



The University of Tehran Press

Performance Evaluation of Renewable Energy Systems for Green Hydrogen Production in Southern Iran: A Case Study of Qeshm Island

Arash Kalantari¹ | Majid Soltani^{2*}

1. M.Sc. Graduate in Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: arashkalantari1998@gmail.com

2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: msoltani@kntu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 22 May 2025

Revised: 21 July 2025

Accepted: 26 September 2025

Published Online: 15 January 2025

Keywords:

Wind energy,
Solar energy,
Techno-economic analysis,
HOMER software,
Green hydrogen.

ABSTRACT

The transition toward sustainable energy systems necessitates integrated solutions that reduce reliance on fossil fuels while enabling large-scale clean fuel production. This study presents a techno-economic assessment and optimization of a grid-connected hybrid wind-solar system incorporating green hydrogen production for a research facility on Qeshm Island, Iran. Using the HOMER software, system performance was simulated and evaluated under multiple operational scenarios. The optimal configuration supplies over 90% of the site's electricity demand from renewable sources, produces approximately 4,091 kg of hydrogen annually, and exports a substantial surplus of electricity to the grid, resulting in negative net annual CO₂ emissions. Sensitivity analysis indicates that increasing electrical or hydrogen demand improves economic performance and lowers hydrogen production costs, whereas excessive electrolyzer oversizing at low loads reduces investment returns. Wind turbine capital costs were found to have a pronounced effect on economic viability, highlighting the importance of cost-effective equipment selection. The proposed system demonstrates high replicability due to its clean energy reliance, operational adaptability under varying load conditions, and significant emissions mitigation potential. These findings provide a robust blueprint for the deployment of hybrid renewable-hydrogen infrastructures in similar geographical and climatic contexts.

Cite this article: Kalantari, A. & Soltani, M. (2026). Performance Evaluation of Renewable Energy Systems for Green Hydrogen Production in Southern Iran: A Case Study of Qeshm Island. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 143-164. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.397990.1165>



© Arash Kalantari, Majid Soltani **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.397990.1165>

Introduction

The rising global population and increasing industrialization have significantly escalated energy demand, which continues to be largely met by depleting fossil fuel resources—resulting in severe environmental consequences. This underscores the urgent need to transition toward clean, renewable, and sustainable energy sources. Despite the global expansion of renewable energy capacity, the intermittent nature of these sources often limits efficiency and reliability. Hybrid Energy Systems (HES), which combine multiple energy sources, offer a viable solution to improve performance and resilience. Hydrogen has gained attention as a promising clean energy carrier due to its low emissions and its potential to reduce reliance on fossil fuels. However, significant challenges remain regarding its production, storage, and integration with renewable energy systems. Accurate system modeling is essential for evaluating feasibility and designing optimal configurations. Intelligent control techniques such as neural networks, fuzzy logic, and metaheuristic optimization have been widely applied in HES analysis. Software tools like HOMER and RETScreen have been extensively used for technical and economic evaluation of hybrid systems in various contexts. Several studies have investigated

hydrogen production from surplus renewable energy, aiming to enable combined electricity and fuel generation. Building upon this foundation, the present study focuses on optimizing a hybrid renewable energy system with integrated hydrogen production for a research facility on Qeshm Island, Iran, using the HOMER software. The findings underscore the potential of localized, sustainable energy solutions in supporting critical infrastructure and promoting energy independence.

Methodology

A comprehensive technical and economic assessment of a Hybrid Energy System (HES) requires detailed analysis of its key components. As illustrated in Figure 1, the proposed system integrates photovoltaic (PV) panels, wind turbines, an electrolyzer, a converter, an optional grid connection, and a hydrogen storage tank. Its primary goal is to meet the electrical demand of a research facility, with excess energy directed toward green hydrogen production for storage and future use. The system was modeled and optimized using HOMER software, developed by the U.S. National Renewable Energy Laboratory. HOMER allows simulation of both grid-connected and off-grid configurations, using inputs such as load profiles, renewable resource data, technical specifications, and economic parameters. Its flexibility and comprehensive database make it a suitable choice compared to alternatives like RETScreen, PVSOL, or MATLAB. The case study is based on a proposed research center near Qeshm Island, Iran (26.97°N, 56.10°E). Resource data—solar radiation, wind speed, and ambient temperature—were extracted from NASA's meteorological database. The annual average solar radiation is 5.75 kWh/m²/day, and wind speed is 3.77 m/s, supporting year-round multi-source energy generation. Due to the unavailability of actual load profiles, a synthetic daily demand of 2,422 kWh with a peak of 399.74 kW was modeled in HOMER. The consumption profile reflects educational and research activity patterns, with a daily load fluctuation of 10% and a load factor of 0.25. The hydrogen demand was set at 11.27 kg/day, with short-term variability of up to 20%, ensuring a realistic and dynamic analysis of H₂ consumption.

Results

The HOMER software was used to optimize the configuration of a hybrid energy system consisting of solar panels, wind turbines, grid connection, and hydrogen storage. Wind turbines accounted for the largest share of system costs. The optimal system had an initial investment of \$1.59 million, a total lifecycle cost of \$1.21 million, and a levelized cost of electricity (LCOE) of \$0.04229/kWh. About 90% of the system's energy was supplied by renewable sources. Solar panels and wind turbines contributed 10.2% and 80.7% of the annual electricity production (totaling over 2.2 GWh), respectively. Only 9.11% of electricity was purchased from the grid, indicating a nearly off-grid performance. The electrolyzer, with a capacity of 5.44 kW, produced around 4,091 kg of hydrogen per year. The hydrogen storage tank, with a 40 kg capacity, maintained stable levels throughout the year. Emissions were significantly reduced, with some pollutants dropping to zero. Compared to similar studies, this dual-purpose system (electricity + hydrogen) had slightly higher costs but demonstrated strong sustainability and economic viability. Future cost reductions are expected with technological advancements, making such systems more competitive.

Conclusion

The integration of renewable energy systems for hydrogen production offers a promising pathway to reduce carbon emissions and decrease reliance on fossil fuel imports. This study analyzed a hybrid grid-connected energy system with hydrogen production capability, located near the Islamic Azad University on Qeshm Island, Iran. Using HOMER software, various renewable energy sources were assessed to identify the most cost-effective and sustainable configuration. The optimal system—comprising wind, solar, and grid connection—achieved a low levelized cost of electricity (LCOE) of \$0.04229/kWh and a high renewable energy contribution of 90%. These findings highlight the system's technical and economic feasibility for green energy generation and hydrogen production. Future advancements in renewable technologies can further enhance the viability of such systems, especially in urban and national-scale applications. Feasibility studies like this can serve as valuable references for policymakers, investors, and stakeholders aiming to develop hydrogen infrastructure. Additionally, implementing sensitivity analysis and smart control strategies in future studies can improve performance and flexibility. The outcomes of this research may also contribute to the validation and commercialization of green hydrogen production systems.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

ارزیابی عملکرد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن سبز در جنوب ایران: مطالعه موردی در جزیره قشم

آرش کلانتری^۱ | مجید سلطانی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: gmail.com@1998arashkalantari

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: msoltani@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

انرژی بادی،

انرژی خورشیدی،

تحلیل فنی - اقتصادی،

نرم‌افزار هومر،

هیدروژن سبز.

در راستای توسعه سامانه‌های انرژی پایدار و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، این پژوهش به امکان‌سنجی و بهینه‌سازی یک سامانه ترکیبی بادی - خورشیدی متصل به شبکه با قابلیت تولید هیدروژن سبز پرداخته است. این سامانه برای یک مرکز تحقیقاتی در جزیره قشم، ایران، با استفاده از نرم‌افزار HOMER شبیه‌سازی و از نظر فنی و اقتصادی ارزیابی شد. نتایج نشان داد پیکربندی بهینه بیش از ۹۰ درصد نیاز برق را از منابع تجدیدپذیر تأمین کرده، سالانه حدود ۴۰۹۱ کیلوگرم هیدروژن تولید می‌کند و مازاد برق قابل توجهی را به شبکه تزریق می‌کند که باعث کاهش خالص انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقیاس منطقه‌ای می‌شود. مقدار خالص انتشار سالانه دی‌اکسید کربن منفی بوده و بیانگر جایگزینی تولید برق فسیلی با انرژی پاک است. تحلیل حساسیت نشان داد افزایش بار الکتریکی یا هیدروژنی، بهره‌وری اقتصادی را بهبود می‌بخشد و هزینه تولید هیدروژن را کاهش می‌دهد، اما افزایش بیش از حد ظرفیت الکترولایزر در بارهای پایین بازده سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد. همچنین، تغییرات هزینه سرمایه‌گذاری توربین بادی اثر قابل توجهی بر شاخص‌های اقتصادی دارد و انتخاب تجهیزات با هزینه مناسب برای حفظ صرفه اقتصادی ضروری است. مدل پیشنهادی به دلیل اتکا به منابع پاک، انعطاف‌پذیری در شرایط بار مختلف و توانایی کاهش آلودگی، قابلیت تکرارپذیری بالایی دارد و می‌تواند الگوی مناسبی برای توسعه زیرساخت‌های هیدروژن سبز در مناطق مشابه باشد.

استناد: کلانتری، آرش و سلطانی، مجید (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن سبز در جنوب ایران: مطالعه موردی در جزیره قشم. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۱) ۱۴۳-۱۶۴.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.397990.1165>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© آرش کلانتری، مجید سلطانی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.397990.1165>



۱. مقدمه

در سراسر جهان، رشد جمعیت و گسترش صنعتی شدن به افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی منجر شده است. این تقاضا عمدتاً از طریق سوخت‌های فسیلی رو به کاهش تأمین می‌شود، که پیامدهای زیست‌محیطی جدی و نگرانی‌های گسترده‌ای را به دنبال دارد. از این رو، اتخاذ راهبردهای نوین برای ترویج استفاده‌ای پایدارتر از منابع انرژی پاک، سازگار با محیط زیست و تجدیدپذیر، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید. در سال‌های اخیر، پیشرفت چشمگیری در زمینه منابع انرژی تجدیدپذیر در سطح جهانی حاصل شده است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA)، ظرفیت جهانی انرژی تجدیدپذیر در سال گذشته با رشد قابل توجهی معادل ۹/۶ درصد افزایش یافت؛ به بیانی ۲۹۵ گیگاوات به ظرفیت جهانی افزوده شد که در مجموع به ظرفیت ۳۳۷۲ گیگاوات رسیده است [۱]. با وجود این پیشرفت، نوسانات ذاتی منابع تجدیدپذیر مشکلاتی را در زمینه بهره‌وری و پایداری انرژی ایجاد می‌کند. برای غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از چند منبع انرژی به صورت ترکیبی، که با عنوان «سامانه‌های انرژی هیبریدی» شناخته می‌شوند، به منظور دستیابی به پایداری انرژی و ارتقای بازدهی، راهکار مؤثری تلقی می‌شود [۲]. علاوه بر منابع انرژی تجدیدپذیر موجود، هیدروژن نیز به عنوان عاملی تحول‌آفرین در بخش انرژی مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۳]. این عنصر می‌تواند نسبت به سایر گزینه‌ها، انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد و وابستگی به سوخت‌های فسیلی وارداتی را به حداقل برساند. ذخیره‌سازی هیدروژن شامل روش‌های متنوعی از جمله فشردن‌سازی، مایع‌سازی و ذخیره‌سازی در حالت جامد است که هر یک با چالش‌ها و مزایای خاص خود همراه هستند. وجود تأسیسات ذخیره‌سازی مناسب، تضمین‌کننده تأمین پیوسته هیدروژن برای کاربردهای متنوعی نظیر حمل‌ونقل، صنایع و تولید برق است و در نتیجه، تاب‌آوری سامانه را در برابر نوسانات منابع تجدیدپذیر افزایش می‌دهد. با این حال، چالش اصلی در این مسیر، تولید هیدروژن به صورت خالص است [۳]. یکپارچه‌سازی مؤثر تولید هیدروژن با منابع انرژی تجدیدپذیر، افقی نو برای تولید پایدار و کارآمد هم‌زمان برق و هیدروژن خالص فراهم می‌سازد. این نوع ادغام می‌تواند راه‌حلی بالقوه برای دستیابی به پایداری بلندمدت و ارتقای بهره‌وری انرژی در ساختار در حال تحول صنعت انرژی باشد.

پیش از ورود به مرحله طراحی، مدل‌سازی یک سامانه تولید انرژی امری ضروری است تا تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و تحلیل‌های پیش‌امکان‌سنجی به‌درستی انجام گیرد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند تکنیک‌های کنترل هوشمند در تحلیل سامانه‌های هیبریدی به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تکنیک‌ها به دلیل قابلیت انطباق سریع با شرایط پویا و متغیر، به عنوان روش‌های هوشمند شناخته می‌شوند و به کنترل و تحلیل کارآمد سامانه‌ها می‌انجامند. شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختارهای استنتاج فازی - عصبی تطبیقی^۱، کاربردهای منطق فازی و روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، از جمله این تکنیک‌های کنترل هوشمند به شمار می‌آیند. هدف اصلی این مطالعات، شناسایی مفاهیم فنی و اقتصادی بهینه برای طراحی سامانه‌های انرژی هیبریدی است [۴-۶]. علاوه بر این روش‌ها، پژوهشگران از چندین نرم‌افزار تجاری و متن‌باز برای شبیه‌سازی ویژگی‌های فنی و اقتصادی سامانه‌های انرژی هیبریدی بهره گرفته‌اند؛ از جمله می‌توان به نرم‌افزارهایی مانند HOMER (بهینه‌سازی هیبریدی منابع چندگانه انرژی) و RETScreen اشاره کرد [۷-۹]. در مطالعات متعددی، ترکیب منابع مختلف انرژی برای اهداف گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. به‌ویژه سامانه‌های انرژی هیبریدی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، به منظور تولید برق، مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند [۱۰-۱۲].

نرم‌افزار HOMER و سایر نرم‌افزارهای مشابه برای تحلیل اقتصادی و امکان‌سنجی در مکان‌های متصل به شبکه و خارج از شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در برخی مطالعات، فضاهای آموزشی نیز به عنوان محل‌هایی برای تولید انرژی هیبریدی ارزیابی شده‌اند [۱۳-۱۵]. اگرچه این مطالعات دیدگاه‌ها و روش‌های متفاوتی را در بر می‌گیرند، هدف اصلی در سامانه‌های هیبریدی، حفظ پیوستگی و بهره‌وری انرژی در بالاترین سطح ممکن است. در حالی که پژوهش‌های متعددی به بررسی ترکیب‌های مختلف سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر پرداخته‌اند، مطالعاتی نیز به ادغام تولید هیدروژن از طریق فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در مقیاس‌های مختلف تمرکز دارند [۱۶-۲۱]. انرژی مازاد تولیدشده به منظور تولید هیدروژن مورد استفاده قرار

می‌گیرد. هیدروژن تولیدشده می‌تواند در کاربردهای متنوعی نظیر ذخیره‌سازی انرژی، حمل‌ونقل، صنعت و سایر حوزه‌ها مورد بهره‌برداری قرار گیرد. هدف اصلی مطالعه حاضر، تلفیق انرژی تجدیدپذیر با تولید هیدروژن و بهینه‌سازی فرایند تولید انرژی از طریق انتخاب پیکربندی فنی و اقتصادی بهینه با استفاده از نرم‌افزار HOMER است [۲۲].

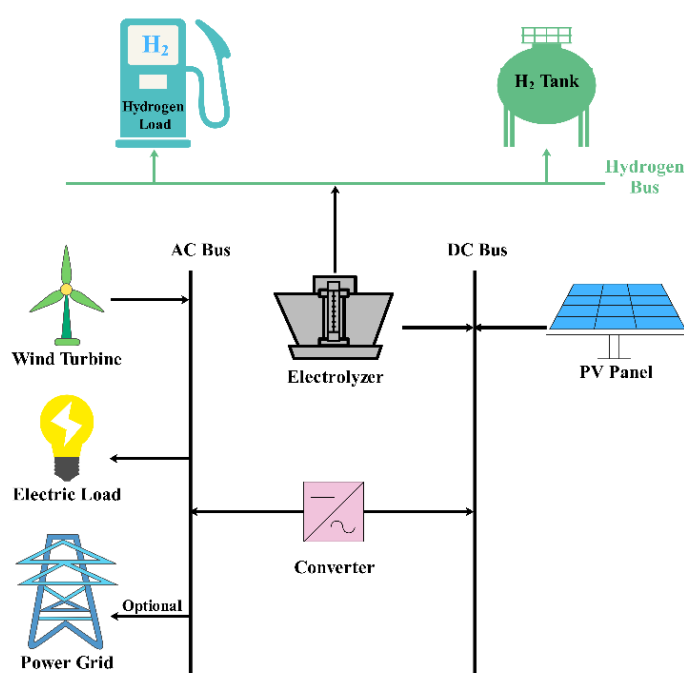
در دهه‌های اخیر، رشد نگرانی‌ها نسبت به تغییرات اقلیمی و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، توجه گسترده‌ای را به سمت توسعه سامانه‌های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر جلب کرده است. در این راستا، پژوهش‌های متعددی با هدف طراحی، بهینه‌سازی و ارزیابی فنی - اقتصادی سامانه‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و سوخت‌های پاک، به‌ویژه هیدروژن، صورت گرفته‌اند. صدیقی و دینسر [۲۳] به بررسی استفاده هم‌زمان از انرژی‌های خورشیدی و بادی برای تولید هیدروژن و الکتریسیته پرداختند. در این پژوهش، برق تولیدشده از منابع تجدیدپذیر، به طور هم‌زمان برای فرایند الکترولیز آب و جداسازی نیتروژن موجود در هوا جهت تولید آمونیاک به کار گرفته شد. از آمونیاک حاصل‌شده نیز در زمان‌های کمبود انرژی، برای تولید برق در یک پیل سوختی استفاده شد. این سامانه یکپارچه، به عنوان رویکردی نوین در استفاده ترکیبی از منابع انرژی و تبدیل آن‌ها به حامل‌های انرژی چندمنظوره معرفی شد. شروین [۲۴] با انجام یک تحلیل جامع فنی - اقتصادی، آینده تولید سوخت‌های الکتریکی را در بستر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، انرژی بادی و خورشیدی به صورت مجزا برای انجام فرایند الکترولیز و تولید هیدروژن استفاده شد. سپس با استفاده از واکنش‌های شیمیایی بین هیدروژن تولیدشده و دی‌اکسید کربن استخراج‌شده از هوا، سوخت‌های مایع شامل سوخت جت، نفتا و دیزل سنتز شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد کاهش هزینه‌های الکترولایزر و برق تجدیدپذیر، شرط اساسی برای اقتصادی شدن این فناوری است. جهانگیری و همکاران [۲۵] با هدف بررسی عملکرد یک سامانه ترکیبی در مقیاس خانگی، تولید هم‌زمان برق، گرما و هیدروژن را در شهر آبادان مورد مطالعه قرار دادند. این سامانه با بهره‌گیری از انرژی بادی، خورشیدی، زیست‌توده و پیل سوختی و با استفاده از نرم‌افزار HOMER مدل‌سازی شد. یافته‌های پژوهش یادشده نشان داد کمترین هزینه تولید هیدروژن برابر با ۳۵/۴۴ دلار به ازای هر کیلوگرم بوده و بهره‌برداری سالانه حداقل ۳۰ درصدی از زیست‌توده، بهره‌وری اقتصادی سامانه را تضمین می‌کند. در پژوهشی دیگر، زاهدی و همکاران [۲۶] به شبیه‌سازی یک سامانه بادی - پیل سوختی نوع PEM همراه با ذخیره‌ساز هیدروژن در شرایط خارج از شبکه پرداختند. این مطالعه که با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و COMSOL و در منطقه کوهین ایران انجام شد، به بررسی تأثیر وجود داشتن یا نداشتن ذخیره‌سازی هیدروژن بر هزینه تولید برق پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد هزینه تولید برق در سامانه فاقد ذخیره‌سازی برابر با ۰/۶۴۵۲ دلار و در سامانه دارای ذخیره‌سازی برابر با ۰/۷۲۳۷ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت بوده است. بهرامی‌سامانی و جهانگیری [۲۷] عملکرد یک سامانه بادی مجهز به باتری پشتیبان و ژنراتور دیزلی را در افق زمانی ۲۵ ساله از منظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه که با بهره‌گیری از نرم‌افزار HOMER و روش تحلیل عددی انجام شد، نرخ تولید هیدروژن با استفاده از چهار نوع الکترولایزر مختلف تحلیل شد. همچنین، با بررسی ۱۰ ایستگاه بادی منتخب در ایران، بهترین گزینه از لحاظ عملکرد انرژی و هزینه‌ای تعیین شد. در نهایت، مصطفایی‌پور و همکاران [۲۸] تأثیر انواع مختلف پنل‌های خورشیدی را بر عملکرد یک سامانه تولید هم‌زمان برق و حرارت در دو وضعیت متصل و منفصل از شبکه مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه در منطقه جاسک و با استفاده از نرم‌افزار HOMER انجام شد و نشان داد کمترین هزینه تولید هیدروژن در حالت متصل به شبکه ۲۹/۳۳ دلار و در حالت خارج از شبکه ۷۷/۹۷ دلار به ازای هر کیلوگرم بوده است. در مجموع، مرور مطالعات پیشین حاکی از آن است که طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های ترکیبی تجدیدپذیر برای تولید هم‌زمان برق، حرارت و سوخت، به‌ویژه در شرایط خارج از شبکه، نیازمند تحلیل دقیق فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است و استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی همچون HOMER، MATLAB و COMSOL نقش کلیدی در این مسیر ایفا می‌کنند.

نوآوری این پژوهش در ارزیابی یک سامانه انرژی هیبریدی^۱ همراه با تولید هیدروژن در جزیره قشم واقع در جنوب کشور ایران، نهفته است؛ پژوهشی که می‌تواند به مطالعات علمی مرتبط با توسعه‌های مرتبط با هیدروژن در سطح منطقه‌ای و ملی یاری رساند. این رویکرد بومی، ظرفیت راهکارهای پایدار را به نمایش می‌گذارد و بر اهمیت منابع انرژی خوداتکا تأکید دارد؛

منابعی که می‌توانند در شرایط اضطراری، از خدمات حیاتی، اقدامات امدادرسانی و زیرساخت‌های حساس پشتیبانی کنند. این مقاله در چهار بخش سازمان‌دهی شده است. در بخش دوم، توصیفی از سامانه‌های هیبریدی و اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها ارائه می‌شود. در بخش سوم، نتایج حاصل از پژوهش با استفاده از نرم‌افزار HOMER نمایش داده می‌شود. بخش چهارم نیز به بیان یافته‌ها و ارائه پیشنهادها برای پژوهش اختصاص دارد.

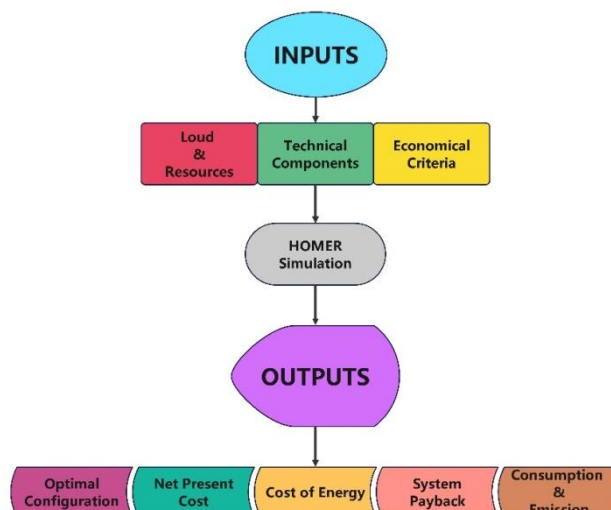
۲. مواد و روش

ارزیابی آثار فنی - اقتصادی یک سامانه انرژی هیبریدی مستلزم تحلیل اجزای فرعی مختلف آن است. شکل ۱ نمای کلی سامانه انرژی هیبریدی پیشنهادی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد [۲۹]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سامانه کلی شامل پنل‌های خورشیدی (PV)، توربین‌های بادی، الکترولیزر، مبدل، اتصال اختیاری به شبکه برق، و مخزن ذخیره‌سازی هیدروژن است. هدف اصلی این سامانه، تولید انرژی برای تأمین بارهای الکتریکی است و انرژی مازاد تولیدشده نیز به تولید هیدروژن اختصاص می‌یابد تا به عنوان منبع جایگزین برای انواع بارهای انرژی و ذخیره‌سازی در یک محیط دانشگاهی مورد استفاده قرار گیرد [۳۰]. این ساختار چندوجهی با رویکرد انرژی پایدار هم‌راستا است و از منابع تجدیدپذیر برای پاسخ‌گویی به نیازهای آبی برق بهره می‌گیرد، در حالی که به طور هم‌زمان یک ذخیره‌گاه هیدروژن برای استفاده‌های آبی فراهم می‌سازد. اگرچه روش‌های سنتی تولید هیدروژن مبتنی بر منابع کربنی نظیر ریفرمینگ بخار متان و گازی‌سازی زغال‌سنگ رایج بوده‌اند، امروزه راهکارهای نوینی در راستای تولید هیدروژن با تکیه بر منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزین توسعه یافته‌اند. این روش‌ها تحت عنوان هیدروژن سبز شناخته می‌شوند و هدف اصلی آن‌ها، کاهش انتشار آلاینده‌ها و ردپای کربنی در فرایند تولید انرژی است [۳۱].



شکل ۱. نمای کلی سامانه انرژی هیبریدی

به منظور تعیین پیکربندی بهینه سامانه انرژی هیبریدی، از نرم‌افزار شبیه‌سازی HOMER استفاده شده است؛ این نرم‌افزار توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده توسعه یافته است. روش کار نرم‌افزار HOMER در شکل ۲ نمایش داده شده است.



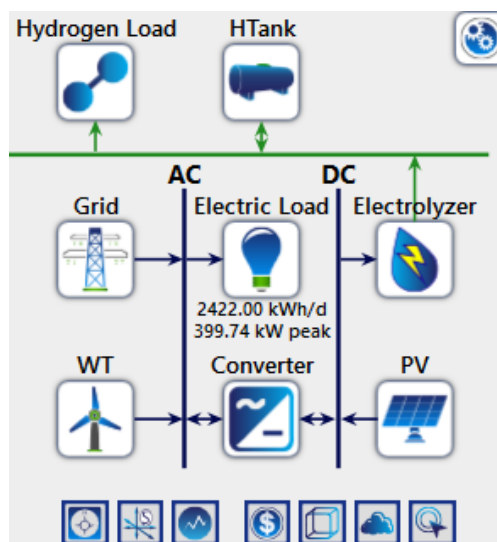
شکل ۲. متد شبیه‌سازی در نرم‌افزار HOMER

در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای مشابه مانند RETScreen، PVSOL، Hybrid2، TRANSYS، SAMS، RAPSYS، و MATLAB، نرم‌افزار HOMER دارای ویژگی‌های برتری است؛ از جمله کتابخانه گسترده‌تر منابع انرژی تجدیدپذیر و قابلیت شبیه‌سازی ترکیب‌های متنوع آن‌ها تحت محدودیت‌های گوناگون. این نرم‌افزار قادر است سامانه‌های متصل به شبکه و مستقل از شبکه را مدل‌سازی کند.

نرم‌افزار HOMER برای انجام تحلیل اقتصادی و رتبه‌بندی سامانه‌ها بر اساس شاخص‌های اقتصادی، از ورودی‌هایی نظیر داده‌های بار مصرفی، داده‌های منابع انرژی، مشخصات فنی اجزای سامانه، پارامترهای اقتصادی و سایر اطلاعات مرتبط استفاده می‌کند. علاوه بر این، HOMER می‌تواند تحلیل حساسیت انجام دهد تا تأثیر متغیرهای مختلف بر ارزیابی‌های فنی - اقتصادی را مشخص سازد [۳۲]. ارزیابی یک سامانه انرژی هیبریدی با انتخاب صحیح محل اجرا، جمع‌آوری داده‌های دقیق مربوط به منابع انرژی، و تحلیل نیاز بار مصرفی آن محل آغاز می‌شود. مکان پیشنهادی برای مطالعه موردی، یک مرکز تحقیقاتی در نزدیکی دانشگاه آزاد جزیره قشم در استان هرمزگان ایران است. مختصات جغرافیایی محل مورد نظر شامل طول جغرافیایی ۵۶°۱۰' درجه و عرض جغرافیایی ۲۶°۹۷' درجه است. نمای ماهواره‌ای این موقعیت در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، طراحی سامانه انرژی هیبریدی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار HOMER در شکل ۴ نمایش داده شده است.

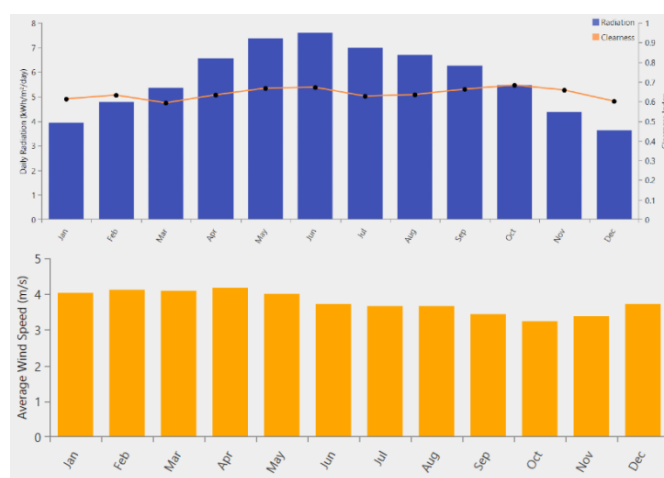


شکل ۳. نمای ماهواره‌ای محل مورد مطالعه



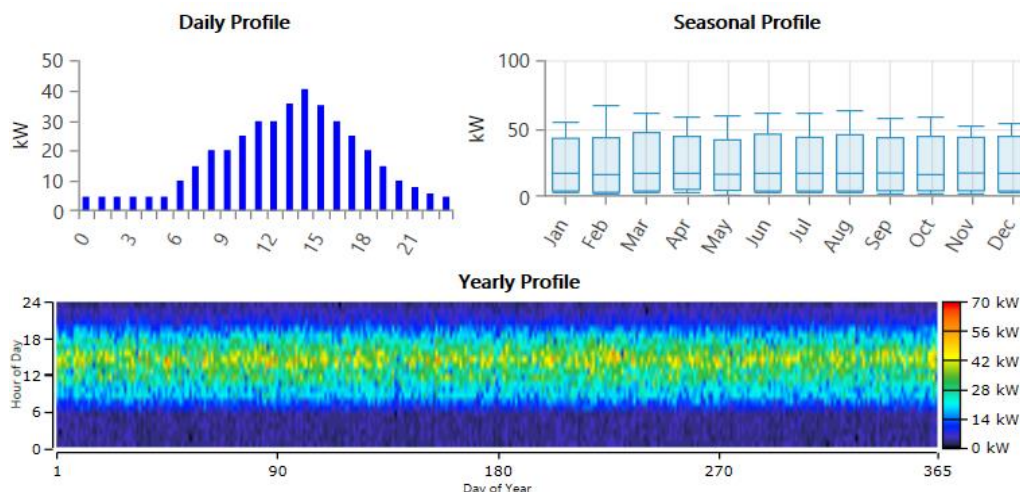
شکل ۴. شبیه‌سازی سامانه انرژی هیبریدی در نرم‌افزار HOMER

داده‌های مورد نیاز برای تحلیل انرژی‌های در دسترس، شامل تابش خورشیدی، سرعت باد، و دمای میانگین، از عناصر کلیدی این مطالعه به شمار می‌روند. این داده‌ها می‌توانند به صورت میانگین‌های ماهانه یا سری‌های زمانی ارائه شوند و نرم‌افزار HOMER قادر به پذیرش داده‌های تابش خورشیدی و سرعت باد در این قالب‌ها است. اطلاعات یادشده از پایگاه داده هواشناسی و انرژی ناسا^۱ برای موقعیت مکانی مورد نظر استخراج شده‌اند [۳۲]. این داده‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵. تغییرات ماهانه تابش خورشیدی و سرعت باد برای منطقه منتخب

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در شکل ۵، میانگین سالانه تابش خورشیدی برابر با ۵۰۷۵ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در روز و میانگین سرعت باد سالانه برابر با ۳۰۷۷ متر بر ثانیه است. دما در فصل تابستان به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و هر دو پارامتر تابش خورشیدی و سرعت باد، نوسانات نسبتاً ثابتی طی سال نشان می‌دهند این امر امکان تولید انرژی چندمنبعی در تمام سال را فراهم می‌سازد. این منابع تولید انرژی به صورت مکمل عمل می‌کنند. به دلیل عدم دسترسی به پروفایل بار لحظه‌ای از شرکت برق منطقه‌ای، یک بار الکتریکی مصنوعی با مقدار ۲۴۲۲ کیلووات‌ساعت در روز و بار پیک ۳۹۹۰۷۴ کیلووات در این مطالعه و توسط نرم‌افزار HOMER لحاظ شده است. این پروفایل بار برای یک مرکز پژوهشی در نظر گرفته شده و نمودار روزانه، فصلی و سالانه بار مصرفی در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶. پروفایل بار مصرفی روزانه، فصلی و سالانه مرکز پژوهشی

بر اساس داده‌های بار مصرفی، پروفایل بار نشان می‌دهد در ساعت‌های مشخصی از شبانه‌روز، افزایش و کاهش بار به صورت متعادل رخ می‌دهد که این تغییرات تابعی از ساعت‌های کاری مرکز پژوهشی است. الگوی مصرف برق یا همان پروفایل بار به شکل قابل توجهی تحت تأثیر تجهیزات و ابزارهای متعددی است که به صورت ویژه برای اهداف آموزشی و پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

میزان نوسان تصادفی روزانه بار مصرفی در این مکان به طور میانگین ۱۰ درصد برآورد شده و ضریب بار ۱ برابر با ۰.۲۵ برای مصارف آموزشی در نظر گرفته شده است [۳۳]. معمولاً میزان تقاضا در ساعت‌های روز بالا بوده و در ساعت‌های شب کاهش می‌یابد. پروفایل بار در این منطقه از نظر زمان‌بندی و شدت بار، با الگوهای بار مسکونی، تجاری، صنعتی یا بارهای واردشده به صورت دستی تفاوت دارد. در این مطالعه از استراتژی اعزام بار پیرو^۲ برای مدیریت بار و تولید انرژی استفاده شده است. در ارزیابی بار مصرفی هیدروژن، نوسانات ناشی از عوامل تصادفی و تغییرات روزانه با نرخ ۱۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر، نوسان‌پذیری ۲۰ درصد لحاظ شده است. برای اهداف این تحلیل، میانگین سالانه بار مصرفی هیدروژن برابر با ۱۱۰۲۷ کیلوگرم در روز (معادل ۰.۴۷ کیلوگرم در ساعت) در نظر گرفته شده است. این روش، نوسانات کوتاه‌مدت و روندهای بلندمدت را به صورت هم‌زمان در تحلیل لحاظ می‌کند و دیدگاهی جامع نسبت به ماهیت پویا و متغیر مصرف هیدروژن در این مطالعه فراهم می‌سازد.

۲-۱. اجزای سامانه

در این بخش، فرمول‌بندی‌های مورد استفاده در نرم‌افزار HOMER برای مدل‌سازی هر یک از اجزای سامانه و استخراج نتایج پیکربندی از داده‌های ورودی توضیح داده می‌شود.

۲-۱-۱. پنل خورشیدی

پنل‌های خورشیدی، نور خورشید را بدون مصرف اضافی برق، به جریان مستقیم (DC) تبدیل می‌کنند و این انرژی می‌تواند مستقیم به الکترولایزر برای تولید هیدروژن منتقل شود. در نرم‌افزار HOMER، به منظور شبیه‌سازی عملکرد پنل‌های خورشیدی، از مجموعه داده‌هایی مانند تابش خورشیدی، شاخص شفافیت^۳ و دما استفاده می‌شود. این داده‌ها به صورت سری‌های زمانی قابل وارد کردن به محیط HOMER بوده و امکان واردسازی دستی آن‌ها نیز وجود دارد. خروجی الکتریکی آرایه‌های فتوولتائیک با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود.

1. Load Factor
2. Load - Following
3. Clearness Index

$$P_{PV} = Y_{PV} \times f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,SC}} \right) \times [1 + a_f (T_C - T_{C,SC})] \quad (۱)$$

که در آن:

- Y_{PV} : توان نامی پنل‌های خورشیدی در شرایط استاندارد (SC) بر حسب کیلووات
- f_{PV} : ضریب کاهش بازدهی پنل‌های خورشیدی^۱ بر حسب درصد
- G_T : مقدار تابش خورشیدی روی پنل‌های خورشیدی بر حسب کیلووات ساعت بر متر مربع
- $G_{T,SC}$: مقدار تابش استاندارد (یک کیلووات ساعت بر متر مربع)
- a_f : ضریب دمایی پنل خورشیدی بر حسب درصد بر درجه سانتی‌گراد
- T_C : دمای سلول خورشیدی بر حسب درجه سانتی‌گراد
- $T_{C,SC}$: دمای استاندارد سلول خورشیدی (۲۵ درجه سانتی‌گراد)

۲-۱-۲. توربین بادی

نرم‌افزار HOMER توان خروجی توربین بادی را بر اساس منحنی توان^۲ آن تعیین می‌کند. منحنی توان، رابطه میان سرعت باد و توان تولیدی توربین را نشان می‌دهد و از طریق مشخصات فنی توربین و میانگین سرعت باد در ارتفاع هاب^۳ به دست می‌آید. این رابطه با استفاده از معادله ۲ بیان می‌شود [۳۴].

$$V_H = V_{AN} \times \left(\frac{\ln \left(\frac{H_H}{H_0} \right)}{\ln \left(\frac{H_{AN}}{H_0} \right)} \right) \quad (۲)$$

در معادله ۲:

- V_H : میانگین سرعت باد در ارتفاع هاب (متر بر ثانیه)
- V_{AN} : مقدار سرعت باد در ارتفاع نصب بادسنج (متر بر ثانیه)
- H_H : ارتفاع هاب توربین (متر)
- H_{AN} : ارتفاع بادسنج توربین (متر)
- H_0 : ارتفاع زبری سطح (متر)

در معادله ۲، اگر سرعت باد محاسبه شده در ارتفاع هاب توربین در بازه تعریف شده منحنی توان قرار نداشته باشد، سامانه فرض می‌کند که توربین هیچ توانی تولید نمی‌کند.

۲-۱-۳. الکتrolایزر

فرایند تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن که از طریق الکتrolایزر انجام می‌شود، الکتrolیز نام دارد. هیدروژن تولید شده می‌تواند برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد یا در مخزن هیدروژن ذخیره شود. روش‌های گوناگونی برای تولید هیدروژن وجود دارد و بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر که به طور رایج به آن هیدروژن سبز گفته می‌شود، به تولیدی سازگار با محیط زیست و پایدار منجر می‌شود. در این مطالعه، فرض بر آن بوده است که آب ورودی به فرایند الکتrolیز از نوع آب تصفیه شده با استاندارد صنعتی بوده و حاوی ناخالصی‌های مؤثر بر عملکرد سلول‌های الکتrolیز نیست. از آنجا که داده‌های دقیق مربوط به شوری آب منطقه در دسترس نبوده، تأثیر مستقیم آن در مدل وارد نشده است. بدیهی است که در صورت استفاده از آب با شوری بالا (نظیر

1. PV Derating Factor
2. Power Curve
3. Hub Height

آب دریا، نیاز به پیش تصفیه و صرف انرژی مضاعف برای نمک‌زدایی وجود خواهد داشت که این موضوع می‌تواند در مطالعات آتی مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گیرد.

۲-۱-۴. مخزن هیدروژن

در صورت عدم امکان تولید هیدروژن برای مدت طولانی یا در مواقع تولید بیش از حد، مخزن هیدروژن نقش تأمین هیدروژن مورد نیاز را ایفا می‌کند و بدون نیاز به تعویض طی عمر پروژه، موجب افزایش قابلیت اطمینان سامانه می‌شود.

۲-۱-۵. شبکه برق

گزینه دیگر برای افزایش قابلیت اطمینان سامانه انرژی هیبریدی، اتصال به شبکه برق است. در دوره‌های با مصرف پایین، برق مازاد می‌تواند به شبکه منتقل شود. با این حال، هزینه بالای نصب خطوط انتقال برای مکان‌هایی که از شبکه فاصله زیادی دارند، می‌تواند به عنوان یک ضعف مطرح باشد.

۲-۱-۶. مبدل

مبدل برای انتقال دوسویه انرژی (از جریان متناوب به جریان مستقیم و به عکس) مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به طوری که انرژی تولیدشده توسط توربین‌های بادی را یک‌سوسازی کرده و همچنین توان DC تولیدشده توسط پنل‌های خورشیدی را به AC تبدیل می‌کند تا نیازهای بار الکتریکی را تأمین کند. نرم‌افزار HOMER می‌تواند پارامترهایی مانند راندمان، طول عمر، و هزینه مبدل انتخابی را برای انجام تحلیل‌ها به کار گیرد.

۲-۱-۷. ارزیابی اقتصادی

برای اطمینان از عملکرد مؤثر سامانه، ارزیابی اقتصادی نقش حیاتی در کاهش هزینه کلی و دستیابی به معیارهای بهینه عملکرد ایفا می‌کند [۳۵]. دو شاخص کلیدی در ارزیابی عملکرد فنی - اقتصادی سامانه انرژی هیبریدی، عبارت‌اند از: هزینه خالص فعلی^۱ (NPC) و هزینه انرژی^۲ (COE). اقتصاد سامانه را می‌توان بر اساس هزینه‌های عملیات، نگهداری^۳ و جایگزینی^۴، هزینه سالانه^۵، هزینه ترازشده برق^۶ (LCOE)، و هزینه ترازشده هیدروژن^۷ (LCOH) تحلیل کرد. مقدار NPC برابر است با مجموع ارزش فعلی کل هزینه‌های سامانه طی عمر پروژه، منهای ارزش فعلی کل درآمدهای آن. در شبیه‌سازی انجام‌شده با نرم‌افزار HOMER، معادلات زیر برای محاسبه COE به کار گرفته شده‌اند.

$$AC = CRF \times NPC \quad (۳)$$

که در آن AC نمایانگر هزینه سالانه و CRF بیانگر ضریب بازگشت سرمایه^۸ است. مقدار CRF به صورت معادله ۴ محاسبه می‌شود:

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۴)$$

که در آن i نرخ تنزیل سالانه و n نمایانگر تعداد سال‌ها است. مقدار i از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$i = \frac{i^* - f}{1 + f} \quad (۵)$$

1. Net Present Cost
2. Cost of Energy
3. Operation & Maintenance Cost
4. Replacement Cost
5. Annualized Cost
6. Levelized Cost of Electricity
7. Levelized Cost of Hydrogen
8. Capital Recovery Factor

که در آن i^* نرخ اسمی مورد استفاده در معاملات مالی و f نرخ تورم است. با استفاده از معادله ۶ می‌توان هزینه انرژی به ازای هر کیلووات ساعت را برای سامانه انرژی هیبریدی (HES) محاسبه کرد.

$$COE = AC \left(\frac{yr}{E_{srv} (kWh / yr)} \right) \quad (۶)$$

که در آن yr سال کاری و E_{srv} نشان‌دهنده انرژی تأمین شده (تولید شده) است. در نرم‌افزار HOMER، شاخص‌های عملکرد شامل هزینه واحد انرژی (COE)، هزینه خالص فعلی (NPC)، و هزینه‌های عملیاتی و سایر هزینه‌ها هستند. در این مطالعه، نرخ تنزیل اسمی برابر با ۸ درصد و نرخ تورم سالانه ۲ درصد در نظر گرفته شده است. طول عمر پروژه نیز ۲۵ سال فرض شده که مطابق با عمر مفید اغلب تجهیزات انرژی تجدیدپذیر است. نرخ تنزیل واقعی به طور مستقیم در نرم‌افزار HOMER اعمال شده و تمامی تحلیل‌های اقتصادی نظیر LCOE و NPC بر این اساس انجام شده‌اند. نرخ بازگشت سرمایه و سایر شاخص‌های اقتصادی نیز بر پایه همین مفروضات محاسبه شده‌اند.

پارامتر COE مهم‌ترین شاخص ارزیابی است، زیرا نشان‌دهنده هزینه تولید هر ۱ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی است. هزینه خالص فعلی (NPC) از طریق جمع تمام هزینه‌های مرتبط با پروژه طی دوره عمر آن محاسبه می‌شود؛ این هزینه‌ها شامل سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های جایگزینی، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری، و هزینه‌های سوخت هستند. در پایان، ارزش باقی‌مانده^۱ در پایان عمر پروژه از مجموع این هزینه‌ها کسر می‌شود.

۳. نتایج و بحث

اندازه‌گذاری دقیق اجزای سامانه در تحلیل فنی - اقتصادی برای عملکرد صحیح و بهینه‌سازی هزینه‌ها ضروری است. توضیحات مربوط به هر یک از اجزای مورد استفاده در این مطالعه به طور کامل در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. اجزای سامانه پیشنهادی [۳۳ و ۳۶]

تجهیزات	توربین بادی	پنل خورشیدی	الکتروالایزر	مخزن هیدروژن	بار هیدروژن	مبدل	شبکه برق
مدل	EWT 54	Peimar SG300MBF	Generic	Generic	۱۱/۲۶ kg/day	System	Power Price ۰/۰۰۲ \$/kWh
توان	۹۰۰ kW	۱ kW	۱ kW	۱ kg		۱ kW	
هزینه سرمایه‌گذاری	۶۵۰۰۰\$	۶۵۰\$	۲۰۰۰\$	۱۵۰۰\$		۷۵۰\$	
هزینه جایگزینی	۵۰۰۰۰\$	۶۵۰\$	۱۵۰۰\$	۱۰۰۰\$		۷۵۰\$	
هزینه عملیات و نگهداری (O&M)	۵۰۰\$	۵۰\$	۰\$	۰\$	۰/۴۷ kg/h	۵۰\$	Sellback Price ۰/۰۳۴ \$/kWh
طول عمر	۲۵ سال	۲۵ سال	۱۵ سال	۲۵ سال		۱۵ سال	

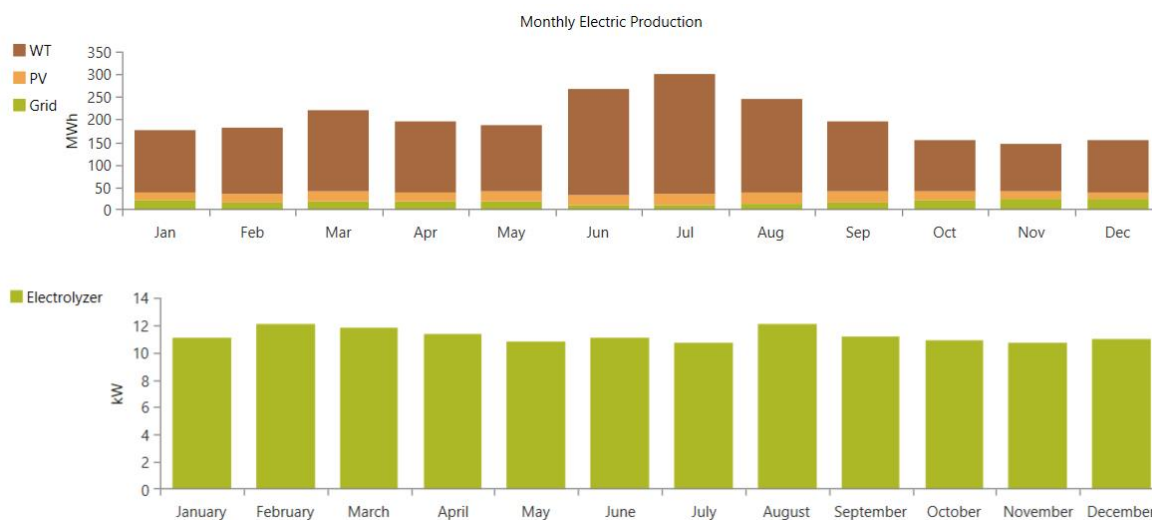
همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، سامانه انرژی هیبریدی از اجزای مختلفی تشکیل شده که به صورت مقادیر واحد ارائه شده‌اند. نرم‌افزار HOMER توان و هزینه کلی هر جزء را محاسبه می‌کند. مقدار «Generic» در جدول نشان می‌دهد نرم‌افزار HOMER بدون وابستگی به برند خاص، توان و هزینه هر جزء را هنگام عملیات برآورد می‌کند. HOMER با در نظر گرفتن پارامترهای هزینه، تمامی ترکیب‌های ممکن از اجزای انتخاب شده را تحلیل می‌کند. این پارامترها که به دلار آمریکا بیان شده‌اند، شامل هزینه خالص فعلی (NPC)، هزینه‌های عملیات و نگهداری (O&M)، هزینه‌های جایگزینی، هزینه سالانه شده (AC)، و هزینه تراز شده برق (LCOE) هستند. در نتیجه فرایند بهینه‌سازی انجام شده توسط HOMER، هدف دستیابی به پیکربندی سامانه‌ای است که بیشترین کارایی اقتصادی را داشته باشد. این مقادیر سپس می‌تواند با نتایج سایر مطالعات مورد مقایسه قرار گیرند. نرم‌افزار HOMER تمامی ترکیب‌های ممکن یک سامانه انرژی هیبریدی را با انجام شبیه‌سازی ساعتی برای یک سال بررسی کرده و نتایج را بر اساس هزینه خالص فعلی (NPC) رتبه‌بندی می‌کند. این فرایند به تعیین چرخه عمر بهینه و ارزیابی امکان‌سنجی فنی سامانه کمک می‌کند.

بر اساس نتایج ارائه شده، بهینه‌ترین سامانه شامل پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، اتصال به شبکه برق و ذخیره‌سازی هیدروژن است. عمر مفید پروژه برابر با ۲۵ سال در نظر گرفته شده است. این نرم‌افزار همچنین با استفاده از پارامترهای تعدیل شده، تأثیر عوامل مختلف بر شبیه‌سازی پروژه را تحلیل می‌کند. مقادیر فنی و اقتصادی اجزای محاسبه شده سامانه انرژی هیدریدی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. ارزیابی فنی و اقتصادی سامانه پیشنهادی [۳۳ و ۳۶]

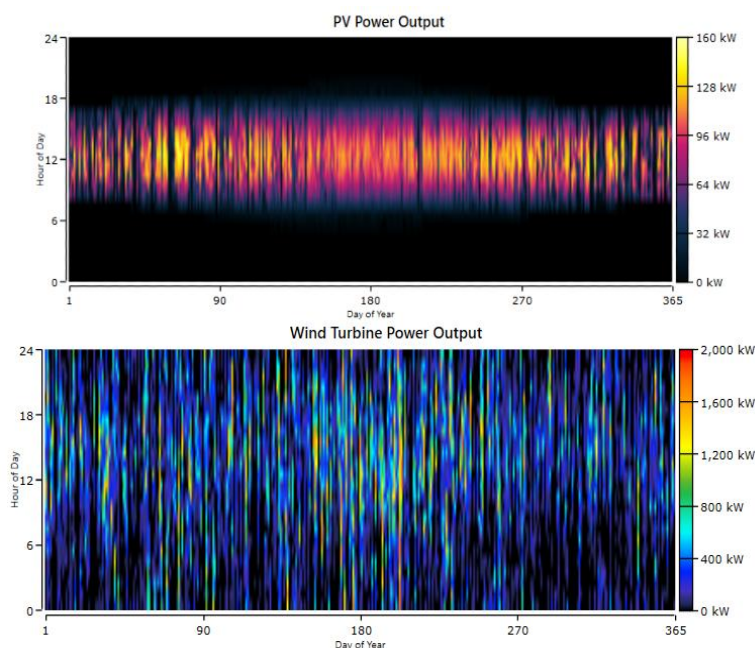
تجهیزات	ظرفیت نامی	هزینه اولیه سرمایه گذاری	هزینه جایگزینی	هزینه بهره برداری و نگهداری	اسقاط	مجموع
توربین بادی	۱۸۰۰ kW	۱۳۰۰۰۰ \$	۰	۱۲۹۲۷ \$	۰	۱۳۱۲۹۲۷ \$
پنل خورشیدی	۱۵۶ kW	۱۰۱۵۱۹ \$	۰	۱۰۰۹۵۳ \$	۰	۲۰۲۴۷۲ \$
الکترولایزر	۴۴/۵ kW	۸۹۰۱۲ \$	۲۸۳۳۴ \$	۰	۵۳۳۰ \$	۱۱۲۰۰۶ \$
مخزن هیدروژن	۴۰ kg	۶۰۰۰۰ \$	۰	۰	۰	۶۰۰۰۰ \$
مبدل	۵۸/۹ kW	۴۴۱۶۶ \$	۱۸۷۳۸ \$	۳۸۰۶۳ \$	۳۵۲۶ \$	۹۷۴۴۱ \$
مقدار برق خریداری شده از شبکه (kWh)	۲۲۰۸۶۲	بهای خرید برق از شبکه (\$/kWh)	۰/۰۰۲	هزینه برق خریداری شده از شبکه	۴۴۱/۷۲۴ \$	
برق فروخته شده به شبکه (kWh)	۱۳۲۵۴۶۵	بهای فروش برق به شبکه (\$/kWh)	۰/۰۳۴	درآمد حاصل از فروش برق به شبکه	۴۵۰۶۵/۸۱ \$	
هزینه کلی پروژه			۱۲۰۷۹۶۸ \$			

بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۱، مشخص است که بخش عمده‌ای از هزینه‌ها به توربین‌های بادی اختصاص دارد. در تعیین هزینه‌های مربوط به جایگزینی و عملیات و نگهداری، شرایط اقتصادی فعلی و پیش‌بینی‌های محتمل در نظر گرفته شده‌اند. سناریو انتخاب شده که به عنوان سامانه بهینه تعریف شده، در شکل ۷ ارائه شده است. این سامانه معیارهای امکان‌سنجی فنی را برآورده کرده و کمترین هزینه چرخه عمر را دارد. هزینه بهره‌برداری سالانه برابر با ۲۹۹۱۵ دلار و هزینه انرژی (COE) معادل ۰۰۰۴۲۲۹ دلار به ازای هر کیلووات ساعت محاسبه شده است. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه معادل ۱۰۵۹ میلیون دلار و هزینه کلی طی عمر پروژه برابر با ۱۰۲۱ میلیون دلار گزارش شده است. سهم انرژی تجدیدپذیر در این سامانه ۹۰ درصد است. توان خروجی ماهانه هر یک از اجزای تولید انرژی و توان الکترولایزر در شکل ۷ نمایش داده شده است.



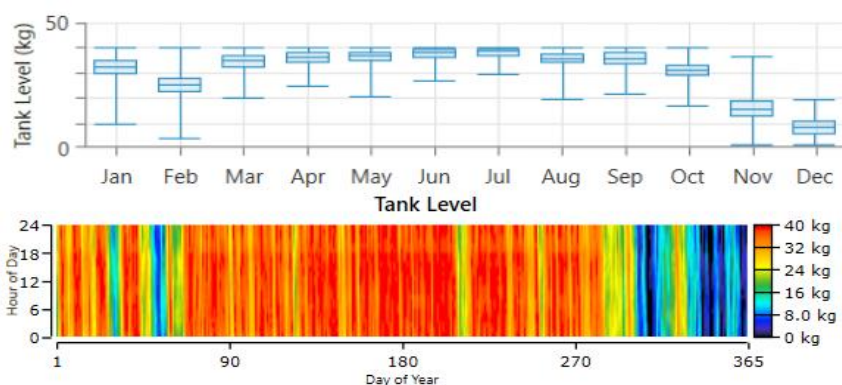
شکل ۷. توان خروجی ماهانه برای اجزای مختلف تولید توان به صورت مجزا و توان الکترولایزر

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی به ترتیب ۱۰/۲ و ۸۰/۷ درصد از کل برق تولیدشده (درمجموع: ۲۲۰۳۸۹۶ کیلووات‌ساعت در سال) را تأمین کرده‌اند. میزان برق خریداری‌شده از شبکه تنها ۹/۱۱ درصد بوده است که نشان می‌دهد سامانه پیشنهادی تقریباً به عنوان یک سامانه مستقل از شبکه^۱ و تولید انرژی پایدار عمل کرده است. خروجی سالانه الکترولایزر برابر با ۴۰۹۱ کیلوگرم در سال محاسبه شده است. میزان برق تولیدی سالانه توسط پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸. خروجی سالانه توان برای پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، پنل‌های خورشیدی Peimar SG300MBF با ظرفیت نامی ۱۵۶ کیلووات، سالانه ۲۴۶ مگاوات‌ساعت انرژی تولید می‌کنند. خروجی سالانه سامانه توربین بادی (EWT 54، دو دستگاه $900 \times$ کیلووات) معادل ۱۹۵۷ مگاوات‌ساعت با ظرفیت نامی ۱۸۰۰ کیلووات است. میانگین توان روزانه این دو منبع به ترتیب ۲۸/۱ کیلووات و ۲۲۳ کیلووات است. انرژی مازاد تولیدشده از منابع تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترولایزر با ظرفیت نامی ۴۴/۵ کیلووات و میانگین ورودی ۲۱/۷ کیلووات، با ضریب ظرفیت ۴۸/۷ درصد عمل کرده و سالانه ۴۰۹۱ کیلوگرم هیدروژن تولید می‌کند. ظرفیت مخزن هیدروژن برابر با ۴۰ کیلوگرم تعیین شده، اما سطح ذخیره‌سازی آن طی سال متغیر است. تغییرات سطح مخزن هیدروژن به صورت ماهانه و سالانه در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. تغییرات سطح مخزن هیدروژن

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، سطح مخزن هیدروژن طی سال تقریباً ثابت باقی می‌ماند که این موضوع با تغییرات در مقیاس رنگ مشخص شده است. این امر نشان می‌دهد سوخت هیدروژن می‌تواند بر اساس ظرفیت مخزن، برای کاربردهای مختلف تأمین شود. علاوه بر این، با افزایش ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر، میزان بیشتری از تولید هیدروژن و ظرفیت مخزن نیز امکان‌پذیر خواهد بود. اگرچه در برخی مواقع مخزن هیدروژن به حداکثر ظرفیت خود می‌رسد، ممکن است همچنان تولید برق مازاد در سامانه انرژی هیبریدی وجود داشته باشد. این انرژی اضافی می‌تواند به شبکه برق فروخته شود که به کاهش هزینه‌های کلی منجر خواهد شد. قیمت فروش برق مازاد مطابق با قانون استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در ساتبا محاسبه می‌شود [۳۷ و ۳۸].

۳-۱. تحلیل آلاینده‌گی و اثرات زیست‌محیطی

فروش برق مازاد به شبکه در سیستم طراحی شده نقش کلیدی در کاهش انتشار آلاینده‌ها ایفا می‌کند. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده، بخش قابل توجهی از تقاضای برق توسط منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی تأمین می‌شود که موجب کاهش چشمگیر آلاینده‌های زیست‌محیطی شده است. در این پیکربندی، به طور متوسط سالانه حدود ۲۲۰۸۶۲ کیلووات‌ساعت برق از شبکه خریداری می‌شود و در مقابل، حدود ۱۳۲۵۴۶۵ کیلووات‌ساعت برق مازاد از طریق انرژی تجدیدپذیر به شبکه تزریق می‌شود. از آنجا که منبع اصلی آلاینده‌گی در این سیستم، برق خریداری شده از شبکه است، محاسبات انتشار دی‌اکسیدکربن بر اساس ضریب انتشار رسمی شبکه (به ازای هر کیلووات‌ساعت) صورت گرفته است. از سوی دیگر، فروش برق مازاد به شبکه به معنای جایگزینی بخشی از تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با تولید پاک است که به کاهش خالص گازهای گلخانه‌ای در مقیاس منطقه‌ای منجر می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد مقدار خالص انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه در این سیستم منفی است؛ به این معنا که سیستم نه تنها منبع آلاینده‌ای برای محیط زیست نیست، بلکه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در شبکه کمک می‌کند. کاهش چشمگیر انتشار گازهای CO_2 و NO_x ، بیانگر قابلیت بالای پیکربندی پیشنهادی در راستای توسعه پایدار و مشارکت در اهداف ملی و جهانی مقابله با تغییرات اقلیمی است. فروش برق مازاد به شبکه به طور چشمگیری در کاهش انتشار آلاینده‌ها مؤثر است. مقادیر مختلف انتشار آلاینده‌ها از سامانه انرژی هیبریدی مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. مقادیر انتشار آلاینده‌های سامانه [۳۶]

نوع آلاینده	ضریب انتشار (g/kWh)	انرژی خریداری شده از شبکه (kWh/year)	انرژی فروخته شده به شبکه (kWh/year)	آلاینده‌گی سالانه (kg/year)
دی‌اکسیدکربن (CO_2)	۶۳۲	۲۲۰۸۶۲	۱۳۲۵۴۶۵	-۶۹۸۱۰۹
دی‌اکسید گوگرد (SO_2)	۲/۷۴			-۳۰۲۷
اکسیدهای نیتروژن (NO_x)	۱/۳۴			-۱۴۸۰

به منظور اعتبارسنجی پژوهش حاضر، یک مقایسه جامع با سایر مطالعات انجام شده است. این فرایند ارزیابی به عنوان معیاری اساسی عمل می‌کند و اطلاعات مهمی در خصوص پایداری و به‌صرفه بودن مدل پیشنهادی ارائه می‌دهد. مقایسه سامانه فعلی با سایر مطالعات، بر اساس پژوهش‌هایی صورت گرفته که دارای پروفایل بار مشابه بوده‌اند. داده‌های مقایسه‌ای در جدول ۴ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۴. مقایسه سایر پژوهش‌ها با سامانه پیشنهادی

پیکربندی سامانه	نوع انرژی	هزینه کل	بار پیک (کیلووات پیک)	منبع
خورشیدی - دیزل ژنراتور - باتری	برق	۱۶۱ M\$	۴۰۵/۷۱	[۳۹]
خورشیدی - بادی - دیزل ژنراتور - باتری	برق	۱/۷۶ M\$	۳۱۳/۴۰	[۴۰]
خورشیدی - شبکه برق - مبدل	برق	۴/۵۵ M\$	۳۴۱/۸۳	[۴۱]
خورشیدی - بادی - پیل سوختی - مخزن هیدروژن - الکترولایزر	برق و هیدروژن	۱۰۷ M\$	۳۷۰/۰۸	[۴۲]
سامانه پیشنهادی	برق و هیدروژن	۱/۲۱ M\$	۳۹۹/۷۴	

بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۴، سامانه‌ای که در این پژوهش به کار گرفته شده، توانایی تولید هم‌زمان برق و هیدروژن را داراست، هرچند هزینه آن در مقایسه با سامانه‌های ترکیبی که فقط بر تولید برق متمرکز هستند، بالاتر است. این افزایش هزینه را می‌توان به وجود اجزای اختصاص یافته برای تولید هیدروژن و نیز بهره‌گیری از تجهیزات با ظرفیت بالاتر نسبت داد. شایان یادآوری است که ساختار کنونی هزینه‌ها ممکن است در آینده بهبود یابد، چرا که انتظار می‌رود با پیشرفت فناوری‌های تولید در سال‌های پیش رو، هزینه‌ها کاهش یابد. این امر نشان می‌دهد توسعه‌های مستمر فناوریانه می‌توانند به راه‌حلی به‌صرفه‌تر منجر شوند و در نتیجه، سامانه دومانظوره یادشده از منظر اقتصادی رقابتی‌تر از وضعیت کنونی خود شود.

۴. ارزیابی حساسیت

۴-۱. ارزیابی حساسیت هم‌زمان بار الکتریکی و ظرفیت الکترولايزر

با توجه به اینکه در این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های واقعی مصرف برق، از یک پروفایل بار مصنوعی استفاده شده است، بررسی اثر تغییرات بار بر نتایج طراحی سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به این منظور، یک تحلیل حساسیت نسبت به سه سناریوی بار الکتریکی با سطوح مصرف متفاوت (کمینه، میانه و بیشینه) انجام شده است تا میزان تأثیرپذیری عملکرد سیستم و هزینه‌های کل از نوسانات احتمالی در الگوی مصرف مشخص شود. در این تحلیل، سناریوهای تعریف شده به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که گستره‌ای از شرایط عملیاتی ممکن برای یک مرکز پژوهشی را پوشش دهند. میانگین مصرف روزانه انرژی در این سناریوها به ترتیب برابر با ۱۸۰۰، ۲۴۲۲ (سناریوی پایه) و ۳۲۰۰ کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. به منظور حفظ واقع‌گرایی، الگوی توزیع ساعتی بار طی شبانه‌روز در تمام سناریوها ثابت باقی‌مانده و تنها شدت بار تغییر یافته است. این موضوع امکان ارزیابی دقیق‌تر تأثیر افزایش یا کاهش تقاضای برق بر ابعاد اقتصادی و فنی سیستم را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم در این سه سناریو در جدول ۵ ارائه شده است. پارامترهایی نظیر هزینه کل سرمایه‌گذاری، هزینه نهایی انرژی (LCOE) و نرخ تولید هیدروژن در این مقایسه لحاظ شده‌اند که در جدول ۵ نمایش داده شده است تا روند تغییرات خروجی‌ها در مواجهه با بارهای مختلف به‌خوبی قابل مشاهده باشد.

جدول ۵. تأثیر سناریوهای بار الکتریکی بر شاخص‌های اقتصادی و فنی سیستم

ظرفیت الکترولايزر ۴۴/۵ کیلووات						
سناریو	انرژی روزانه (kWh/day)	پیک بار (kW)	LCOE (\$/kWh)	LCOH (\$/kg)	NPC (M\$)	تولید سالانه هیدروژن (kg/yr)
کمینه	۱۸۰۰	۳۰۰	۰/۰۴۱۷	۲۰	۱/۰۵	۴۰۷۱
میانه	۲۴۲۲	۳۹۹/۷۴	۰/۰۴۲۴	۲۲/۸	۱/۲۱	۴۰۹۱
بیشینه	۳۲۰۰	۴۸۰	۰/۰۳۴۸	۲۷/۵	۱/۴۵	۴۰۹۱
ظرفیت الکترولايزر ۸۹ کیلووات						
سناریو	انرژی روزانه (kWh/day)	پیک بار (kW)	LCOE (\$/kWh)	LCOH (\$/kg)	NPC (M\$)	تولید سالانه هیدروژن (kg/yr)
کمینه	۱۸۰۰	۳۰۰	۰/۰۴۴۲	۲۱	۱/۱۱	۴۱۰۰
میانه	۲۴۲۲	۳۹۹/۷۴	۰/۰۴۶۵	۲۴/۷	۱/۳۲	۴۱۲۶
بیشینه	۳۲۰۰	۴۸۰	۰/۰۳۳۰	۳۲/۶	۱/۷۳	۴۰۹۷
ظرفیت الکترولايزر ۱۳۳/۵ کیلووات						
سناریو	انرژی روزانه (kWh/day)	پیک بار (kW)	LCOE (\$/kWh)	LCOH (\$/kg)	NPC (M\$)	تولید سالانه هیدروژن (kg/yr)
کمینه	۱۸۰۰	۳۰۰	۰/۰۴۸۶	۲۳/۱	۱/۲۳	۴۱۰۰
میانه	۲۴۲۲	۳۹۹/۷۴	۰/۰۵۰۵	۲۶/۸	۱/۴۳	۴۱۲۶
بیشینه	۳۲۰۰	۴۸۰	۰/۰۳۵۲	۳۴/۷	۱/۸۴	۴۰۹۷

در این مطالعه، به منظور بررسی اثر متقابل تغییرات بار الکتریکی و ظرفیت الکترولایزر، ۹ سناریوی ترکیبی طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهند افزایش بار مصرفی در اغلب موارد به کاهش LCOE منجر شده و بهره‌برداری اقتصادی‌تری از منابع تجدیدپذیر فراهم می‌آورد. با این حال، افزایش ظرفیت الکترولایزر به‌ویژه در سطوح پایین بار، موجب افزایش LCOH شده که نشان‌دهنده کاهش بهره‌وری سرمایه‌گذاری در آن شرایط است. هزینه خالص فعلی (NPC) نیز با افزایش هم‌زمان بار و ظرفیت الکترولایزر رشد می‌کند که نتیجه طبیعی افزایش مقیاس سیستم است. تولید سالانه هیدروژن در تمامی سناریوها تقریباً ثابت باقی‌مانده و نشان می‌دهد محدودیت‌هایی در بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های بالاتر الکترولایزر وجود دارد. در مجموع، سناریوی دارای بار بالا و ظرفیت میانی الکترولایزر (۸۹ کیلووات) از نظر شاخص‌های اقتصادی و تولید هیدروژن، تعادل مناسبی بین هزینه و عملکرد ایجاد کرده است.

۴-۲. ارزیابی حساسیت هم‌زمان بار هیدروژن و ظرفیت الکترولایزر

به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان نیاز مصرف هیدروژن و ظرفیت الکترولایزر بر عملکرد فنی و اقتصادی سامانه، یک تحلیل حساسیت دوجمله‌ای در جدول ۶ طراحی شد. در این تحلیل، سه سطح مختلف برای بار هیدروژن روزانه (۸، ۱۱، ۲۷ و ۱۵ کیلوگرم در روز) با سه ظرفیت مختلف برای الکترولایزر (۸۹، ۴۴، ۵ و ۱۳۳ کیلووات) ترکیب شده و در مجموع ۹ سناریو شبیه‌سازی شد. هدف از این تحلیل، ارزیابی میزان انعطاف‌پذیری سامانه در پاسخ به نوسانات مصرف و تعیین نقاط بهینه از نظر هزینه تولید هیدروژن و بهره‌برداری از ظرفیت تولیدی است.

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت سیستم نسبت به ترکیب سطوح مختلف بار هیدروژن و ظرفیت الکترولایزر

ظرفیت الکترولایزر ۴۴/۵ کیلووات					
سناریو	بار هیدروژن (day/kg)	LCOE (\$/kWh)	LCOH (\$/kg)	NPC (M\$)	تولید سالانه هیدروژن (kg/yr)
کمینه	۸	۰/۰۴۰۵	۳۰/۸	۱/۱۷	۲۹۳۴
میانه	۱۱/۲۷	۰/۰۴۲۴	۲۲/۹	۱/۲۱	۴۰۹۱
بیشینه	۱۵	۰/۰۴۰۵	۲۳/۴	۱/۶۴	۵۴۳۰
ظرفیت الکترولایزر ۸۹ کیلووات					
سناریو	بار هیدروژن (day/kg)	LCOE (\$/kWh)	LCOH (\$/kg)	NPC (M\$)	تولید سالانه هیدروژن (kg/yr)
کمینه	۸	۰/۰۴۴۵	۳۳/۸	۱/۲۸	۲۹۳۵
میانه	۱۱/۲۷	۰/۰۴۶۵	۲۴/۷	۱/۳۲	۴۱۲۶
بیشینه	۱۵	۰/۰۴۸۸	۱۹/۲	۱/۳۶	۵۴۷۳
ظرفیت الکترولایزر ۱۳۳/۵ کیلووات					
سناریو	بار هیدروژن (day/kg)	LCOE (\$/kWh)	LCOH (\$/kg)	NPC (M\$)	تولید سالانه هیدروژن (kg/yr)
کمینه	۸	۰/۰۴۸۳	۳۶/۷	۱/۳۹	۲۹۳۵
میانه	۱۱/۲۷	۰/۰۵۰۵	۲۶/۸	۱/۴۳	۴۱۲۶
بیشینه	۱۵	۰/۰۵۳۲	۲۰/۸	۱/۴۷	۵۴۸۳

در تحلیل حساسیت انجام‌شده، افزایش تقاضای روزانه هیدروژن از ۸ به ۱۵ کیلوگرم باعث کاهش قابل توجه در هزینه تولید هیدروژن (LCOH) شده است. این روند در تمامی ظرفیت‌های الکترولایزر مشاهده شد و نشان‌دهنده بهره‌برداری مؤثرتر از تجهیزات در بارهای بالاتر است. از سوی دیگر، افزایش ظرفیت الکترولایزر به رشد هزینه کل سامانه (NPC) منجر شد، ولی در صورت وجود مصرف کافی، می‌تواند به کاهش LCOH کمک کند؛ بنابراین، انتخاب بهینه ظرفیت الکترولایزر باید متناسب با بار هیدروژن موردانتظار انجام شود تا تعادلی بین هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌وری اقتصادی حاصل شود.

۴-۳. ارزیابی حساسیت هزینه سرمایه‌گذاری توربین بادی

با توجه به نوسانات اقتصادی و تغییرات مداوم در قیمت تجهیزات انرژی تجدیدپذیر، انجام تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای اقتصادی کلیدی، به‌ویژه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، به منظور ارزیابی تأثیر نوسانات قیمت توربین بادی بر شاخص‌های اقتصادی پروژه، تحلیل حساسیتی نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه توربین بادی مدل 54 EWT با ظرفیت نامی ۹۰۰ کیلووات در جدول ۷ صورت گرفته است. برای افزایش دقت و واقع‌گرایی تحلیل، هزینه جایگزینی نیز متناسب با هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و بر مبنای نسبت تقریبی ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است. هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری با فرض ثبات ویژگی‌های فنی توربین، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این تحلیل با هدف بررسی تغییرات در شاخص‌هایی از قبیل هزینه نهایی تولید برق (LCOE)، هزینه نهایی تولید هیدروژن (LCOH) و هزینه کل پروژه (NPC) انجام شده و می‌تواند در بهینه‌سازی اقتصادی طرح‌های مشابه در آینده مؤثر واقع شود.

جدول ۷. تأثیر تغییرات هزینه سرمایه‌گذاری توربین بادی بر شاخص‌های اقتصادی سیستم

سناریو	هزینه سرمایه‌گذاری (\$)	هزینه جایگزینی (\$)	هزینه عملیات و نگهداری (\$)	LCOE (\$/kWh)	LCOH (\$/kg)	NPC (M\$)	تولید سالانه هیدروژن (kg/yr)
کمینه	۵۵۰۰۰۰	۴۴۰۰۰۰	۵۰۰	۰/۰۳۵۳	۱۹/۱	۱/۰۱	۴۰۹۱
میانه	۶۵۰۰۰۰	۵۵۰۰۰۰	۵۰۰	۰/۰۴۲۳	۲۲/۸	۱/۲۱	۴۰۹۱
بیشینه	۷۵۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰	۵۰۰	۰/۰۴۹۴	۲۶/۶	۱/۴۱	۴۰۹۱

تحلیل حساسیت نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه توربین بادی نشان می‌دهد شاخص‌های اقتصادی سیستم ترکیبی به طور قابل توجهی تحت تأثیر نوسانات در این پارامتر قرار دارند. با افزایش هزینه سرمایه‌گذاری از ۵۵۰ هزار دلار به ۷۵۰ هزار دلار (معادل افزایش حدود ۳۶ درصد)، هزینه نهایی تولید برق (LCOE) از ۰/۰۳۵۳ به ۰/۰۴۹۴ دلار بر کیلووات‌ساعت افزایش یافته است، که حاکی از رشد ۴۰ درصد در این شاخص است. به صورت مشابه، هزینه نهایی تولید هیدروژن (LCOH) از ۱۹/۱ به ۲۶/۶ دلار بر کیلوگرم رسیده و هزینه کل پروژه (NPC) از ۱/۰۱ به ۱/۴۱ میلیون دلار افزایش یافته است. درخور یادآوری است که تولید سالانه هیدروژن در تمام سناریوها ثابت باقی مانده، که این مسئله نشان‌دهنده آن است که تأثیر هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر از طریق افزایش هزینه‌های سطحی و سرمایه‌گذاری اولیه رخ داده و نه از طریق تغییر عملکرد سیستم. در جمع‌بندی، می‌توان گفت که افزایش هزینه سرمایه‌گذاری در توربین بادی باعث کاهش چشمگیر صرفه اقتصادی سیستم شده و به‌ویژه در پروژه‌هایی که بازگشت سرمایه از اهمیت بالایی برخوردار است، انتخاب توربین با هزینه مناسب و ارزیابی دقیق هزینه‌های سرمایه‌ای از اهمیت راهبردی برخوردار خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهند توربین‌هایی با هزینه سرمایه‌گذاری کمتر، در صورت حفظ عملکرد فنی مشابه، می‌توانند سهم مؤثرتری در کاهش هزینه نهایی تولید انرژی در سامانه‌های چندمنظوره از جمله تولید هم‌زمان برق و هیدروژن ایفا کنند.

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از سامانه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن، منجر به کاهش انتشار گازهای کربنی و کاهش وابستگی به واردات سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف خواهد شد. در این مقاله، یک سامانه انرژی ترکیبی متصل به شبکه با قابلیت تولید هیدروژن به عنوان مطالعه موردی در محدوده یک مرکز تحقیقاتی در نزدیکی دانشگاه آزاد جزیره قشم در استان هرمزگان ایران، مورد بررسی قرار گرفته است. منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر با استفاده از نرم‌افزار HOMER تحلیل شده‌اند تا بهینه‌ترین پیکربندی برای تولید برق و هیدروژن تعیین شود. تحلیل‌های گوناگون فنی - اقتصادی با بهره‌گیری از این نرم‌افزار انجام شده است. بر اساس یافته‌ها، سامانه بهینه شامل انرژی بادی، خورشیدی و اتصال به شبکه است که کمترین هزینه برق تولیدی در حالت پایه (۰/۰۴۲۳۹ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت) و بیشترین سهم انرژی تجدیدپذیر (۹۰ درصد) را دارا است. میزان تولید

سالانه هیدروژن در این پژوهش (۴۰۹۱ کیلوگرم در سال) با هدف تأمین نیاز یک مرکز آموزشی - پژوهشی طراحی شده و نه تأمین هیدروژن کل منطقه یا صنایع استان. با این حال، در نسخه بازبینی شده، به روشنی به محدود بودن مقیاس پروژه اشاره شده و توضیح داده شده است که نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان مدلی اولیه برای توسعه پروژه‌های بزرگ مقیاس در سطح استان یا مناطق صنعتی دیگر مورد استفاده قرار گیرد. در آینده، پیشرفت در فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر می‌تواند نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری در حوزه هیدروژن، به‌ویژه در مناطق شهری و در سطح ملی ایفا کند. تحلیل‌های امکان‌سنجی مبتنی بر نتایج مطالعات مشابه می‌تواند به عنوان مرجعی ارزشمند برای سیاست‌گذاران، سرمایه‌گذاران و ذی‌نفعانی که در پی ایجاد زیرساخت‌های سوخت‌رسانی هیدروژن هستند، مورد استفاده قرار گیرد. با بهره‌گیری از سامانه‌های انرژی ترکیبی، شهرها و کشورها می‌توانند پایداری نظام انرژی خود را ارتقا داده، به کاهش انتشار کربن کمک کنند و زمینه رشد و توسعه هیدروژن را فراهم آورند. برای مطالعات آتی، می‌توان با انجام تحلیل حساسیت سیستم در نرم‌افزار HOMER، عملکرد آن را در برابر تغییر پارامترهای مختلف ارزیابی کرد. همچنین، استفاده از روش‌های هوشمند کنترلی در سامانه‌های ترکیبی می‌تواند با مطالعات مشابه موجود مقایسه شود. امکان تحلیل کاربرد روش‌های کنترلی مختلف، که هنوز به‌طور گسترده به کار گرفته نشده‌اند، در سامانه‌های انرژی ترکیبی با قابلیت تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن نیز وجود دارد. افزون بر این، نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند در آزمون و تجاری‌سازی فرایند تولید هیدروژن سبز مورد استفاده قرار گیرند.

منابع

- [1] Global renewable energy grows by record 9.6% in 2022: IRENA report. Anadolu Agency 2023.
- [2] Xia T, Rezaei M, Dampage U, Alharbi SA, Nasif O, Borowski PF, et al. Techno-economic assessment of a grid-independent hybrid power plant for co-supplying a remote micro-community with electricity and hydrogen. *Processes* 2021;9:1375.
- [3] Pareek A, Dom R, Gupta J, Chandran J, Adepu V, Borse PH. Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Mater Sci Energy Technol* 2020;3:319–27.
- [4] Guo F, Gao J, Liu H, He P. A hybrid fuzzy investment assessment framework for offshore wind-photovoltaic-hydrogen storage project. *J Energy Storage* 2022;45:103757.
- [5] Zhang W, Maleki A, Pourfayaz F, Shadloo MS. An artificial intelligence approach to optimization of an off-grid hybrid wind/hydrogen system. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46:12725–38.
- [6] Jahangiri M, Shamsabadi AA, Mostafaeipour A, Rezaei M, Yousefi Y, Pomares LM. Using fuzzy MCDM technique to find the best location in Qatar for exploiting wind and solar energy to generate hydrogen and electricity. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:13862–75.
- [7] Gökçek M, Kale C. Optimal design of a hydrogen refuelling station (HRFS) powered by hybrid power system. *Energy Convers Manag* 2018;161:215–24.
- [8] Ahmadiourenabadi B, Marzband M, Hosseini-Hemati S, Sadati SMB, Rastgou A. Quantifying and enabling the resiliency of a microgrid considering electric vehicles using a Bayesian network risk assessment. *Energy* 2024;308:133036. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133036>.
- [9] Rastgou A, Moshtagh J, Bahramara S. Probabilistic Power Distribution Planning Using Multi-Objective Harmony Search Algorithm. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* 2018;6:111–25. <https://doi.org/10.22098/joape.2018.3908.1309>.
- [10] Ekren O, Canbaz CH, Güvel ÇB. Sizing of a solar-wind hybrid electric vehicle charging station by using HOMER software. *J Clean Prod* 2021;279:123615.
- [11] Bekele G, Palm B. Feasibility study for a standalone solar–wind-based hybrid energy system for application in Ethiopia. *Appl Energy* 2010;87:487–95.
- [12] Mahmoud FS, Diab AAZ, Ali ZM, El-Sayed A-HM, Alquthami T, Ahmed M, et al. Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms. *Energy Reports* 2022;8:4935–56.
- [13] Popescu D. Techno-Economic Analysis of a RES Microgrid: an Application of HOMER Software. 2021 10th international conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM), IEEE; 2021, p. 1–4.
- [14] Nesamalar JJD, Suruthi S, Raja SC, Tamilarasu K. Techno-economic analysis of both on-grid and off-grid hybrid energy system with sensitivity analysis for an educational institution. *Energy Convers Manag* 2021;239:114188.
- [15] Riayatsyah TMI, Geumpana TA, Fattah IMR, Rizal S, Mahlia TMI. Techno-economic analysis and optimisation of campus grid-connected hybrid renewable energy system using HOMER grid. *Sustainability* 2022;14:7735.
- [16] Syed Mohammed A, Anuj, Lodhi AS, Murtaza Q. Techno-economic feasibility of hydrogen based electric vehicle charging station: a case study. *Int J Energy Res* 2022;46:14145–60.
- [17] Thaler B, Posch S, Wimmer A, Pirker G. Hybrid model predictive control of renewable microgrids and seasonal hydrogen storage. *Int J Hydrogen Energy* 2023;48:38125–42.
- [18] Yang G, Zhang H, Wang W, Liu B, Lyu C, Yang D. Capacity optimization and economic analysis of PV–hydrogen hybrid systems with physical solar power curve modeling. *Energy Convers Manag* 2023;288:117128.
- [19] Wang R, Zhang R. Techno-economic analysis and optimization of hybrid energy systems based on hydrogen storage for sustainable energy utilization by a biological-inspired optimization algorithm. *J Energy Storage* 2023;66:107469.
- [20] Alonso AM, Costa D, Messagie M, Coosemans T. Techno-economic assessment on hybrid energy storage systems comprising hydrogen and batteries: A case study in Belgium. *Int J Hydrogen Energy* 2024;52:1124–35.

- [21] Abdolmaleki L, Berardi U. Hybrid solar energy systems with hydrogen and electrical energy storage for a single house and a midrise apartment in North America. *Int J Hydrogen Energy* 2024;52:1381–94.
- [22] Kalinci Y. Alternative energy scenarios for Bozcaada island, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;45:468–80.
- [23] Siddiqui O, Dincer I. Optimization of a New Renewable Energy System for Producing Electricity, Hydrogen and Ammonia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2021;44:101023. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101023>.
- [24] Sherwin ED. Electrofuel Synthesis from Variable Renewable Electricity: An Optimization-Based Techno-Economic Analysis. *Environ Sci Technol* 2021;55:7583–94.
- [25] Jahangiri M, Shahmarvandi FK, Alayi R. Renewable Energy-Based Systems on a Residential Scale in Southern Coastal Areas of Iran: Trigenation of Heat, Power, and Hydrogen. *Journal of Renewable Energy and Environment* 2021;8:67–76. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.261980.1170>.
- [26] Zahedi A, AL-bonsrulah HAZ, Tafavogh M. Conceptual design and simulation of a stand-alone Wind/PEM fuel Cell/Hydrogen storage energy system for off-grid regions, a case study in Kuhn, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2023;57. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103142>.
- [27] Bahramisamani M, Jahangiri M. Wind-Powered Hydrogen Production: A Promising Outlook for Iran's Clean Energy Future. *Iranica Journal of Energy & Environment* 2025;16:67–78. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.08>.
- [28] Mostafaeipour A, Jahangiri M, Saghaei H, Raiesi Goojani A, Chowdhury MS, Techato K. Impact of Different Solar Trackers on Hydrogen Production: A Case Study in Iran. *International Journal of Photoenergy* 2022;2022:3186287. <https://doi.org/10.1155/2022/3186287>.
- [29] Agyekum EB, Ampah JD, Afrane S, Adebayo TS, Agbozo E. A 3E, hydrogen production, irrigation, and employment potential assessment of a hybrid energy system for tropical weather conditions—Combination of HOMER software, shannon entropy, and TOPSIS. *Int J Hydrogen Energy* 2022;47:31073–97.
- [30] Abdin Z, Mérida W. Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: A techno-economic analysis. *Energy Convers Manag* 2019;196:1068–79.
- [31] Arat HT, Baltacioglu MK, Tanç B, Sürer MG, Dincer I. A perspective on hydrogen energy research, development and innovation activities in Turkey. *Int J Energy Res* 2020;44:588–93.
- [32] Kalinci Y, Hepbasli A, Dincer I. Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40:7652–64.
- [33] Caliskan A, Percin HB. Techno-economic analysis of a campus-based hydrogen-producing hybrid system. *Int J Hydrogen Energy* 2024;75:428–37.
- [34] Al-Sharafi A, Sahin AZ, Ayar T, Yilbas BS. Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;69:33–49.
- [35] Turkdogan S. Design and optimization of a solely renewable based hybrid energy system for residential electrical load and fuel cell electric vehicle. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2021;24:397–404.
- [36] Aboutalebi GR, Khalili M, Jahangiri M. Effect of temperature coefficient and efficiency of PV technologies on 3E performance and hydrogen production of on-grid PV system in a very hot and humid climate. *Journal of Solar Energy Research* 2023;8:1715–27.
- [37] (SATBA) RE and EEO of I. Guaranteed Electricity Purchase Tariff. Tehran: Iran's Ministry of Energy; 2021.
- [38] Aboutalebi GR, Khalili M, Jahangiri M. Effect of Temperature Coefficient and Efficiency of PV Technologies On 3E Performance and Hydrogen Production of On-Grid PV System in A Very Hot and Humid Climate. *Journal of Solar Energy Research* 2023;8:1715–27. <https://doi.org/10.22059/jser.2024.362287.1326>.

- [39] Recioui A, Dekhandji FZ. Hydrogen-based hybrid renewable energy system sizing optimization using HOMER. 2022 13th International Renewable Energy Congress (IREC), IEEE; 2022, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IREC56325.2022.10002028>.
- [40] Araoye TO, Ashigwuike EC, Umar SA, Adebayo TF, Egoigwe S V, Odo MC, et al. Modeling and optimization of hybrid microgrid energy system: a case study of University of Abuja, Nigeria. International Journal of Power Electronics and Drive Systems 2023;14:1201–9. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i2.pp1201-1209>.
- [41] Pürlü M, Ozkan Ü. Economic and environmental analysis of grid-connected rooftop photovoltaic system using HOMER. Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems 2023;3:39–46. <https://doi.org/10.5152/tepes.2023.23002>.
- [42] Luta DN, Raji AK. Decision-making between a grid extension and a rural renewable off-grid system with hydrogen generation. Int J Hydrogen Energy 2018;43:9535–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.032>.