



Original Article

Modeling and Optimization of a Hybrid Solar-Wind Renewable System for Electricity Generation in Fereydunshahr Farms

Mehran Movahedi¹, Asadolah Akram^{1*}, Majid Khanali¹

1- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Hybrid Systems,
Renewable Energy,
Sustainable Agriculture,
Technical and Economic
Analysis

Received:

January 19, 2025

Revised:

February 18, 2025

Accepted:

March 10, 2025

* Corresponding Author:

aakram@ut.ac.ir

ABSTRACT

The agricultural sector, as one of the most energy-intensive sectors, plays a vital role in ensuring food security. With the increasing global demand for energy and intensifying environmental concerns, the need to use renewable resources in this area is felt more than ever. However, high initial costs and production instability have created serious obstacles to the development of these technologies. This study, with the aim of identifying technical and economic solutions for providing sustainable energy in agriculture, examined different scenarios for renewable energy production on a 50-hectare farm located in Fereydunshahr County, Isfahan Province. For this purpose, six scenarios based on the combination of solar and wind energy were designed and simulated and optimized using Homer software. The results showed that Scenario 5, which includes a combination of solar and wind renewable energies, connected to the national grid, with the possibility of selling excess energy to the grid and without the use of fossil fuel generators, is the best option, producing 462.99 MWh of energy and a 58% contribution from renewable sources. This scenario is considered the most economically viable option with an energy cost of \$0.022 per kWh. This study, emphasizing the need to develop storage infrastructure and improve energy production technologies, shows that the use of renewable hybrid systems can be a fundamental step in reducing dependence on fossil fuels and realizing sustainable agriculture.

Introduction

Energy, a critical pillar of development, plays a key role in the global economy by driving industrial, agricultural, transportation, and other economic sectors. The significant increase in population and economic growth, particularly in developing countries, has resulted in a considerable rise in global energy demand in recent decades. In the agricultural sector, energy consumption has been increasing due to its usage in irrigation and agricultural equipment. This growth in demand coupled with economic development necessitates a close examination of consumption patterns and the formulation of appropriate policies to manage consumption and foster sustainable development in the energy sector. Given the growing significance of utilizing renewable energy in the agricultural sector, the present study investigates the potential of harnessing alternative energy sources on agricultural farms in the Fereydunshahr region of Isfahan province. Currently, energy in agricultural farms in this region is primarily supplied through fossil resources and traditional methods or through the national electricity grid, which leads to dependency on non-renewable energy sources and increased costs. The primary objective of this study is to model and evaluate the technical and economic feasibility of using renewable energy systems in agricultural farms within the Fereydunshahr region.

Materials and Methods

How to cite:

Movahedi, M., Akram, A. and Khanali, M. (2025). *Modeling and Optimization of a Hybrid Solar-Wind Renewable System for Electricity Generation in Fereydunshahr Farms*. *Journal of Agricultural Mechanization*, 10 (1):67-86.
<https://doi.org/10.22034/jam.2025.65536.1313>.



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



The present study aimed to investigate and analyze the electricity supply to a 50-hectare farm located in Fereydunshahr County, Isfahan Province, in a cold and mountainous area at an altitude of 2510 meters above sea level. To achieve this, six scenarios were designed and evaluated, taking into account sustainable agricultural production. Scenario 1: Combination of solar and wind renewable energies, connected to the national grid, without the possibility of selling excess energy to the grid and using fossil fuel generators. Scenario 2: Combination of solar and wind renewable energies, connected to the national grid, with the possibility of selling excess energy to the grid and using fossil fuel generators. Scenario 3: Combination of solar and wind renewable energies, independent of the national grid, designed for operation in areas without access to the electricity grid and using fossil fuel generators. Scenario 4: Combination of solar and wind renewable energies, connected to the national grid, without the possibility of selling to the grid and without the use of fossil fuel generators. Scenario 5: Combination of solar and wind renewable energies, connected to the national grid, with the possibility of selling excess energy to the grid and without the use of fossil fuel generators. Scenario 6: Using the national grid and fossil fuel generators (diesel fuel) to provide electricity, without the use of renewable energy sources. The technical and economic aspects of these scenarios were assessed using simulation, optimization, and sensitivity analysis in the Homer software. Data related to equipment, initial and operating costs, load patterns, and regional climatic conditions were analyzed to develop a comprehensive assessment of each scenario.

Results and Discussion

Based on the available results, Scenario 1 combines solar, wind, and generator renewables connected to the national grid without the ability to sell excess energy back to the grid. It generates a total of 406,269 kWh of energy, with 31.8% derived from renewables. Scenario 4 is similar to Scenario 1, but it omits the use of fossil fuel generators and the ability to sell excess energy. It produces 462,435 kWh of energy, with a renewable share of 41.8%. The unused energy in this scenario is 134,533 kWh, and the initial cost and energy cost are \$263,920 and \$0.0502 per kWh, respectively. Scenario 5 represents an ideal balance by combining solar and wind resources connected to the national grid with the ability to sell excess energy to the grid. It generates 462,998 kWh of energy, with a renewable energy share of 58%, resulting in only 5,806 kWh of unused energy. The initial cost is \$265,825, and the energy cost is \$0.0226 per kWh, making it a cost-efficient and sustainable option when considering the balance between renewable energy generation, cost reduction, and waste reduction. Scenario 6 solely relies on non-renewable sources, including the national grid and fossil fuel generators, which generates 320,606 kWh of energy but contributes no renewable energy. The initial cost is \$60,000, and the energy cost is \$0.0199 per kWh, the lowest among the scenarios. However, relying entirely on non-renewable resources has significant negative environmental impacts, making this scenario unsustainable from a sustainability perspective. This comparison underscores the benefits of Scenario 5 in terms of sustainable energy supply and cost efficiency. The analysis also underscores the importance of complementary policies, technological efficiency, and environmental factors for the widespread adoption and sustainability of renewable energy systems.

Conclusion

To address the need for sustainable energy sources in farms aimed at increasing food security, this study modeled and optimized various scenarios. Through this process, Scenario 5 was identified as the most optimal option. It is a combination of solar and wind renewable energies, connected to the national grid, and possesses the capability to sell excess energy to the grid while eliminating the use of fossil fuel generators.



مدل سازی و بهینه سازی سامانه تجدیدپذیر ترکیبی خورشیدی - بادی برای تولید الکتریسیته مزارع فریدون شهر

مهران موحدی^۱، اسداله اکرم^{۱*}، مجید خانعلی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

۱- گروه مهندسی ماشین های کشاورزی- دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی- دانشگاه تهران- کرج- ایران.

* نویسنده مسئول E-mail: aakram@ut.ac.ir

چکیده

بخش کشاورزی به عنوان یکی از پرمصرف ترین بخش ها از نظر انرژی، نقشی حیاتی در تأمین امنیت غذایی دارد. با افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و تشدید نگرانی های محیط زیستی، ضرورت استفاده از منابع تجدیدپذیر در این حوزه بیش از پیش احساس می شود. با این حال، هزینه های اولیه بالا و ناپایداری تولید، موانعی جدی برای توسعه این فناوری ها ایجاد کرده است. این پژوهش با هدف شناسایی راهکارهای فنی و اقتصادی برای تأمین انرژی پایدار در کشاورزی، به بررسی سناریوهای مختلف تولید انرژی تجدیدپذیر در یک مزرعه ۵۰ هکتاری واقع در شهرستان فریدون شهر، استان اصفهان پرداخته است. برای این منظور، شش سناریوی مبتنی بر ترکیب انرژی های خورشیدی و بادی طراحی و با استفاده از نرم افزار هومر شبیه سازی و بهینه سازی شدند. نتایج نشان داد که سناریو ۵ که شامل ترکیب انرژی های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، متصل به شبکه سراسری، با امکان فروش انرژی مازاد به شبکه و بدون استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی است، با تولید ۴۶۲/۹۹ مگاوات ساعت انرژی و مشارکت ۵۸ درصدی منابع تجدیدپذیر، بهترین گزینه می باشد. این سناریو با هزینه انرژی ۰/۰۲۲ دلار به ازای هر کیلووات ساعت، از نظر اقتصادی به صرفه ترین گزینه محسوب می شود. این پژوهش با تأکید بر ضرورت توسعه زیرساخت های ذخیره سازی و ارتقای فناوری های تولید انرژی، نشان می دهد که استفاده از سامانه های ترکیبی تجدیدپذیر می تواند گامی اساسی در کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و تحقق کشاورزی پایدار باشد.

کلمات کلیدی: انرژی های تجدیدپذیر، تحلیل فنی و اقتصادی، سامانه های ترکیبی، کشاورزی پایدار

۱- مقدمه

انرژی به عنوان یکی از ارکان حیاتی و اساسی توسعه، نقش محوری در پویایی اقتصاد جهانی ایفا می کند. این رکن حیاتی به عنوان محرک اساسی در فعالیتهای صنعتی، کشاورزی، حمل و نقل و دیگر بخشهای اقتصادی، تأثیر مستقیمی بر رشد و توسعه پایدار جوامع بشری دارد (Tahir et al., 2023). با افزایش چشمگیر جمعیت و رشد اقتصادی در دهه های اخیر، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، تقاضای جهانی برای انرژی به طور قابل توجهی افزایش یافته است و این روند رو به رشد، وابستگی فزاینده به سوخت های فسیلی را در آینده نزدیک اجتناب ناپذیر ساخته و نگرانی های محیط زیستی از جمله تغییرات اقلیمی، آلودگی هوا و منابع آبی را به شدت تشدید کرده است (Fayazi et al., 2024). از این رو، مشکل اساسی، ایجاد تعادلی مؤثر بین توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط زیست است. راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی و گسترش استفاده از منابع تجدیدپذیر نظیر انرژی های خورشیدی، بادی، آبی و زمین گرمایی، به عنوان راهکارهای کلیدی برای مقابله با چالش های مطرح در این حوزه شناخته می شود. با این حال، گسترش و توسعه این منابع با چالش های قابل توجهی نظیر هزینه های بالای اولیه، نوسانات تولید و نیاز به زیرساخت های فناوری پیشرفته مواجه است. بنابراین، حمایت های دولتی و تدوین سیاست های مناسب می تواند در تسریع فرآیند گذار به سوی انرژی های تجدیدپذیر و رفع این چالش ها نقش حیاتی ایفا کند (Tahir et al., 2023).

در همین راستا، باتوجه به افزایش تقاضای جهانی انرژی و نگرانی های محیط زیستی ناشی از استفاده بیش از حد از سوخت های فسیلی، بخش کشاورزی به عنوان یکی از بزرگ ترین مصرف کنندگان انرژی، اهمیت ویژه ای پیدا کرده است. در این بخش، انرژی نه تنها به عنوان یکی از ارکان اصلی تولید شناخته می شود، بلکه میزان مصرف آن به طور مستقیم با بهره وری تولید مرتبط است. کشاورزی به عنوان یک زنجیره پیچیده شامل تولید، فرآوری و عرضه محصولات به مصرف کنندگان، در کشورهای در حال توسعه نقشی کلیدی در توسعه اقتصادی ایفا می کند. افزایش بهره وری و مکانیزه شدن سامانه های تولید کشاورزی، از مهم ترین عوامل کاهش فقر در سطح جهانی است و انرژی در این زمینه نقشی حیاتی دارد (Manasseh et al., 2025). در این میان، انرژی الکتریکی به عنوان یکی از مهم ترین حامل های انرژی، نقش محوری در زندگی روزمره بشر و به ویژه در بخش کشاورزی ایفا می کند (Jalalvand et al., 2024). مزایای این انرژی، از جمله تولید مقرون به صرفه و تنوع روش های تولید، تقاضا برای آن را در بخش کشاورزی افزایش داده است. با این حال، چالش هایی مانند ذخیره سازی، مدیریت عرضه و تقاضا، تأثیرات

محیط زیستی و برخی روش های تولید، توسعه گسترده آن را با محدودیت مواجه کرده است.

در بخش کشاورزی، مصرف الکتریسیته به دلیل کاربرد آن در آبیاری و تجهیزات کشاورزی رو به افزایش است. رشد بالای تقاضای الکتریسیته در کشور و یارانه های انرژی، لزوم بررسی دقیق تر الگوی مصرف و تدوین سیاست های مناسب برای مدیریت مصرف و توسعه پایدار بخش انرژی را نشان می دهد (Tari et al., 2023). بر اساس گزارش جامع صنعت الکتریسیته که در اسفند ماه سال ۱۴۰۱ منتشر شده است، میزان انرژی الکتریکی مصرفی در بخش کشاورزی کشور معادل ۴۵۶۲۴ میلیون کیلووات ساعت تخمین زده شد؛ که این میزان انرژی توسط ۵۲۳۰۰۰ مشترک مورد استفاده قرار گرفته است. سهم این میزان مصرف نسبت به کل انرژی الکتریکی معادل ۱۴/۴ درصد برآورد شده است. همچنین، میانگین درصد رشد سالانه مصرف انرژی الکتریکی در بخش کشاورزی ایران در دوره ی ۱۳۹۳ تا پایان سال ۱۴۰۱ حدود ۸ درصد اعلام شده است (Iran Ministry of Energy, 2023). انرژی های تجدیدپذیر نه تنها در تأمین الکتریسیته مورد نیاز برای پمپاژ آب، بلکه در گرمایش و سرمایش گلخانه ها، تأسیسات دامداری و طیور و حتی روشنایی مزارع نیز کاربرد دارند. به این ترتیب، انرژی های تجدیدپذیر نقش مهمی در بهبود بهره وری و کاهش هزینه های تولید در بخش کشاورزی ایفا می کنند (Mottaghi & Rahimi Khob, 2023). علاوه بر کشاورزی، این انرژی ها برای تأمین نیاز بخش های غیر کشاورزی مناطق روستایی به ویژه مناطق خارج از شبکه الکتریسیته نیز قابل استفاده است (Adefarati & Bansal, 2019). این منابع انرژی نه تنها در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و تأثیرات منفی بر محیط زیست نقش مؤثری ایفا می کنند، بلکه به عنوان راه حل هایی پایدار و سازگار با محیط زیست به شمار می روند که می توانند به طور مستمر در تولید انرژی مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، یکی از چالش های عمده در بهره برداری از این منابع، علاوه بر هزینه بالای راه اندازی، نوسانات و تغییرات ذاتی در تولید انرژی است. برای مقابله با این مشکل و افزایش پایداری سامانه های تولید الکتریسیته، رویکرد ترکیب منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر به عنوان یک راهکار مؤثر معرفی شده است. در این راستا، پژوهش های مختلفی نشان دادند که سامانه های ترکیبی با ترکیب هوشمندانه منابعی چون انرژی خورشیدی، بادی، آبی، زمین گرمایی و زیست توده، همراه با سامانه های ذخیره سازی انرژی، این امکان را فراهم می آورند که انرژی تولیدی مازاد در زمان های پرباری ذخیره شده و در زمان های کم باری به شبکه تزریق گردد. این سامانه ها با مدیریت بهینه منابع انرژی و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی، می توانند نقش مؤثری در تأمین انرژی پایدار

مبتنی بر دیزل برای تقریباً همه رده‌های اثر (تغییرات آب و هوایی، تخریب لایه ازن، اسیدی شدن، اختناق دریاچه‌ای و استفاده از منابع فسیلی) است. نتایج کلی نشان داد که کاربرد این سامانه از انتشار حدود ۶۵۷۰ تن گاز کربن‌دی‌اکسید در ۲۵ سال (طول زندگی سامانه) جلوگیری خواهد کرد.

Razmjoo et al., (2021) در پژوهشی چندین سامانه تجدیدپذیر ترکیبی پایدار برای تولید الکتریسیته در منطقه رضوان در ایران را مورد ارزیابی قرار دادند. در این کار پس از بررسی جامع مسائل محیط‌زیستی، داده‌های سازمان هواشناسی جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزار هومر ارزیابی فنی اقتصادی انجام شد. نتایج نشان داد که پیکربندی ترکیبی متشکل از سلول‌های خورشیدی، توربین بادی، دیزل ژنراتور و باتری بهترین نتیجه را با هزینه انرژی ۰/۱۵۱ دلار در کیلووات ساعت و ۱۵/۶ درصد بازگشت سرمایه ایجاد کرد. علاوه بر این، این سامانه ترکیبی می‌تواند سالانه بیش از ۲۰۰۰ کیلوگرم انتشار کربن را به ازای هر خانوار کاهش دهد.

جمع‌بندی پژوهش‌ها بر اهمیت بهینه‌سازی سامانه‌ها بر اساس شرایط اقتصادی و فنی تأکید دارند تا راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه با کمترین اثرات محیط‌زیستی برای بخش کشاورزی شناسایی شوند. با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش کشاورزی، پژوهش حاضر به بررسی پتانسیل بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر در مزارع کشاورزی منطقه فریدون‌شهر استان اصفهان می‌پردازد. این منطقه با طبیعت بکر، آب و هوای متنوع و قابلیت کشت محصولات مختلف از جمله غلات، حبوبات، ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی و محصولات باغی، از دیرباز به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی استان شناخته می‌شود. در حال حاضر، تأمین انرژی در مزارع کشاورزی این منطقه عمدتاً از طریق منابع فسیلی و روش‌های سنتی یا از طریق شبکه الکتریسیته سراسری انجام می‌شود که باعث وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر و افزایش هزینه‌ها می‌شود. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، مدل‌سازی و ارزیابی فنی اقتصادی استفاده از سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر در مزارع کشاورزی فریدون‌شهر است. این پژوهش به دنبال معرفی راهکارهایی برای کاهش وابستگی به منابع فسیلی و استفاده بهینه از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی در بخش کشاورزی می‌باشد.

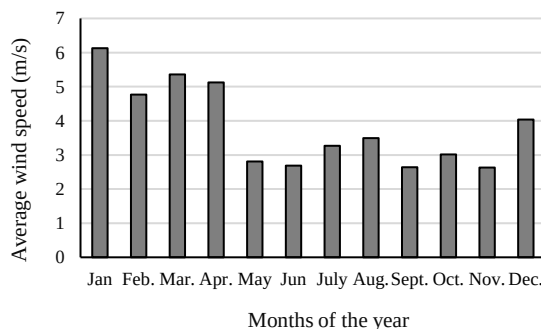
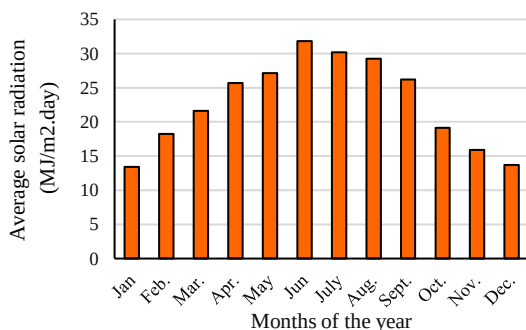
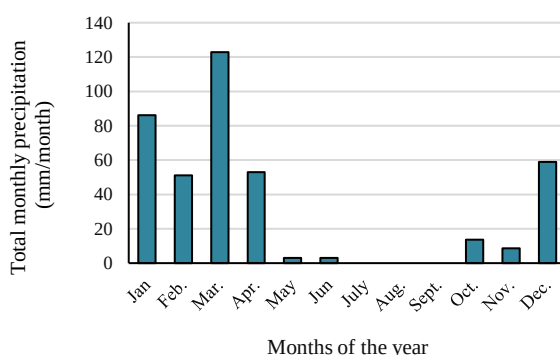
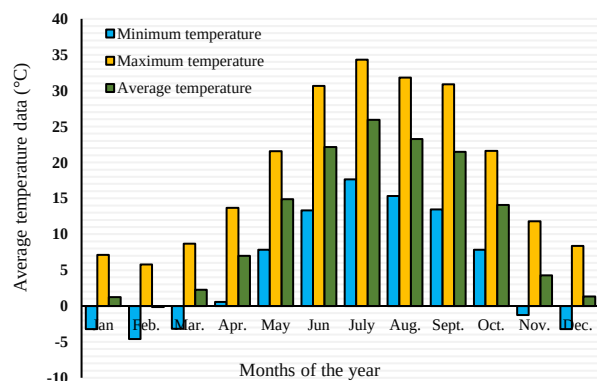
نوآوری این پژوهش در مدل‌سازی دقیق و بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر برای کشاورزی است که نه تنها به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک می‌کند، بلکه به افزایش استقلال انرژی در بخش کشاورزی نیز می‌انجامد. این پژوهش با تحلیل و مقایسه عملکرد سامانه‌های مختلف انرژی تجدیدپذیر و پیشنهاد اندازه بهینه آن‌ها، به

و کاهش تأثیرات منفی بر محیط‌زیست ایفا کنند (Kiehadrouinezhad et al., 2022). همچنین، استفاده از این سامانه‌ها می‌تواند در بخش‌های مختلف اقتصادی، به ویژه در کشاورزی، که نیازمند تأمین انرژی در مقیاس وسیع است، به‌طور چشمگیری به بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها کمک نماید (Colmenar-Santos et al., 2020).

Kapen et al., (2022) در پژوهشی به مقایسه دو سناریو برای تأمین الکتریسیته در کشور کامرون پرداختند. سناریو ۱ شامل پنل خورشیدی، پیل سوختی، الکترولیز و بیوگاز؛ و سناریو ۲ شامل باتری، پنل خورشیدی، پیل سوختی، الکترولیز و بیوگاز بود. در این طرح از ترکیب الکترولیز، پیل سوختی و مخزن هیدروژن برای کاهش نیاز ذخیره‌سازی باتری استفاده شد. نتایج نشان داد که سناریو ۲ تأثیرات محیط‌زیستی کمتری در مقایسه با سناریو ۱ دارد. استفاده از باتری منجر به کاهش هزینه انرژی شد و انتشار کلی کربن‌دی‌اکسید و کربن مونوکسید برای سناریو ۲ در مقایسه با سناریو ۱ کمتر بود. همچنین نتایج بهینه‌سازی نشان داد که ترکیب الکترولیز آب، پیل سوختی و مخزن هیدروژن همراه با ژنراتور بیوگاز و ماژول‌های خورشیدی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل جایگزین برای در دسترس قرار دادن برق برای جمعیت شمال کامرون استفاده گردد.

Garcia et al., (2022) در پژوهشی طرح‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف تأمین انرژی الکتریکی برای یک مزرعه فاقد دسترسی به شبکه برق سراسری، بهینه‌سازی و بررسی کردند. در این پژوهش سامانه‌های مختلفی از جمله خورشیدی و آبی مقیاس کوچک همراه با دیزل ژنراتور و بلنک باتری به‌عنوان سامانه پشتیبان بررسی شدند. نتایج نشان داد که سامانه‌های با وابستگی بیشتر به باتری از نظر اثرات محیط‌زیستی کمترین تأثیر را دارند، در حالی که در سامانه‌های بهینه‌شده برای کاهش مصرف منابع معدنی و فلزی، مصرف سوخت افزایش یافته است. همچنین، در این سامانه‌ها، حداکثر ۳۷ درصد از کل انرژی تولیدشده مصرف می‌شود. این پژوهش به‌ویژه بر شناسایی راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه و با کمترین اثرات محیط‌زیستی برای کربن‌زدایی بخش کشاورزی تأکید دارد.

Gandiglio et al., (2022) به بررسی یک راه‌حل نوآورانه مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر با یک سامانه ترکیبی ذخیره انرژی هیدروژن باتری پرداختند. همچنین یک ارزیابی چرخه زندگی مقایسه‌ای به‌منظور بررسی بهبودهای زیست‌محیطی سامانه مبتنی انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با پیکربندی مبتنی بر تأمین الکتریسیته موجود و سوخت دیزل انجام دادند. نتایج نشان داد که تأثیر سامانه مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر کمتر از ۱۰ درصد از روش



شکل ۱- میانگین ماهانه داده‌های دما، بارش، سرعت باد و تابش خورشیدی در منطقه مورد مطالعه.

Fig 1. Monthly average data of temperature, precipitation, wind speed and solar radiation in the study area.

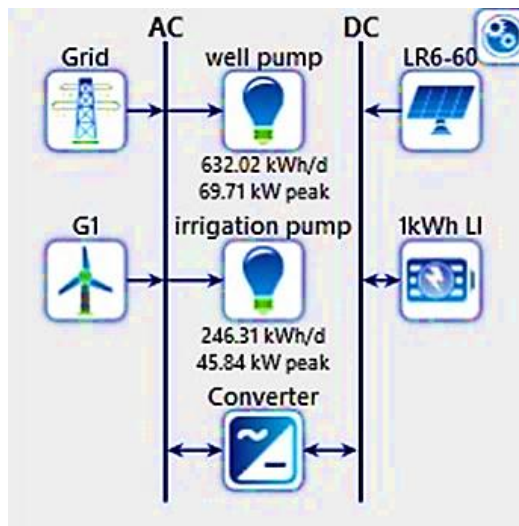
سیاست‌گذاران کشاورزی راهکارهای عملی و علمی برای اجرای پایدار و کارآمد این سامانه‌ها در مزارع کشاورزی ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به منظور بررسی و تحلیل تأمین انرژی الکتریسته برای یک مزرعه ۵۰ هکتاری در شهرستان فریدون‌شهر، واقع در استان اصفهان، در یک منطقه سرد و کوهستانی و در ارتفاع ۲۵۱۰ متری از سطح دریا، انجام شد. این شهرستان در مختصات جغرافیایی ۳۲/۹۴ عرض جغرافیایی و ۵۰/۱۲ طول جغرافیایی واقع شده است. مزرعه مذکور که در نزدیکی شبکه سراسری الکتریسته واقع است، از سامانه آبیاری مدرن بهره می‌برد و برای تأمین آب آبیاری خود از یک چاه عمیق با عمق ۲۰۰ متر و پمپ‌های الکتریکی استفاده می‌کند. این مزرعه به‌طور کلی از یک پمپ الکتریکی برای پمپاژ آب از چاه عمیق و یک پمپ الکتریکی دیگر برای تأمین آب آبیاری تحت فشار با حداکثر فشار ۶ اتمسفر برخوردار است. علاوه بر این، مزرعه دارای تجهیزات روشنایی برای تأمین نور در اتاق‌ها و نقاط مختلف آن می‌باشد. این ترکیب از تجهیزات الکتریکی و نیازهای انرژی مختلف، فرصتی مناسب برای بررسی راهکارهای متنوع تأمین انرژی، به‌ویژه استفاده از منابع تجدیدپذیر، به‌شمار می‌رود.

در ابتدا، تمام داده‌های مرتبط با منطقه بر اساس میانگین مقدار گزارش شده، از طریق بازدید از منطقه و همچنین از داده‌های موجود جمع‌آوری شدند. داده‌ها به صورت متوسط ۱۰ ساله می‌باشد و شامل داده‌های میانگین ساعتی بارش (mm)، میانگین دما (°C)، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین ($m s^{-1}$) و تابش خورشیدی ($W m^{-2}$) در منطقه مورد مطالعه است. از این داده‌های ساعتی، داده‌های مجموع بارش ماهیانه، میانگین دمای کمینه، میانگین دمای بیشینه و میانگین دمای ماهیانه، میانگین سرعت باد و میانگین تابش خورشیدی استخراج شده است. نمودار میانگین ماهانه داده‌های دما، بارش، سرعت باد و تابش خورشیدی در شهرستان فریدون‌شهر در شکل ۱ نشان داده شده است.

و از ژنراتور برای تأمین انرژی استفاده کند. علاوه بر این، ریزشبه قابلیت اتصال به شبکه سراسری را دارد و می‌تواند در صورت نیاز، الکتریسیته موردنیاز را از شبکه تأمین کند. همچنین، در حدود چهار تا پنج ماه از سال که به دلیل شرایط اقلیمی منطقه هیچ‌گونه محصول کشاورزی تولید نمی‌شود، الکتریسیته تولیدی مازاد توسط ریزشبه به شبکه سراسری فروخته می‌شود و از این طریق امکان درآمدزایی فراهم می‌گردد. شکل ۳ نحوه‌ی عملکرد این استراتژی برای کنترل سامانه تولید انرژی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. در این استراتژی، ژنراتور تنها توان کافی برای برآوردن نیاز بار اولیه را در زمانی که اجزای تجدیدپذیر نتوانند، کل توان مورد نیاز را فراهم کنند، تأمین می‌کند. همچنین اجزای تجدیدپذیر وظیفه شارژ باتری‌ها را نیز به عهده دارند. در این استراتژی در هر مرحله زمانی مجموع توان تولیدی از منابع تجدیدپذیر محاسبه شده و سپس با مقدار نیازمندی مقایسه می‌گردد. در شرایطی که توان تولیدی بیش از نیاز سامانه است، مازاد الکتریسیته تولیدی ابتدا برای شارژ بانک باتری استفاده شده و سپس مقدار باقی‌مانده به‌عنوان الکتریسیته مازاد در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند به صورت مستقیم به شبکه سراسری برق جهت افزایش درآمد صاحبان زمین فروخته شود. در صورتی که توان تولیدی کمتر از مقدار انرژی مورد نیاز باشد، اقتصادی‌ترین روش میان دشارژ بانک باتری و یا روشن‌سازی ژنراتور سوخت فسیلی انتخاب می‌گردد. در جدول ۲ جزئیات اقتصادی و در جدول ۳ جزئیات فنی اجزای مختلف این سامانه شامل پنل‌های خورشیدی، توربین بادی، مبدل، باتری و ژنراتور دیزلی نشان داده شده است.



شکل ۲- طرحواره‌ی سامانه‌ی ترکیبی تولید انرژی الکتریکی برای پژوهش حاضر.

Fig 2. Schematic of the combined electrical energy generation system for the present study.

در این پژوهش برای تأمین انرژی الکتریکی مزرعه مورد بررسی و دستیابی به هدف پایداری در تولید محصولات کشاورزی، شش سناریوی مختلف طراحی و ارزیابی شد. این سناریوها، پس از پژوهش‌های گسترده در زمینه فناوری‌های موجود، باهدف ارائه راهکارهای جامع برای تحقق سامانه انرژی پایدار تدوین شده‌اند. جدول ۱ سناریوهای مورد بررسی را به طور کامل توصیف می‌کند. این سناریوها با هدف ارزیابی فنی - اقتصادی سامانه‌های مختلف انرژی تدوین شده‌اند تا ضمن تأمین انرژی پایدار، امکان کاهش هزینه‌ها و کاهش وابستگی به منابع فسیلی نیز فراهم شود. ارزیابی این سناریوها از طریق شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت در نرم‌افزار هومر (HOMER Energy LLC, 2016) انجام شد. این فرآیند شامل تحلیل داده‌های مربوط به تجهیزات، هزینه‌های اولیه و عملیاتی، الگوهای بار مصرفی و شرایط اقلیمی منطقه بود.

جدول ۱- سناریوهای مورد بررسی در پژوهش حاضر.

Table 1. Scenarios studied in the present study.

سناریوها	توصیف
Scenarios	Description
سناریو ۱ Scenario 1	ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، متصل به شبکه سراسری، بدون امکان فروش انرژی مازاد به شبکه و با استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی
سناریو ۲ Scenario 2	ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، متصل به شبکه سراسری، همراه با امکان فروش انرژی مازاد به شبکه و با استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی
سناریو ۳ Scenario 3	ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، متصل از شبکه سراسری، طراحی شده برای بهره‌برداری در مناطق فاقد دسترسی به شبکه الکتریسیته و با استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی
سناریو ۴ Scenario 4	ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، متصل به شبکه سراسری، بدون امکان فروش به شبکه و بدون استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی
سناریو ۵ Scenario 5	ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، متصل به شبکه سراسری، با امکان فروش انرژی مازاد به شبکه و بدون استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی
سناریو ۶ Scenario 6	استفاده از شبکه سراسری و ژنراتورهای سوخت فسیلی (سوخت دیزل) برای تأمین الکتریسیته، بدون بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر

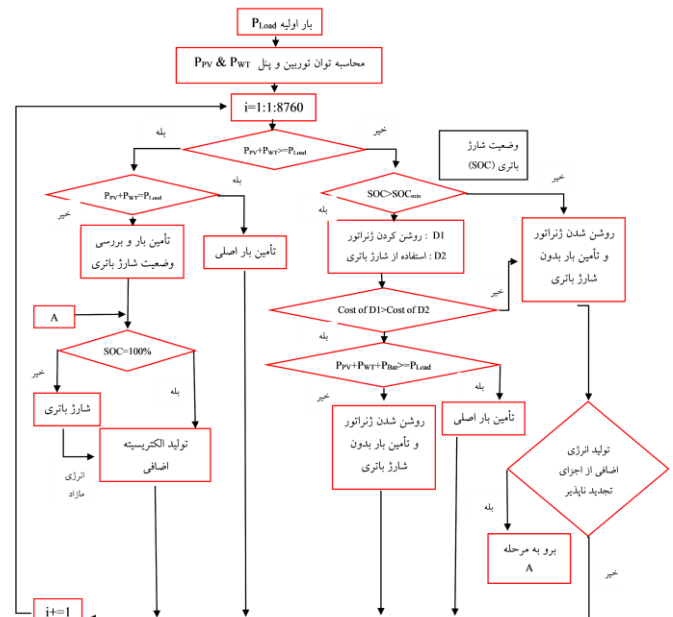
شکل ۲ طرحواره‌ی سامانه‌ی ترکیبی تولید انرژی الکتریکی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. این مدل به‌گونه‌ای طراحی شده که سامانه پشتیبان آن تنها در زمان افت توان به‌صورت فعال وارد عمل شود

جدول ۳- اطلاعات فنی اجزای سامانه تولید توان در پژوهش

حاضر مطابق کتابخانه نرم افزار هومر.

Table 3. Technical information of the components of the power generation system in the present study according to the Homer software library.

(Solar Panel)	
پنل خورشیدی	Model
LONGi LR6-72HV-350M	Nominal capacity
350 W	Cell type
Mono-Crystalline Cell	ضریب دما
-0.410	Temperature coefficient
45 °C	Operating temperature
18.1 %	Efficiency
(Wind Turbine)	
توربین بادی	Model
AWS HC 3.3kW Wind Turbine	ارتفاع هاب
12 m	Hub Height
4.65 m	Impeller Diameter
3.3 kW	ظرفیت اسمی
2.2 m/s	Nominal Capacity
12 m/s	کمترین سرعت باد برای کارکرد
	Min Wind Speed for Operation
	بیشترین سرعت باد برای کارکرد
	Max Wind Speed for Operation
(Generator)	
ژنراتور	Model
Generic Small Genset	حداکثر ظرفیت نامی
80 kW	Max Rated Capacity
25%	حداقل نسبت بار
	Min Load Ratio
دیزل	نوع سوخت مصرفی
	Fuel Type
(Battery)	
باتری	Model
Li-Ion – لیتیوم یون	ولتاژ اسمی
6 V	Nominal voltage
1 kWh	ظرفیت اسمی هر واحد
	Nominal capacity per unit
167 A	بیشترین جریان شارژ
	Max charging current
90%	راندمان شارژ و دشارژ
	Charging and discharging efficiency
3000 kWh	توان عملیاتی
	Operating power



شکل ۳- فلوچارت نحوه عملکرد استراتژی برای کنترل سامانه

تولید انرژی در پژوهش حاضر.

Fig 3. Flowchart of how the strategy works to control the energy production system in the present.

جدول ۲- اطلاعات اقتصادی اجزای سامانه تولید توان در پژوهش حاضر.

Table 2. Economic information of the components of the power generation system in the present study.

نوع اجزاء سامانه	هزینه تعمیرات و نگهداری	هزینه اولیه	طول عمر
Type of system components	Maintenance cost (\$/year)	Initial cost(\$)	Lifespan
پنل خورشیدی	1٪ هزینه اولیه	1000 /kW	20 year
Solar Panel			
توربین بادی	5٪ هزینه اولیه	1500 /kW	20 year
Wind Turbine			
ژنراتور	0.02 /op.hr	500 /kW	15000 hr
Generator			
مبدل	1٪ هزینه اولیه	200 /kW	10 year
Converter			
باتری	1٪ هزینه اولیه	300 /kWh	15 year
Battery			

$$b = \frac{V_{cut-in}^3}{V_{rated}^3 - V_{cut-in}^3} \quad (۴)$$

$$P_{WT.theory} = \frac{1}{2} \rho \cdot C \cdot A \cdot V^3 \quad (۵)$$

$$P_{Renewable} = P_{PV} \cdot \eta_{inv} + P_{WT} \quad (۶)$$

منبع اصلی انرژی تجدیدناپذیر در این مطالعه دیزل ژنراتور است که توان خروجی آن (P_{FG}) را می توان با رابطه (۷) و (۸) محاسبه کرد (Vaziri Rad et al., 2024). در این معادله F_{FG} مصرف سوخت در طول زمان کارکرد بر حسب لیتر، $P(t)$ تولید برق در زمان واقعی توسط ژنراتور بر حسب η_{FG} ، kW راندمان کل ژنراتور به صورت اعشار و Y_{FG} توان نامی ژنراتورها بر حسب kW است.

$$P_{FG} = F_{FG} \cdot \eta_{FG} \cdot PCLF \quad (۷)$$

$$F_{FG}(t) = 0.246 \cdot Y_{FG} + 0.084 \cdot P(t) \quad (۸)$$

باتری ها انرژی الکتریکی مازاد تولیدی در هنگام پیک بار را ذخیره سازی می کنند و از آن ها در زمان های بحرانی که سامانه قادر به تأمین بار مصرفی نمی باشد استفاده می کنند. توان ورودی به باتری توسط رابطه (۹) محاسبه می شود که در آن P_{ren} توان تجدیدپذیر تولیدی، P_{Load} بیانگر توان مصرفی و η بیانگر راندمان مبدل است. همچنین توان خروجی مبدل جریان از رابطه (۱۰) بدست می آید که در آن P_{in} بیانگر توان ورودی است (Vaziri Rad et al., 2024).

$$\Delta P(t) = P_{ren}(t) - \frac{P_{Load}(t)}{\eta_i} \quad (۹)$$

$$P_{out} = P_{in} \times \eta_i \quad (۱۰)$$

در این پژوهش، محاسبه ارزش فعلی خالص که شامل ارزش فعلی تمام اجزاء سامانه در طول عمر مفید آن ها است، بر اساس رابطه (۱۱) محاسبه می شود که C_{ann} ، کل هزینه نصب، هزینه های جاری، جایگزینی، سوخت، و خرید برق از شبکه بر حسب واحد پول و CRF ، فاکتور بازایی هزینه سرمایه گذاری است. فاکتور بازایی هزینه سرمایه گذاری به تعداد سال های عمر پروژه (R) و نرخ بهره واقعی (i) بستگی دارد و با رابطه (۱۲) قابل محاسبه است (Vaziri Rad et al., 2023). در این پژوهش نرخ بهره برابر با ۲۰٪ و نرخ تورم برابر با ۲۳٪ در نظر گرفته شده اند.

مبدل (Converter)	
بازدهی اینورتر	95%
Inverter Efficiency	
بازدهی رکتیفایر	95%
Rectifier Efficiency	
نوع تبدیل بار	DC/AC و AC/DC
Load Conversion Type	
بازدهی اینورتر	95%
Inverter Efficiency	
بازدهی رکتیفایر	95%
Rectifier Efficiency	
نوع تبدیل بار	DC/AC و AC/DC
Load conversion type	

در این بخش روابط محاسباتی مورد نیاز جهت شبیه سازی سامانه های ترکیبی تجدیدپذیر در قالب سناریوهای تعریف شده، ارائه می گردد. در نرم افزار هومر از رابطه (۱) به منظور محاسبه الکتریسیته تولید شده توسط پنل های خورشیدی استفاده می شود. بر طبق این معادله، Y_{PV} ظرفیت پنل های خورشیدی بر حسب kW ، f_{PV} فاکتور فرسایش بر حسب درصد، G_T شدت تابش خورشیدی بر سطح پنل بر حسب kW/m^2 ، $G_{T,STC}$ شدت تابش خورشیدی بر سطح پنل در شرایط استاندارد آزمایشی بر حسب kW/m^2 ، μ ضریب دمایی توان بر حسب $1/^\circ C$ ، T_c دمای سلول ها و $T_{c,STC}$ دمای سلول های خورشیدی در شرایط استاندارد و واقعی بر حسب $^\circ C$ است.

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) [1 + \mu (T_c - T_{c,STC})] \quad (۱)$$

توان خروجی توربین بادی بر اساس سرعت باد ساعتی و منحنی قدرت توربین محاسبه می شود. رابطه های (۲) تا (۴) توان خروجی واقعی (P_{WT}) توربین بادی را بر اساس مشخصات اعلام شده توسط سازنده توربین توصیف می کند، در حالی که رابطه (۵) توان خروجی نظری آن را نشان می دهد (Vaziri Rad et al., 2024). در این معادله V سرعت واقعی باد بر حسب m/s ، Y_{WT} توان نامی توربین بر حسب kW ، A مساحت تحت پوشش پره ها بر حسب m^2 ، ρ چگالی هوا در ارتفاع خاص بر حسب Kg/m^3 و C نشان دهنده ضریب توان توربین است. در نهایت، کل تولید برق تجدیدپذیر ممکن را می توان با رابطه (۶) تخمین زد.

$$P_{WT} = \begin{cases} P_{WT} = 0 & V < V_{cut-in} \\ P_{WT} = a \cdot V^3 - b \cdot Y_{WT} & V_{cut-in} < V < V_{rated} \\ P_{WT} = P_{WT} & V_{rated} < V < V_{cut-off} \\ P_{WT} = 0 & V > V_{cut-off} \end{cases} \quad (۲)$$

$$a = \frac{Y_{WT}}{V_{rated}^3 - V_{cut-in}^3} \quad (۳)$$

خروجی انرژی بالاتر با مصرف سوخت کمتر می‌گردد که سامانه انرژی پایدارتر و سازگارتر با محیط‌زیست به وجود می‌آورد.

جدول ۵، میزان آلاینده‌گی ناشی از تولید الکتریسیته توسط شبکه سراسری و ژنراتور در این سناریوها را نشان می‌دهد. به‌طور خاص، سناریوهای ۱ و ۲ که مصرف سوخت کمتری دارند، به ترتیب با تولید ۱۴۶۲۳۸ و ۱۴۶۰۴۵ کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید در سال، آلاینده‌گی کمتری در مقایسه با سناریوهای ۳ و ۶ که به ترتیب ۱۱۹۶۶۸ و ۲۱۹۰۳۰ کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید در سال تولید می‌کنند، دارند. همچنین، میزان ذرات ریز معلق و نیتروژن اکسید در این سناریوها به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. این یافته‌ها با پژوهش Ding et al., (2022) مطابقت دارد که نشان داد استفاده از سامانه‌های ترکیبی خورشیدی بادی می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. در سناریوهای ۳ و ۶، به‌دلیل مصرف بالای سوخت (۴۵۷۱۲ و ۱۳۷۳۳ لیتر در سال)، میزان تولید آلاینده‌ها به‌ویژه در مورد کربن‌دی‌اکسید به مراتب بالاتر است که با پژوهش Goel & Sharma, (2017) همخوانی دارد؛ در این مطالعه نشان داده شد که سامانه‌های ترکیبی متصل به شبکه، در مقایسه با سیستم‌های مستقل دیزلی، می‌توانند انتشار آلاینده‌ها را تا ۵۰ درصد کاهش دهند. این تفاوت‌ها در میزان آلاینده‌گی می‌تواند اثرات منفی قابل‌توجهی بر محیط‌زیست داشته باشد، به‌ویژه در مناطق حساس که نیازمند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. با توجه به اینکه کاهش مصرف سوخت در سناریوهای ۱ و ۲ منجر به کاهش آلاینده‌گی و بهبود شرایط محیط‌زیستی می‌شود، این سناریوها از نظر پایداری محیط‌زیستی برتر به نظر می‌رسند. در مقابل، سناریوهای ۳ و ۶ که مصرف سوخت بالاتر دارند، نیازمند توجه ویژه به فناوری‌های کاهش آلاینده‌گی نظیر به‌کارگیری فناوری‌های نوین در فیلتر کردن آلاینده‌ها و بهبود کارایی سامانه‌ها هستند تا از اثرات منفی آن‌ها کاسته شود. در مقایسه با مطالعات دیگر، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که علاوه بر تأثیر مثبت انرژی‌های تجدیدپذیر بر کاهش آلاینده‌گی، اتصال به شبکه و امکان فروش انرژی مازاد نیز نقش بسزایی در بهینه‌سازی محیط‌زیستی دارد. برای مثال، Hassan et al., (2023) در پژوهشی نشان دادند که سامانه‌های ترکیبی خورشیدی بادی که به شبکه متصل هستند، نه‌تنها آلاینده‌گی را کاهش می‌دهند، بلکه امکان استفاده بهینه از انرژی مازاد را فراهم کرده و نیاز به ذخیره‌سازی گسترده را کاهش می‌دهند. این موضوع با نتایج سناریو ۵ در پژوهش حاضر همسو است که به‌عنوان بهینه‌ترین گزینه از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی شناخته شده است. در مجموع، نتایج حاصل از این تحلیل‌ها به وضوح نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی مصرف سوخت در کاهش آلاینده‌گی و ارتقاء عملکرد محیط‌زیستی سامانه‌های تولید انرژی است. این تغییرات

$$NPC = \frac{C_{ann}}{CRF(i, R)} \quad (11)$$

$$CRF(i, R) = \frac{i(1+i)^R}{(1+i)^R - 1} \quad (12)$$

هزینه انرژی (COE)، میانگین هزینه به ازای هر کیلووات-ساعت انرژی تولید شده توسط سامانه است که با رابطه (۱۳) قابل محاسبه است که در آن، E_{served} مقدار انرژی تولید شده در سال بر حسب kW.h/year است. همچنین $C_{ann.t}$ کل هزینه سالانه‌ی پروژه بر حسب \$ و OC هزینه‌های جاری بر حسب \$/year است که با رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود که در آن $C_{ann.cl}$ کل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سالانه است (Kebede et al., 2014).

$$COE = \frac{C_{ann.t}}{E_{served}} \quad (13)$$

$$OC = C_{ann.t} - C_{ann.cl} \quad (14)$$

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج محاسبات و تحلیل‌های فنی و اقتصادی و بهینه‌سازی سامانه‌های ترکیبی تجدیدپذیر بررسی شد. اطلاعات فنی خروجی حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. بر طبق نتایج، سناریو ۶ که صرفاً از شبکه سراسری و ژنراتورهای سوخت فسیلی (سوخت دیزل) برای تأمین الکتریسیته استفاده می‌کند، بیشترین مصرف سوخت در سال (۱۳۷۳۳ لیتر) را دارد. در مقابل، سناریوهای ۱ و ۲ که از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی استفاده می‌کنند، مصرف سوخت کمتری دارند. تجزیه و تحلیل جدول ۴ نشان می‌دهد که سناریو ۴ و ۵ از نظر مصرف سوخت، کارآمدترین سناریوها می‌باشند، زیرا به هیچ ژنراتوری نیاز ندارند و صرفاً بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) کار می‌کنند. این یافته‌ها با مطالعات متعددی همخوانی دارد. به‌عنوان مثال، Zhou et al., (2019) در پژوهشی بر روی سامانه‌های ترکیبی خورشیدی بادی در مناطق روستایی چین، نشان دادند که ترکیب بهینه منابع تجدیدپذیر می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد و هزینه انرژی را نیز به میزان قابل‌توجهی پایین بیاورد. این نتیجه مشابه سناریو ۴ و ۵ این پژوهش است که کمترین مصرف سوخت فسیلی را دارند. این نتیجه‌گیری بر اساس تعادل بهینه به دست آمده در ظرفیت‌های نصب منابع انرژی خورشیدی و بادی است که نشان‌دهنده بازده کلی بالاتر سناریوهای ۴ و ۵ در پژوهش حاضر است. علاوه بر این، بهینه‌سازی ظرفیت انرژی تجدیدپذیر باعث

می‌تولند بر تصمیم‌گیری‌های راهبردی برای طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر با تأکید بر کارایی محیط‌زیستی و کاهش اثرات منفی آن‌ها تأثیرگذار باشد.

جدول ۴- اطلاعات فنی خروجی از نرم‌افزار هومر در سناریوهای مختلف حاصل از شبیه‌سازی.

Table 4. Output technical information from Homer software in different scenarios resulting from simulation.

سناریو ۶	سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	پارامترها
Scenario6	Scenario5	Scenario4	Scenario3	Scenario2	Scenario1	parameters
0	168	168	146	112	112	پنل‌های خورشیدی (kW)
0	3.6	3.6	58.8	3.6	3.6	Solar panel
0	3	3	49	3	3	توربین بادی (kW)
0	175	175	293	109	109	Wind turbine
0	118	110	84	92.3	92.3	تعداد توربین بادی
120	0	0	60	30	30	Number of wind turbines
13733	0	0	45712	4101	4116	باتری (kW)
						Battery
						مبدل (kW)
						Converter
						ژنراتور (kW)
						Generator
						سوخت مصرفی (L/year)
						Fuel consumption

هیچ‌گونه فروش الکتریسیته به شبکه سراسری صورت نمی‌گیرد و فقط میزان خرید الکتریسیته از شبکه معادل ۲۰۵/۰۴ مگاوات‌ساعت سالانه است. این سناریو نشان‌دهنده وابستگی کامل به شبکه سراسری برای تأمین انرژی است، جایی که تولید انرژی تجدیدپذیر به حدی نیست که بتوان آن را به شبکه فروخت. در سناریو ۲، میزان فروش سالانه الکتریسیته تجدیدپذیر به شبکه سراسری برابر با ۷۶/۶۶ مگاوات‌ساعت است و درعین حال ۲۰۴/۸۱ مگاوات‌ساعت از شبکه خریداری می‌شود. این سناریو نشان می‌دهد که بخشی از نیاز به الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود، اما همچنان برای برآورده کردن کل تقاضا، شبکه سراسری منبع اصلی تأمین انرژی باقی می‌ماند.

در سناریو ۳، هیچ‌گونه خرید یا فروشی از شبکه سراسری وجود ندارد. این سناریو می‌تواند نمایانگر وضعیتی باشد که سامانه انرژی تجدیدپذیر به‌طور کامل خودکفا است و نیاز به هیچ‌گونه تبادل انرژی با شبکه سراسری ندارد، یا به دلیل عدم عملکرد تجهیزات، هیچ‌گونه تولید یا مصرف انرژی صورت نمی‌گیرد. در سناریو ۴، میزان خرید از شبکه معادل ۱۸۹/۷۷ مگاوات‌ساعت است، اما هیچ‌گونه فروشی از انرژی تجدیدپذیر به شبکه صورت نمی‌گیرد. این مورد نشان می‌دهد که سامانه تجدیدپذیر نمی‌تواند به‌طور کافی انرژی تولید کند و نیاز به تأمین انرژی از شبکه سراسری دارد. در سناریو ۵، میزان فروش سالانه انرژی تجدیدپذیر به شبکه سراسری به ۱۲۳/۰۵ مگاوات‌ساعت می‌رسد و در عین حال ۱۸۵/۹۲ مگاوات‌ساعت از شبکه خریداری می‌شود. این سناریو، مشابه سناریو ۲، نشان‌دهنده ترکیبی از تولید

جدول ۵ - میزان آلاینده‌گی ناشی از تولید الکتریسیته توسط شبکه سراسری و ژنراتور.

Table 5. Emissions from electricity generation by the national grid and generators.

سناریوها	ذرات ریز	نیتروژن	کربن دی‌اکسید
Scenarios	معلق	اکسید	Carbon Dioxide
	Particulate Matter	Nitrogen Oxide	(kg/year)
	(kg/year)	(kg/year)	
سناریو ۱	24	552	146238
Scenario 1			
سناریو ۲	24	551	146045
Scenario 2			
سناریو ۳	4.48	702	119668
Scenario 3			
سناریو ۴	21.4	443	122779
Scenario 4			
سناریو ۵	21.4	443	122828
Scenario 5			
سناریو ۶	33.2	871	219030
Scenario 6			

جدول ۶ اطلاعات مربوط به میزان خرید و فروش سالانه الکتریسیته از شبکه سراسری در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. این داده‌ها برای تحلیل عملکرد سامانه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر و تعامل آن‌ها با شبکه سراسری بسیار حائز اهمیت است. در جدول ۶، میزان الکتریسیته‌ای که به شبکه سراسری فروخته شده و همچنین میزان خرید از شبکه برای هر سناریو ارائه شده است. در سناریو ۱،

جدول ۶- میزان خرید و فروش برآورد شده از شبکه سراسری الکتریسیته در هر سناریو.

Table 6. Estimated purchase and sale of the national electricity network in each scenario.

سناریوها Scenarios	میزان فروش سالانه الکتریسیته سراسری Annual renewable energy electricity sales to the national grid (kWh/year)	میزان خرید سالانه الکتریسیته از شبکه سراسری Annual electricity purchases from the national grid (kWh/year)
سناریو ۱ Scenario 1	0	205045
سناریو ۲ Scenario 2	76663	204810
سناریو ۳ Scenario 3	0	0
سناریو ۴ Scenario 4	0	189773
سناریو ۵ Scenario 5	123052	185920
سناریو ۶ Scenario 6	0	277120

نتایج کلی تحلیل‌ها و داده‌های خروجی از نرم‌افزار هومر که مشتمل به نتایج فنی و اقتصادی هر کدام از سناریوهای طراحی شده می‌باشد در جدول ۷ ارائه شده است. بر طبق این نتایج، سناریو ۱، ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی، بادی و ژنراتور است که به شبکه سراسری متصل بوده و فاقد امکان فروش انرژی مازاد به شبکه می‌باشد. در این سناریو، ۴۰۶/۲۶ مگاوات‌ساعت انرژی تولید شده که ۳۱/۸ درصد آن از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. این سناریو با هزینه اولیه نسبتاً پایین ۱۹۲۸۵۴ دلار و هزینه انرژی ۰/۰۳۹۹ دلار به ازای هر کیلووات ساعت، تولید ۸۰۴/۷۷ مگاوات‌ساعت انرژی مازاد دارد که بلااستفاده باقی می‌ماند و بنابراین بازده کلی انرژی بهینه نیست. سناریو ۲ نیز ترکیبی مشبلیه از انرژی خورشیدی، بادی و ژنراتور دارد و به شبکه سراسری متصل است، اما قابلیت فروش انرژی مازاد به شبکه، بازده اقتصادی آن را افزایش می‌دهد. در این حالت، تولید انرژی به ۴۰۶/۷۸ مگاوات‌ساعت می‌رسد و انرژی بلااستفاده به طور چشمگیری به ۱۴۱۰ کیلووات ساعت کاهش می‌یابد.

سهم انرژی تجدیدپذیر ۴۴/۹ درصد بوده و هزینه انرژی در مقایسه با سناریو ۱ به ۰/۰۲۲۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده تأثیر مثبت سیاست‌های حمایتی برای فروش انرژی مازاد است. سناریو ۳ برای مناطقی که دسترسی به شبکه سراسری ندارند طراحی شده و کاملاً مستقل عمل می‌کند. با تولید ۵۲۴/۷۲ مگاوات‌ساعت انرژی، این سناریو بالاترین سطح تولید انرژی را دارد. سهم انرژی تجدیدپذیر نیز به ۵۴/۶ درصد افزایش یافته است. با

انرژی تجدیدپذیر و وابستگی به شبکه سراسری برای تکمیل نیازهای انرژی است.

در سناریو ۶، تنها خرید انرژی از شبکه سراسری صورت می‌گیرد که معادل ۲۷۷/۱۲ مگاوات‌ساعت است و هیچ‌گونه فروشی به شبکه انجام نمی‌شود. این سناریو نیز نشان‌دهنده وابستگی کامل به شبکه سراسری است و هیچ‌گونه تولید یا فروش انرژی تجدیدپذیر از سوی سامانه وجود ندارد. در تحلیل کلی این جدول، می‌توان گفت که سناریوهایی که در آن‌ها میزان فروش به شبکه سراسری افزایش می‌یابد (مانند سناریو ۲ و ۵)، در شرایط بهینه‌تری از نظر تولید و فروش انرژی تجدیدپذیر قرار دارند، در حالی که سناریوهایی که صرفاً به خرید از شبکه وابسته هستند (مانند سناریو ۱، ۴ و ۶)، نشان‌دهنده سامانه‌هایی با کارایی کمتر در تولید انرژی تجدیدپذیر و وابستگی بالاتر به منابع انرژی خارج از سامانه هستند. نتایج پژوهش حاضر در زمینه کاهش وابستگی به شبکه و افزایش بهره‌وری سامانه‌های تجدیدپذیر با مطالعات متعددی مطابقت دارد. به عنوان مثال، Das et al., (2021) در بررسی سامانه‌های ترکیبی خورشیدی بادی نشان دادند که اتصال به شبکه با قابلیت فروش انرژی مازاد، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، می‌تواند قابلیت اطمینان سامانه را نیز افزایش دهد. این یافته‌ها با نتایج سناریو ۵ در این پژوهش همخوانی دارد که در آن، میزان فروش سالانه انرژی تجدیدپذیر ۱۲۳/۰۵ مگاوات‌ساعت بوده و نیاز به خرید از شبکه نیز کاهش یافته است. همچنین، Manjula et al., (2025) در مطالعه‌ای در خصوص سامانه‌های تجدیدپذیر نشان دادند که هرچه میزان خودکفایی انرژی بیشتر باشد، پایداری سامانه افزایش می‌یابد و نوسانات قیمتی ناشی از خرید برق از شبکه کاهش پیدا می‌کند.

در پژوهش حاضر، سناریو ۳ که کاملاً مستقل از شبکه عمل می‌کند، می‌تواند گزینه‌ای پایدار اما نیازمند مدیریت دقیق ذخیره‌سازی انرژی باشد. این موضوع با نتایج (Emrani & Berrada, 2002) نیز سازگار است که نشان دادند سامانه‌های مستقل به شرط داشتن ذخیره‌سازهای قوی می‌توانند قابلیت اطمینان مناسبی داشته باشند. از میان سناریوهای با امکان خرید توان از شبکه، سناریو ۵ با خرید سالانه ۱۸۵/۹۲ مگاوات‌ساعت و بصورت بدیهی سناریو ۶ (بدون استفاده از منابع تجدیدپذیر)، با خرید سالانه ۲۷۷/۱۲ مگاوات‌ساعت، کمترین و بیشترین خرید از شبکه را خواهند داشت. کاهش خرید در سناریو ۵ در شباهت با افزایش میزان فروش در این سناریو و ناشی از زیاد بودن تعداد و ظرفیت پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی است.

در مطالعه‌ای در هند، هزینه‌های سامانه‌های ترکیبی شامل فتوولتائیک، زیست‌توده و باتری را در محدوده ۰/۱۰۱ تا ۰/۱۰۵ دلار بر کیلووات‌ساعت برای مزارع برنج در شش منطقه کشاورزی گزارش کردند. نتایج نشان داد که سامانه‌های ترکیبی با استفاده از منابع تجدیدپذیر، می‌توانند علاوه بر کاهش هزینه‌ها، اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند. نتایج تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش، نشان‌دهنده اهمیت ترکیب سیاست‌های حمایتی، بهره‌وری فنی، و سازگاری با شرایط محیطی است. در مطالعات Elkadeem et al., (2019) و Das & Mandal, (2022) نیز تأکید شده است که سیاست‌های دولتی و حمایت‌های مالی می‌توانند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های اولیه سامانه‌ها و افزایش بهره‌وری آن‌ها ایفا کنند. در این زمینه، مطالعات موجود بر بهینه‌سازی ترکیب انرژی تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر به‌عنوان راهی برای توسعه پایدار و اقتصادی تأکید دارند. نتایج کلی پژوهش حاضر نشان می‌دهد که سناریو ۵ با ارائه تعادل میان تولید انرژی تجدیدپذیر، کاهش هزینه‌ها و کاهش انرژی بلااستفاده، می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد پایدار و اقتصادی برای تأمین انرژی در نظر گرفته شود. این تحلیل همچنین بر اهمیت ترکیب سیاست‌های حمایتی، بهره‌وری فنی، و سازگاری با شرایط محیطی تأکید دارد.

شکل ۴ تغییرات تولید انرژی در سناریوی بهینه (سناریو ۵) را در طول یک دوره یک‌ساله نشان می‌دهد. این سناریو با ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی و امکان اتصال به شبکه سراسری برای فروش انرژی مازاد طراحی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ماه‌های می تا اکتبر به دلیل نوسانات تولید انرژی تجدیدپذیر و نبود ژنراتور پشتیبان، میزان نیاز به خرید انرژی از شبکه افزایش می‌یابد. این افزایش به‌ویژه در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر مشهود است که به دلیل اوج مصرف انرژی در دوره آبیاری محصولات رخ می‌دهد. در این بازه زمانی، تولید انرژی از پنل‌های خورشیدی به دلیل تابش شدید خورشید به حداکثر خود می‌رسد، اما سهم توربین‌های بادی به دلیل شرایط اقلیمی و وزش باد کم‌تر از انتظار است. این امر نیاز به منابع جایگزین یا شبکه سراسری را در این بازه زمانی پررنگ‌تر می‌کند. این یافته با مطالعه Giraud et al., (2001) همخوانی دارد که نشان داده است سامانه‌های ترکیبی متصل به شبکه، در بازه‌هایی از سال که میزان باد کاهش می‌یابد، دچار افزایش وابستگی به شبکه می‌شوند. این پژوهش پیشنهاد کرده است که افزودن یک سامانه ذخیره‌سازی، و یا بهینه‌سازی سهم انرژی خورشیدی و بادی می‌تواند وابستگی به شبکه را کاهش دهد.

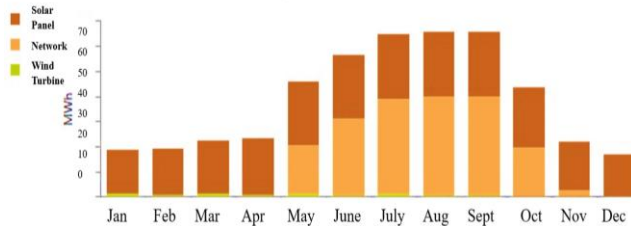
این حال، هزینه اولیه ۳۷۹۱۰۰ دلار و هزینه انرژی ۰/۱۲۵ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت، این سناریو را از نظر اقتصادی کم‌بازده‌تر کرده و آن را بیشتر برای شرایط خاص قابل توجیه می‌سازد. Padron et al., (2019) در پژوهشی مشابه امکان‌سنجی فنی و اقتصادی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی فتوولتائیک، بادی و ژنراتور با ظرفیت تولید روزانه حداکثر ۵۰ متر مکعب آب در روز را برای تأمین انرژی مورد نیاز سامانه‌های نمک‌زدایی تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که اقتصادی‌ترین سامانه تجدیدپذیر برای تأمین انرژی مورد نیاز، سامانه ترکیبی فتوولتائیک، بادی و ژنراتور با هزینه ۰/۴۰۴ دلار بر کیلووات‌ساعت است. نتایج این پژوهش نشان داد که این سامانه ترکیبی، اتکا به ژنراتورهای دیزلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و انرژی تولید شده، ۹۶ درصد از تولید برق سالانه را پوشش می‌دهد.

سناریو ۴، ترکیبی از انرژی‌های خورشیدی و بادی متصل به شبکه است که بدون استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی عمل می‌کند و امکان فروش انرژی مازاد را نیز ندارد. این سناریو ۴۶۲/۴۳ مگاوات‌ساعت انرژی تولید می‌کند و سهم تجدیدپذیر آن ۴۱/۸ درصد است. انرژی بلااستفاده در این حالت ۱۳۴/۵۳ مگاوات‌ساعت بوده و هزینه اولیه و هزینه انرژی آن به ترتیب ۲۶۳۹۲۰ دلار و ۰/۰۵۰۲ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت است. سناریو ۵، یک گزینه بهینه و متعادل است که با استفاده از منابع خورشیدی و بادی، به شبکه سراسری متصل شده و امکان فروش انرژی مازاد به شبکه را نیز دارد. این سناریو ۴۶۲/۹۹ مگاوات‌ساعت انرژی تولید کرده و با سهم ۵۸ درصدی انرژی تجدیدپذیر، تنها ۵۸۰۶ کیلووات‌ساعت انرژی بلااستفاده باقی می‌گذارد. هزینه اولیه ۲۶۵۸۲۵ دلار و هزینه انرژی ۰/۰۲۲۶ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت است که این سناریو را از نظر پایداری و بهره‌وری انرژی، گزینه‌ای برجسته معرفی می‌کند. سناریو ۶ کاملاً بر منابع غیرتجدیدپذیر، شامل شبکه سراسری و ژنراتورهای سوخت فسیلی، متکی است. این سناریو ۳۲۰/۶۰ مگاوات‌ساعت انرژی تولید می‌کند و هیچ سهمی از انرژی تجدیدپذیر ندارد. هزینه اولیه ۶۰۰۰۰ دلار و هزینه انرژی ۰/۰۱۹۹ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت است که کمترین هزینه در بین سناریوها محسوب می‌شود. با این حال، وابستگی کامل به سوخت‌های فسیلی، اثرات محیط‌زیستی منفی قابل توجهی را به همراه دارد و این سناریو را از منظر پایداری نامطلوب می‌سازد. این مقایسه با نتایج Elkadeem et al., (2019) در یک مطالعه مشابه در سودان همخوانی دارد که به بررسی یک سامانه ترکیبی مستقل از شبکه‌ی برق سراسری پرداختند. نتایج نشان داد که هزینه انرژی معادل ۰/۳۷ دلار بر کیلووات‌ساعت است. این مطالعه، مشابه سناریو ۶، بر استفاده از منابع تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی تأکید دارد. از طرفی Das & Mandal, (2022)

جدول ۷- داده‌های فنی و اقتصادی خروجی برای حالت بهینه در هر سناریو.

Table 7. Technical and economic output data for the optimal state in each scenario.

سناریوها Scenarios	کل الکتریسیته مصرف شده (دیماند موردنیاز) Total electricity consumed (required demand) (kWh/year)	کل الکتریسیته تولید شده Total electricity generated (kWh/year)	کسر انرژی تجدیدپذیر از توان کل تولیدی Renewable Energy Fraction of Total Power Generation (%)	الکتریسیته مازاد تولیدی (انرژی بلااستفاده) Surplus Electricity Generation (Unused Energy) (kWh/year)	هزینه اولیه راه‌اندازی Initial Start-up Cost (\$)	هزینه انرژی Energy Cost (\$/kWh)
سناریو ۱ Scenario 1	319631	406269	31.8	80477	192854	0.0339
سناریو ۲ Scenario 2	319631	406781	44.9	1410	193260	0.0225
سناریو ۳ Scenario 3	319631	524721	54.6	195296	379100	0.125
سناریو ۴ Scenario 4	319631	462435	41.8	134533	263920	0.0502
سناریو ۵ Scenario 5	319631	462998	58	5806	265825	0.0226
سناریو ۶ Scenario 6	319631	320606	0	15.7	60000	0.0199



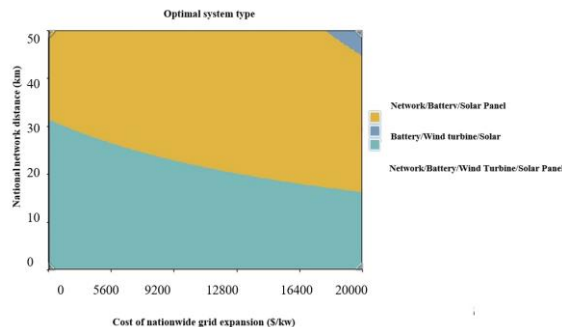
شکل ۴- میزان تولید توان توسط اجزای سامانه در ماه‌های مختلف سال.

Fig 4. Power generation rate by system components in different months of the year.

شکل ۵ جریان مالی سامانه در این سناریوی بهینه را در طول عمر مفید ۲۰ ساله نمایش می‌دهد. در سال نخست، هزینه‌های اصلی شامل خرید و نصب تجهیزات سامانه است. در این سناریو، عمده هزینه‌ها در سال اول شامل خرید و نصب تجهیزات است، که مشابه یافته‌های (Elkadeem et al., 2019) است. در این پژوهش، سامانه ترکیبی انرژی نشان داد که ۸۵ درصد از هزینه‌ها مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه بوده و پس از آن، هزینه‌های عملیاتی کاهش می‌یابد. (Deshmukh & Mukund (2008) نیز اشاره کرده‌اند که در سامانه‌های ترکیبی، سرمایه‌گذاری اولیه به دلیل هزینه‌های بالای فناوری‌های تجدیدپذیر، معمولاً بالا است، اما با کاهش هزینه‌های نگهداری در بلندمدت، سوددهی افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر از سال دوم تا چهاردهم، هزینه‌های جاری صرفاً به نگهداری و سرویس‌دهی توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی محدود می‌شود

بر طبق شکل ۴ از دسامبر تا پایان می، تولید انرژی تجدیدپذیر در سناریو ۵ به حدی می‌رسد که مازاد معادل ۵۸۰۶ کیلووات ساعت در سال تولید می‌شود. با این حال، به دلیل محدودیت‌های ذخیره‌سازی، این انرژی بلااستفاده باقی می‌ماند. (Lukatskaya et al., 2016) در پژوهشی نشان داد یکی از چالش‌های اصلی سامانه‌های ترکیبی، عدم توانایی ذخیره انرژی اضافی در دوره‌های کم‌مصرف است. بنابراین افزودن فناوری‌های ذخیره‌سازی مانند باتری‌های پیشرفته یا هیدروژن می‌تواند بهره‌وری این سامانه‌ها را افزایش دهد. این یافته، اهمیت توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی برای کاهش وابستگی سناریو ۵ به شبکه را برجسته می‌کند. این مازاد انرژی نشان‌دهنده فرصت مهمی برای بهبود بهره‌وری سامانه است که می‌تواند از طریق فروش به شبکه سراسری یا توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی، نظیر باتری‌ها، بهینه‌سازی شود. چنین اقداماتی می‌تواند کارایی سناریوی بهینه را در مدیریت نوسانات فصلی و استفاده کامل از انرژی تجدیدپذیر افزایش دهد. نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که ترکیب بهینه‌ی منابع تجدیدپذیر همراه با ذخیره‌سازی و مدیریت هوشمند بار مصرفی، می‌تواند بهره‌وری سناریو ۵ را بهبود بخشد و وابستگی به شبکه را کاهش دهد.

تأثیری در انتخاب نوع سامانه بهینه ندارد. اما در فاصله های بین ۱۷ تا ۳۲ کیلومتر، با افزایش هزینه اولیه راه اندازی شبکه، بهینگی استفاده از توربین بادی کاهش می یابد و پس از این فاصله، سامانه بدون توربین بادی بهینه تر خواهد بود، به ویژه در شرایطی که هزینه گسترش شبکه بالا باشد. پژوهش های اخیر در زمینه تحلیل حساسیت سامانه های انرژی تجدیدپذیر نشان می دهند که فاصله از شبکه سراسری و هزینه های اولیه سرمایه گذاری از عوامل تأثیرگذار بر بهینگی سامانه های ترکیبی انرژی هستند. شکل ۷ تحلیل حساسیت هزینه انرژی در سناریوی بهینه بر اساس میانگین قیمت انرژی شبکه و میانگین توان مصرفی پمپ ها را نشان می دهد. طبق نتایج، هزینه انرژی در سناریوی بهینه در بازه ای از ۰/۰۴۹۰ تا ۰/۰۵۶۰ دلار متغیر است و افزایش توان مصرفی پمپ ها باعث افزایش هزینه انرژی می شود. بنابراین، تغییرات توان مصرفی پمپ ها و قیمت انرژی شبکه تأثیرات مستقیمی بر هزینه های کلی سامانه ترکیبی تجدیدپذیر دارند. این تجزیه و تحلیل ها نشان می دهند که فاصله شبکه، هزینه گسترش آن و توان مصرفی تجهیزات از جمله پمپ ها، عامل های کلیدی در تعیین بهینگی سامانه های تجدیدپذیر هستند و باید در طراحی و ارزیابی این سامانه ها به دقت مورد توجه قرار گیرند. مطالعات پیشین نیز تأثیر توان مصرفی تجهیزات را بر هزینه انرژی سامانه های تجدیدپذیر تأیید کرده اند.

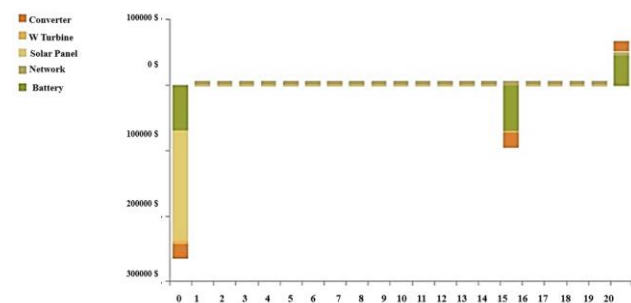


شکل ۶- تحلیل حساسیت سامانه بهینه نسبت به تغییرات فاصله تا نزدیک ترین خطوط انتقال برق و هزینه اولیه راه اندازی آن.

Fig 6. Sensitivity analysis of the optimal system to the changes in the distance to the nearest power transmission lines and its initial startup cost.

پژوهش (Khattak et al., 2024) نشان می دهد که در سامانه های ترکیبی خورشیدی بادی، افزایش مصرف تجهیزات آبیاری باعث افزایش وابستگی به انرژی شبکه می شود، مگر آنکه ظرفیت ذخیره سازی افزایش یابد. نتایج این مطالعه با پژوهش حاضر همخوانی دارد، زیرا افزایش توان مصرفی پمپ ها مستقیماً منجر به افزایش هزینه انرژی شده است.

و نیاز به هزینه اضافی برای تجهیزات جدید وجود ندارد. در سال پانزدهم، باتری ها و مدل ها به دلیل اتمام عمر مفید جایگزین می شوند. این یافته با پژوهش (Elmahallawy et al., 2022) همخوانی دارد که نشان داد عمر مفید باتری های لیتیوم در حدود ۱۰ تا ۱۵ سال است و جایگزینی آن ها تأثیر قابل توجهی بر هزینه های کلی دارد. برخی مطالعات پیشنهاد کرده اند که افزایش بهره وری باتری ها و استفاده از فناوری های نوین (مانند باتری های حلت جامد) می تواند دوره جایگزینی را افزایش دهد و هزینه های کلی را کاهش دهد. در پایان دوره ۲۰ ساله، تجهیزات باقیمانده که هنوز مستهلک نشده اند، می توانند به عنوان ضایعات بازیافتی به فروش برسند و درآمد اضافی برای پروژه ایجاد کنند. از مهم ترین ویژگی های این سناریوی بهینه، امکان فروش انرژی مازاد به شبکه سراسری است که نه تنها نیاز انرژی سامانه را تأمین می کند، بلکه درآمد پایداری نیز ایجاد می کند. این تحلیل ها و نتایج، سناریوی بهینه را به عنوان گزینه ای اقتصادی و پایدار برای تأمین انرژی معرفی می کند که ترکیبی از کاهش هزینه های جاری، بهره وری حداکثری از منابع تجدیدپذیر، و ایجاد درآمد از فروش انرژی مازاد را ارائه می دهد. این ویژگی ها اهمیت بالای سناریو ۵ را برای تصمیم گیری های راهبردی در طراحی و توسعه سامانه های انرژی تجدیدپذیر نشان می دهد.

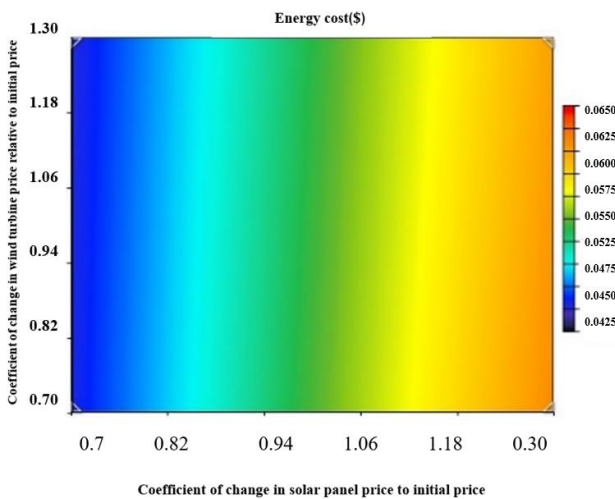


شکل ۵- نمودار جریان مالی سناریوی بهینه در طول عمر مفید ۲۰ ساله.

Fig 5. Cash flow diagram of the optimal scenario over a 20-year useful life.

در این بخش، تحلیل حساسیت برای سناریوی بهینه که ترکیبی از سامانه های خورشیدی، بادی و ذخیره سازی انرژی است، انجام شد تا اثر تغییرات در هر یک از این متغیرها بر عملکرد کلی سامانه مورد بررسی قرار گیرد. در این تجزیه و تحلیل، مجموعه ای از متغیرهای کلیدی که عملکرد سامانه های انرژی تجدیدپذیر و تعامل آن ها با شبکه سراسری را تحت تأثیر قرار می دهند، مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۶، تحلیل حساسیت سامانه بهینه نسبت به تغییرات فاصله تا نزدیک ترین خطوط انتقال برق و هزینه اولیه راه اندازی آن نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، وقتی فاصله از شبکه برق سراسری کمتر از ۱۷ کیلومتر باشد، هزینه اولیه راه اندازی شبکه

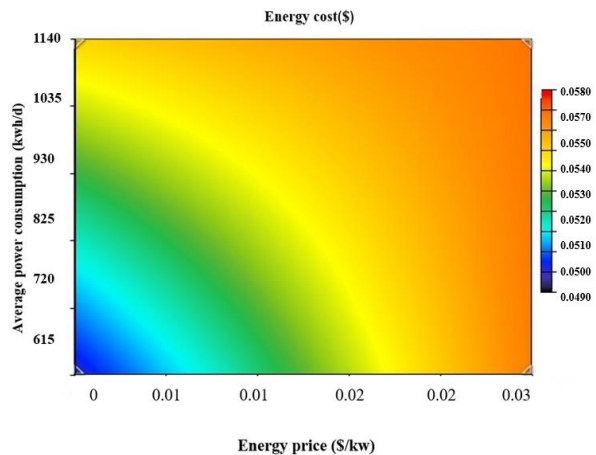
همانطور که مشاهده می‌شود تغییر قیمت توربین بادی تأثیری در تغییر هزینه انرژی نداشته است. اما تغییر قیمت پنل‌های خورشیدی به دلیل اینکه در سناریوی بهینه بیشترین سهم در تولید انرژی را دارد، تأثیر بسزایی در تغییر هزینه انرژی دارد. اما به هر حال تغییرات هزینه انرژی از ۰/۰۴۲۵ تا ۰/۰۶۰۰ دلار بوده است که تغییرات چندان زیادی نیست و پایداری اقتصادی سامانه انرژی جهت راه اندازی اولیه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که سامانه مورد بررسی از پایداری اقتصادی مناسبی برخوردار است و حتی در صورت تغییر قیمت تجهیزات، هزینه انرژی در محدوده قابل قبولی باقی می‌ماند. این نتیجه با پژوهش (Amutha & Rajini, 2015) همخوانی دارد، زیرا در هر دو مطالعه، بر پایداری اقتصادی و کاهش هزینه‌های بلندمدت سامانه‌های ترکیبی تأیید شده است.



شکل ۹- تغییرات هزینه‌ی انرژی در مقابل ضریب تغییرات قیمت توربین بادی و پنل خورشیدی.

Fig 9. Energy cost changes versus the coefficient of change in the price of wind turbines and solar panels.

شکل ۱۰ تحلیل حساسیت مربوط به درصد تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر بر اساس درصد تغییرات قیمت پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی را نشان می‌دهد. طبق این شکل، با افزایش ضریب تغییرات قیمتی پنل‌های خورشیدی و توربین بادی کسر انرژی تجدیدپذیر کاهش می‌کند که این می‌تواند به دلیل ارزان بودن قیمت برق شبکه سراسری نسبت به این تجهیزات باشد. به طور کلی، با تحلیل این نمودار می‌توان تأثیر تغییرات قیمت پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی بر نسبت تجدیدپذیری در سامانه ترکیبی تجدیدپذیر را بررسی کرد. این تحلیل می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تنظیم نسبت استفاده از هر دو تکنولوژی و بهینه‌سازی سامانه ترکیبی کمک کند تا هم نسبت تجدیدپذیری بالاتری داشته باشد و هم هزینه‌های کلی را کاهش دهد.

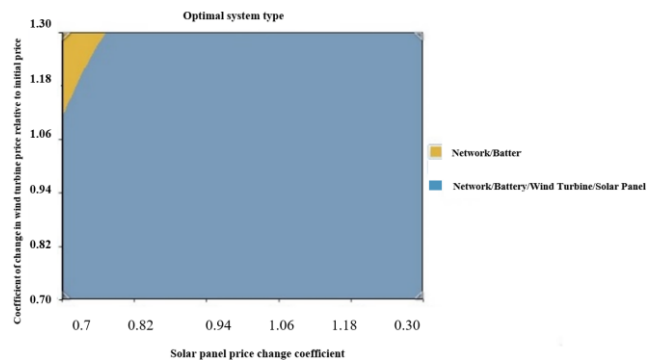


شکل ۷- تحلیل حساسیت بهینگی سامانه نسبت به میانگین

قیمت انرژی شبکه و متوسط توان مصرفی.

Fig 7. Sensitivity analysis of system optimality to average grid energy price and average power consumption.

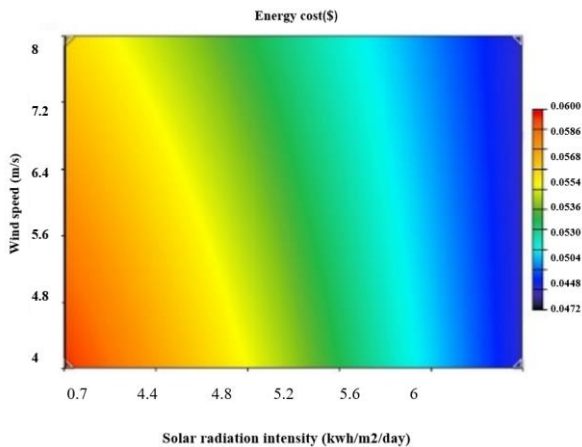
شکل ۸ نمودار تحلیل حساسیت اجزای سامانه بهینه، بر اساس مقادیر تغییرات قیمت پنل خورشیدی و تغییرات قیمت توربین بادی را نشان می‌دهد. با توجه به قیمت بالاتر توربین بادی و پتانسیل بادی کم منطقه، همانطور که مشخص است اگر ضریب تغییرات قیمت توربین بادی کمتر از ۱/۱۲ باشد، استفاده از آن با هر ضریب تغییرات قیمت پنل خورشیدی بهینه خواهد بود. با افزایش ضریب تغییرات قیمت توربین از ۱/۱۲، استفاده از توربین بادی در قیمت‌های پایین پنل خورشیدی بهینه نمی‌باشد. لذا با توجه به این نتایج و نیز قیمت بالاتر توربین بادی و پتانسیل بادی کم منطقه، این نتایج دلیل اولویت استفاده از پنل‌های خورشیدی نسبت به توربین‌های بادی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تحلیل حساسیت سناریوی بهینه نسبت به تغییرات قیمت پنل و تغییرات قیمت توربین بادی.

Fig 8. Sensitivity analysis of the optimal scenario to the changes in panel prices and changes in wind turbine prices.

در شکل ۹ تغییرات هزینه‌ی انرژی در مقابل ضریب تغییرات قیمت توربین بادی و پنل خورشیدی نشان داده شده است.

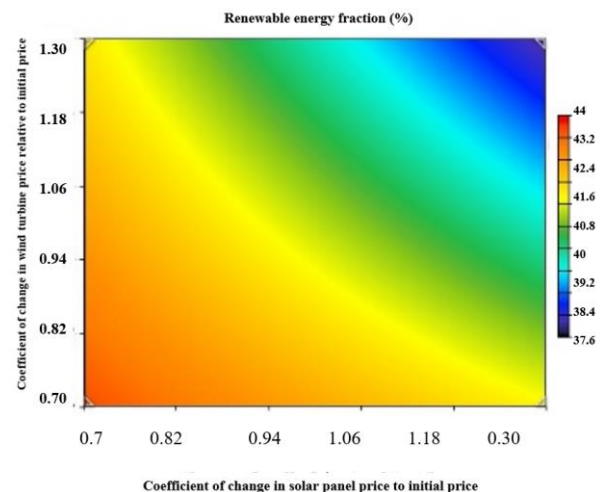


شکل ۱۱- تغییرات هزینه انرژی نسبت به تغییرات شدت تابش خورشیدی و سرعت باد.

Fig 11. Changes in energy costs relative to the changes in solar radiation intensity and wind speed.

شکل ۱۲، تحلیل حساسیت سناریوی بهینه نسبت به تغییرات شدت تابش خورشیدی و تغییرات سرعت باد را نشان می دهد. در نمودار نارنجی، که شامل شبکه، پنل خورشیدی و باتری است، نمی توان تغییری قابل توجهی در نوع سامانه بهینه مشاهده کرد. با افزایش شدت تابش خورشیدی و سرعت باد، همچنان سامانه با ترکیب شبکه، پنل خورشیدی و باتری بهترین گزینه است. در نمودار آبی، که شامل شبکه، باتری، پنل خورشیدی و توربین بادی است، با افزایش شدت تابش خورشیدی و سرعت باد، نوع سامانه بهینه تغییر می کند. در نقاطی که هر دو شدت تابش خورشیدی و سرعت باد بالا هستند، سامانه با ترکیب شبکه، باتری، پنل خورشیدی و توربین بادی بهترین گزینه است. در حالت هایی که هر دو شدت تابش خورشیدی و سرعت باد بالا هستند، استفاده از سامانه با ترکیب شبکه، باتری، پنل خورشیدی و توربین بادی می تواند بهینه باشد، در حالی که در سایر نقاط، سامانه با ترکیب شبکه، پنل خورشیدی و باتری ممکن است بهترین گزینه باشد.

شکل ۱۳ تحلیل حساسیت مربوط به درصد تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر بر اساس شدت تابش خورشید و سرعت وزش باد را نشان می دهد. بر طبق نتایج افزایش سرعت باد و شدت تابش خورشیدی هر دو باعث افزایش کسر انرژی تجدیدپذیر می شود و میزان تولید توان توسط این اجزا افزایش می یابد. اما افزایش سرعت باد تأثیر بیشتری بر میزان کسر انرژی تجدیدپذیر دارد و می توان گفت تولید توان توسط توربین بادی در ساعات بیشتر شبانه روز صورت می گیرد. بر طبق شکل ۱۳ مشاهده می شود بیشترین درصدی که می توان از منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی در سناریوی بهینه بهره برد زمانی است که شدت تابش خورشید ۶ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز و سرعت باد نیز ۸ متربر ثانیه باشد که این مقدار برابر با ۴۱/۸ درصد است.



شکل ۱۰- تغییرات کسر انرژی تجدیدپذیر نسبت به ضریب

تغییرات قیمتی پنل های خورشیدی و توربین بادی.

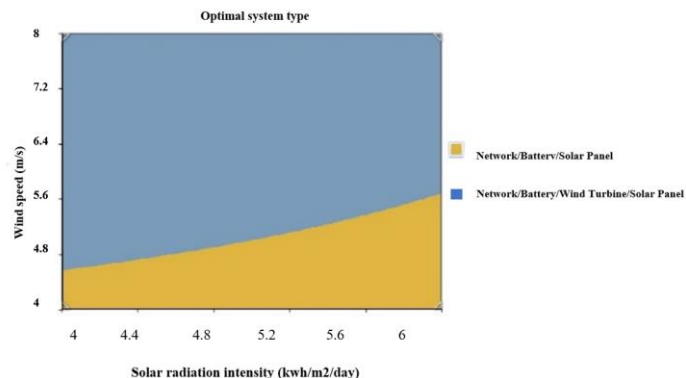
Fig 10. Changes in the renewable energy fraction relative to the price change coefficient of solar panels and wind turbines.

شکل ۱۱ هزینه انجام شده برای تولید انرژی بر اساس شدت تابش خورشید و سرعت وزش باد را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش شدت تابش خورشیدی، هزینه انرژی کاهش می یابد. این بدین معنی است که با افزایش تابش خورشیدی، تولید بیشتری از انرژی توسط پنل های خورشیدی صورت می پذیرد و هزینه تولید انرژی کاهش می یابد. مطالعه Nfaoui & El-Hami (2018) نشان داد که در مناطق با تابش خورشیدی بالا، هزینه تولید انرژی خورشیدی کمتر از مناطق با تابش کم است. این یافته ها با پژوهش حاضر تطابق دارد، زیرا مشاهده شده که هزینه انرژی با افزایش شدت تابش خورشیدی کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش سرعت باد، هزینه انرژی نیز کاهش می یابد. این نشان می دهد که با افزایش سرعت باد، تولید انرژی بیشتری توسط توربین های بادی امکان پذیر است و هزینه تولید انرژی کاهش می یابد. با توجه به این تحلیل، نمودار حساسیت نشان می دهد که میزان هزینه انرژی در سامانه ترکیبی تجدیدپذیر به تغییرات شدت تابش خورشیدی و سرعت باد وابسته است. بنابراین، این دو پارامتر به عنوان متغیرهای کلیدی در برنامه ریزی و بهینه سازی سامانه های ترکیبی تجدیدپذیر مطرح هستند و می توانند به انتخاب بهینه ترین ترکیب از منابع خورشیدی و بادی کمک کنند. این نمودار می تواند در تصمیم گیری های مربوط به برنامه ریزی و بهینه سازی سامانه تجدیدپذیر و انتخاب بهترین ترکیب منابع تجدیدپذیر از نظر هزینه انرژی مفید باشد.

منفی محیط زیستی است. از جنبه اقتصادی، هزینه اولیه راه اندازی این سامانه معادل ۲۶۵۸۲۵ دلار بوده و هزینه تولید انرژی آن ۰/۲۲۶ دلار به ازای هر کیلووات ساعت است که آن را از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر از سایر سناریوها می سازد. در مقایسه با سناریوی ۶ که از منابع تجدیدپذیر استفاده نمی کند، سناریوی ۵ از مزایای محیط زیستی و پایداری بیشتری برخوردار است، هرچند سناریوی ۶ هزینه اولیه کمتری دارد، اما به دلیل عدم توجه به منابع تجدیدپذیر، گزینه مناسبی برای تأمین انرژی بلندمدت و پایدار نخواهد بود. پژوهش حاضر تأکید دارد که استفاده از منابع تجدیدپذیر و ارتقاء فناوری های ذخیره سازی انرژی می تواند به عنوان راهکاری کلیدی برای تأمین انرژی پایدار و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی در راستای تأمین امنیت غذایی پایدار و مقاوم، به ویژه در مناطق روستایی و کشاورزی، عمل کند. سامانه های انرژی پایدار و تجدیدپذیر قادرند تولید پایدار غذا را تسهیل کرده و کشاورزان را در برابر نوسانات انرژی مقاوم تر سازند. پیشنهاد می شود که برای بهبود سامانه های انرژی تجدیدپذیر، شبکه های هوشمند و سامانه های مدیریت انرژی برای بهینه سازی استفاده از انرژی تولیدی مورد توجه قرار گیرند. این شبکه ها قادرند به طور خودکار جریان انرژی را مدیریت کرده و مصرف را بر اساس تولید تنظیم کنند. علاوه بر این، تشویق به استفاده از سامانه های ترکیبی که از ترکیب منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر بهره می برند، می تواند در کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و ارتقاء پایداری انرژی نقش مهمی ایفا کند. در نهایت، تقویت زیرساخت های انرژی تجدیدپذیر، توسعه فناوری های مرتبط و ایجاد سیاست های حمایتی، می تواند نقشی کلیدی در تحقق امنیت انرژی پایدار ایفا کرده و به دستیابی به اهداف توسعه پایدار و امنیت غذایی پایدار کمک نمایند.

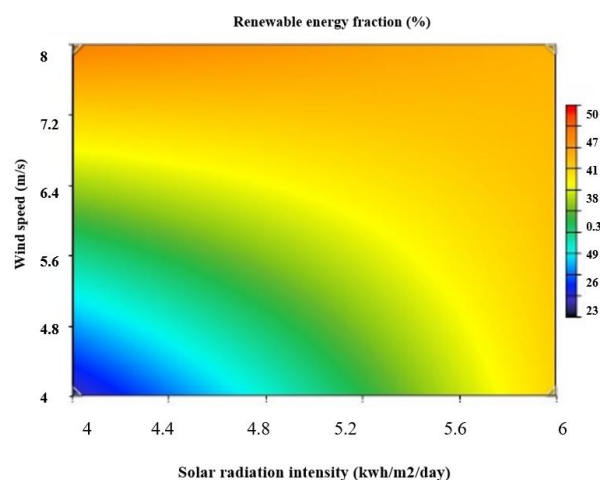
منابع

- Adefarati, T., & Bansal, R. C. (2019). *Application of renewable energy resources in a microgrid power system*. The Journal of Engineering, 2019(18), 5308-5313.
<https://doi.org/10.1049/joe.2018.9261>.
- Amutha, W. M., & Rajini, V. (2015). *Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 553-561.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.103>.
- Colmenar-Santos, A., Palomo-Torrejón, E., Mur-Pérez, F., & Rosales-Asensio, E. (2020). *Thermal desalination potential with parabolic trough collectors and geothermal energy in the Spanish southeast*. Applied Energy, 262, 114433.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114433>.



شکل ۱۲- تحلیل حساسیت سناریوی بهینه نسبت به تغییرات شدت تابش خورشیدی و تغییرات سرعت باد.

Fig 12. Sensitivity analysis of the optimal scenario to the changes in solar radiation intensity and wind speed changes.



شکل ۱۳- تغییرات کسر انرژی نسبت به تغییرات شدت تابش خورشیدی و سرعت باد.

Fig 13. Changes in energy fraction with respect to the changes in solar radiation intensity and wind speed.

۴- نتیجه گیری نهایی

این پژوهش به منظور پاسخ گویی به نگرانی های موجود در تأمین انرژی پایدار برای مزارع، سناریوهای مختلفی را مدل سازی و بهینه سازی کرده است تا بهترین سامانه تجدیدپذیر را برای تأمین نیاز مزارع با هدف افزایش امنیت غذایی شناسایی کند. بر اساس نتایج، سناریو ۵ که ترکیبی از انرژی های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی است، به عنوان بهینه ترین گزینه معرفی شد. این سامانه متصل به شبکه سراسری بوده و امکان فروش انرژی مازاد به شبکه را بدون استفاده از ژنراتورهای سوخت فسیلی دارد. بر اساس یافته های این پژوهش، سناریو ۵ توانسته با تولید ۴۶۲/۹۹ مگاوات ساعت انرژی، نیاز مصرفی ۳۱۹/۶۳ مگاوات ساعت را به طور کامل تأمین کند. میزان کسر تجدیدپذیری در این سناریو معادل ۵۸ درصد است که نشان دهنده بهره برداری بهینه از منابع تجدیدپذیر و کاهش اثرات

- optimization approach for the use of hybrid renewable systems in the search of the zero net energy consumption in water irrigation systems. *Renewable Energy*, 195, 853-871. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.060>.
- Gandiglio, M., Marocco, P., Bianco, I., Lovera, D., Blengini, G. A., & Santarelli, M. (2022). *Life cycle assessment of a renewable energy system with hydrogen-battery storage for a remote off-grid community*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 32822-32834. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.199>.
- Giraud, F., & Salameh, Z. M. (2001). *Steady-state performance of a grid-connected rooftop hybrid wind-photovoltaic power system with battery storage*. *IEEE transactions on energy conversion*, 16(1), 1-7. <https://doi.org/10.1109/60.911395>.
- Goel, S., & Sharma, R. (2017). *Performance evaluation of stand-alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1378-1389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.200>.
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2023). *A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications*. *Results in Engineering*, 101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
- Jalalvand, M., Akram, A. and Khanali, M. (2024). *Agricultural Mechanization Assessment in Boroujerd County by Mechanization Evaluation Indices*. *Agricultural Mechanization*, 9(4), 71-88. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/jam.2024.62765.1285>.
- Kapen, P. T., Nouadje, B. A. M., Chegnimonhan, V., Tchuen, G., & Tchinda, R. (2022). *Techno-economic feasibility of a PV/battery/fuel cell/electrolyzer/biogas hybrid system for energy and hydrogen production in the far north region of cameroon by using HOMER pro*. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100988. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100988>.
- Khattak, S., Yousif, M., Hassan, S. U., Hassan, M., & Alghamdi, T. A. (2024). *Techno-economic and environmental analysis of renewable energy integration in irrigation systems: A comparative study of standalone and grid-connected PV/diesel generator systems in Khyber Pakhtunkhwa*. *Heliyon*, 10(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31025>.
- Kebede, A. A., Coosemans, T., Messagie, M., Jemal, T., Behabtu, H. A., Van Mierlo, J., & Bercebar, M. Das, B. K., Alotaibi, M. A., Das, P., Islam, M. S., Das, S. K., & Hossain, M. A. (2021). *Feasibility and techno-economic analysis of stand-alone and grid-connected PV/Wind/Diesel/Batt hybrid energy system: A case study*. *Energy Strategy Reviews*, 37, 100673. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100673>.
- Das, M., & Mandal, R. (2022). *The effect of photovoltaic energy penetration on a Photovoltaic-Biomass-Lithium-ion off-grid system and system optimization for the agro-climatic zones of West Bengal*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102593. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102593>.
- Deshmukh, M. K., & Deshmukh, S. S. (2008). *Modeling of hybrid renewable energy systems*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(1), 235-249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.011>.
- Ding, Z., Hou, H., Yu, G., Hu, E., Duan, L., & Zhao, J. (2019). *Performance analysis of a wind-solar hybrid power generation system*. *Energy Conversion and Management*, 181, 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.080>.
- Elkadeem, M. R., Wang, S., Sharshir, S. W., & Atia, E. G. (2019). *Feasibility analysis and techno-economic design of grid-isolated hybrid renewable energy system for electrification of agriculture and irrigation area: A case study in Dongola, Sudan*. *Energy Conversion and Management*, 196, 1453-1478. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.085>.
- Elmahallawy, M., Elfouly, T., Alouani, A., & Massoud, A. M. (2022). *A comprehensive review of lithium-ion batteries modeling, and state of health and remaining useful lifetime prediction*. *Ieee Access*, 10, 119040-119070. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3221137>.
- Emrani, A., & Berrada, A. (2024). *Modeling and optimal capacity configuration of dry gravity energy storage integrated in off-grid hybrid PV/wind/biogas plant incorporating renewable power generation forecast*. *Journal of Energy Storage*, 97, 112698. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112698>.
- Fayazi, S., Zareei, S., Samimi-Akhijahani, H. and Maleki, M. R. (2024). *Improving biogas production from fruit waste: using chemical, mechanical and thermal pretreatments and co-digestion with cow manure*. *Agricultural Mechanization*, 9(1), 13-23. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jam.2024.59881.1269>.
- Garcia, A. V. M., Sánchez-Romero, F. J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2022). *A new*

- Razmjoo, A., Kaigutha, L. G., Rad, M. V., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. J. R. E. (2021). *A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area*. *Renewable Energy*, 164, 46-57.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.042>.
- Tahir, K. A., Zamorano, M., & García, J. O. (2023). *Scientific mapping of optimisation applied to microgrids integrated with renewable energy systems*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 145, 108698.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108698>.
- Tari, M. K., Faraji, A. R., Aslani, A., & Zahedi, R. (2023). *Energy simulation and life cycle assessment of a 3D printable building*. *Cleaner Materials*, 7, 100168.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100168>.
- Vaziri Rad, M. A., Kasaeian, A., Mahian, O., & Toopshekan, A. (2024). *Technical and economic evaluation of excess electricity level management beyond the optimum storage capacity for off-grid renewable systems*. *Journal of Energy Storage*, 87, 111385.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111385>.
- Vaziri Rad, M. A., Kasaeian, A., Niu, X., Zhang, K., & Mahian, O. (2023). *Excess electricity problem in off-grid hybrid renewable energy systems: A comprehensive review from challenges to prevalent solutions*. *Renewable Energy*, 212, 538-560.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.073>.
- Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L., & Yang, H. (2010). *Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems*. *Applied energy*, 87(2), 380-389.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.012>.
- (2021). *Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application*. *Journal of Energy Storage*, 40, 102748.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>.
- Kiehbaddroudzeh, M., Merabet, A., Rajabipour, A., Cada, M., Kiehbaddroudzeh, S., Khanali, M., & Hosseinzadeh-Bandbafha, H. (2022). *Optimization of wind/solar energy microgrid by division algorithm considering human health and environmental impacts for power-water cogeneration*. *Energy Conversion and Management*, 252, 115064.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115064>.
- Lukatskaya, M. R., Dunn, B., & Gogotsi, Y. (2016). *Multidimensional materials and device architectures for future hybrid energy storage*. *Nature communications*, 7(1), 12647.
<https://doi.org/10.1038/ncomms12647>.
- Manasseh, C. O., Logan, C. S., Okanya, O. C., Igwemeka, E., Odidi, O., Onoh, C. F., & Ejim, E. P. (2025). *The Nexus between Electricity Generation and Agricultural Development in Africa*. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 15(1), 317-329.
<https://doi.org/10.32479/ijeeep.14651>.
- Manjula, A., Niraimathi, R., Rajarajeswari, M., & Devi, S. C. (2025). *Grid integration of renewable energy sources: challenges and solutions*. In *Green Machine Learning and Big Data for Smart Grids*. 263-286.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28951-4.00020-4>.
- Iran Ministry of Energy. (2023). *Electricity consumption report in Iran, 2015-2023*. Ministry of Energy of Iran. Retrieved February 17, 2024, from www.meo.gov.ir.
- Mottaghi, S., & Khob, A. R. (2023). *Economic Comparison Between Solar Power and National Grid to Supply Energy for Drip Irrigation System: The Case Study of Pakdasht County*. *Water Resources*, 16(56), 1-14.
<https://doi.org/10.30495/wej.2023.26045.2266>.
- Nfaoui, M., & El-Hami, K. (2018). *Extracting the maximum energy from solar panels*. *Energy Reports*, 4, 536-545.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.05.002>.
- Padrón, I., Avila, D., Marichal, G. N., & Rodríguez, J. A. (2019). *Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems to supplied energy to Autonomous Desalination Systems in two islands of the Canary Archipelago*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 221-230.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.009>.