The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Improving Gas Turbine Performance in an Island Energy System Using Fuel Cells

Amir Mohammad Mahdavi Nasab[1] | Ali Roghani Araghi[2*]

1. M.Sc. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran . Email: amir.mahdavi1996@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: ali.roghani@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 23 May 2024
Revised 24 June 2024
Accepted 28 Augusr 2024
Published Online 04 October 2024

Keywords:
Hybrid Energy Systems,
CHP,
Fuel Cell,
Energy Efficiency,
Sustainability.

ABSTRACT

Given the challenges of sustainable energy supply in islanded networks and the importance of reducing losses and environmental pollutants, the use of hybrid energy supply systems is on the rise. This research presents an optimal and economical method for designing a hybrid energy supply system comprising Combined Heat and Power (CHP) sources, boilers, and fuel cells. The primary aim is to achieve network stability, reduce operational costs, and improve maintenance management by minimizing environmental pollutants and reducing water resource usage. The system design is conducted using HOMER software, considering operational, fuel, and maintenance costs as well as technical constraints, including power balance maintenance and production limits for each source. The results indicate that the optimal scenario, consisting of three gas turbines and four fuel cell units, leads to increased network stability, reduced reserve capacity needs, a 6.5% reduction in fuel consumption, and a reduction in emissions: nitrogen oxides by 15%, carbon dioxide by 9%, carbon monoxide by 14.6%, unburned hydrocarbons by 18%, and particulate matter by 11%. This design can serve as a sustainable and economical solution for energy supply in islanded networks, offering high efficiency with minimal environmental impact.

Cite this article: Mahdavi Nasab, A. M. & Roghani Araghi, A. (2024). Improving Gas Turbine Performance in an Island Energy System Using Fuel Cells. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (4), 401-417. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382693.1098

© Amir Mohammad Mahdavi Nasab, Ali Roghani Araghi
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382693.1098

Introduction

This research investigates the potential of integrating hydrogen fuel cells in island energy networks and evaluates the economic and environmental impacts. The HOMER software simulates and analyzes various energy system configurations to reduce costs and emissions and increase energy supply reliability. The objective of this research is to analyze the energy hub composition including gas turbines, fire boilers, and fuel cells in an island network disconnected from the main grid. Simulation results using HOMER demonstrate that the system performs with optimal stability under various conditions, though some scenarios require further optimization. In response to challenges posed by the extensive use of fossil energy resources and the need to reduce emissions, hydrogen fuel cell technology is proposed as a sustainable and clean energy production solution. This study explores the combination of this technology with gas turbines and fire boilers in island networks and analyzes the economic and environmental impacts of this combination.

Methodology: HOMER software is used to evaluate the proposed system and simulate the performance of energy systems under real-world conditions. Four scenarios are analyzed: 1) using four gas turbines, 2) using three gas turbines and four fuel cell units, 3) using two gas turbines and four fuel cell units, and 4) using three gas turbines without fuel cells. The impacts of each scenario on network stability, fuel consumption, economic costs, and emissions are analyzed.

Results: Results indicate that with gas turbines in operation, the network is generally stable, but a trip of one of the turbines could cause overload and risk a system-wide trip. Scenario one, where approximately 30% of the system capacity is underutilized, is optimized using scenario two, which includes four fuel cell units. Scenarios three and four are reviewed for excess capacity and network stability under fault conditions. In terms of fuel consumption, scenario two is the most efficient option. Regarding emissions and economic costs, scenario two is confirmed as the best option for system optimization due to high annual maintenance costs.

Conclusion: This research shows that integrating hydrogen fuel cells with gas turbines in island networks can be considered a sustainable and cost-effective solution for energy supply. Simulation results indicate that scenario two, which includes three gas turbines and four fuel cell units, is the best option in terms of network stability, emission reduction, and return on investment over 25 years. Due to its economic and environmental efficiency, scenario two is the most suitable option for energy supply in island conditions. The recommendations from this research are as follows:

1. **Utilization of Hydrogen Produced from Wastewater:** To reduce carbon footprints and improve environmental quality, it is recommended that hydrogen used in fuel cells be sourced not only from the olefin unit but also through electrolyzing wastewater from the plant. This approach helps in water conservation, reducing carbon emissions, and enhancing environmental quality.
2. **Attention to Maintenance Costs and Complex Management:** Maintenance costs and the complex management of hybrid systems should be carefully considered. Scenarios requiring more complex management should be evaluated concerning their associated costs and environmental benefits.
3. **System Performance Improvement:** To enhance performance and reduce costs, further optimization of hybrid systems and upgrading related technologies are essential. Continuous review and evaluation of energy system performance should be included in plans to improve efficiency and reduce costs.

Ultimately, this research emphasizes that integrating advanced energy technologies can provide effective solutions for sustainable energy supply, provided that all economic, environmental, and management aspects are carefully considered.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

بهبود عملکرد نیروگاه گازی در یک سیستم انرژی جزیره‌ای با به‌کارگیری پیل سوختی

امیرمحمد مهدوی‌نسب[۱] | علی روغنی عراقی[۲*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: amir.mahdavi1996@ut.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی پایدار، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: ali.roghani@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

کلیدواژه:
سامانه‌های هیبریدی انرژی،
تولید هم‌زمان برق و حرارت،
پیل سوختی،
بهره‌وری انرژی،
پایداری.

چکیده

با توجه به چالش‌های تأمین پایدار انرژی در شبکه‌های جزیره‌ای و اهمیت کاهش تلفات و آلاینده‌های زیست‌محیطی، استفاده از سامانه‌های هیبریدی تأمین انرژی رو به افزایش است. این پژوهش، روشی بهینه و اقتصادی برای طراحی سیستم هیبرید تأمین انرژی ارائه می‌دهد که شامل منابع تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP)، بویلر و پیل سوختی است. هدف اصلی، دستیابی به پایداری شبکه، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بهبود مدیریت تعمیرات با حداقل‌سازی آلاینده‌های زیست‌محیطی و کاهش استفاده از منابع آب است. طراحی سیستم با استفاده از نرم‌افزار HOMER و در نظر گرفتن هزینه‌های عملیاتی، سوخت، تعمیر و نگهداری و قیود فنی از جمله حفظ تعادل توان و رعایت محدودیت‌های تولید هر منبع انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد سناریوی بهینه شامل سه توربین گازی و چهار واحد پیل سوختی، باعث افزایش پایداری شبکه، کاهش نیاز به ظرفیت رزرو، کاهش مصرف سوخت تا ۶/۵ درصد کاهش انتشار آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن به میزان ۱۵ درصد، دی‌اکسید کربن به میزان ۹ درصد، مونوکسید کربن به میزان ۱۴/۶ درصد، هیدروکربن‌های نسوخته به میزان ۱۸ درصد و ذرات معلق به میزان ۱۱ درصد می‌شود. این طراحی می‌تواند به عنوان یک راه‌حل پایدار و اقتصادی برای تأمین انرژی در شبکه‌های جزیره‌ای با کارایی بالا و کمترین اثرات زیست‌محیطی به کار رود.

استناد: مهدوی‌نسب، امیرمحمد و روغنی عراقی، علی (۱۴۰۳). بهبود عملکرد نیروگاه گازی در یک سیستم انرژی جزیره‌ای با به‌کارگیری پیل سوختی. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۳ (۴) ۴۰۱-۴۱۷.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382693.1098

© امیرمحمد مهدوی‌نسب، علی روغنی عراقی **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382693.1098

۱. مقدمه

با توجه به تنوع و تفاوت‌های بین کشورها، نیازهای محلی و زیرساخت‌های موجود، اهمیت سفارشی‌سازی و انطباق پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر به‌وضوح نمایان است. در این راستا، همکاری و تعامل مؤثر میان دولت، بخش خصوصی و جامعهٔ علمی نقش حیاتی در موفقیت این پروژه‌ها ایفا می‌کند. پیل‌های سوختی با هیدروژن به عنوان سوخت، یکی از فناوری‌های پیشرو در عرصهٔ تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر به شمار می‌آیند.

پژوهش‌های انجام‌شده توسط Hasan و همکاران نشان می‌دهد ژنراتورهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به طور فزاینده‌ای برای دستیابی به اهداف رسیدن به صفر درصد تولید آلایندگی در سطح جهانی در نظر گرفته می‌شوند. هیدروژن به عنوان حامل انرژی پاک، گزینه‌ای مناسب برای مکان‌هایی است که به دلیل تراکم جمعیت، محدودیت‌های جغرافیایی، سیاست‌های دولتی و مسائل نظارتی، امکان نصب تأسیسات انرژی تجدیدپذیر در مقیاس وسیع یا متوسط فراهم نیست. این مقاله به ارزیابی فنی ـ اقتصادی طراحی ریزشبکه‌ای مبتنی بر هیدروژن سبز برای یک جزیرهٔ دورافتاده در شمال شرقی استرالیا پرداخته است. تحقیق یادشده به تعیین اندازهٔ بهینهٔ اجزای ریزشبکه با بهره‌گیری از فناوری هیدروژن سبز می‌پردازد. در این مطالعه، سیستم تولید هیدروژن سبز و ریزشبکه پیشنهادی در دو جزیرهٔ مجزا بررسی شده و سه سناریوی به‌صرفه برای تولید هیدروژن سبز، حمل‌ونقل و تولید برق ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از پلتفرم HOMER Pro نشان می‌دهد هزینهٔ همسطح انرژی با فناوری هیدروژن می‌تواند بسته به سناریوها و تغییرات پارامترهای کلیدی، از ۰/۳۷ دلار استرالیا برکیلووات ساعت تا ۱/۰۸ دلار استرالیا برکیلووات ساعت متغیر باشد. این فناوری قابلیت ارائهٔ برق کم‌هزینه به جوامع دوردست را دارد و در صورت تأمین ۱۰۰ درصد تقاضای برق توسط سیستم انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند انتشار CO_2 را تا ۱،۷۶۰،۷۷۷ کیلوگرم در سال کاهش دهد [۱].

حسین‌زاده و همکاران طی پژوهشی انعطاف‌پذیری سیستم‌های انرژی پیل سوختی به عنوان استراتژی‌ای برای افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش حوادث نامطلوب در شبکهٔ برق را بررسی کردند. مطالعهٔ یادشده به‌ویژه بر اهمیت گزینه‌های ذخیره‌سازی برای حمایت از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (RES[1]) در کشورهای مختلف، به‌ویژه در اروپا، تأکید دارد. در این تحقیق، شهر کاتانیا در جزیرهٔ سیسیل ایتالیا به عنوان مطالعهٔ موردی انتخاب شده است. نرم‌افزار HOMER برای شبیه‌سازی استفادهٔ اقتصادی و فنی از پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، پیل‌های سوختی، الکترولایزر و مخزن هیدروژن به منظور تأمین تقاضای انرژی ۲ مگاواتی به‌کار رفته است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد پنل‌های فتوولتائیک با تأمین ۷۲ درصد از انرژی کل، راندمان بالاتری نسبت به توربین‌های بادی و پیل‌های سوختی دارند. هزینهٔ سرمایه‌ای برای تأمین نیاز ۲ مگاواتی حدود ۴/۸۵ میلیون یورو برآورد شده و بازگشت سرمایه (ROI[2]) به میزان ۲/۵۹ میلیون یورو طی عمر ۲۵سالهٔ پروژه پیش‌بینی شده است [۲].

Sagel و همکاران در بررسی جزایر کوچک در حال توسعه (SIDS[3]) و وابستگی آن‌ها به سوخت‌های فسیلی، روی جزیرهٔ کوراسائو تمرکز کرده و هزینهٔ همسطح برق برای سیستم ذخیره‌سازی انرژی ترکیبی بادی و آمونیاک را ۰/۱۳ دلار آمریکا/کیلووات ساعت گزارش کرده‌اند. این هزینهٔ رقابتی با هزینه‌های تولید انرژی از نفت کورهٔ سنگین و زغال‌سنگ بدون جذب و ذخیرهٔ کربن (CCS[4]) است [۳].

Zhang و همکاران نشان داده‌اند نیروگاه‌های دیزلی با وجود معایبشان، در بسیاری از جزایر دورافتادهٔ کرهٔ جنوبی هنوز استفاده می‌شوند. برای کاهش آلودگی و هزینه‌ها، مطالعه‌ای در جزیرهٔ Ui انجام شد که به بررسی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر پرداخت. در این تحقیق، سیستم‌های مختلف شامل PV/ باتری، باد/باتری، و ترکیب‌های مختلف با PEMFC[5] شبیه‌سازی شدند. امکان‌سنجی فنی ـ اقتصادی نتایج نشان داد سیستم PV/باد/باتری/PEMFC بهترین سیستم است، با هزینهٔ کل ۵،۲۷۶،۰۶۹ دلار و هزینهٔ یکسان‌شدهٔ برق (LCOE[6]) ۰/۳۶۶ دلار به کیلووات ساعت [۴].

1. Renewable Energy Systems
2. Return of Investment
3. Small Island Developing States
4. Carbon Capture and Storage
5. Proton Exchange Membrane Fuel Cell
6. Levelized Cost of Electricity

بابایی و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی ریزشبکه‌های مبتنی بر هیدروژن برای کربن‌زدایی از شبکه‌های حرارتی، حمل‌ونقل و برق پرداخته‌اند. این تحقیق به توسعهٔ طرح‌های هیبریدی تمیز و به‌صرفه برای تأمین نیازهای هیدروژن و الکتریسیته در سه جزیرهٔ تحت تنش انرژی در شرق کانادا، یعنی Pelee، Wolfe و Saint Pierre، پرداخته است. طراحی‌ها شامل منابع انرژی خورشیدی، بادی، پیل‌های سوختی، هیدروژن و ذخیره‌سازی برق بوده و با استفاده از داده‌های بدون درنگ تابش، سرعت باد، دما و بار، بهینه‌سازی شده‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد هزینهٔ هیدروژن در جزیرهٔ سنت پیر کمترین مقدار را دارد، در حالی که ظرفیت ذخیرهٔ هیدروژن در جزیرهٔ Pelee نسبت به سایر جزایر کمتر است. هزینهٔ یکسان‌شدهٔ برق (LCOE) به تغییرات هزینه‌های پیل سوختی حساس است و بیشترین کاهش (۶۳ درصد) با افزایش عمر مفید سیستم در جزیرهٔ Pelee مشاهده می‌شود. تحلیل نوسانات نشان می‌دهد پیش‌بینی هزینهٔ انرژی در پروژه‌های کوتاه‌مدت چالش‌برانگیز است و پروژه‌های بلندمدت می‌توانند به طور کلی به‌صرفه‌تر باشند [۵].

Tariq و همکاران در مقاله‌ای مروری به بررسی ریزشبکه‌ها و ادغام منابع تجدیدپذیر، به‌ویژه سلول‌های سوختی، پرداخته‌اند. این مطالعه به تحلیل عمیق چالش‌های فنی و پیچیدگی‌های ادغام سلول‌های سوختی با سیستم‌های ریزشبکه می‌پردازد و نشان می‌دهد سلول‌های سوختی اکسید جامد (SOFCs[1]) کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های متصل به شبکه، پشتیبان‌گیری و مستقل دارند. این سیستم‌ها قادرند با ترکیب تکنیک‌های حرارت و برق تا ۹۵ درصد بازدهی داشته باشند و با استفاده از ۱ کیلوگرم هیدروژن، به طور متوسط ۳۳/۶ کیلووات ساعت برق تولید کنند. این مقاله بینش‌های مهمی دربارهٔ چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده در ریزشبکه‌های مبتنی بر پیل سوختی ارائه می‌دهد [۶].

از سوی دیگر در سال‌های اخیر، توجه به ذخیره‌سازی انرژی و بهینه‌سازی منابع انرژی به عنوان دو مؤلفهٔ کلیدی در راستای مدیریت پایدار انرژی در ایران و دیگر کشورها افزایش یافته است. در این راستا، گندم‌زاده و همکاران به بررسی سناریوهای مختلف برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ایران با استفاده از روش تعادل تأثیرات متقابل پرداخته‌اند. این پژوهش به شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های موجود در سیستم انرژی کشور کمک کرده و اهمیت راه‌حل‌های نوآورانه را در این زمینه برجسته می‌کند [۷]. به علاوه، جامی و همکاران با مدل‌سازی آیندهٔ انرژی در ایران و تحلیل سناریوها به شناخت بهتر روندهای آینده در حوزهٔ انرژی پرداخته‌اند و بر لزوم توسعهٔ مدل‌های کارآمد و پایدار در سیستم‌های انرژی تأکید دارند [۸].

Calise و همکاران در مقاله‌ای دیگر، به تحلیل شبکه‌های انرژی هوشمند شامل منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی پرداخته‌اند. این مطالعه به بررسی یک شبکهٔ انرژی هوشمند مبتنی بر پانل‌های فتوولتائیک، پمپ‌های حرارتی، و وسایل نقلیهٔ الکتریکی پرداخته و دو فناوری ذخیره‌سازی (باتری لیتیوم یون و سلول سوختی اکسید جامد برگشت‌پذیر) را مقایسه کرده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد این سیستم‌ها می‌توانند تا ۷۷ درصد نیاز انرژی اولیه را تأمین کنند و دوره بازپرداخت آن‌ها بین ۳/۵ تا ۴/۴ سال است. این نتایج امیدوارکننده نشان‌دهندهٔ صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف انرژی اولیه هستند و به بررسی اثربخشی سیستم‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی کمک می‌کنند [۹].

Hossain و همکاران به بررسی چالش‌های ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های برق، از جمله تأثیرات ناشی از تغییرات آب‌وهوایی و تقاضای بار، پرداخته‌اند. آن‌ها ذخیره‌سازی انرژی هیدروژن سبز (GHE[2]) را به عنوان یک راه‌حل بالقوه شناسایی کرده‌اند که با استفاده از الکترولیز و سلول‌های سوختی می‌تواند به بهینه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر کمک کند. مقاله به بررسی فناوری‌هایGHE و استراتژی‌های مدیریت توان (PMCS[3]) برای بهبود کارایی، قابلیت اطمینان و به‌صرفه بودن سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و قدرت یکپارچه پرداخته و تأکید دارد که پیشرفت در این فناوری‌ها به حمایت از گذار به اقتصاد کربن صفر و تحقق اهداف توسعهٔ پایدار کمک خواهد کرد [۱۰].

پژوهش Trapani و همکاران به بررسی تأمین پایدار برق برای مناطق دوردست و خارج از شبکه پرداخته است. این مناطق همچنان به ژنراتورهای دیزلی متکی هستند، هرچند که این روش باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای

1. Solid Oxide Fuel Cells
2. Green Hydrogen Energy Storage
3. Power Management and Control System

می‌شود. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) به همراه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، راه‌حلی امیدوارکننده برای این مناطق است. تحقیق روی جزایر دوردست نروژ انجام شده و نصب سیستم‌های انرژی مبتنی بر RES و ذخیره‌سازی هیدروژنی بررسی شده است. نتایج نشان داد هزینهٔ تولید برق (LCOE) بین ۰/۲۱ تا ۰/۶۳ یورو در کیلووات ساعت متغیر است و این هزینه به ضریب ظرفیت مزرعهٔ بادی وابسته است. همچنین، هیدروژن به عنوان یک راه‌حل کلیدی برای جلوگیری از بزرگ شدن بیش از حد ژنراتورها و باتری‌های RES و همچنین، تضمین ذخیره‌سازی بلندمدت انرژی در نظر گرفته شده است. در نهایت، بررسی گزینه‌های جایگزین مانند ژنراتورهای دیزلی نشان داد از نظر اقتصادی به‌صرفه نیستند، در حالی که اتصال به شبکه با کابل زیردریایی به عواملی مانند طول کابل و میزان مصرف برق سالانه وابسته است [۱۱].

تحقیقات انجام‌شده توسط اکرمی و همکاران نیز به بررسی یک سیستم انرژی نوآورانه می‌پردازد که انرژی خورشیدی را برای تولید برق طی روز و شب ترکیب می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفادهٔ بهینه از انرژی خورشیدی می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی و کاهش هزینه‌های انرژی کمک کند و بر اهمیت سیستم‌های انرژی ترکیبی در دستیابی به اهداف پایداری و افزایش کارایی تأکید می‌کند. این نتایج، نشان‌دهندهٔ اهمیت سیستم‌های چندمنظوره در تولید انرژی پایدار و کارآمد هستند و می‌توانند به عنوان راه‌حل‌های عملی در مسیر آیندهٔ پایدار مطرح شوند [۱۲].

علاوه بر این، مطالعهٔ اسلامی و همکاران به بررسی تجربی یک سیستم چندمنظورهٔ انرژی برای یک پارک نزدیک به صفر انرژی می‌پردازد. نتایج این تحقیق نشان‌دهندهٔ پتانسیل بالای سیستم‌های چندمنظوره در تحقق اهداف پایداری و بهینه‌سازی مصرف انرژی هستند و می‌توانند به عنوان راه‌حل‌های عملی در مسیر آیندهٔ پایدار مطرح شوند [۱۳].

همچنین، مطالعهٔ اکرمی و همکاران یک تحلیل جامع از سیستم‌های چندمنظورهٔ انرژی را با استفاده از روش‌های انرژی ـ اگزرژی برای تولید آب گرم، خنک‌کننده، برق و هیدروژن ارائه می‌دهد. این تحقیق بر اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی تأکید دارد و نتایج آن نشان می‌دهد استفاده از سیستم‌های چندمنظوره می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک کند [۱۴].

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند استفاده از سیستم‌های ترکیبی شامل انرژی‌های تجدیدپذیر و پیل سوختی در شبکه‌های جزیره‌ای، از نظر اقتصادی و فنی مزایای قابل توجهی دارد. Toudefallah و همکاران به بررسی بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سیستم‌های ترکیبی انرژی تجدیدپذیر برای کاربردهای خارج از شبکه پرداختند که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد این سیستم‌ها نه تنها می‌توانند پایداری شبکه را افزایش دهند، بلکه هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهند [۱۵]. علاوه بر این، مدل‌سازی و کنترل دینامیکی سیستم‌های هیبریدی پیل سوختی نیز به منظور بهبود عملکرد و کاهش اختلالات شبکه اهمیت بالایی دارد. Shabar و همکاران به این موضوع پرداخته و نشان داده‌اند کنترل بهینهٔ این سیستم‌ها می‌تواند پایداری سیستم‌های جزیره‌ای را به شکل قابل توجهی بهبود بخشد [۱۶].

استفاده از هیدروژن به عنوان منبع اصلی در سیستم‌های مبتنی بر پیل سوختی نیز رو به افزایش است؛ به‌ویژه در کاربردهای میکروشبکه‌ای. Yu و همکارش نشان داده‌اند مدیریت انرژی در سیستم‌های مبتنی بر هیدروژن می‌تواند بهره‌وری و پایداری سیستم را در شرایط مختلف بار افزایش دهد [۱۷]. از سوی دیگر، Akinyele و همکاران با مرور تکنولوژی‌های پیل سوختی برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های جزیره‌ای، به این نتیجه رسیده‌اند که این سیستم‌ها می‌توانند به عنوان راه‌حل مؤثر برای ذخیره‌سازی و تأمین انرژی در شبکه‌های ایزوله مورد استفاده قرار گیرند [۱۸].

پایداری و کنترل سیستم‌های هیبریدی که شامل منابع تجدیدپذیر و منابع مرسوم انرژی هستند، همچنان به عنوان یکی از چالش‌های اساسی مطرح است. Fazal و همکاران در تحقیق خود به تحلیل پایداری این سیستم‌ها و ارائهٔ استراتژی‌های کنترلی برای بهبود پایداری شبکه‌های جزیره‌ای پرداخته‌اند که این یافته‌ها می‌تواند به طراحی استراتژی‌های کنترلی مؤثر در سیستم‌های هیبریدی کمک کند [۱۹].

از جنبهٔ زیست‌محیطی و اقتصادی، سیستم‌های هیبریدی در شبکه‌های جزیره‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند، Mojumder و همکاران در مرور خود به ارزیابی این سیستم‌ها از منظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی پرداخته‌اند و بر اهمیت طراحی بهینه و پایداری آن‌ها تأکید کرده‌اند [۲۰].

در همین راستا، بررسی کنترل توربین‌های گازی و پیل‌های سوختی در حالت جزیره‌ای نشان می‌دهد استراتژی‌های کنترلی مناسبی می‌توانند به بهبود کارایی این سیستم‌ها کمک کنند. McLarty و همکاران به تحلیل این موضوع پرداخته‌اند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهندهٔ بهبود پایداری و کاهش نوسانات سیستم است [۲۱]. Thakkar و همکاران همچنین به بررسی استراتژی‌های مدیریت انرژی برای میکروشبکه‌های مبتنی بر هیدروژن و توربین‌های گازی پرداخته‌اند که می‌تواند تعامل این دو تکنولوژی را در سیستم‌های جزیره‌ای بهبود بخشد [۲۲].

در نهایت، بهینه‌سازی سیستم‌های هیبریدی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر و پیل سوختی برای شبکه‌های جزیره‌ای نیز یکی از موضوعات اصلی تحقیقات اخیر بوده است. Chen و همکاران نشان داده‌اند این بهینه‌سازی می‌تواند کارایی انرژی و بهره‌وری سیستم را افزایش دهد و عملکرد کلی شبکه‌های جزیره‌ای را بهبود بخشد [۲۳]. Jia و همکاران نیز به بررسی بهبود عملکرد توربین‌های گازی در سیستم‌های هیبریدی پرداخته و پیشنهادهای جدیدی برای افزایش بهره‌وری سیستم ارائه داده‌اند [۲۴].

در مجموع، پیل‌های سوختی هیدروژنی به‌عنوان یکی از راهکارهای مهم برای دستیابی به انرژی پاک و پایدار مطرح هستند و توسعهٔ این فناوری می‌تواند نقش مهمی در آیندهٔ انرژی ایفا کند. پیل‌های سوختی با استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت، یکی از فناوری‌های مهم در زمینهٔ تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر هستند. این فناوری به عنوان جایگزینی مناسب برای موتورهای احتراق داخلی و دیگر منابع انرژی فسیلی مطرح می‌شود. در این روش، هیدروژن به عنوان سوخت در پیل‌های سوختی استفاده می‌شود و می‌تواند از منابع طبیعی مختلفی مانند گاز طبیعی، بیوگاز، آب و نفت خام استخراج شود. این فرایند استخراج هیدروژن به نام پتروشیمی یا پتروشیمی هیدروژن شناخته می‌شود، البته کنترل شبکهٔ هیبریدی چالش‌هایی را در بر دارد. از جمله چالش‌های این فناوری، هزینه‌های بالای تولید، ذخیره‌سازی و توزیع هیدروژن است که به توسعهٔ فناوری‌های نوین و سرمایه‌گذاری‌های کلان نیاز دارد. اما در پتروشیمی اراک، تولید هیدروژن با خلوص بالای ۹۹ درصد این چالش‌ها را کاهش داده و موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها شده است. به‌ویژه، عدم نیاز به زیرساخت‌های پیچیده برای تولید هیدروژن، این فرایند را از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه کرده و هم‌زمان بهبودهای زیست‌محیطی نیز به همراه دارد.

درمجموع، با بررسی‌های انجام‌گرفته از مطالعات انجام‌پذیرفته نظر بر استفاده از نرم‌افزار هومر و بررسی پایداری و مقایسهٔ ارزیابی فنی اقتصادی و زیست‌محیطی در دو حالت با فناوری پیل سوختی و بدون پیل سوختی و فقط استفاده از سوخت فسیلی و بررسی ذخیره‌سازی هیدروژن انجام می‌پذیرد.

در این تحقیق، به بررسی و تحلیل توانمندی‌های ادغام پیل‌های سوختی با هیدروژن در شبکه‌های انرژی جزیره‌ای و ارزیابی تأثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی آن پرداخته می‌شود. استفاده از نرم‌افزار HOMER برای شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد سیستم‌های انرژی مختلف، به منظور کاهش هزینه‌ها، آلایندگی، و افزایش قابلیت اطمینان تأمین انرژی، صورت می‌گیرد.

۲. روش‌شناسی

در این پژوهش، هدف بررسی و تحلیل کارایی و بهینه‌سازی یک شبکهٔ جزیره‌ای برای تأمین انرژی مورد نیاز است. برای رسیدن به این هدف، ترکیب‌های مختلف از نظر هزینه، آلودگی و قابلیت اطمینان ارزیابی شده است. سیستم به گونه‌ای مدیریت می‌شود که کمترین آلودگی و بیشترین قابلیت اطمینان را داشته باشد. طراحی سیستم به گونه‌ای است که واحدهای تولید انرژی در ابعادی مناسب برای تعمیرات و نگهداری قرار داشته باشند تا شبکهٔ برق محلی به خطر نیفتد یا در حالت مرزی قرار نگیرد.

پیل‌های سوختی هیدروژنی به دلیل مزایایی همچون بازده بالا، عدم آلایندگی و کاربردهای گسترده، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این فناوری قادر است انرژی شیمیایی را با بازدهی بالا به انرژی الکتریکی تبدیل کند. همچنین، در فرایند تولید انرژی از هیدروژن، هیچ‌گونه آلاینده محیط زیستی تولید نمی‌شود. علاوه بر این، پیل‌های سوختی می‌توانند در حوزه‌های مختلفی مانند خودروها و ژنراتورهای برق به کار گرفته شوند.

با این‌وجود، این فناوری همچنان با چالش‌هایی مواجه است. یکی از مشکلات مهم، هزینه‌های بالای تولید، ذخیره‌سازی و توزیع هیدروژن است. این هزینه‌ها نیازمند توسعهٔ فناوری‌های جدید و سرمایه‌گذاری‌های کلان برای کاهش قیمت‌ها و افزایش دسترسی به هیدروژن هستند.

نیروگاه‌های گازی و پیل‌های سوختی هر یک ویژگی‌های خاص خود را دارند. نیروگاه‌های گازی از سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی استفاده می‌کنند و بازدهی حرارتی نسبتاً پایین و بین ۲۰ تا ۳۵ درصد دارند. اما این نیروگاه‌ها با انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها همراه هستند. در مقابل، پیل‌های سوختی از فناوری‌های الکتروشیمیایی برای تبدیل انرژی استفاده می‌کنند و بازدهی الکتریکی بالاتری بین ۴۰ تا ۶۰ درصد دارند. همچنین، این فناوری آلایندگی کمتری دارد، اما هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیهٔ آن نسبت به نیروگاه‌های گازی بالاتر است.

با این‌حال، ادغام این دو فناوری با چالش‌هایی مواجه است. هزینهٔ اولیهٔ بالا برای پیاده‌سازی و ادغام این سیستم‌ها یکی از موانع اصلی است. همچنین، پیل‌های سوختی به فضای بیشتری برای نصب نیاز دارند و مدیریت و کنترل سیستم ترکیبی پیچیده‌تر است، که این موارد از جمله موانع مهم پیش روی توسعهٔ این فناوری‌ها هستند.

۲. ۱. روش تحقیق

در این پژوهش، ترکیب یک هاب انرژی شامل فایر بویلر، توربین‌های گازی مجهز به ریکاوری بویلر و پیل‌های سوختی در یک شبکهٔ جزیره‌ای غیر متصل به شبکهٔ سراسری مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های واقعی از شرکت پتروشیمی اراک برای بررسی این ترکیب استفاده شده است.

وظیفهٔ پیل سوختی تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به برق از طریق یک واکنش شیمیایی است که در آن سوخت اکسید شده و برق تولید می‌شود. در نرم‌افزار HOMER، پیل سوختی به صورت یک ژنراتور مدل‌سازی شده است که سوخت ورودی آن هیدروژن است و فرمول‌های آن با انتخاب سوخت همگن شده است. این فرمول‌ها در بخش بعدی آورده شده‌اند.

در این مطالعه، بهینه‌سازی سیستم تولید انرژی با استفاده از توربین‌های گازی و فایر بویلرها انجام شده است. برای تعیین ظرفیت پیل سوختی به عنوان متغیر اصلی، عوامل محدودکننده شامل میزان تولید مازاد هیدروژن و میزان اکسیژن موجود در واحدهای پتروشیمی مورد بررسی قرار گرفته است. براساس این بررسی، ظرفیت تولید انرژی الکتریکی از پیل سوختی حدود ۸/۵ مگاوات تخمین زده شده است. به دلیل امکان نوسانات در تولید، پیشنهاد می‌شود که به جای استفاده از واحدهای بزرگ، از واحدهای کوچک‌تر به ظرفیت ۲ هزار کیلووات ساعت استفاده شود. خروجی پیل سوختی به صورت جریان مستقیم (DC) است و به طور مستقیم به واحد تصفیهٔ آب EDR مجتمع منتقل می‌شود تا از هزینهٔ اینورتر جلوگیری شده و نوسانات در شبکهٔ برق کاهش یابد. همچنین، آب خروجی از پیل سوختی به دلیل نبود املاح، به فرایند تولید بخار کمک می‌کند و جبران CHP را در صورت خاموشی یک توربین گاز می‌کند. استخراج آب نیز از چاه آب کاهش می‌یابد.

۲. ۲. شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی و ارزیابی حساسیت سیستم، از نرم‌افزار HOMER استفاده شده است. شماتیک هاب انرژی بهینه‌شده در پتروشیمی اراک در شکل ۱ نشان داده شده است. شبیه‌سازی در دو حالت با پیل سوختی و بدون آن انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است که به‌ترتیب نبود پیل سوختی و وجود آن را نمایش می‌دهند.

- معادلات حاکم برای توربین گازی:

در نرم‌افزار HOMER، ژنراتورها قادر به استفاده از دو نوع سوخت گاز و گازوئیل هستند. با این‌حال، از آنجا که سوخت اصلی در این سیستم گاز است، در شبیه‌سازی فقط از سوخت گاز استفاده شده است. برای انجام محاسبات، از رابطهٔ ۱ استفاده شده است:

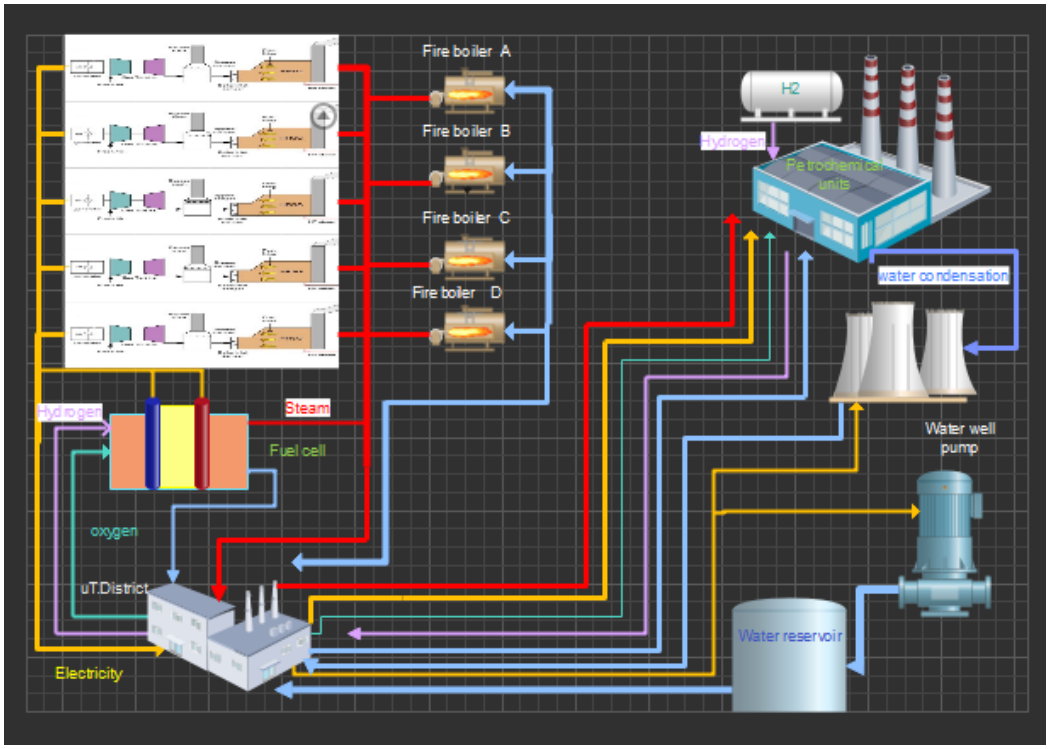
$$\eta_{GEN} = \frac{3.6 \times E_{gen}}{m_{fuel} \times LHV_{FUEL}} \quad (۱)$$

- η_{GEN}: متوسط بازدهی انرژی الکتریکی ژنراتور درسال

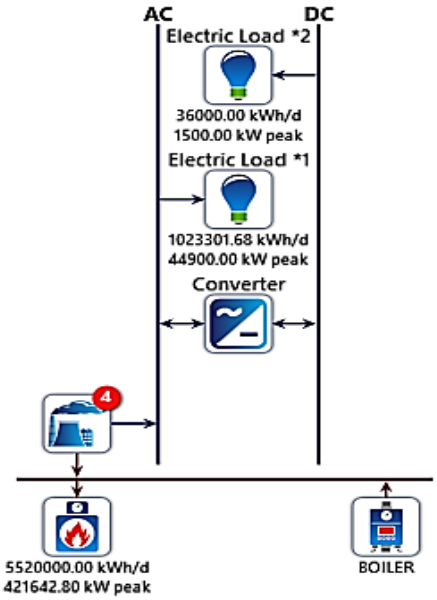
E_{gen}–کل انرژی الکتریکی سالیانهٔ تولیدشده توسط ژنراتور (kWh/yr)

m_{fuel}–کل سوخت مصرف‌شدهٔ سالیانه توسط ژنراتور (kg/yr)

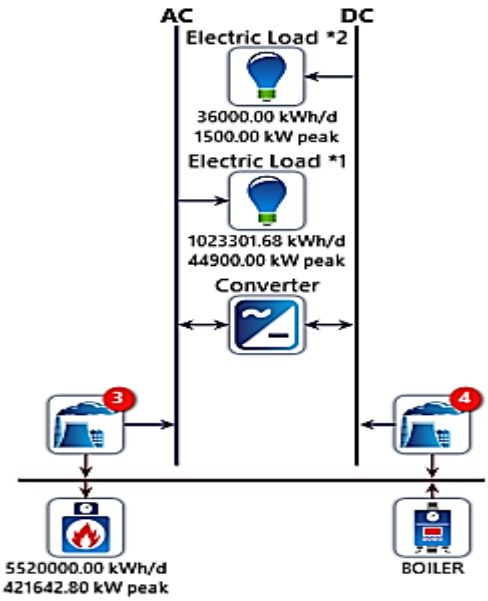
LHV_{FUEL}–ارزش حرارتی پایین سوخت (MJ/kg)



شکل ۱. شماتیک هاب انرژی بهینه‌شده در پتروشیمی اراک



شکل ۲. شبیه‌سازی سیستم بدون پیل سوختی



شکل ۳. شبیه‌سازی سیستم با پیل سوختی

عدد ۳/۶ برای تبدیل واحدها به کار می‌رود، زیرا E_{gen} بر حسب کیلووات ساعت (kWh) و LHV_{FUEL} بر حسب مگاژول بر کیلوگرم (MJ/Kg) است. این عدد به شکل زیر به دست آمده است:

- یک کیلووات ساعت برابر است با ۳۶۰۰ کیلوژول (kJ).
- از آنجا که 1 MJ =1000 kJ، بنابراین ۳/۶ (که حاصل $\frac{3600}{1000}$است) ضریبی برای تبدیل کیلووات ساعت به مگاژول است.

در نتیجه، ۳/۶ با واحد مگاژول بر کیلووات‌ساعت (MJ/kWh) در رابطه استفاده شده تا همه واحدها به صورت یکسان و قابل مقایسه باشد و بازدهی به صورت یک نسبت بدون واحد به دست آید.

نرخ مصرف سوخت رادر هر گام زمانی از رابطهٔ ۲ به دست می‌آید:

$$F = F_0 \times Y_{gen} + F_1 \times P_{gen} \quad (۲)$$

F: نرخ مصرف سوخت (L/hr)

F_0: ضریب عرض از مبدأ منحنی سوخت ژنراتور ($L/hr/ kw_{rated}$)

Y_{gen}: ظرفیت نامی ژنراتور (kW)

F_1: شیب منحنی سوخت ژنراتور ($L/ hr/ kw_{out\ put}$)

P_{gen}: خروجی ژنراتور در این گام زمانی (kW)

طول عمر عملیاتی ژنراتور نیز طبق رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود:

$$R_{gen} = \frac{R_{gen.h}}{N_{gen}} \quad (۳)$$

$R_{gen.h}$: طول عمر ژنراتور (hr)

N_{gen}: تعداد ساعت‌های عملکرد ژنراتور طی سال (hr/yr)

معادلهٔ ۳ انتقال هزینه‌ها و درآمدها از حال به آینده:

$$FVF = (1+i)^{*}n \quad (۴)$$

FVF: ضریب تبدیل ارزش در سالn ام به ارزش فعلی

i: نرخ بهره

n: فاصلهٔ سال مربوطه تا سال مبنا

معادلهٔ ۵ انتقال و تبدیل هزینه یا درآمد از آینده به حال:

$$PVF = \frac{1}{(1+i)^{n}} \quad (۵)$$

PVF: نرخ تبدیل ارزش آیندهٔ سال nام به سال مبنا

i: نرخ بهره

n: فاصلهٔ سال مربوطه تا سال مبنا

معادلهٔ ۶ محاسبهٔ ارزش حال درآمد یا هزینهٔ سالانهٔ یکسان:

$$CRF = \frac{(-1)+(1+i)^{n}}{i(1+i)^{n}} \quad (۶)$$

CRF: ضریب تبدیل هزینه یا درآمد یکسان در چند سال به ارزش حال

i: نرخ بهره

n: فاصلهٔ سال مربوطه تا سال مبنا

در شبیه‌سازی انجام‌شده، واحد پولی مرجع دلار در نظر گرفته شده و نرخ بهرهٔ ۸ درصد و نرخ تورم ۲ درصد طی ۲۵ سال عمر پروژه لحاظ شده است. با توجه به نوسانات ارزی، تمامی هزینه‌های تعمیر و نگهداری، سوخت و آورده اولیه به صورت دلار محاسبه شده است. در صورت اجرای پروژه، به دلیل درآمد ارزی مجتمع، مشکلی در محاسبات وجود نخواهد داشت. همچنین، با توجه به معادلات ۱ تا ۳ و کانورتور ۹۵ درصد، F_0 برابر با ۰/۳۳ و F_1 برای بار ۰/۲۷۳ در نظر گرفته شده است. ظرفیت تولید، ۲۵

مگاوات برای توربین گازی و ۲ مگاوات برای پیل سوختی با عمر عملیاتی ۴۰ و ۵۰ هزار ساعت به‌ترتیب لحاظ شده است. هزینهٔ نصب اولیهٔ سیستم توربین گازی و بویلر در نظر گرفته نشده است. هزینهٔ سوخت گاز هر متر مکعب ۰/۰۹۱ دلار و قیمت گاز هیدروژن ۱ دلار در شبیه‌سازی لحاظ شده است. به دلیل مازاد تولید اکسیژن در مجتمع، هزینهٔ آن در محاسبات لحاظ نمی‌شود.

در این مقاله، پایداری سیستم بخار و الکتریکی در چهار سناریو مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. بار مصرفی در مجتمع‌های صنعتی به طور تقریبی ثابت است و تنها طی روز به دلیل مصارف اداری و در زمان تاریکی هوا به سبب روشنایی، نوساناتی کمتر از ۵ درصد را تجربه می‌کند. در زمان تعمیرات اساسی، نوسانات مصرف به حداکثر می‌رسد. از دیتا مصرف سال ۱۳۹۶، که بالاترین نوسان مصرف را داشته، مطابق شکل ۴ استفاده شده است.

در بدترین حالت، با استفاده از سه عدد فایر بویلر و دو ریکاوری بویلر و سرویس بودن تمامی واحدهای پیل سوختی بررسی شده است. اگر دو توربین گازی از سرویس خارج شوند، ریکاوری آن‌ها نیز غیرقابل استفاده خواهد شد و شبکهٔ برق و بخار ممکن است از کار بیفتد، زیرا سیستم بخار با کاهش فشار و قطع اتصال هدرها دچار خاموشی می‌شود. با این‌حال، به دلیل نادر بودن وقوع هم‌زمان دو توربین، این سناریو نادیده گرفته شده و با چهار بویلر، شبکهٔ بخار به طور پایدار باقی می‌ماند.

سناریوهای بررسی‌شده عبارت‌اند از:

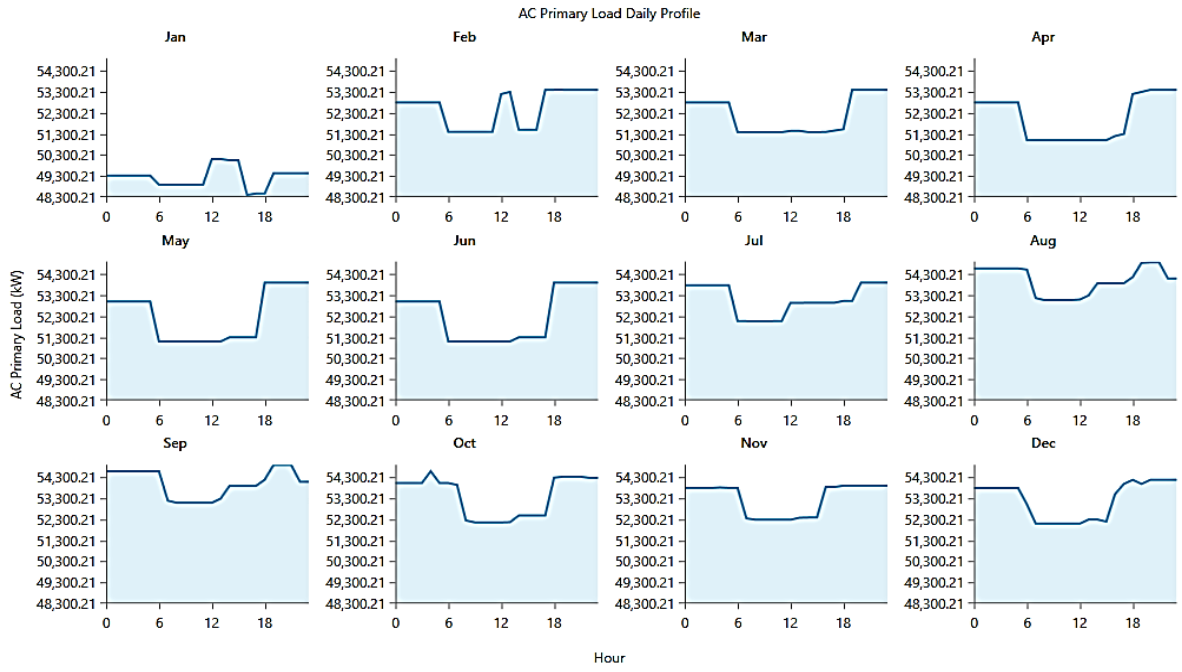
۱. **سناریوی اول**: بررسی پایداری در حالت چهار توربین گازی.

۲. **سناریوی دوم**: بررسی پایداری در حالت سه توربین گازی با چهار واحد پیل سوختی در سرویس.

۳. **سناریوی سوم**: بررسی پایداری در حالت دو توربین گازی با چهار واحد پیل سوختی در سرویس.

٤. **سناریوی چهارم**: بررسی پایداری در حالت سه توربین گازی در سرویس.

شکل ۴ میزان مصرف برق به تفکیک ماه طی یک سال برای مجتمع را نشان می‌دهد.

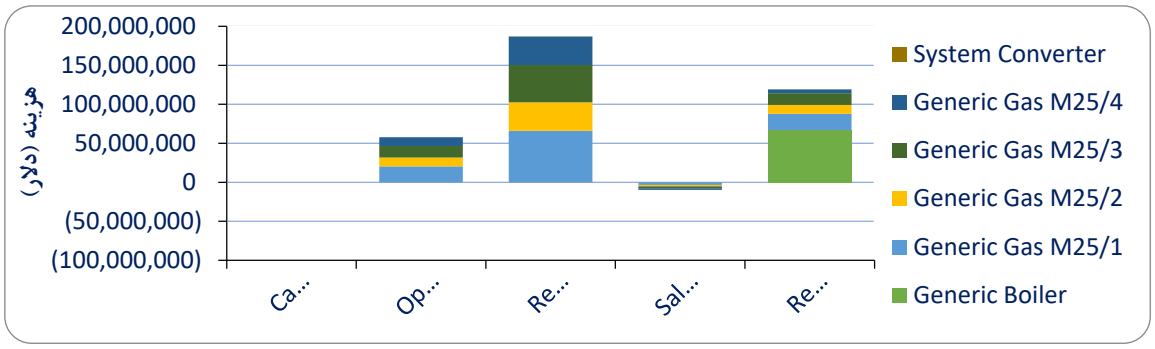


شکل ٤ میزان مصرف برق به تفکیک ماه طی یک سال

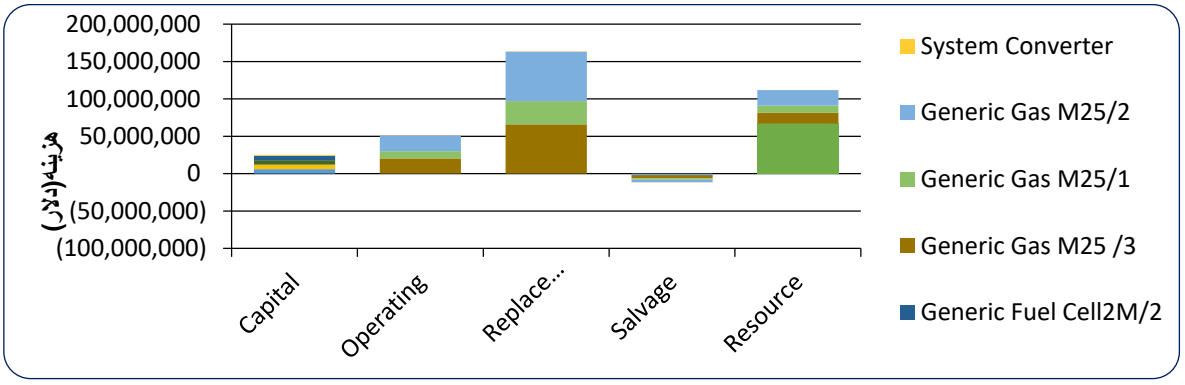
۳. نتایج و بحث

ابتدا، نتایج شبیه‌سازی شامل خلاصه‌ای از هزینه‌های انجام‌شده طی عمر پروژه نمایش داده شده است. شکل ۵ مربوط به سناریوی اول، شکل ۶ مربوط به سناریوی دوم، شکل ۷ مربوط به سناریوی سوم و شکل ۸ مربوط به سناریوی چهارم است.

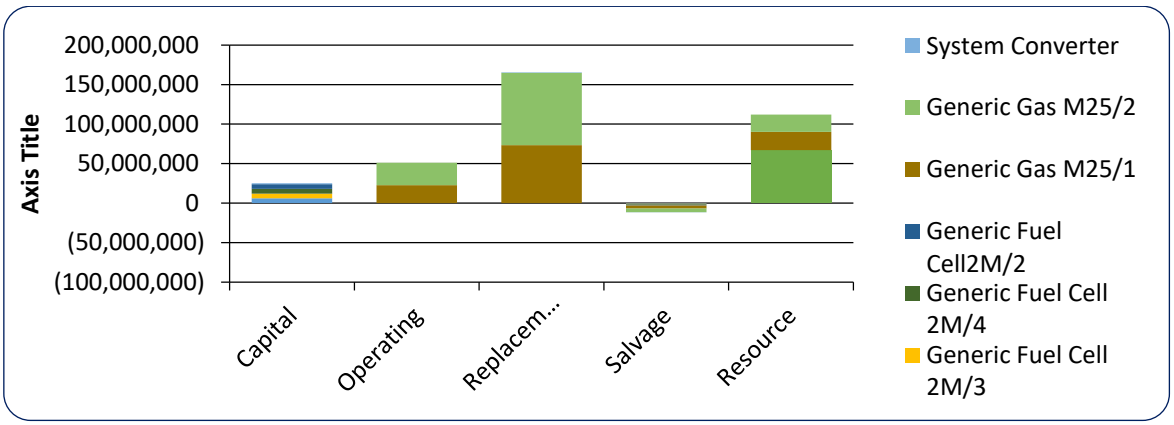
همان‌طور که مشاهده می‌شود، هزینهٔ بهره‌برداری در سناریوی اول به دلیل استفاده از ۴ توربین گازی، از سایر سناریوها بیشتر است. در بررسی هزینه‌های اولیه، هزینهٔ سناریوهای ۱ و ۴ به دلیل نصب بودن توربین‌ها و بویلر، صفر در نظر گرفته شده است. بیشترین هزینهٔ اولیه مربوط به سناریوهای دوم و سوم است که برابر بوده و این افزایش به علت اضافه شدن کانورتر و پیل سوختی است. از نظر اقتصادی، سناریوی دوم به دلیل هزینهٔ بالاتر تعمیرات سالیانه نسبت به سناریوی سوم، گران‌تر است. درآمد حاصل از نجات (Salvage) در هر دو سناریوی اول و دوم تقریباً برابر است؛ به این صورت که در سناریوی اول یک توربین ۲۵ مگاواتی از رده خارج شده و در سناریوی دوم، یک پیل سوختی با ظرفیت ۸ مگاوات. همچنین، در مقایسه هزینهٔ سوخت‌ها، سناریوی اول بیشترین هزینه را دارد و بعد از آن سناریوی چهارم قرار می‌گیرد، در حالی که سناریوی دوم کمترین هزینه را دارد. شایان یادآوری است با در نظر گرفتن تحقیقی که توسط Ding و همکاران انجام شده است، ترکیب توربین گازی و پیل سوختی دارای پایداری در شبکهٔ برق است و از نظر فنی قابلیت اجرا دارد [۲۵].



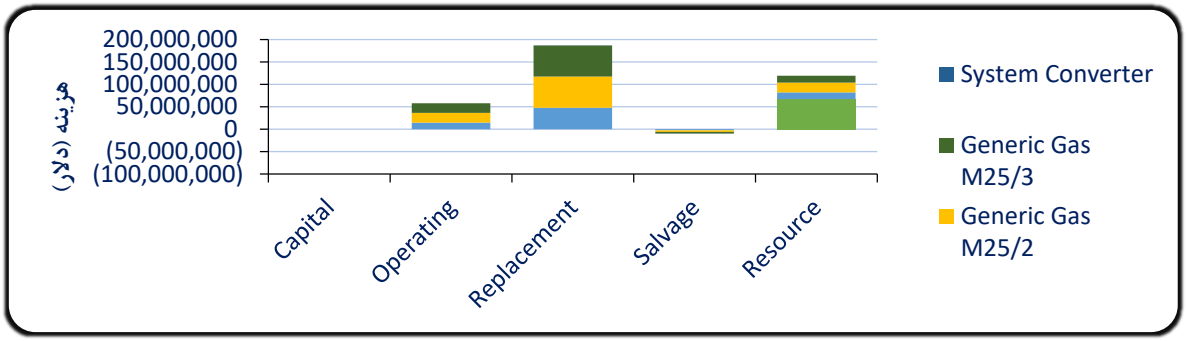
شکل ۵. هزینه‌های مربوط به سناریوی اول



شکل ٦. هزینه‌های مربوط به سناریوی دوم



شکل ۷. هزینه‌های مربوط به سناریوی سوم



شکل ۸. هزینه‌های مربوط به سناریوی چهارم

همان‌طور که مشاهده می‌شود، جدول‌های ۱ تا ۴ میزان تولید هر توربین گازی و پیل سوختی و درصد مشارکت در تأمین انرژی الکتریکی را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهند. در سناریوی دوم، بیشترین توزیع بار بین مصرف‌کننده‌ها وجود دارد که قابلیت برنامه‌ریزی برای تعمیرات و نگهداری را افزایش می‌دهد. جدول ۵ میزان مصرف گاز در توربین‌های گازی را در تمامی سناریوها نشان می‌دهد. همچنین، جدول ۶ میزان گاز مصرفی در بویلرها را در سناریوهای اول تا چهارم ارائه می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به علت استفاده از پیل سوختی در سناریوهای دوم و سوم، مصرف گاز ۶/۵ درصد کاهش یافته است. در نهایت، جدول ۷ میزان مصرف هیدروژن را در سناریوهای دوم و سوم نشان می‌دهد. شایان یادآوری است پیل سوختی درنظرگرفته‌شده برای شبیه‌سازی از نوع SOFC و مطابق با پژوهشی که توسط Huang و همکاران انجام شده است [۲۶].

جدول ۱. تولید برق در سناریوی اول

تولیدکننده	مقدار تولید (kWh/y)	درصد مشارکت
توربین گازی شمارهٔ ۱	۱۵۷۶۸۰۰۰۰	۴۰٫۷
توربین گازی شمارهٔ ۲	۸۷۶۰۰۰۰۰	۲۲٫۶
توربین گازی شمارهٔ ۳	۱۱۲۹۵۸۸۴۳	۲۹٫۲
توربین گازی شمارهٔ ۴	۲۹۰۹۷۸۴۹	۷٫۵۱
کل	۳۸۷۳۳۶۶۹۲	۱۰۰

جدول ۲. تولید برق در سناریوی دوم

تولیدکننده	مقدار تولید (kWh/y)	درصد مشارکت
پیل سوختی شمارهٔ ۱	۱۵۶۷۲۰۰۰	۴٫۰۱
پیل سوختی شمارهٔ ۲	۱۴۶۶۴۰۰۰	۳٫۷۵
پیل سوختی شمارهٔ ۳	۱۴۵۹۲۰۰۰	۳٫۷۳
پیل سوختی شمارهٔ ۴	۱۳۸۹۶۰۰۰	۳٫۵۵
توربین گازی شمارهٔ ۱	۷۴۴۶۰۰۰۰	۱۹
توربین گازی شمارهٔ ۲	۱۵۷۶۸۰۰۰۰	۴۰٫۳
توربین گازی شمارهٔ ۳	۱۰۰۰۴۵۸۱۳	۲۵٫۶
کل	۳۸۷۳۳۶۶۹۲	۱۰۰

جدول ۳. تولید برق در سناریوی سوم

تولیدکننده	مقدار تولید (kWh/y)	درصد مشارکت
پیل سوختی شمارهٔ ۱	۱۵۶۷۲۰۰۰	۴٫۰۱
پیل سوختی شمارهٔ ۲	۱۴۶۶۴۰۰۰	۳٫۷۵
پیل سوختی شمارهٔ ۳	۱۴۵۹۲۰۰۰	۳٫۷۳
پیل سوختی شمارهٔ ۴	۱۳۸۹۶۰۰۰	۳٫۵۵
توربین گازی شمارهٔ ۱	۱۷۵۲۰۰۰۰۰	۴۴٫۸
توربین گازی شمارهٔ ۲	۱۵۲۹۸۵۸۱۳	۴۰٫۱
کل	۳۸۷۳۳۶۶۹۲	۱۰۰

جدول ٤. تولید برق در سناریوی چهارم

تولیدکننده	مقدار تولید (kWh/y)	درصد مشارکت
توربین گازی شمارهٔ ۱	۱۱۳۸۸۰۰۰۰	۲۹,۴
توربین گازی شمارهٔ ۲	۱۶۶۴۴۰۰۰۰	۴۳
توربین گازی شمارهٔ ۳	۱۰۷۰۱۶۶۹۲	۲۷,۶
کل	۳۸۷۳۳۶۶۹۲	۱۰۰

جدول ٥. میزان مصرف گاز در توربین‌های گازی در سناریوی اول تا چهارم

مقدار	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم	واحد
کل سوخت مصرف‌شده	۱۳۴۶۶۵۶۴۱	۱۱۵۸۲۴۸۸۶	۱۱۶۰۴۳۸۸۶	۱۳۴۶۶۵۶۴۱	m^3
میانگین مصرف سوخت در روز	۳۶۸۹۴۷	۳۱۷۳۲۸	۳۱۷۹۲۸	۳۶۸۹۴۷	m^3/day
میانگین مصرف سوخت در ساعت	۱۵۳۷۳	۱۳۲۲۲	۱۳۲۴۷	۱۵۳۷۳	$m^3/hour$

جدول ٦. میزان گاز مصرفی در بویلرها در سناریوی اول تا چهارم

مقدار	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم	واحد
کل سوخت مصرف‌شده	۱۷۲۶۷۷۰۳۰	۱۷۲۸۳۳۹۱۸	۱۷۲۶۹۹۰۳۷	۱۷۲۶۷۷۰۳۰	m^3
میانگین مصرف سوخت در روز	۴۷۳۰۸۸	۴۷۳۵۱۸	۴۷۳۱۴۸	۳۶۸۹۴۷	m^3/day
میانگین مصرف سوخت در ساعت	۱۹۷۱۲	۱۹۷۳۰	۱۹۷۱۵	۱۹۷۱۲	$m^3/hour$

جدول ۷. میزان مصرف هیدروژن در سناریوی دوم و سوم

مقدار	سناریوی دوم	سناریوی سوم	واحد
کل سوخت مصرف‌شده	۳۶۴۷۰۸۸	۳۶۴۷۰۸۸	m^3
میانگین مصرف سوخت در روز	۹۹۹۲	۹۹۹۲	m^3/day
میانگین مصرف سوخت در ساعت	۴۱۶	۴۱۶	$m^3/hour$

میزان انتشار آلاینده‌ها در هر سناریو در جدول ۸ نشان داده شده است. میزان آلاینده‌ها در توربین گازی بر اساس داده‌های آنالیزور (تحلیل‌گر) نصب‌شده در اگزوز توربین‌های نیروگاه پتروشیمی شازند و بر اساس مقادیر واقعی موجود در نظر گرفته شده است. همچنین، میزان آلایندگی پیل سوختی بر اساس پژوهشی که توسط Abdelkareem انجام شده، به عنوان ورودی در نرم‌افزار لحاظ شده است [۲۷]. همان‌گونه که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، میزان انتشار آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن (Nitrogen Oxides) ۱۵ درصد کاهش یافته است. همچنین انتشار دی‌اکسید کربن (Carbon Dioxide) به میزان ۹ درصد، مونوکسید کربن (Carbon Monoxide) به میزان ۱۴/۶ درصد، هیدروکربن‌های نسوخته (Unburned Hydrocarbons) به میزان ۱۸ درصد، و ذرات معلق (Particulate Matter) به میزان ۱۱ درصد در سناریوی دوم (و نیز سوم) نسبت به دو سناریوی دیگر کاهش یافته است.

جدول ۸. میزان انتشار آلاینده‌ها در سناریوهای مختلف

آلاینده	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم	واحد
دی‌اکسید کربن	۵۹۵۰۹۱۶۳۴	۵۴۱۹۵۹۹۵۲	۵۴۲۰۸۴۴۲۴	۵۹۵۰۹۱۶۳۴	kg/yr
مونوکسید کربن	۸۷۸۳۶۸	۷۵۰۸۱۲	۷۵۴۹۵۴	۸۷۸۳۶۸	kg/yr
هیدروکربن‌های نسوخته	۳۴۵۴	۲۸۵۲	۲۸۵۰	۳۴۵۴	kg/yr
ذرات معلق	۵۸۹۱۰	۵۲۰۷۴	۵۲۰۹۰	۵۸۹۱۰	kg/yr
اکسیدهای نیتروژن	۱۸۶۵۷۴۹	۱۵۹۸۱۸۵	۱۶۰۱۱۰۶	۱۸۶۵۷۴۹	kg/yr

با توجه به جدول‌های ۱ تا ۴، مشاهده می‌شود که شبکه در شرایطی که هر چهار توربین گازی در سرویس باشند، پایدار است. اما در صورت قطع ناگهانی یا خروج اضطراری یکی از توربین‌ها از مدار، شبکه به سناریوی چهارم تبدیل می‌شود. همچنین، زمانی

که سه توربین گازی و چهار واحد پیل سوختی در سرویس باشند، اگر یکی از توربین‌های گازی تریپ کند، سناریوی دوم به سناریوی سوم تغییر می‌کند. از آنجا که سناریوهای سوم و چهارم در حالت نرمال پایدار هستند، سناریوهای اول و دوم به دلیل اینکه با اولین خطا ناپایدار نمی‌شوند، قابلیت اجرا در مجتمع را دارند. با این‌حال، سناریوهای سوم و چهارم با اولین خطا در یکی از توربین‌های گازی، به اورلود شبکهٔ برق منجر می‌شوند و کل مجموعه در خطر تریپ سراسری قرار می‌گیرد. این نوع تریپ سراسری برای صنایع نفت هزینه‌های زیادی به دنبال دارد. بنابراین، سناریوی چهارم از نظر فنی و اقتصادی کنار گذاشته می‌شود و در ادامه به آن اشاره نخواهد شد.

در بررسی سناریوی اول، تقریباً ۳۰ درصد از ظرفیت سیستم تحت بار قرار نمی‌گیرد. برای رفع این مشکل، از سناریوی دوم به عنوان روش بهسازی سیستم استفاده شده است. از نظر فنی، سناریوی دوم به عنوان ایمن‌ترین و مناسب‌ترین سیستم با حساسیت بالا در نظر گرفته می‌شود.

۴. نتیجه گیری

تحقیق حاضر نشان می‌دهد ترکیب پیل‌های سوختی با هیدروژن و توربین‌های گازی در شبکه‌های جزیره‌ای می‌تواند به عنوان یک راه‌حل پایدار و اقتصادی برای تأمین انرژی در نظر گرفته شود.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد استفاده از چهار سناریوی مختلف در این طراحی، قابلیت پایداری شبکه را در شرایط مختلف بهینه می‌کند. در سناریوی اول که از چهار توربین گازی استفاده شده، شبکه پایدار است؛ اما به دلیل حدود ۳۰ درصد ظرفیت استفاده‌نشده، کارایی بهینه‌ای ندارد. در سناریوی دوم با ترکیب سه توربین گازی و چهار واحد پیل سوختی، بهره‌وری شبکه افزایش یافته و هزینه‌های سوخت و تعمیرات به حداقل می‌رسد. همچنین، سناریوی دوم با کاهش مصرف گاز به میزان ۶/۵ درصد و کاهش انتشار آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن به میزان ۱۵ درصد، دی‌اکسید کربن به میزان ۹ درصد، مونوکسید کربن به میزان ۱۴/۶ درصد، هیدروکربن‌های نسوخته به میزان ۱۸ درصد، و ذرات معلق به میزان ۱۱ درصد نسبت به سناریوی اول، به عنوان گزینه‌ای بهینه معرفی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد استفاده از پیل سوختی در سناریوهای دوم و سوم، مصرف سوخت و هزینه‌های زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. در نهایت، سناریوی دوم به دلیل پایداری بالا و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای تأمین انرژی در شبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد می‌شود. همچنین پیشنهادهای این تحقیق به شرح زیر است:

۱. استفاده از هیدروژن تولیدشده از پساب مجتمع: به‌منظور کاهش کربن در محصولات خروجی و بهبود محیط زیست، پیشنهاد می‌شود که هیدروژن مورد استفاده در پیل‌های سوختی علاوه بر تأمین از واحد الفین، از طریق الکترولیز آب پساب مجتمع نیز تأمین شود. این رویکرد به صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش انتشار کربن، و بهبود کیفیت محیط زیست کمک می‌کند.

۲. توجه به هزینه‌های تعمیرات و مدیریت پیچیده‌تر: هزینه‌های تعمیرات و مدیریت پیچیده‌تر سیستم‌های ترکیبی باید به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از سناریوهایی که نیاز به مدیریت پیچیده‌تری دارند باید با توجه به هزینه‌های مربوطه و مزایای زیست‌محیطی ارزیابی شود.

۳. بازنگری در مدیریت بارهای الکتریکی: تغییرساعت کاری بعضی از بارهای الکتریکی و محدودیت اضافه شدن بارهای غیر ضروری که موجب کاهش میانگین مصرف و پیک مصرف شود.

۴. بهبود عملکرد سیستم: برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها، بهینه‌سازی بیشتر سیستم‌های ترکیبی و ارتقای فناوری‌های مربوطه ضروری است. بررسی مداوم و ارزیابی عملکرد سیستم‌های انرژی به منظور افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها باید در برنامه‌های آینده گنجانده شود.

در نهایت، این تحقیق تأکید می‌کند که ترکیب فناوری‌های نوین انرژی می‌تواند راه‌حل‌های مؤثری برای تأمین پایدار انرژی ارائه دهد، به شرطی که تمامی جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، و مدیریتی به‌دقت مورد توجه قرار گیرد.

منابع

[1] Hasan T, Emami K, Shah R, Hassan NMS, Belokoskov V, Ly M. Techno-economic assessment of a hydrogen-based islanded microgrid in North-east. Energy Reports. 2023;9:3380-3396.

[2] Hoseinzadeh S, Garcia DA. Techno-economic assessment of hybrid energy flexibility systems for islands' decarbonization: A case study in Italy. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022;51:101929.

[3] Sagel VN, Rouwenhorst KH, Faria JA. Green ammonia enables sustainable energy production in small island developing states: A case study on the island of Curaçao. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022;161:112381.

[4] Zhang X, Wei QS, Oh BS. Cost analysis of off-grid renewable hybrid power generation system on Ui Island, South Korea. International Journal of Hydrogen Energy. 2022;47(27):13199-212.

[5] Babaei R, Ting DS, Carriveau R. Optimization of hydrogen-producing sustainable island microgrids. International Journal of Hydrogen Energy. 2022;47(32):14375-92.

[6] Tariq AH, Kazmi SAA, Hassan M, Ali SAM, Anwar M. Analysis of fuel cell integration with hybrid microgrid systems for clean energy: A comparative review. Int J Hydrogen Energy. 2024;52(D):1005-1034.

[7] Gandomzadeh M, Mahmoudian YS, Mosayyebi A, Zandi M. Development scenarios for electrical energy storage in Iran with Cross-Impact Balance method. Journal of Sustainable Energy Systems .2022;1(4), 373-96.

[8] Jami M, Parsay A, Gandomzadeh M, Mosayyebi A, Zandi M. Future energy modeling pathway in Iran: Scenario analysis using Cross-Impact Balance method. Journal of Sustainable Energy Systems. 2024;3(2),193-208.

[9] Calise F, Cappiello FL, Cimmino L, d'Accadia MD, Vicidomini M. Renewable smart energy network: A thermoeconomic comparison between conventional lithium-ion batteries and reversible solid oxide fuel cells. Renew Energy. 2023;214:74-95.

[10] Hossain MB, Ahmed F, Choudhury SM, Karim Z. Advancement of fuel cells and electrolyzers technologies and their applications to renewable-rich power grids. Journal of Energy Storage. 2023;62:106842.

[11] Trapani D, Marocco P, Ferrero D, Lindberg KB, Sundseth K, Santarelli M. The potential of hydrogen-battery storage systems for a sustainable renewable-based electrification of remote islands in Norway. J Energy Storage. 2024;75:109482.

[12] Akrami E, Gholami A, Ameri M, Zandi M. Integrated an innovative energy system assessment by assisting solar energy for day and night time power generation: Exergetic and exergo-economic investigation. Energy Conversion and Management. 2018;175:21-32.

[13] Eslami S, Gholami A, Bakhtiari A, Zandi M, Noorollahi Y. Experimental investigation of a multi-generation energy system for a nearly zero-energy park: A solution toward sustainable future. Energy Conversion and Management. 2019;200:112107.

[14] Akrami E, Khazaee I, Gholami A. Comprehensive analysis of a multi-generation energy system by using an energy-exergy methodology for hot water, cooling, power and hydrogen production. Applied Thermal Engineering. 2018;129:995-1001.

[15] Toudefallah M, Stathopoulos P. Techno-economic optimization of hybrid renewable energy system for islands application. Sustain Futures. 2024;8:100281.

[16] Shabar NM, Afifi OA, Fouda MH, Abdelsalam RA, Abdallah YS, El-Deib AA. Dynamic modeling and control of hybrid AC/DC microgrid with green hydrogen energy storage. In: 2023 IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE); Luxor, Egypt. IEEE; 2023. doi:10.1109/CPERE56564.2023.10119606.

[17] Yu N, Duan W, Fan X. Hydrogen-fueled microgrid energy management: Novel EMS approach for efficiency and reliability. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;80:1466-1476.

[18] Akinyele D, Olabode E, Amole A. Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems. Inventions. 2020;5(3):42.

[19] Fazal S, Haque ME, Arif MT, Gargoom A, Oo AMT. Grid integration impacts and control strategies for renewable-based microgrid. Sustain Energy Technol Assess. 2023;56:103069.

[20] Mojumder MFH, Islam T, Chowdhury P, Hasan M, Takia NA, Chowdhury NUR, Farrok O. Techno-economic and environmental analysis of hybrid energy systems for remote areas: A sustainable case study in Bangladesh. Energy Conversion and Management: X. 2024;23:100664.
[21] McLarty D, Brouwer J, Samuelsen S. Fuel cell–gas turbine hybrid system design part II: Dynamics and control. J Power Sources. 2014;254:126-136.
[22] Thakkar N, Paliwal P. Hydrogen storage-based micro-grid: A comprehensive review on technology, energy management and planning techniques. International Journal of Green Energy. 2023;20(4):445-463.
[23] Chen H, Gao L, Zhang Z, Li H. Optimal energy management strategy for an islanded microgrid with hybrid energy storage. Journal of Electrical Engineering & Technology. 2021;16:1313-1325.
[24] Jia K, Liu C, Li S, Jiang D. Modeling and optimization of a hybrid renewable energy system integrated with gas turbine and energy storage. Energy Convers Manag. 2023;279:116763.
[25] Ding X, Sun W, Harrison G.P, Lv X, Weng Y. Multi-objective optimization for an integrated renewable, power-to-gas and solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system in microgrid. Energy. 2020; 213: 118804.
[26] Huang S, Yang C, Chen H, Zhou N, Tucker D. Coupling impacts of SOFC operating temperature and fuel utilization on system net efficiency in natural gas hybrid SOFC/GT system. Case Studies in Thermal Engineering 2022; 31: 101868.
[27] Abdelkareem M.A., Elsaid K., Wilberforce T., Kamil M., Sayed E.T., Olabi A. Environmental aspects of fuel cells: A review. Science of The Total Environment. 2021; 752: 141803.