرژی متغیر مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین فرض شده است که انرژی تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی برابر هدف‌گذاری 5 درصد از کل برق تولید شده باشد.

محاسبه هزینه‌های سیستم خورشیدی و ذخیره‌ساز با توجه به مفروضات مربوطه در ادامه ارائه می‌شوند. سیستم عرضه برق شامل نیروگاه خورشیدی، ذخیره‌ساز انرژی و نیروگاه‌های تولید منعطف است. در شرایط عدم نفوذ برق خورشیدی و بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز، در هر لحظه t کل بار ($load_t$) برابر با میزان تولید برق نیروگاه‌های بار منعطف ($flexible\ generation_t$) و تولید نیروگاه‌های بار پایه ($base\ load_t$) است. (معادله 1).

$$load_t = flexible\ generation_t + base\ load_t \quad (1)$$

در صورت نفوذ برق خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز، کل بار برابر با میزان تولید برق خورشیدی که برای تامین بار استفاده شده است ($solar\ pv\ use_t$)، برق نیروگاه‌های تولید منعطف، انرژی که از سیستم ذخیره‌سازی تخلیه شده ($storage\ discharge_t$) و تولید نیروگاه‌های بار پایه خواهد بود (معادله 2). با توجه به ثابت نگه داشتن سمت چپ تساوی (کل بار) و با توجه به تولید برق خورشیدی میزان برق کمتری از سایر نیروگاه‌ها مورد نیاز خواهد بود. در مدل مورد بررسی، به دلیل فرض ثابت نگه داشتن هزینه تولید سایر نیروگاه‌ها فرض شده الگوی تولید نیروگاه‌های تولید منعطف تغییری نکند و فقط ظرفیت آن‌ها با ضریب α که کوچکتر از 1 است، کاهش یابد.

$$load_t = solar\ pv\ use_t + \alpha \cdot flexible\ generation_t + storage\ discharge_t + base\ load_t \quad (2)$$

توان مورد استفاده از نیروگاه خورشیدی در یک ساعت مشخص($solar\ energy_t$) برابر است با مجموع توانی که برای تامین بار مصرف شده ($solar\ pv\ use_t$) و توانی که صرف شارژ سیستم ذخیره‌سازی ($storage\ charge_t$) شده است

$$solar\ energy_t = solar\ pv\ use_t + storage\ charge_t \quad (3)$$

ارتباط بین شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز با توجه به بازده سیستم ذخیره‌ساز مشخص می‌شود. به عنوان مثال در سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، از هر 100 کیلووات ساعت برق خورشیدی که وارد الکترولایزر می شود، معادل 72 کیلووات ساعت آن تبدیل به هیدروژن می شود که وارد ذخیره ساز هیدروژن با بازده 95 درصد می شود. 72 درصد ضربدر 0/95 از انرژی ذخیره شده به پیل سوختی وارد می شود که با توجه به بازده 0/52 آن، 35/5 کیلووات ساعت برق در زمان نیاز از ذخیره ساز دشارژ می شود. بازده 35/5٪ سیستم ذخیره ساز موجب می شود میزان برق شارژ شده حدودا سه برابر میزان دشارژ از سیستم ذخیره ساز باشد. به عبارت دیگر انرژی تخلیه‌شده از سیستم ذخیره‌سازی در یک بازه مشخص (d) برابر است با انرژی ورودی به سیستم ذخیره‌سازی (شارژ)، ضربدر بازده‌های فناوری‌های موجود (η_{i1}) در سیستم ذخیره‌ساز.

$$\sum_d \eta_{i_1} \cdot \eta_{i_2} \cdot \ldots \cdot \eta_{i_n} \cdot storage\ charge_d = \sum_d storage\ discharge_d \quad (4)$$

هرچه طول بازه زمانی نگهداشت انرژی برای سیستم ذخیره‌ساز بیشتر باشد، امکان بیشتری برای ذخیره‌سازی برق خورشیدی و استفاده از آن وجود دارد. لذا اگر ذخیره‌ساز بلندمدت باشد می‌تواند برق خورشیدی مازاد را بصورت ماهانه و فصلی ذخیره کرده و در زمان افزایش بار (بعنوان مثال در تابستان) تحویل دهد. در صورتی‌که ذخیره‌ساز کوتاه‌مدت باشد، امکان کمتری برای نگهداشت انرژی در بازه‌های زمانی مانند یک هفته خواهد داشت و لذا در بار پیک تابستان تنها می‌تواند از ذخیره‌سازی انجام شده در بازه‌های زمانی نزدیک استفاده کند که آن ساعات نیز خود در زمره پیک فصلی است.

ضریب α با توجه به تراز شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز مشخص می‌شود. به عنوان مثال وقتی ضریب α برابر با 0/8 باشد، مقدار 20٪ از تولید نیروگاه‌های تولید منعطف در هر ساعت کاهش می یابد. بخصوص در شب که انرژی خورشیدی در دسترس نیست، دشارژ سیستم ذخیره‌ساز باید بتواند این میزان کاهش را جبران کند. توازن بین مقدار شارژ شده و مازاد در طول روز با دشارژ مورد نیاز در شب، مقدار ضریب α را تعیین می کند. اگر α کم باشد، کل دشارژ مورد نیاز بیش از کل شارژ در روز خواهد بود. کمترین مقدار α که به ازای آن در هیچ دوره ای از سال مقدار دشارژ بیش از شارژ نباشد، مقدار درصد کاهش ظرفیت نیروگاه‌های تولید منعطف را مشخص می‌کند.

همانطور که در بخش مقدمه اشاره شد، 4 سناریو مختلف در این مقاله تعریف شده است. برای مقایسه چهار سناریو مختلف هزینه همتراز شده برق محاسبه شده است. برای محاسبه هزینه هم‌تراز شده هر تکنولوژی، به اطلاعاتی همچون نرخ تنزیل (r)، ظرفیت (cap)، انرژی تولید شده سالانه (g)، هزینه سرمایه‌گذاری (capital_cost) و عملیاتی (operation_cost) هر تکنولوژی نیاز است. هزینه همتراز شده به کمک معادله 5 محاسبه می‌گردد.

$$\boldsymbol{LCOE} = \frac{(\boldsymbol{capital_cost \cdot cap}) + \sum_{\boldsymbol{n}} \frac{\boldsymbol{fix_cost \cdot cap}}{(1+r)^n}}{\sum_{\boldsymbol{n}} \frac{\boldsymbol{g}}{(1+r)^n}} \quad (5)$$

پس از محاسبه هزینه هم‌تراز شده هر تکنولوژی، هزینه تولید برق در سناریو 1 تا 4 با توجه به هزینه‌های هم‌تراز شده تکنولوژی‌ها و راندمان آن‌ها به ترتیب با توجه به معادلات 6 تا 9 بدست می‌آید.

$$cost = LCOE_{\text{battery}} + \frac{LCOE_{solar}}{\eta_{battery}} \quad (6)$$

$$cost = LCOE_{PHS} + \left(\frac{LCOE_{solar}}{\eta_{PHS}}\right) \quad (7)$$

$$cost = LCOE_{fuel_cell} + \frac{LCOE_{h2_{storage}} + \frac{LCOE_{electrolysis} + \frac{LCOE_{Solar}}{\eta_{\text{electrolysis}}}}{\eta_{h2_storage}}}{\eta_{fuel_{cell}}} \quad (8)$$

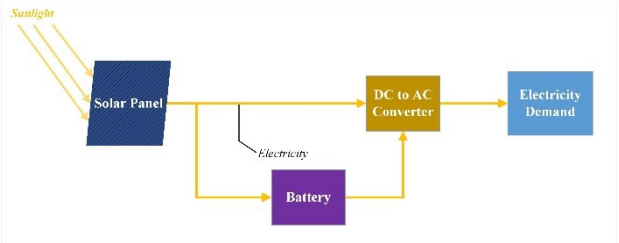
$$cost = LCOE_{gas_turbine} + \frac{LCOE_{h2_{storage}} + \frac{LCOE_{electrolysis} + \frac{LCOE_{Solar}}{\eta_{\text{electrolysis}}}}{\eta_{h2_storage}}}{\eta_{gas_turbine}} \quad (9)$$

ظرفیت تکنولوژی های ذخیره‌ساز و پنل خورشیدی، انرژی تولیدی در طول سال و ضریب ظرفیت، هزینه هم‌تراز شده هر تکنولوژی و پس از آن، هزینه همتراز شده مربوط به سناریو مورد نظر با توجه به راندمان تکنولوژی‌ها و هزینه هم‌تراز شده هر یک از آن‌ها در آن سناریو، محاسبه شد.

3- سناریوها

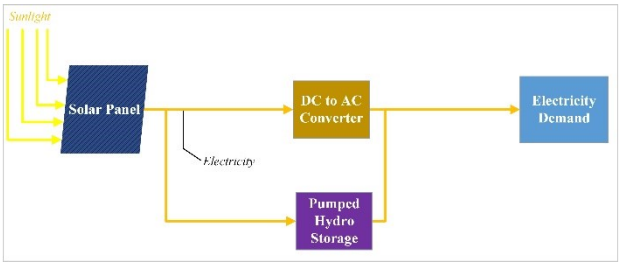
در این مقاله، چهار سناریو متمایز برای ذخیره‌سازی انرژی به منظور مدیریت تغییرپذیری قابل پیشبینی نیروگاه خورشیدی و حفظ الگوی تولید نیروگاه‌های حرارتی معرفی شده‌اند که شامل سناریو ذخیره‌سازی با باتری، ذخیره‌سازی به کمک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، سناریو تولید هیدروژن و استفاده در پیل سوختی، و سناریو ترکیب هیدروژن با گاز طبیعی و استفاده در نیروگاه‌های گازی می‌شوند که در ادامه به هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

با توجه به شکل 1، در سناریو ذخیره‌سازی در باتری، باتری‌ها به عنوان مخازن انرژی عمل می‌کنند. این رویکرد با توجه به سرعت سریع باتری‌ها در ورود و خروج از مدار تولید و همچنین قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در ابعاد مورد نیاز شبکه به عنوان یک راهکار موثر برای مدیریت نوسانات تولید انرژی خورشیدی و تأمین پایداری شبکه برق مطرح است. در این سناریو بازده چرخه شارژ باتری برابر با 0/85 در نظر گرفته شده است.



شکل 1 سناریو استفاده از سیستم باتری

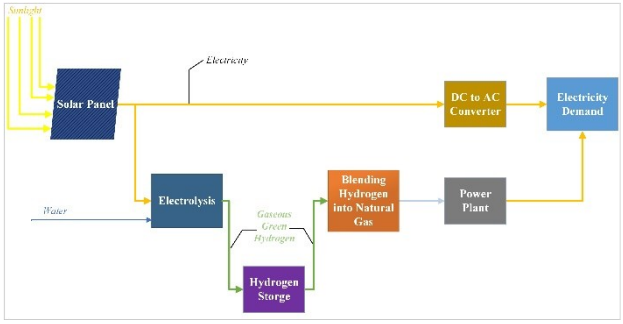
در سناریو دوم همانطور در شکل 2 مشخص شده است، از سیستم تلمبه ذخیره‌ای استفاده می‌گردد. در این سناریو از برق مازاد تولید شده برای پمپ کردن آب از مخزن در ارتفاع پایین به مخزن در ارتفاع بالا استفاده می‌شود. در زمان نیاز، آب موجود در مخزن بالا به مخزن پایین منتقل می‌شود و با گذر از توربین‌ها ان رژی الکتریکی تولید می‌شود. نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به علت قابلیت ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ، امکان ذخیره سازی در بازه‌های بلندمدت را فراهم می‌آورند. این فناوری همچنین با سرعت مناسب در زمان دشارژ و راه‌اندازی مجدد شناخته شده‌اند.



شکل 2 سناریو استفاده از نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای

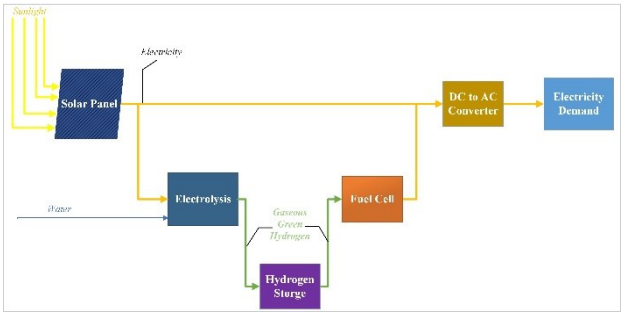
استفاده از هیدروژن به عنوان وسیله‌ای برای ذخیره‌سازی انرژی از کاربردهایی است که با توجه به مشخصات هیدروژن، از جمله قابلیت تولید مستقیم از آب به کمک برق و همچنین قابل ذخیره‌سازی بودن آن، مورد توجه قرار گرفته است. الکترولایز قادر است تا با استفاده از واکنش الکتروشیمیایی مستقیما از آب هیدروژن تولید کند. پیل سوختی نیز دقیقا برعکس آن عملکرده و با واکنش میان اکسیژن و هیدروژن برق و آب را بازتولید می‌کند. برتری پیل سوختی نسبت به سایر روش‌های تبدیل هیدروژن به انرژی، عدم تولید انتشارات، بهره‌وری مناسب‌تر و همچنین زمان سریع وارد مدار شدن است که مجموعه این سیستم را به گزینه‌ای قابل توجه جهت ذخیره‌سازی انرژی بدل کرده است. در سناریو سوم (شکل 3) و چهارم (شکل 4) این مقاله از میان انواع پیل‌های سوختی موجود، با توجه به توسعه بیشتر، الکترولایزرهای آلکالاین[1] مورد بررسی قرار گرفته است. این الکترولایزرها در مقیاس‌های صنعتی بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با توجه به بروز کم‌یابی عرضه گاز طبیعی، استفاده از راهکارهای کاهش مصرف گاز طبیعی بسیار حائز اهمیت گشته‌اند. در سناریو چهام، قابلیت ترکیب هیدروژن در سوخت توربین‌های گاز مورد مطالعه قرارگرفته است و ترکیب هیدروژن تا 20 درصد نیز با انجام حداقل تغییرات در برخی از توربین‌ها بدون نیاز به تغییرات اساسی قابل دستیابی است [28،29].



شکل 3 سناریو استفاده از الکترولیز و پیل سوختی هیدروژن

بدلیل آنکه نمی‌توان از هیدروژن بصورت خالص و بدون ایجاد تغییرات گسترده، در توربین گاز استفاده کرد، مصرف هیدروژن بصورت درصدی از



1 . Alkaline Fuel Cell

سوخت ورودی در نظر گرفته شده است. میزان این ترکیب مطابق با اعداد گزارش شده در ادبیات موضوع در نظر گرفته شده است [28,30].

شکل 4 سناریو ترکیب هیدروژن با سوخت نیروگاه گازی

به منظور استفاده حداکثری از توان مازاد تولید شده برق خورشیدی و همچنین عدم مواجهه با چالش‌های انتقال هیدروژن مانند جلوگیری از نیاز به احداث خط لوله ویژه انتقال هیدروژن و یا نیاز به ترکیب هیدروژن در شبکه گاز محلی یا سراسری، تمامی مراحل تولید و ذخیره سازی در محل مصرف، یعنی در کنار نیروگاه گازی فرض شده است. بدین ترتیب با استفاده از الکترولایزرهای آلکالاینی تجزیه الکتروشیمیایی آب انجام گرفته و سپس هیدروژن تولید شده در یک سیستم ذخیره‌سازی بصورت گاز متراکم ذخیره خواهد شد. نهایتا در طول بازه‌های زمانی موردنیاز، از ترکیب هیدروژن با گاز طبیعی در نیروگاه گازی برای تولید توان استفاده می‌شود.

4- نتایج

در این مقاله، چهار سناریو مختلف برای ذخیره‌سازی انرژی، مدیریت نوسانات تولید انرژی و حفظ الگوی تولید نیروگاه‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سناریو اول، از باتری‌های مقیاس شبکه به عنوان ذخیره‌ساز انرژی برای ذخیره انرژی استفاده شده است. در سناریو دوم، از نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای برای ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. در سناریو سوم، الکترولایزرها برای تولید هیدروژن و از پیل‌های سوختی برای تبدیل آن به برق استفاده شده است. در سناریو چهارم، ترکیب هیدروژن با گاز طبیعی در توربین‌های گازی برای تولید توان استفاده شده است. در هر یک از این سناریوها به ازای ظرفیت خورشیدی اضافه شده به شبکه برق، ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی به اندازه‌ای کاهش یافته است که هزینه تولید این نیروگاه‌ها دستخوش کمترین تغییر شود. درصد کاهش ظرفیت مورد نیاز نیروگاه‌های حرارتی به دلیل جایگزین شدن با ظرفیت نیروگاه خورشیدی به تناسب هر سناریو در جدول 1 ارائه شده است.

ضریب ظرفیت پنل خورشیدی معمولاً به عنوان معیاری از میزان برق تولیدی نسبت به توان نامی سیستم در یک بازه زمانی مشخص تعریف می‌شود. از آنجایی که الگوی تولید سایر نیروگاه‌ها ثابت فرض شده است، تنها ظرفیت نیروگاهی کاهش می‌یابد تا از افزایش هزینه همترازی تولید برق (LCOE) برای سایر نیروگاه‌ها جلوگیری شود. این مساله باعث می‌شود تولید برق از سلول‌های خورشیدی نسبت به سایر نیروگاه‌ها در اولویت نباشد. زمانی که با کاهش ظرفیت نیروگاه‌ها نیاز به انرژی خورشیدی است، از برق تولید شده توسط نیروگاه خورشیدی استفاده می‌شود. با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز این قابلیت ایجاد می‌شود که در بازه‌های زمانی مشخصی، بتوان از برق تولید شده در طول روز که ذخیره شده است، استفاده کرد. لذا ضریب ظرفیت عملی نیروگاه‌های خورشیدی نسبت به زمانی که بر این ضریب اساس شدت تابش محاسبه می‌شود، کمتر خواهد بود. علاوه بر آن، هنگامی که برق تولیدی در سیستم‌های ذخیره‌سازی ذخیره می‌شود، بخشی از آن به دلیل محدودیت‌های فنی، از جمله راندمان متفاوت دستگاه‌های ذخیره‌ساز و هدررفت‌های مرتبط با ذخیره‌سازی و تخلیه انرژی، از دست می‌رود. همچنین، مدت‌زمانی که انرژی می‌تواند در سیستم ذخیره بماند بین سیستم‌های مختلف متفاوت است و می‌تواند منجر به کاهش ضریب ظرفیت شود.

همانگونه که در معادله 3 نیز نشان داده شده است، هزینه همترازشده انرژی علاوه بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، تابعی از ساعات بکارگیری یا همان ضریب ظرفیت تکنولوژی است. جدول 1 مقادیر هزینه های همتراز شده تکنولوژی های بکار گرفته شده در سناریوهای مختلف را نشان می دهد. در تفسیر نتایج بدست آمده، توجه به این نکته ضروری است که نتایج بدست آمده در شرایط عدم تغییر الگوی تولید نیروگاه‌های حرارتی هستند. مقدار انرژی تولیدشده توسط هر تکنولوژی ذخیره‌ساز با توجه به نیاز شبکه در هر ساعت تعیین شده و برای کل یک سال جمع زده شده است و بیشترین مقدار انرژی تولیدی هر تکنولوژی به عنوان ظرفیت آن تعیین شده است.

شایان ذکر است این مقاله به دنبال تخمین هزینه های جانبی نفوذ انرژی خورشیدی در شرایط خاص عدم تغییر الگوی تولیدسایر نیروگاه‌ها و تنها کاهش ظرفیت نیروگاه‌های بار منعطف بوده است تا به این ترتیب هزینه برق تولیدی سایر نیروگاه‌ها تغییری نکند.

مشخص است در صورت نفوذ ذخیره‌سازها در مقیاس بالا در شبکه قدرت، پروفایل توان مورد نیاز نیروگاه های بار منعطف نیز می‌تواند تغییر کند و منحنی تداوم بار به صورت هموارتر با پیک کمتر و بار پایه بیشتر تبدیل شود. در این حالت ظرفیت مورد نیاز نیروگاه های حرارتی کاهش می‌یابد و برای نیروگاه های باقی مانده هزینه همتراز شده برق تولیدی کاهش می‌یابد که این مساله مورد بررسی این مقاله نیست.

جدول 1 هزینه همتراز شده انرژی و ضرایب ظرفیت فناوری‌ها

	تجهیز	هزینه سرمایه‌گذاری ($/kW)	هزینه عملیاتی(ثابت) ($/kW)	انرژی تولیدی (TWh)	عمر مفید (سال)	هزینه همتراز شده انرژی ($/kWh)	ظرفیت (GW)	ضریب ظرفیت (%)
سناریو 1	پنل خورشیدی	800	13	4/68	25	0/10	7	8
	باتری	377	10	9/02	15	0/18	34/26	3
سناریو 2	پنل خورشیدی	800	13	15/26	25	0/03	7	25
	نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای	1400	15/59	9/02	40	0/06	5/65	18
سناریو 3	پنل خورشیدی	800	13	4/48	25	0/11	7	7
	الکترولایزر	1316	8/62	2/48	20	0/25	5/42	5

	مخزن هیدروژن	386		2/35	20	0/31	18/53	1
	پیل سوختی	1320		1/22	20	0/09	0/91	15
	پنل خورشیدی	800	13	15/26	25	0/03	7	25
	الکترولایزر	1316	8/62	9/35	20	0/08	6/78	16
سناریو 4	مخزن هیدروژن	386		8/89	20	0/16	36/42	3
	توربین گاز	0	0	3/03	30	0	0/66	52

جداول 2، 3 و 4 هزینه تولید برق در چهار سناریوی مورد بحث را با در نظر گرفتن کل تکنولوژی های مورد نیاز در هر سناریو نشان می‌دهد. در سناریو ۱، که شامل پنل‌های خورشیدی و باتری‌هاست، هزینه تولید برق به میزان 0/30 دلار برای هر کیلووت ساعت است. در این سناریو، پنل‌های خورشیدی با هزینه 0.10دلار برای هر کیلووات ساعت و باتری‌ها با هزینه 0/18 دلار برای هر کیلووات ساعت به تولید انرژی مشارکت می‌کنند. سناریو ۲ که از نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای استفاده می‌کند، هزینه تولید برقی معادل 0/09 دلار برای هر کیلووات ساعت خواهد داشت. در سناریو ۳ که شامل هیدروژن و پیل‌های سوختی است، هزینه تولید برق به میزان 1/50 دلار برای هر کیلووات ساعت است. در این سناریو برق تولیدی پنل‌های خورشیدی ضریب ظرفیت کمتری دارند که باعث افزایش هزینه آن به 0/11 دلار بر کیلووات ساعت می‌شود. در سناریو ۴، که ترکیب هیدروژن و گاز طبیعی در توربین گاز انجام می‌شود که بیشترین هزینه مربوط به مخزن هیدروژن با هزینه 0/16 دلار برای هر کیلووات سالانه شرکت می‌کنند.

لازم بذکر است با توجه به فعال بودن واحد نیروگاه گازی مدنظر، فارغ از سناریو در نظر گرفته شده، در محاسبه هزینه همتراز شده انرژی، تنها هزینه در نظرگرفته شده هزینه گاز صرفه‌جویی شده است. به همین دلیل هزینه همتراز شده این نیروگاه منفی و معادل قیمت هر کیلووات ساعت گاز صرفه‌جویی شده می‌باشد. این هزینه معادل قیمت گاز تحویل شده به نیروگاه‌ها فرض شده است. با توجه به امکان صادر کردن گاز صرفه‌جویی شده محاسبه قیمت صادراتی گاز طبیعی می‌تواند بر نتایج اثرگذار باشد. بعلاوه علت تفاوت هزینه هم‌ترازشده پنل خورشیدی در سناریوهای مختلف، تفاوت ضریب بهره‌برداری از آن‌ها به دلیل تفاوت بازده سایر تکنولوژی ها بکار گرفته شده در سناریوها می‌باشد.

نتایج پژوهش حاضر مؤید آن است که در راستای مبارزه با چالش‌های برآمده از توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر، استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی هزینه تمام شده برق نیروگاه‌های تجدیدپذیر متغیر مانند خورشیدی را افزایش خواهد داد. این افزایش متناسب با راهکار و سناریو مورد بررسی متغیر است. استفاده از سیستم ذخیره‌ساز تلمبه‌ذخیره‌ای، درصورت وجود پتانسیل‌های آب‌وهوایی و جغرافیایی، اقتصادی‌ترین راهکار جهت ذخیره‌سازی انرژی خواهد بود. در این سناریو، به ازای ظرفیت مشخص نیروگاه خورشیدی، ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی بیشترین کاهش را در اثر جایگزینی دارد. با این وجود با توجه به محدودیت‌های جغرافیایی و آبی مورد نیاز برای توسعه نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، توسعه سایر تکنولوژی‌های ذخیره‌ساز گریزناپذیر است.

استفاده از سیستم باتری بعنوان ذخیره‌سازی انرژی، که در سالیان اخیر توجه ویژه‌ای در سطح جهانی را متوجه خود کرده است، پس از نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای اقتصادی‌ترین راهکار ذخیره‌سازی است.

استفاده از هیدروژن بعنوان ذخیره‌ساز انرژی در کنار پیل سوختی که در سناریو 3 مورد بررسی قرار گرفته است، نشان می‌دهد که علی‌رغم توانایی ایجاد انعطاف‌پذیری، این تکنولوژی در مقایسه با سایر روش‌ها هزینه بیشتری درپی خواهد داشت. هزینه سرمایه‌گذاری بالای مورد نیاز برای استفاده از این فناوری‌ها اصلی‌ترین عاملی است که موجب بالارفتن هزینه همتراز شده برق در این سناریو می‌باشد. این فناوری‌ها برای قابل رقابت بودن با سایر تکنولوژی‌ها نیازمند توسعه بیشتر و کاهش بالای هزینه‌های سرمایه‌گذاری هستند. امری که مطابق پیشبینی‌های جهانی دور از انتظار نمی‌باشد.

جدول 2 هزینه هم تراز شده سناریوهای 1 و 2

سناریو	کاهش سهم نیروگاه‌های حرارتی (٪)	هزینه هم‌تراز شده انرژی ($/kWh) نیروگاه خورشیدی	باتری	نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای	هزینه تولید برق سناریو
سناریو 1	6	0.10	0.18	---	0.30
سناریو 2	17	0.03	---	0.06	0.09

جدول 3 هزینه همتراز شده سناریو 3

سناریو	کاهش سهم نیروگاه‌های حرارتی (٪)	هزینه هم‌تراز شده انرژی ($/kWh) نیروگاه خورشیدی	الکترولایزر	مخزن هیدروژن	پیل سوختی	هزینه تولید برق
سناریو 3	4	0.11	0.25	0.31	0.09	1.50

جدول 4 هزینه همتراز شده سناریو 4

سناریو	کاهش سهم نیروگاه‌های	هزینه هم‌تراز شده انرژی ($/kWh) نیروگاه خورشیدی	الکترولایزر	مخزن هیدروژن	توربین گاز	هزینه تولید برق

سناریو	حرارتی (٪)					
4	8	0.03	0.08	0.16	0.00	0.89

سناریو 4 که مربوط به استفاده از ترکیب 20 درصدی هیدروژن در توربین گاز می‌باشد، با توجه به وجود نیروگاه‌های گازی سرویسی در شبکه تولید برق و همچنین کم‌یابی عرضه گازطبیعی در دسترس مورد بررسی قرارگرفته است. در این سناریو قیمت گاز صرفه‌جویی شده در نتیجه ترکیب کردن هیدروژن در سوخت ورودی به توربین، برابر قیمت گاز تحویل شده به نیروگاه محاسبه شده است. به همین دلیل هزینه همتراز شده نهایی بدست آمده برای این سناریو تاثیرپذیری بسیار اندکی از صرفه‌جویی حاصل شده خواهد داشت. در شرایطی که قیمت واقعی و کم‌یابی گاز بدرستی در قیمت لحاظ شود، بررسی این سناریو در کنار سایر سناریوها می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل استفاده از هیدروژن در کنار سایر روش‌های ذخیره‌ساز انرژی باشد.

5-تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت امکان بررسی اثر تغییرات در پارامترهای کلیدی مانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بازده تجهیزات بر هزینه‌های همتراز شده برق مصرفی را فراهم می‌کند. جدول 5 نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای اساسی بر هزینه همترازشده برق را نشان می‌دهد. همانگونه که نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد بهبودراندمان پیل سوختی در مقیاس زاید می تواند منجر به حدود ٪30 کاهش هزینه همتراز شده برق شود. کاهش هزینه سرمایه‌گذاری سلول‌های خورشیدی از 800 به 500 دلار بر کیلووات در سناریو 2 باعث کاهش بیست درصدی هزینه همتراز شده برق می‌شود.

جدول 5 نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای اساسی بر هزینه همتراز شده برق

پارامتر	مقدار اولیه	مقدار تغییر یافته	سناریو	LCOE اولیه $/kWh	LCOE تغییر یافته $/kWh	درصد تغییرات LCOE
راندمان چرخه شارژ	85%	75%	1	0/30	0/31	3/33
		90%			0/29	-3/33
		96%			0/28	-6/67
راندمان پیل سوختی	52%	60%	3	1/42	1/26	-11/27
		65%			1/17	-17/61
		80%			0/97	-31/69
هزینه سرمایه‌گذاری پنل خورشیدی	800 $/kw	600	1	0/30	0/27	-10
		500			0/26	-13/33
		600	2	0/09	0/08	-11/11
		500			0/07	-22/22
		600	3	1/42	1/36	-4/23
		500			1/33	-6/34
		600	4	0/89	0/86	-3/37
		500			0/84	-5/62
هزینه سرمایه‌گذاری باتری	376 $/kWh	300	2	0/30	0/27	-10
		250			0/25	-16/67
هزینه سرمایه‌گذاری الکترولایزر	1316 $/kWh	650	3	1/42	1/2	-15/49
		1000			1/32	-7/49
		2000			1/64	15/49
		650	4	0.89	0/77	-13/48
		1000			0/83	-6/78
		2000			1/01	13/48
هزینه سرمایه‌گذاری پیل سوختی	1320 $/kWh	1200	3	1.42	1/41	-0/70
		1750			1/44	1/41
		2000			1/46	2/82
هزینه گاز توربین گازی	0/0024 $/m³	0/31	4	0/89	1/88	-1/2

مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در عملکرد کلی سیستم انرژی، ضریب ظرفیت نیروگاه‌ها و ذخیره‌سازها است؛ عاملی که به دلیل شرایط محدود و پیچیده

به‌طور کامل در کنترل ما نیست. ضریب ظرفیت، با توجه به فرض ثابت ماندن الگوی تولید نیروگاه‌های حرارتی و نیز با در نظر گرفتن ظرفیت ذخیره‌سازی (چه در بازه‌های روزانه و چه فصلی) تعیین می‌شود. این محدودیت‌ها باعث می‌گردد که توان عملی ما برای بهینه‌سازی ظرفیت‌های تولید و ذخیره‌سازی محدود شود. در نتیجه، ضریب ظرفیت به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی، نه تنها بر پایداری انرژی تأثیر می‌گذارد، بلکه نقش مهمی در تعیین ظرفیت‌های ذخیره‌سازی و همچنین کارایی کلی سیستم دارد.

6-بحث و بررسی

با توجه به اهمیت نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر محاسبه هزینه همتزراز شده انرژی‌های تجدیدپذیر با درنظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌ساز در مطالعات متعددی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

هزینه همتراز شده برق خورشیدی با سیستم ذخیره‌ساز باتری در سطح بین‌المللی در مقیاس‌های مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بطور معمول، هزینه سلول خورشیدی با ذخیره‌ساز در کشورهایی مانند چین و آمریکا کمتر از 0/10 دلار به ازای کیلووات ساعت گزارش شده است [31]. دلیل این مسئله دادن اولویت به سیستم خورشیدی در تولید توان و تحت تاثیر قرار دادن تولید سایر نیروگاه‌ها در اثر نفوذ انرژی خورشیدی است. که این مسئله باعث می‌شود هزینه همتراز شده سلول خورشیدی و باتری بدلیل افزایش ضریب ظرفیت آن‌ها بشدت کاهش یابد.

درحقیقت در این شرایط وجود ذخیره‌ساز کمک می‌کند مازاد تولید انرژی خورشیدی و همچنین تولید سایر نیروگاه‌ها ذخیره شده و در ساعات پیک شبکه مورد استفاده قرار گیرد و به عبارت دیگر ذخیره‌ساز موجود در شبکه تنها ذخیره‌ساز سیستم خورشیدی نبوده و به کاهش هزینه کل سیستم کمک می‌کند که این مسئله باعث کاهش هزینه تولید برق خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز خواهد شد. در شرایطی که سیستم ذخیره‌ساز و خورشیدی تنها برای تامین بار مورد نیاز مورد استفاده قرار گیرند، میزان هزینه همتراز شده افزایش خواهد یافت. بعنوان نمونه مطالعه [32] به بررسی سیستم خورشیدی در کنار باتری در یک سیستم خانگی منفک از شبکه پرداخته است. در این مطالعه با فرض هزینه سرمایه گذاری سلول خورشیدی و باتری به ترتیب برابر با 660 و 290 دلار به ازای کیلووات ساعت هزینه همتراز شده برق برابر با 0/375 دلار به ازای کیلووات ساعت محاسبه شده است.

این مطالعه از نظر هزینه و در نظر گرفتن محدودیت روزانه باتری در نگهداری انرژی (16 ساعت) با داده‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر مشابهت نسبی دارد. دو تفاوت اصلی بین این مطالعه و مطالعه حاضر وجود دارد؛ مورد اول مربوط به مقیاس تولید توان و پروفایل بار مورد نیاز شبکه است. مطابق داده‌های ارائه شده توسط مقاله مذکور، بار مورد نیاز بخش خانگی تطابق بسیار کمی با تابش خورشید داشته و این مسئله باعث افزایش هزینه برق همتراز شده این مطالعه نسبت به سایر مطالعات شده است. مورد بعد مربوط به تاثیر ثابت فرض کردن بار تولیدی سایر نیروگاه‌ها در مطالعه حاضر است.

در مطالعه [33] نفوذ انواع سلول‌های خورشیدی (شناور بر روی آب، نصب بر روی ساختمان و مزرعه خورشیدی بر روی زمین) در کنار سیستم ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای در شبکه برق مورد بررسی قرار گرفته است. هزینه همتراز شده برق بدست آمده از ترکیب سلول خورشیدی و سیستم ذخیره تلمبه ذخیره‌ای برابر با 0/165 دلار به ازای کیلووات ساعت محاسبه شده است. مقدار متناظر محاسبه شده در مطالعه حاضر برابر با 0/09 دلار به ازای کیلووات ساعت است. مهمترین دلایل بیشتر بودن هزینه همتراز شده در این مطالعه نسبت به مطالعه حاضر به دو عامل ضریب ظرفیت و هزینه عملیاتی بر می‌گردد. ضریب ظرفیت سیستم تلمبه ذخیره‌ای در این مطالعه ٪10/3 در مقایسه با ٪18 در مطالعه حاضر بوده است. میزان هزینه عملیاتی در نظر گرفته شده در این مطالعه برابر 0/0563 دلار به ازای کیلووات ساعت بوده است که عدد نسبتا بالایی است. در صورتی که ضریب ظرفیت مطالعه حاضر به ٪10 کاهش پیدا کند و هزینه عملیاتی برابر با مقدار بیان شده در این مطالعه باشد، میزان هزینه همتراز شده برق در سناریو دوم (سلول خورشیدی و سیستم تلمبه ذخیره‌ای) در شرایط عدم لحاظ یکسان بودن پروفایل تولیدی سایر نیروگاه‌ها برابر با 0/18 دلار به ازای کیلووات ساعت خواهد شد که در حدود عدد بیان شده در این مطالعه است. مطالعه [34] با فرض تامین برق شبکه به محاسبه هزینه همتراز شده برق خروجی از سیستم الکترولایزر، مخزن هیدروژن و پیل سوختی پرداخته است. در این مقاله مبادله برق با شبکه بدون هیچ محدودیتی و بدون در نظر گرفتن تاثیر نفوذ سیستم ذخیره‌ساز بر تولید سایر نیروگاه‌ها در شبکه فرض شده است. علاوه‌برآن سیستم تولید برق به کمک انرژی خورشیدی نیز در نظر گرفته نشده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد با فرض قیمت برق 0/02 دلار به ازای کیلووات ساعت، هزینه برق خروجی از سیستم ذخیره‌ساز برابر با 0/40 دلار به ازای کیلووات ساعت می‌شود. از آنجایی که محدودیت شدت تابش انرژی خورشیدی در این مطالعه درنظر گرفته نشده است، هزینه همتراز شده برق تولیدی توسط سیستم ذخیره‌ساز از هزینه آن در شرایط اعمال محدودیت شدت تابش در ساعات مختلف کمتر خواهد بود. مطالعه [35] با در نظر گرفتن یک سیستم انرژی خورشیدی، الکترولایزر، مخزن هیدروژن و پیل سوختی در شرایط منفک از شبکه به بررسی هزینه همتراز شده انرژی در شرایط مختلف بازده الکترولایزر و پیل سوختی پرداخته است. هزینه همتراز شده انرژی در شرایط بازده الکترولایزر و پیل سوختی مشابه با مقاله حاضر حدود 0/43 دلار به ازای کیلووات ساعت محاسبه شده است. از آنجایی که شرایط مقاله منفک از شبکه بوده است لذا محدودیتی بر روی سلول خورشیدی برای استفاده از انرژی خورشیدی اعمال نشده و این مسئله امکان بهره‌برداری از کل انرژی خورشیدی در طول روز را فراهم کرده است. مقایسه نتیجه بدست‌آمده حاضر (1/5 دلار به ازای کیلووات ساعت) با مطالعات بیان شده نشان می‌دهد هزینه همتراز شده انرژی نسبت هب مطالعات جهانی بالاتر است. این مسئله در اثر اعمال محدودیت حفظ الگوی بار تولیدی سایر نیروگاه‌ها که باعث کم شدن ضریب ظرفیت نیروگاه خورشیدی تا حد ٪7 شده است می‌باشد. چنانچه در مطالعه حاضر محدودیت حفظ پروفایل تولید سایر نیروگاه‌ها برداشته شود و ضریب ظرفیت سلول خورشیدی، الاکترولایزر، مخزن هیدروژن و پیل سوختی به ترتیب به ٪22، ٪18، ٪8 و ٪20 افزایش یابد، هزینه همتراز شده برق این سیستم برابر با 0/42 دلار به ازای کیلووات ساعت خواهد شد که مشابه با دو مطالعه پیشین است.

در جمع‌بندی می‌توان دریافت که با توجه به مفروضات متفاوت بین مقالات نتایج بدست آمده در مطالعات مختلف با یکدیگر و همچنین با مطالعه حاضر تفاوت خواهد داشت. ریشه این تفاوت‌ها در دو عامل خلاصه می‌شود؛ عامل اول مفروضات عددی متفاوت و عامل دوم مفروضات مرتبط با روش‌شناسی تحلیل

است. در اثر نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر ، معمولا الگوی بار تولیدی سایر نیروگاه ها تغییر می کند و معمولا بخشی از هزینه‌های غیرمستقیم نفوذ انرژی‌های تجدید پذیر در قالب کاهش ساعت تولید بر دوش سایر نیروگاه‌ها قرار بگیرد. در حالی که مطالعات دیگر مربوط به سیستم عرضه برق، تغییرات در برنامه ریزی تولید کل شبکه را در اثر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توضیح می‌دهند؛ مطالعه حاضر اثرات نفوذ انرژی تجدیدپذیر را با ثابت نگه داشتن متغیرهای خاص بررسی می کند. به طور مشخص، تاثیر استفاده از انرژی های تجدیدپذیر بر ضریب ظرفیت سایر نیروگاه ها جدا شده و فرض شده این ضریب ظرفیت و الگوی تولید سایر نیروگاه ها ثابت بماند تا به این ترتیب درک واضح‌تری از هزینه‌های غیرمستقیم مرتبط با یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه از طریق استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی، بدون در نظر گرفتن تأثیر آن بر کاهش تولید سایر نیروگاه‌ها، ارائه شود.

7-جمع‌بندی

در این مقاله تلاش شده تا با معرفی چرایی نیاز به سیستم‌های ذخیره‌ساز در صورت نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر و بررسی روش‌های موجود، سناریوهایی مطابق با شرایط شبکه سراسری برق و همچنین پتانسیل توسعه انرژی خورشیدی در ایران و هزینه واقعی برق تولید شده از این منابع با توجه به تلفات فرایند تولید و ذخیره‌سازی مورد بررسی قرارگیرند. سیستم‌های تعریف شده عبارتند از باتری‌های مقیاس شبکه، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، الکترولایزر برای تولید هیدروژن و پیل‌های سوختی برای تبدیل آن به برق و ترکیب هیدروژن با گاز طبیعی در توربین‌های گازی برای تولید توان.

با استفاده از هزینه همتراز شده، هزینه اضافه شده برای تامین برق در هر سناریو در شرایط عدم تغییر الگوی تولید نیروگاه‌های حرارتی و با در نظر گرفتن بازده کل سیستم (به عبارت دیگر با در نظر گرفتن تلفات تولید و ذخیره‌سازی برق)، مورد مطالعه قرار گرفته است. هزینه‌های همتراز شده برق در سناریوهای مختلف بخوبی نشان می‌دهد که هزینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر برای شبکه برق فراتر از هزینه احداث نیروگاه‌هی آن‌ها می‌باشد و در شرایط مورد بررسی استفاده از نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای و پس از آن استفاده از باتری‌های در مقیاس شبکه از دیدگاه اقتصادی می‌توانند با کمترین هزینه تولید و ذخیره‌سازی انرژی را انجام دهند.

نفوذ انرژی‌های تجدید پذیر با وجود ابعاد مثبت زیست محیطی آن‌ها می‌بایست با توجه به شرایط و محدودیت‌های شبکه برق و بار مورد توجه و بررسی کامل قرار گیرد. به خصوص در شرایط کشور ما که همبستگی بین شدت تابش خورشید و بار مصرفی نسبت به برخی کشورهای دیگر مانند کشورهای اروپایی پایین‌تر است. هزینه‌های غیرمستقیم استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بسیار مهم است و باید مورد بررسی کامل قرار گیرد. در این پژوهش هزینه تحمیل شده بر سیستم برق از جنبه نیاز به ذخیره ساز مورد ارزیابی قرار گرفت. در گام بعد سایر اجزای هزینه‌های غیر مستقیم توسعه انرژی‌های تجدید پذیر مانند هزینه‌های اتصال و خطوط شبکه، هزینه‌های قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری نیز باید مورد بررسی و محاسبه قرار گیرد. گرچه پتانسیل انرژی بادی نسبت به انرژی خورشیدی در کشور ما پایین‌تر است لیکن با توجه به نقش مثبت انرژی بادی در تامین بار پیک در شب، تحلیل‌های مشابهی برای بررسی هزینه‌های غیر مستقیم نفوذ انرژی باد در شبکه برق نیزجزو اقدامات آتی مورد نیاز است. علاوه بر مطالب فوق با توجه به کمیابی آب، قیمت سایه‌ای آب در شرایط کمیابی آب می‌بایست به هزینه هیدروژن اضافه گردد.

8-مراجع

[1] A. Shahsavari, Y. Hossein, and S. Esrafiel, Share of solar power in the global energy basket by 2030, *Journal of Renewable and New Energy,* pp. 116-121,
2018. (in Persian)

[2] H. Zibandeh, Examining the flexibility of the power system due to the increase of renewable energies and uncertainty, in *3rd International Conference on Electrical Engineering*, Tehran, 2019. (in Persian)

[3] M. Mohammadi Khiyareh and A. Karshenasan, The Nonlinear Relationship Between Economic Growth, Energy Prices, and Renewable Energy: A Threshold Regression Approach, *Journal of Renewable and New energy*, 1396. (in Persian)

[4] H. Zibandeh, Examining the flexibility of the power system due to the increase of renewable energies and uncertainty, in *3rd International Conference on Electrical Engineering*, Tehran, 2019. (in Persian)

[5] R. Pourdarbani, An Analysis of the Current Status and Future Demands of Renewable Energy in Iran and Its Marketing, *Journal of Renewable and new energy*, 1399. (in Persian)

[6] N. Khalilpur Tilmi, J. Rezaian, and I. Mahdavi, Multi-objective optimization for meeting electricity demand using scheduling of renewable resources and conventional resources, *Iranian Electric Industry Journal Of Quality And Productivity*, 2018. (in Persian)

[7] S. Ould Amrouche, D. Rekioua, T. Rekioua, and S. Bacha, Overview of energy storage in renewable energy systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.

[8] N. Güntera and A. Marinopoulos, Energy storage for grid services and applications: Classification, market review, metrics, and methodology for evaluation of deployment cases, *Journal of Energy Storage*, 2016.

[9] E. M. G. Rodrigues, R. Godina, A. W. Bizuayehu, S. F. Santos, J. Contreras, and J. P. S. Catalao, Energy storage systems supporting increased penetration of renewables in islanded systems, *Energy*, 2014.

[10] M. Bagheri, E. Zare Aliabadi, and A. Enzabati, Investigating the Impact of Using Renewable Resources in Meeting Power Grid Demand by Proposing a Bi-Objective Mathematical Model, *Journal of Renewable and New Energy*, 1398. (in Persian)

[11] C. A. Hill, M. Clayton Such, D. Chen, J. Gonzalez, and W. Grady, Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 2, pp. 850-857, 2012.

[12] K. C. Divya and J. Østergaard, Battery energy storage technology for power systems—An overview, *Electric Power Systems Research*, Vol 79, No. 4, 2009.

[13] B. Lin and W. Wu, Economic Viability of Battery Energy Storage and Grid Strategy: A Special Case of China Electricity Market, *Energy*, 2017.

[14] X. Fan, B. Liu, J. Liu, et al. Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage, *Trans. Tianjin Univ*. Vol. 26, pp. 92–103, 2020.

[15] C. Tarhan and M. A. Çil, A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods, *Journal of Energy Storage*, 2021.

[16] A. S. Larimi, A Review of the Sustainability of Resources and Systems for Hydrogen Production and Storage and Its Future, *Journal of Renewable and New Energy*, 1399. (in Persian)

[17] F. J. de Sisternes, J. D. Jenkins, and A. Botterud, The value of energy storage in decarbonizing the electricity sector, *Applied Energy*, 2016.

[18] Marco Cavana, Andrea Mazza, Gianfranco Chicco, and Pierluigi Leone, Electrical and gas networks coupling through hydrogen blending under increasing distributed photovoltaic generation, *Applied Energy*, 2021.

[19] M. Ozturk and I. Dincer, System development and assessment for green hydrogen generation and blending with natural gas, *Energy*, 2022.
[20] J. B. Cristello, J. M. Yang, R. Hugo, Y. Lee, and S. S. Park, Feasibility analysis of blending hydrogen into natural gas networks, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 46, pp. 17605–17629, 2023.
[21] M. Davis, A. Okunlola, G. Di Lullo, T. Giwa, and A. Kumar, Greenhouse gas reduction potential and cost-effectiveness of economy-wide hydrogen-natural gas blending for energy end uses, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 171, pp. 112962, 2023,
[22] D. Kirchem and W. P. Schill, Power sector effects of green hydrogen production in Germany, *Energy Policy*, 2023.
[23] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, and D. Hissel, Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021.
[24] Y. Dong, Z. Hana, C. Li, S. Ma, and Z. Ma, Research on the optimal planning method of hydrogen-storage units in wind–hydrogen energy system considering hydrogen energy source, *Energy Reports*, 2023.
[25] O. J. Guerra, J. Zhang, J. Eichman, P. Denholm, B. Hodge, and J. Kurtz, The Value of Seasonal Energy Storage Technologies for the Integration of Wind and Solar Power, *Energy Environ Sci*, 2020.
[26] M. Jahangiri, M. Souloukngа, F. Bardei, A. Shamsabadi, E. Akinlabi, S. Sichilalu, A. Mostafaeipour, Techno-econo-environmental optimal operation of grid-wind-solar electricity generation with hydrogen storage system for domestic scale, case study in Chad, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019.
[27] N.G. Kiryanova, P.V. Matrenin, S.V. Mitrofanov, S.E. Kokin, and M. Kh. Safaraliev, Hydrogen energy storage systems to improve wind power plant efficiency considering electricity tariff dynamics, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.
[28] E. Komuri Yousef Abad and M. Mirsoufian, Challenges of hydrogen fuel in gas turbines, in *29th International Conference of Mechanical Engineering*, Tehran, 2021. (in Persian)
[29] Y. Norollahi, H. Yousefi, R. Moltames, and R. Fattahi, Performance Evaluation of a Hydrogen Production System Using Combined Photovoltaic-Organic Rankine Cycle Technology, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 2, pp. 36-45, 2023. (in Persian)
[30] MAPNA group, *Mapna MGT-75*, Last accessed 21 November 2024; https://mapnagroup.com/mapnafeatures/mgt-75/.
[31] IEA, *LCOE and value-adjusted LCOE for solar PV plus battery storage, coal and natural gas in selected regions in the Stated Policies Scenario,* 2022-2030.
[32] B. A. Bhayo, H. H. Al-Kayiem, and S. I. Gilani, Assessment of standalone solar PV-Battery system for electricity generation and utilization of excess power for water pumping, *Solar Energy*, Vol. 194, pp. 766–776, 2019.
[33] Y. Y. Siburian, P. Adriana, S. Danastri, and B. Priyono, Economic Analysis of Combination of Pumped Hydroelectric Storage (PHS) and Floating Photovoltaic + PV Roof Top + PV in empty land of Power Plant Area, in *Proceedings of the 4th Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering*, 2022.
[34] C. Hunter, E. Reznicek, M. Penev, J. Eichman, and S. Baldwin, *Energy Storage Analysis,* 2020.
[35] N. D. Nordin and H. A. Rahman, Sizing and economic analysis of standalone photovoltaic system with hydrogen storage, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 93, No. 1, 2017.