



Techno-economic optimization and environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid System Microgrids for Minimizing Grid Power Outages in Residential Areas

Marzie Salehi¹|Majid Khanali²|Hassan Ghasemi-Mobtaker³| Mohammad Amin Vaziri Rad⁴

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: marzie.salehi@ut.ac.ir
2. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: khanali@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mobtaker@ut.ac.ir
4. Department of Energy and Environment, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: aminvazirirad@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 4, 2024

Revised: March. 9, 2025

Accepted: Apr. 8, 2025

Published online: Winter 2025

Keywords:

*Life cycle assessment,
Hybrid system,
Grid outage,
Cost of energy,
HOMER*

ABSTRACT

This study investigates the techno-economic and environmental performance of a hybrid renewable microgrid consisting of grid/ wind turbine / solar panels /electrolyzer/inverter/battery for mitigating power outages in Najafabad Isfahan. In this paper the environmental assessment utilizes a life cycle assessment (LCA) approach with ReCiPe 2016 and simulation, optimization and modeling procedures are done by HOMER software. Five different scenarios were considered for power outages. In the first scenario, blackouts occur without a set timetable influenced by governmental decisions and immediate requirements, reflecting the real condition of blackouts in Najaf Abad city. Cost of energy for scenarios 1, 2, 3, 4, and 5 were calculated to be 0.0712, 0.0839, \$0.0759, 0.0966, and 0.0777 \$/kWh, respectively. Results show that if the government schedules power outages during sunny hours to compensate for capacity shortages in the national electricity grid, the utilization of large-scale renewables becomes more cost-effective. Scenario 3 is found to be the most sustainable energy system with a cost of energy of \$0.0759/kWh by installing 34 wind turbines, 49844 kW of solar panels, 5000 kW of electrolyzers, 29268 kW of converters, 34500 kW hours of batteries and 116541.5 mWh per year of the national network. Furthermore, the comparative endpoint impacts of the five scenarios obtained by the ReCiPe 2016 method 36.38, 16, 17.20, 14.29 and 23.38 (mPt kWh -1) was reported, respectively and the fourth scenario with a 62 percent reduction in pollutants compared to the baseline scenario was recognized as the most sustainable scenario in terms of the environment.

Cite this article: Salehi, M., Khanali, M., Ghasemi Mobtaker, H., Vaziri Rad, M.A. (2025). Techno-economic optimization and environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid System Microgrids for Minimizing Grid Power Outages in Residential Areas, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 55 (4), 81-102. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.385950.665575>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.385950.665575>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, Hybrid System Microgrids, have been getting considerable attention worldwide for maximum utilization of distributed energy resources. In order for a hybrid system to be technically feasible, economically viable, and environmentally sustainable, a set of technical, economic, and environmental factors must be considered. LCA is a practical method of evaluating the environmental effects of any product, as it identifies the impacts for a broad range of environmental categories. LCA analysis deals with the total inputs and outputs, material flows, and emissions at each stage of a product. It also analyzes the lifetime of a product, from the raw material extraction to manufacturing, usage and end-of-life waste disposal. This study proposes a multi-approach framework for developing operationally feasible, economically viable, and environmentally sustainable hybrid energy systems in residential Areas.

Material and Methods

The residential electrical load profile of Najaf Abad city was obtained from the city's power department. Two different methods were used in this research: one for optimal economic operation and another for environmental impact assessment of the hybrid System. The main mathematical formulation of PV, wind turbine, electrolyzer, battery, and economic objective were discussed. Different power outage scenarios were designed, and ultimately, five electricity generation scenarios were defined. This study analyzed the developed HESs using the widely accepted HOMER software. This program economically evaluated hybrid energy production systems based on technical and economic data of components, load profiles, and meteorological data. Also, the life cycle assessment analysis was performed based on the ReCiPe 2016 method. The HOMER surface plot sensitivity analysis tool was employed to determine the variations in COE and RF in response to changes in renewable resource potential.

Results and Discussion

The optimal sizing in each scenario is determined by comparing the COE. According to the obtained results, the cost of energy for scenarios 1, 2, 3, 4 and 5 were \$0/0712, \$0/0839, \$0/0759, \$0/0966 and \$0/0777 per kWh, respectively. The third scenario with the lowest energy cost was recognized as the optimal scenario. The ideal combination of hybrid system components for this scenario consists of 49,844 kW PV, 34,500 kWh battery bank, 29,268 kW converter, 34 wind turbine units, and a 5 MW electrolyzer. The percentage of participation of renewable resources in five scenarios was calculated as zero, 45/8%, 45/5%, 49/4% and 34% respectively. The initial capital costs for scenarios 1, 2, 3, 4 and 5 were \$0, \$45/8, \$45/5, 49/4 and \$34 respectively. Global warming changed between 0/23 – 0/72 kg CO₂ per kilowatt of electricity produced for different scenarios. The second scenario with a 52% reduction, the third scenario with a 58% reduction, the fourth scenario with a 70% reduction, and the fifth scenario with a 43% reduction in global warming compared to the first scenario showed the ability of these scenarios to use renewable resources in order to reduce greenhouse gas emissions. The total amounts of environmental pollutants in the five studied scenarios were calculated as 38/36, 16, 17/20, 14/29 and 23/38 (mPt kWh⁻¹) respectively, and the fourth scenario was considered to be the most environmentally sustainable scenario.

Conclusions

In this paper, the techno-economic feasibility analysis and environmental Life Cycle Assessment of a hybrid renewable energy system was conducted to address power outages in residential areas. The results indicated that, if the government plans power outages during hours with suitable solar radiation (scenario three) renewable energy can be used to compensate for outages even from the Peak time of power outages. The highest percentage of renewable fraction was related to the fourth scenario (49/4%) due to the maximum use of wind turbines to compensate for power outages.

The fourth scenario, despite having the lowest amount of harmful environmental effects, has a higher energy cost than the other scenarios, and the choice of the best scenario depends on the opinion of the policy maker who considers the energy cost or prioritizes the environmental effects.

Author Contributions

Conceptualization, M.Kh., Methodology, M.Kh., Software, M.S and M.A.V.R; Validation, H.Gh.M; Formal analysis, M.S and M.A.V.R; Investigation, M.S; Resources, H.Gh.M; Data Curation, M.S; Writing-original draft preparation, M.S; Writing-reviewing, and editing, H.Gh.M; Visualization, M.S; Supervision, M.Kh. and H.Gh.M; Project administration, M.Kh. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study will be available from the corresponding author on reasonable requests.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge for all supports by Najafabad Electricity power distribution company and Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of Tehran. authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی فنی - اقتصادی و محیط‌زیستی عملکرد سیستم هیبریدی به‌منظور جبران خاموشی‌های شبکه برق در مناطق مسکونی

مرضیه صالحی^۱ | مجید خانعلی^۲ | حسن قاسمی مبتکر^۳ | محمدامین وزیری راد^۴

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

marzie.salehi@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

khanali@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

mobtaker@ut.ac.ir

۴. گروه انرژی و محیط زیست، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:

aminvazirirad@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش امکان استفاده از سیستم هیبریدی متشکل از شبکه/توربین بادی/پنل خورشیدی/الکترولاایزر/میدل/باتری از لحاظ فنی - اقتصادی و محیط‌زیستی جهت جبران خاموشی‌های برق مصرفی واحدهای مسکونی در منطقه نجف آباد اصفهان مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی توسط نرم‌افزارهای تحلیل انرژی هومر و سیمپرو صورت گرفت. در این پژوهش ۵ سناریو جهت اعمال قطعی برق در نظر گرفته شد. در سناریو اول که به‌عنوان سناریو پایه شناخته شد، خاموشی‌ها بدون برنامه زمانی مشخص و تحت تأثیر تصمیمات دولتی و الزامات فوری رخ می‌دهند که بیانگر وضعیت واقعی خاموشی در شهر نجف‌آباد است. هزینه انرژی برای سناریوهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۰/۰۷۱۲، ۰/۰۸۳۹، ۰/۰۷۵۹، ۰/۰۹۶۶ و ۰/۰۷۷۷ دلار بر کیلووات‌ساعت محاسبه گردید. نتایج نشان داد که اگر دولت برای جبران کمبود ظرفیت در شبکه برق سراسری، قطع برق را در ساعات آفتابی برنامه‌ریزی کند، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ مقرون‌به‌صرفه خواهد بود؛ بنابراین سناریو سوم با بهره‌گیری از ۳۴ عدد توربین بادی، ۴۹۸۴۴ کیلووات پنل خورشیدی، ۵۰۰۰ کیلووات الکترولاایزر، ۲۹۲۶۸ کیلووات میدل، ۳۴۵۰۰ کیلووات‌ساعت باتری و ۱۱۶۵۴۱/۵ مگاوات‌ساعت بر سال شبکه سراسری کمترین میزان هزینه انرژی را به خود اختصاص داده است و به‌عنوان پایدارترین سناریو برای تولید توان در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج، مقادیر کل آلاینده‌های محیط‌زیستی در پنج سناریو به ترتیب ۳۸/۳۶، ۱۷/۲۰، ۱۴/۲۹ و ۲۳/۳۸ (۱- mPt kWh) گزارش گردید و سناریوی چهارم با کاهش ۶۲ درصدی آلاینده‌ها نسبت به سناریو پایه به لحاظ محیط‌زیستی، پایدارترین سناریو شناخته شد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۱۹

تاریخ انتشار: زمستان ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

ارزیابی چرخه زندگی،

سیستم هیبریدی،

خاموشی شبکه،

هزینه انرژی،

هومر

استاد: صالحی، مرضیه؛ خانعلی، مجید؛ قاسمی مبتکر؛ حسن و وزیری راد، محمدامین (۱۴۰۳). ارزیابی فنی - اقتصادی و محیط‌زیستی عملکرد سیستم هیبریدی به منظور حداقل نمودن خاموشی‌های شبکه برق در مناطق مسکونی، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۵ (۴)، ۸۱-۱۰۲.



<https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.385950.665575>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.385950.665575>

مقدمه

پیشرفت در عرصه‌های مختلف اقتصادی، انسانی و اجتماعی به اشکال مختلفی مرتبط با انرژی است، بنابراین انرژی از عوامل اساسی برای دستیابی به توسعه پایدار، خاصه در کشورهای در حال توسعه است. با توجه به روند روبه‌رشد رفاه در سطح جهانی، تقاضای مصرف انرژی افزایش یافته است. در این میان؛ نیاز روز جهان و به‌خصوص کشورهای در حال توسعه به انرژی الکتریسیته، توسعه نیروگاه‌ها را طلب می‌کند که این امر در کشور ما نیز بسیار پرشتاب بوده است. از این‌رو، تأمین الکتریسیته کافی، سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه برای توسعه پایدار ضروری است (Ali et al., 2020). تولید الکتریسیته به منابع انرژی، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی وابسته است؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۱۱ حدود ۶۷ درصد انرژی الکتریسیته جهان از این منابع، ۱۵ درصد از انرژی آبی و تنها ۴ درصد از منابع دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر تولید شده است. از طرفی، مصرف انرژی‌های سنتی و سوختن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های برق؛ آلاینده‌های بسیاری از قبیل اکسیدهای سولفور، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن و مواد ریز ذره‌ای را ایجاد کرده و تأثیراتی همچون باران اسیدی، فرسایش لایه ازن و پدیده گرمایش جهانی را به همراه دارد (Bhattacharyya, 2011).

امنیت انرژی یکی از اساسی‌ترین پیش نیازهای اقتصادی و توسعه اجتماعی یک کشور است و مصرف انرژی برق در ایران به عنوان یک کشور در حال توسعه به سرعت در حال افزایش است. از آنجا که الکتریسیته به دلیل ویژگی‌های فیزیکی آن، به طور اقتصادی انباشت‌پذیر نمی‌باشد، بنابراین امکان ذخیره‌سازی ندارد، لذا مانند سایر کالاهای اقتصادی نیست که در صورت کمبود بتوان از خارج شبکه؛ اقدامات مرتبط با تولید و توزیع آن را انجام داد. در نتیجه مواقعی که میزان مصرف لحظه‌ای بخش تقاضا از مجموع میزان تولید و قابل توزیع پیشی می‌گیرد، خاموشی رخ می‌دهد. به عبارت دیگر بیشتر بودن نرخ رشد تقاضای الکتریسیته از نرخ رشد عرضه که عموماً به دلیل افزایش روزافزون مشترکین شبکه برق و عدم توجه به ازدیاد بار بر شبکه ناشی از موج گرما، افت ولتاژ در سطح شبکه توزیع و بروز مشکل فنی ناشی از وزش باد شدید اتفاق می‌افتد، سبب بروز خاموشی می‌گردد. این خاموشی‌ها خسارت‌های جبران‌ناپذیر زیادی را هم به اقتصاد کشور و هم به زندگی روزمره شهروندان وارد می‌سازد.

بسیاری از کشورها به دنبال توسعه بیشتر انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی هستند. از طرفی به دلیل متناوب بودن و عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر انرژی، دو یا چند منبع تجدیدپذیر را ترکیب می‌نمایند و یا دیگر روش‌های تولید الکتریسیته را به تولید با سوخت مرسوم اضافه می‌نمایند که در اصطلاح به آنها سامانه‌های هیبریدی گفته می‌شود (Belmili et al., 2014). به‌طور کلی سامانه‌های هیبریدی به آن دسته از فناوری‌هایی اطلاق می‌شود که از تلفیق و یکپارچگی دو یا چند منبع تجدیدپذیر و گاهی سنتی و بهره‌برداری هم‌زمان از آنها حاصل گشته‌اند (Erdinc and Uzunoglu et al., 2011). در مقایسه با سامانه‌های انرژی تک‌منبع، سامانه‌های انرژی هیبریدی یا چند منبع، دارای مزایای بسیاری است که می‌توانند با تولید انرژی مبتنی بر منابع انرژی محلی باعث کاهش کمبود ظرفیت و متعاقباً کاهش احتمال خاموشی برق در کشورهای در حال توسعه گردند و در تأمین الکتریسیته موردنیاز، بسیار مؤثر عمل نمایند (Nagapurkar et and Smith, 2019).

از آنجائی که سامانه‌های هیبریدی اگر براساس مطالعات فنی-اقتصادی و تحت روش‌های صحیح بهینه‌سازی قرار بگیرند، کاهش اندازه و ظرفیت اجزاء سیستم هیبریدی، کاهش هزینه چرخه عمر سیستم و مزایای اقتصادی قابل توجهی را به دنبال خواهند داشت. بنابراین اهداف طراحی بهینه سامانه‌های هیبریدی می‌تواند از دیدگاه اقتصادی، فنی، اجتماعی، محیط‌زیستی و یا ترکیبی از عوامل مذکور باشد (Al-falahi et al., 2017). برای دستیابی به این اهداف می‌توان از نرم‌افزارهایی نظیر هومر، هیبرید ۲ و متلب بهره گرفت. افزایش تقاضای انرژی می‌تواند مشکلات فراوان محیط‌زیستی را به همراه داشته باشد. برای بررسی اثرات محیط‌زیستی تولید الکتریسیته بر سلامت انسان، کیفیت زیست‌بوم، تغییرات آب‌وهوا و کاهش منابع، می‌توان از تجزیه و تحلیل ارزیابی چرخه زندگی (LCA) به عنوان ابزاری قوی استفاده نمود. علی‌رغم توانایی بالای ارزیابی چرخه زندگی در مطالعات محیط‌زیستی، پژوهش‌های محدودی در خصوص ارزیابی چرخه زندگی سامانه‌های هیبریدی انجام شده است. به‌طور کلی، مطالعات به بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سامانه هیبریدی پرداخته‌اند و برخی از مطالعات به ارزیابی محیط‌زیستی سامانه هیبریدی مربوط بوده‌اند که در ادامه به چند نمونه تحقیق انجام شده در این زمینه اشاره شده است.

Malherio et al., (2015) هزینه‌های تولید الکتریسیته با استفاده از دیزل را ۶۷۵ دلار بر مگاوات‌ساعت گزارش نمودند. نتایج آنها

نشان داد که با استفاده از یک سامانه هیبریدی شامل توربین بادی/ پنل خورشیدی/ سوخت می توان ضمن کاهش ۹۰ درصدی هزینه های تولید، هزینه های مصرف سوخت را نیز تا ۲۷۰ دلار بر مگاوات ساعت کاهش داد. Kennedy et al., (2017) با استفاده از نرم افزار هومر یک سامانه انرژی هیبریدی بهینه شامل یک نیروگاه آبی کوچک، سلول خورشیدی، باتری و ژنراتور دیزلی برای جزیره ای در انگلستان را مدل سازی نمودند. نتایج نشان داد که در هشت ماه از سال، الکتریسیته مورد نیاز را نمی توان صرفاً از منابع تجدیدپذیر تولید نمود. برای تولید الکتریسیته بطور کامل از منابع تجدیدپذیر پیشنهاد گردید که مازاد هیدروژن تولیدی از الکتریسیته تجدیدپذیر، جایگزین سوخت دیزل در ژنراتور دیزلی گردد. براساس نتایج، با جایگزینی هیدروژن به جای دیزل می توان الکتریسیته را تماماً از منابع تجدیدپذیر و بدون انتشار دی اکسید کربن در این جزیره تولید کرد. در این سامانه جدید هزینه تولید الکتریسیته به ازای هر کیلووات ساعت ۰/۷۷۶ دلار گزارش شد. Ayodele et al., (2017) در تحقیقی هزینه یک سامانه تولید انرژی دیزلی را برای هتلی بین ۱۸۰ الی ۲۱۰ دلار بر مگاوات ساعت گزارش نمودند. در حالی که با استفاده از یک سامانه هیبریدی ضمن کاهش هزینه تولید به ۱۳۰ دلار بر مگاوات ساعت، میزان کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن را ۸۰ درصد عنوان نمودند. Duman & Güler., (2018) ترکیب های مختلفی از سامانه های فتوولتائیک، بادی و پیل سوختی را به همراه دیزل ژنراتور در حالت منفصل از شبکه برای چند خانه در یکی از شهرهای ترکیه طراحی و بهینه سازی نمودند. در این کار که با استفاده از نرم افزار هومر انجام شد دو پروفیل بار متفاوت مربوط به خانه های فصلی شش ماهه و نیز خانه های معمولی سالیانه در نظر گرفته شد. همچنین یکی دیگر از اهداف این کار، مقایسه دو سامانه باتری و هیدروژنی، به عنوان سامانه های ذخیره ساز در روش هیبریدی بود.

Krishan & Suhag (2019) به تحلیل فنی و اقتصادی یک سامانه تجدیدپذیر هیبریدی برای تأمین انرژی منطقه مسکونی و کشاورزی منطقه یامونانگار هند پرداختند. این منطقه از نظر تولید انرژی دارای محدودیت بود. بررسی آنها بین سه حالت بادی/باتری، خورشیدی/ باتری و بادی/خورشیدی/باتری با تعیین هزینه انرژی (COE) و هزینه فعلی خالص (NPC) برای تعیین اقتصادی ترین حالت انجام شد و تحلیل فنی و اقتصادی با استفاده از نرم افزار هومر صورت گرفت. برای تجزیه و تحلیل فنی و دستیابی به هماهنگی بین اجزای مختلف سامانه هیبریدی تجدیدپذیر و حفظ تعادل بین عرضه و تقاضا و ثابت نگه داشتن ولتاژ با تغییرات سرعت باد و میزان نور خورشید و همچنین تغییرات بار بین مدل های پیشنهادی از برنامه متلب استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل هیبریدی بادی/خورشیدی/باتری مقرون به صرفه ترین حالت بوده است. Baseer et al., (2019) یک سیستم هیبریدی برای تأمین برق یک مجموعه مسکونی بهینه سازی نمودند و هزینه انرژی سیستم هیبریدی خورشیدی/بادی/باتری دارای هزینه انرژی ۰/۲۵ دلار بر کیلووات ساعت گزارش گردید.

Zebra et al., (2021) به بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد سامانه های تجدیدپذیر در شبکه های کوچک الکتریسیته در کشورهای در حال توسعه پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که حمایت دولتی از جامعه روستایی عنصری کلیدی در راه اندازی موفق این سامانه در بین سامانه های دیزل، سامانه فتوولتائیک خورشیدی و سامانه هیبریدی دیزل - فتوولتائیک می باشد. در این مطالعه، سامانه دیزل به عنوان گران ترین گزینه تأمین الکتریسیته تعیین گردید. نتایج این پژوهش نشان داد به جای گسترش شبکه الکتریسیته سراسری، توسعه سامانه های هیبریدی تجدیدپذیر راه حل ارزان تر و مناسب تری برای تأمین الکتریسیته در کشورهای توسعه یافته است.

Tamjid Shabestari et al., (2022) تعداد احتمالی خاموشی الکتریسیته در روستایی در ایران را با استفاده از روش یادگیری ماشین (MI) با ۹ روش پیش بینی نمودند و بر اساس خاموشی های پیش بینی شده؛ شبیه سازی یک سامانه هیبریدی متصل به شبکه شامل پنل های خورشیدی/ ژنراتور بیودیزل/ باتری را تحت سه سناریوی قطع برق شامل قطعی های زمان پیک بار، قطعی های برنامه ریزی شده و قطعی های تصادفی با نرم افزار هومر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از انرژی های تجدیدپذیر برای جبران خاموشی های ناشی از قطع الکتریسیته برنامه ریزی شده راه حل مقرون به صرفه ای با هزینه انرژی ۰/۰۷-۰/۰۶۶ دلار بر کیلووات ساعت است. آنالیز حساسیت نشان داد که دولت باید میانگین زمان خاموشی ها را کمتر از دو ساعت نگه دارد تا برای جبران خاموشی ها در مناطق روستایی در ماه های گرم سال توسط انرژی های تجدیدپذیر بتوان اطمینان حاصل نمود. Ahmadi et al., (2023) یک مطالعه چندرویکردی را برای یک جزیره دور افتاده در ویتنام که از نظر عملیاتی و اقتصادی امکان پذیر و از نظر محیط زیستی پایدار باشد، را انجام دادند. نتایج نشان داد یک سامانه هیبریدی بدون شبکه شامل پنل خورشیدی/ توربین های بادی/ باتری/ دیزل ژنراتور دارای کمترین هزینه خالص به میزان ۱۰۹/۷ میلیون

دلار برای تأمین الکتریسیته مصرفی جزیره مورد مطالعه می‌باشد، اما دارای کسری انرژی معادل ۵۵٪ بود. براساس نتایج، سامانه هیبریدی متصل به شبکه که شامل سطح بالایی از پنل خورشیدی و توربین بادی باشد بهترین عملکرد را از نظر سازگاری با محیط‌زیست، کاهش انتشارات و همچنین دارای قابلیت صدور مازاد الکتریسیته به شبکه دارد.

Sackey et al., (2023) یک سیستم هیبریدی برای بهبود برق رسانی به زیپ لاین در کشور غنا را شبیه‌سازی نمودند. براساس نتایج آنها سیستم شبیه‌سازی شده شامل پنل‌های خورشیدی ۹۴/۸ کیلوواتی، باتری لیتیوم با ظرفیت ۲۳۱ کیلووات‌ساعت، مبدل ۵۶/۳۱ کیلووات و ژنراتور ۱۵۸ کیلوواتی بود.

Han et al., (2024) به بررسی فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی برای طراحی و بهره‌برداری از سیستم هیبریدی متصل به شبکه پرداختند. براساس نتایج آنها مدل پیشنهادی می‌تواند هزینه کل را تا ۲۸/۳۸ درصد و هزینه محیط‌زیستی را تا ۳/۳۹ درصد کاهش دهد. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که هزینه کل سیستم نسبت به قیمت گاز طبیعی و الکتریسیته از حساسیت بیشتری برخوردار است. در دهه اخیر، ظرفیت تولید برق کشور با یک شیب ملایم افزایش یافته، ولی ترکیب سبد عرضه برق تغییر چندانی نداشته است. در سال ۱۳۹۹ مجموع ظرفیت کشور ۸۵۳۱۳ مگاوات بوده که نسبت به سال ۱۳۹۸ رشدی معادل ۲/۲٪ داشته است. از این میزان ظرفیت، ۷۱۳۳۱ مگاوات مربوط به نیروگاه‌های حرارتی و ۱۳۹۸۲ مگاوات مربوط به نیروگاه‌های تجدیدپذیر (نیروگاه‌های برق‌آبی، اتمی و تجدیدپذیر) بوده است. پدیده خاموشی از شکاف بین عرضه و تقاضای الکتریسیته ایجاد می‌شود و خاموشی‌های گسترده زمانی بروز می‌یابد که ظرفیت تأسیسات عرضه الکتریسیته متناسب با نرخ رشد تقاضا رشد نکرده باشد (خواجه رضائی، ۱۳۹۹). برای رفع مشکل خاموشی و جلوگیری از تکرار آن به خصوص در فصول گرم سال، لازم است که میزان عرضه و تقاضای برق در شبکه تراز شوند، به عبارت دیگر مجموع تقاضا و مجموع عرضه در یک تعادل قرار گیرند. بنابراین، تمرکز اولیه این مطالعه شبیه‌سازی یک سامانه انرژی هیبریدی کارآمد شامل شبکه توربین بادی / پنل خورشیدی / الکترولایزر / مبدل / باتری است که از منابع انرژی تجدیدپذیر موجود برای رفع قطعی الکتریسیته در شبکه مناطق مسکونی شهر نجف آباد واقع در استان اصفهان استفاده نماید. برای اینکه یک سامانه هیبریدی از نظر فنی امکان‌پذیر و به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و از نظر پایداری سازگار با محیط‌زیست باشد مجموعه‌ای از عوامل فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی باید در نظر گرفته شود. هدف دیگر از پژوهش پیش‌رو ارزیابی فنی - اقتصادی و چرخه زندگی سامانه هیبریدی تولید الکتریسیته در زمان بروز خاموشی می‌باشد. بدین منظور این پژوهش مجموعه کاملی از شاخص‌های فنی - اقتصادی و محیط‌زیستی را برای دست یافتن به اهداف فوق‌الذکر ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

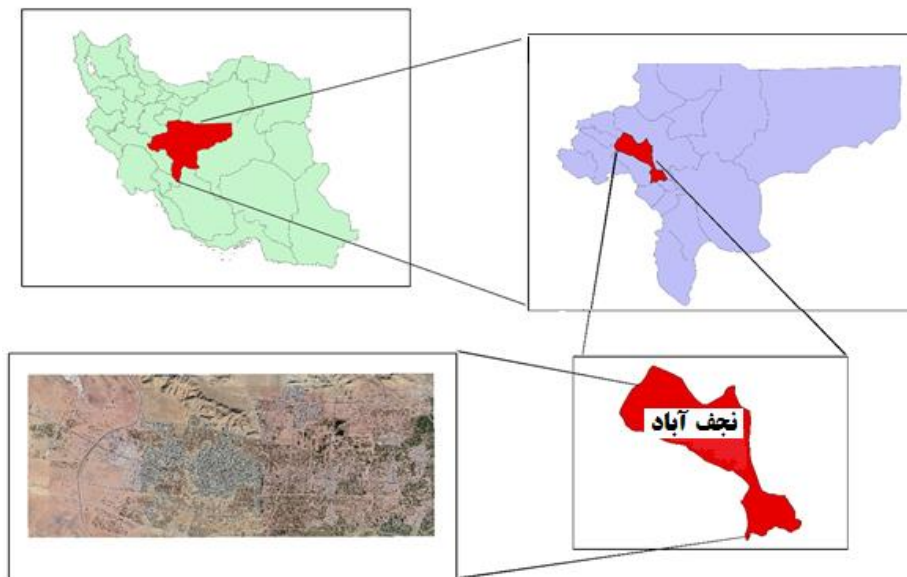
در این مطالعه هدف آنالیز فنی - اقتصادی و محیط‌زیستی سامانه هیبریدی تولید الکتریسیته می‌باشد. بدین منظور ابتدا منطقه مورد مطالعه معرفی و در ادامه اطلاعاتی در خصوص پارامترهای فنی - اقتصادی و محیط‌زیستی ارائه شده است و سپس راهبرد توزیع و سناریوهای نحوه اعمال خاموشی‌ها توضیح داده شده است.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان نجف‌آباد بین عرض ۳۲/۵ تا ۳۳/۳ شمالی و طول ۵۰/۶ تا ۵۱/۵ درجه شرقی، با مساحتی بالغ بر ۲۳۴۳/۳۲ کیلومتر مربع در غرب اصفهان واقع شده است (شکل ۱). شهر نجف‌آباد در دشتی با آب و هوای معتدل و نسبتاً خشک قرار گرفته است. میانگین بارش سالیانه در آن ۱۵۰ میلی‌متر بوده که بیشتر در فصل‌های سرد سال انجام می‌گیرد. حداکثر و حداقل مطلق درجه حرارت به ترتیب ۳۸ و ۵/۹ درجه سلسیوس و متوسط درجه حرارت در سال برابر ۸/۱۵ درجه سلسیوس می‌باشد. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۶۰۰ متر است.

جمع‌آوری اطلاعات

به منظور انجام پژوهش پیش‌رو، با مراجعه حضوری به اداره برق شهرستان نجف‌آباد، آمار خاموشی‌های سالیانه در بخش مسکونی، تعداد انشعابات الکتریسیته مسکونی، تعداد ترانس و تعداد فیدها و اینکه هر فیدر چه تعداد واحد مسکونی را تغذیه می‌کند؛ استخراج گردید. میزان الکتریسیته هر واحد مسکونی، پیک مصرف و پتانسیل مصرف، پروفایل بار مصرف‌کنندگان، اطلاعات منطقه‌ای و پتانسیل منابع تجدیدپذیر نظیر میزان تابش خورشید و سرعت باد، اطلاعات فنی و اقتصادی اجزای سامانه جمع‌آوری گردید.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

آنالیز فنی - اقتصادی

ارزیابی فنی - اقتصادی سامانه هیبریدی مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار HOMER انجام پذیرفت. نرم افزار HOMER توسط آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر ایالات متحده آمریکا ایجاد شده و توسعه یافته است (Homerenergy.com, 2024). هومر از تحلیل اقتصادی برای بهینه سازی سامانه هیبریدی و یا سامانه مستقل استفاده می کند و سامانه ها را براساس هزینه خالص فعلی، هزینه هم سطح انرژی (LCOE) و هزینه عملیاتی درجه بندی می کند. داده های تکنیکی - اقتصادی تجهیزات موجود در سیستم هیبریدی مورد استفاده به منظور شبیه سازی در قسمت پیوست آورده شده است.

باتوجه به هدف بهینه سازی که افزایش قابلیت اطمینان تأمین برق با حداقل سازی احتمال بروز خاموشی برای منطقه مطالعاتی مورد نظر بوده، میزان CAPACITY SHORTAGE صفر در نظر گرفته شد که به مفهوم تأمین ۱۰۰ درصد بار الکتریکی در پنج سناریو طراحی شده به منظور جبران خاموشی های منطقه بوده است. سایر پارامترهای کلیدی در این نرم افزار شامل FOCUS FACTOR بهینه سازی روی عدد پنج (معادل دقت شبیه سازی بالا)، MINIMUM RENEWABLE FRACTION روی عدد صفر (یا عدم تحمیل استفاده از منابع تجدیدپذیر در صورت اقتصادی نبودن)، EMISSION PENALTY روی عدد صفر به دلیل عدم اعمال جریمه انتشار کربن در ایران و OPERATING RESERVE منابع تجدیدپذیر روی عدد ۵۰ به منظور پوشش احتمال تغییرات ناگهانی در توان خروجی منابع فرض گردید.

معادلات اصلی:

مهم ترین روابط مورد استفاده در نرم افزار هومر در راهنمای جامع این نرم افزار برای استفاده کنندگان قرار گرفته است. در این بخش، فرمول ریاضی پنل خورشیدی، توربین بادی، الکترو لایزر، باتری، مبدل و هدف اقتصادی براساس راهنمای جامع نرم افزار هومر که در این مطالعه استفاده شده، مورد بحث قرار گرفته است.

پنل خورشیدی:

معادله (۱) برای محاسبه توان خروجی سلول های خورشیدی استفاده می شوند (Homerenergy.com, 2024):

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

در روابط فوق P_{PV} خروجی الکتریسیته از پنل بر حسب kW، Y_{PV} ظرفیت نامی آرایه های فوتوولتائیک (kW)، f_{PV} ضریب کاهش (تأثیر گرما، گرد و غبار و ...) (%)، G_T شدت تابش ورودی بر سطح پنل در هر گام زمانی شبیه سازی (kW/m^2)، $G_{T,STC}$ شدت تابش در

شرایط تست استاندارد (1 kW/m²)، α ضریب دما بر توان خروجی (°C / %)، T_C دمای سلول در هر گام زمانی شبیه‌سازی (°C) و $T_{C,STC}$ دمای سلول در شرایط تست استاندارد (°C) است.

توربین بادی:

توان خروجی واقعی توربین بادی را می‌توان با استفاده از معادله زیر تعیین کرد (Khosravani et al., 2023):

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V_r^3 C_p \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن A سطح مقطع - ρ چگالی هوا برحسب kg/m^3 ، V_r سرعت نامی - C_p بازده توربین‌های بادی می‌باشد.

باتری:

باتری به‌عنوان یک سامانه ذخیره‌سازی در سامانه هیبریدی قرار داده می‌شود تا پایداری تولید توسط سایر انرژی‌های تجدیدپذیر را جبران نماید. معادلات ۷ و ۸ به ترتیب برای محاسبه حداکثر توان جذب شده توسط باتری و حداکثر توان قابل تخلیه توسط باتری را حساب می‌کند (Homerenergy.com, 2024):

$$P_{batt,cmax,kgm} = \eta_{Bat} \cdot \left(\frac{k \cdot Q_{max} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q \cdot k \cdot c(1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c(k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$P_{batt,dmax,kgm} = \frac{-k \cdot c \cdot Q_{max} + k \cdot Q_1 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q \cdot k \cdot c(1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c(k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \quad \text{رابطه (۴)}$$

پس از محاسبه مقدار توان واقعی شارژ و دشارژ، مقدار انرژی در دسترس و محدود در پایان هر گام شبیه‌سازی زمانی توسط معادلات زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_{1,end} = Q_1 e^{-k \Delta t} + \frac{(Qkc - P)(1 - e^{-k \Delta t})}{k} + \frac{Pc(k \Delta t - 1 + e^{-k \Delta t})}{k} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Q_{2,end} = Q_2 e^{-k \Delta t} + Q(1 - c)(1 - e^{-k \Delta t}) + \frac{P(1 - c)(k \Delta t - 1 + e^{-k \Delta t})}{k} \quad \text{رابطه (۶)}$$

Δt گام زمانی شبیه‌سازی را تعیین می‌کند. η_{Bat} راندمان تخلیه باتری، Q_{max} ظرفیت کل بانک باتری، c نسبت ظرفیت باتری، k نرخ ثابت تبدیل انرژی، Q_1 انرژی قابل دسترس در باتری در آغاز هر گام زمانی (kWh) است. Q انرژی محدود در باتری در آغاز هر گام زمانی (kWh) - Q مجموع مقدار انرژی در باتری در آغاز هر گام زمانی (kWh) است.

الکترولایزر:

هدف از کاربرد الکترولایزر، الکترولیز آب برای تولید هیدروژن و اکسیژن است. الکترولایزر صرفاً با الکتریسیته تجدیدپذیر اضافی کار می‌کند. معادله ۱۱ نشان‌دهنده خروجی هیدروژن محاسبه شده (Q_{H2}) در شرایط دمایی ایده‌آل و نسبت‌های ورودی صحیح است (Olabi et al., 2023):

$$Q_{H2} = P_{Excess} \cdot \eta_{electrolizer} \cdot R_{PEM} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$Y_{Electrolizer} = Q_{H2} \cdot SSC_{PEM} \quad \text{رابطه (۸)}$$

P_{Excess} الکتریسیته مازاد موجود از منابع تجدیدپذیر (kWh)، $\eta_{electrolizer}$ کارایی دستگاه الکترولایزر، R_{PEM} نسبت تولید هیدروژن دستگاه است. $Y_{Electrolizer}$ ظرفیت اسمی الکترولایزر SSC_{PEM} مصرف ویژه سیستم به ازای هر کیلوگرم هیدروژن تولید شده است که تقریباً معادل ۵۰ کیلووات ساعت بر کیلوگرم است.

مبدل:

توان الکتریکی خروجی مبدل (AC) را میتوان از معادله زیر حساب کرد (Akhtari & Baneshi, 2019):

$$P_{out} = P_{in} \eta_{inv} \quad \text{رابطه (۹)}$$

P_{in} توان ورودی DC به مبدل است و η_{inv} بازده مبدل است.

هزینه انرژی:

هزینه انرژی به میانگین هزینه هر کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی مفید تولید شده توسط سامانه اشاره دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید



(Abdin & M'erida, 2019):

$$COE = \frac{CP}{E_{Served}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$CP = CRF(I, n) \cdot NPC \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$CRF(I, n) = \frac{I(1+I)^n}{(1+I)^n - 1} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$I = \frac{r-i}{1+i} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

که در آن E_{Served} کل الکتریسیته تولید شده و CP کل هزینه جاری سالانه سامانه است. ضرایب CRF ، I ، n ، r و i به ترتیب به ضریب بازگشت سرمایه، نرخ بهره واقعی، طول عمر ایستگاه (سال)، نرخ بهره اسمی و نرخ تورم اشاره دارند.

درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر:

درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر (RF) به نسبت انرژی تحویل شده به بار از طریق منابع تجدیدپذیر اشاره دارد و از طریق معادله زیر محاسبه می‌گردد (Ghenai et al., 2020):

$$RF = \left(1 - \frac{P_{Grid}}{P_{Served}}\right) * 100 \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن، P_{Grid} توان شبکه و P_{Served} توان مؤثر عرضه شده است.

ارزیابی چرخه زندگی (LCA):

پایداری سامانه هیبریدی به لحاظ محیط‌زیستی با روش‌های مختلفی نظیر LCA بررسی می‌گردد. در این مطالعه، تحلیل ارزیابی چرخه زندگی براساس روش ReCiPe 2016 انجام شده است. در این روش، ۱۸ بخش اثر شامل پتانسیل گرمایش جهانی، پتانسیل اختناق دریاچه‌ای، مسمومیت انسانی، پتانسیل اسیدی شدن، نقصان لایه ازن، تقلیل منابع غیرآلی، مسمومیت آب‌های آزاد، مسمومیت آب‌های سطحی، اکسیداسیون فتوشیمیایی و مسمومیت خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است. این روش تجزیه و تحلیل، وزن را در سطح نقطه پایانی بر اساس دسته‌بندی اثرات و آسیب‌ها در سه دسته سلامت انسان، زیست‌بوم و منابع ارائه می‌دهد. پژوهش جاری واحد عملکردی این سیستم را بر پایه یک کیلووات‌ساعت الکتریسیته تولیدی (kWh) در نظر گرفته است.

هر پروژه ارزیابی چرخه زندگی بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰، دارای چهار مرحله الزامی به شرح زیر است (ISO, 2006a, 2006b):

الف- تعریف هدف و دامنه: در این مرحله چهارچوب کلی کار که شامل واحدهای کارکردی (جریان‌های مرجع)، مرزهای

سامانه و تخصیص منابع است، مشخص می‌شود. باوجود اینکه سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر می‌توانند به کاهش انتشار آلاینده‌ها کمک کنند؛ اما آنها عاری از انتشار دی‌اکسیدکربن و سایر آلاینده‌ها نیستند. ساخت تأسیسات انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند پنل خورشیدی، توربین بادی، باتری و ...) مواد خطرناکی را به خاک، آب‌وهوا وارد می‌کند. هدف این پژوهش ارزیابی مسائل محیط‌زیستی سامانه هیبریدی موردنظر است. سامانه هیبریدی مورد استفاده در این پژوهش شامل شبکه/توربین بادی/پنل خورشیدی/الکترولیزر/مبدل/باتری است. واحد عملکردی در این پژوهش ۱ کیلووات‌ساعت الکتریسیته تولید شده از سامانه هیبریدی موردنظر تحت سناریوهای مختلف است. در این مطالعه، مرز سامانه مطابق شکل شماره ۲ از استخراج مواد خام و انرژی شروع و تا تولید الکتریسیته توسط سامانه هیبریدی خاتمه یافت.

ب- تجزیه و تحلیل سیاهه در ارزیابی چرخه زندگی: در این مرحله، منابع استفاده شده و انتشار آلاینده‌ها در کل یا

بخشی از دوره زندگی محصول که با توجه به مرزهای سامانه تعیین می‌شوند، در نظر گرفته می‌شود. داده‌های مرتبط با میزان مصرف مواد و حامل‌های انرژی ورودی به سامانه هیبریدی و میزان تولید الکتریسیته از سامانه هیبریدی جمع‌آوری و در جدول شماره ۱ گزارش شده‌اند. مشخصات اجزای سامانه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار SimaPro، در جدول شماره ۲ گزارش شده است.

ج- ارزیابی تأثیرات چرخه زندگی: به‌منظور تفسیر نتایج، انتشار آلاینده‌های مهم در بخش‌های اثرگذار ارائه می‌گردد. در

مرحله ارزیابی اثرات، ورودی‌های منابع طبیعی و انتشارات محیط‌زیستی به سهم آنها در محدوده بخش‌های اثر منتخب محاسبه می‌شود و بدین منظور برای هر یک از گروه‌های تأثیر، ضریب تأثیر ویژه تعریف شد.

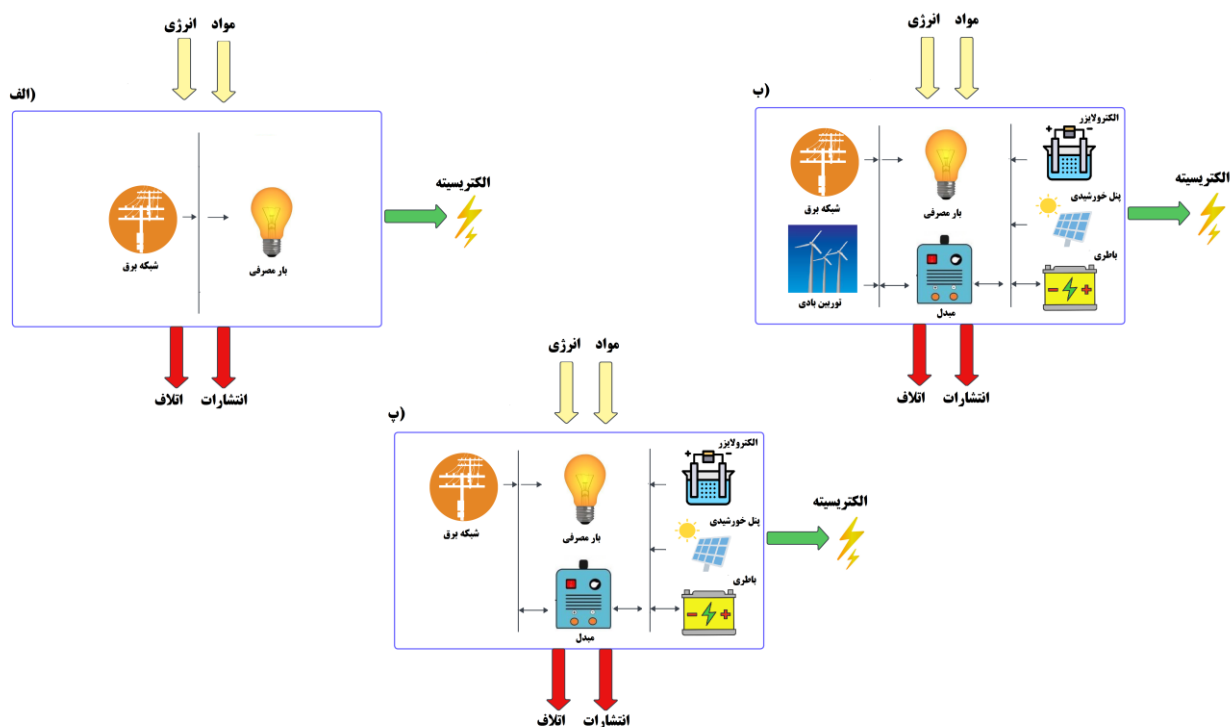
د- تحلیل نتایج: در این قسمت تمام نتایج به منظور نتیجه‌گیری و ارائه راهکارها مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

جدول ۱. تحلیل سیاهه چرخه زندگی سامانه هیبریدی مورد استفاده

عامل‌ها	واحد	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم	سناریو پنجم
الف) ورودی‌ها						
توربین بادی	تعداد	۰	۳۲	۳۴	۶۱	۰
پنل خورشیدی	kW	۰	۵۲۰۹۳	۴۹۸۴۴	۳۹۸۶۸	۵۶۶۷۸
الکترو لایزر	kW	۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰
مبدل	kW	۰	۴۵۶۱۲	۲۹۲۶۸	۷۵۲۴۲	۳۳۶۵۸
باتری	kWh	۰	۸۱۴۰۰	۳۴۵۰۰	۱۷۲۹۰۰	۴۱۹۰۰
شبکه سراسری	MWh/year	۲۱۵۵۸۴	۱۱۵۱۸۱/۲	۱۱۶۵۴۱/۵	۱۰۷۵۲۱/۷	۱۴۰۹۲۷/۷
الف) خروجی						
الکتریسیته	MWh/year	۲۱۵۵۸۴	۲۱۲۷۰/۴	۲۴۶۵۲۶/۸	۲۵۷۸۶۵/۵	۲۳۵۷۰۱/۳

جدول ۲. مشخصات اجزای سامانه هیبریدی شبیه‌سازی شده و مستخرج از پایگاه داده نرم‌افزار SimaPro.

اجزای سامانه	اطلاعات مورد استفاده در SimaPro
پنل خورشیدی	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {GLO} market for APOS, U
توربین بادی	Wind turbine, 2 MW, onshore {GLO} market for APOS, U
باتری	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO} market for APOS, U
مبدل	Inverter, 500kW {GLO} market for APOS, U
الکترو لایزر	Titanium {GLO} market for titanium APOS, U Aluminium, primary, ingot {RoW} market for APOS, U Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U Copper {GLO} market for APOS, U Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, U Activated carbon, granular {GLO} market for activated carbon, granular APOS, U Platinum {GLO} market for APOS, U



شکل ۲. مرز سامانه تولید الکتریسیته توسط سامانه هیبریدی (الف) سناریو اول (ب) سناریو دوم، سوم و چهارم (پ) سناریو پنجم



سناریوهای وقوع خاموشی‌ها

در این پژوهش برای طراحی سناریوهای مختلف، میزان کمبود ظرفیت الکتریسیته (برق تأمین نشده توسط شبکه) از اداره برق منطقه مورد مطالعه اخذ شد و سناریوهای مختلف قطع الکتریسیته طراحی شد و در نهایت ۵ سناریو که شباهت زیادی به وضعیت وقوع خاموشی‌ها در ایران دارد به شرح ذیل تعریف گردید:

(الف) در سناریوی اول (S1)؛ که به عنوان سناریو پایه شناخته می‌شود، الکتریسیته مصرفی صرفاً از طریق شبکه سراسری الکتریسیته تأمین می‌گردد و برنامه خاموشی واقعی لحاظ می‌شود.

(ب) در دومین سناریو (S2)؛ خاموشی‌ها بدون برنامه زمانی مشخص و تحت تأثیر الزامات فوری رخ می‌دهد که نشان‌دهنده وضعیت واقعی خاموشی در شهر نجف‌آباد است و جبران خاموشی‌ها و تأمین آنها با استفاده از پنل خورشیدی و توربین بادی است.

(ج) در سناریوی سوم (S3)؛ قطع الکتریسیته در ساعات‌های دارای تابش خورشیدی مناسب برنامه‌ریزی شده است (معمولاً بین ساعت ۱۰:۰۰ صبح تا ۱۵:۰۰ بعدازظهر) و تأمین الکتریسیته و جبران خاموشی‌ها با استفاده از پنل خورشیدی و توربین بادی است.

(د) در سناریوی چهارم (S4)؛ خاموشی عمدتاً در اوج مصرف الکتریسیته، معمولاً بین ساعت ۱۷:۰۰ تا ۱۹:۰۰ رخ می‌دهد و برای جبران خاموشی و تأمین الکتریسیته از پنل خورشیدی و توربین بادی استفاده می‌شود.

(و) در سناریوی پنجم (S5)؛ خاموشی‌ها مشابه سناریوی دوم اتفاق می‌افتد، اما جبران خاموشی و تأمین الکتریسیته تنها از طریق پنل خورشیدی و بدون دخالت توربین‌های بادی صورت می‌پذیرد.

یافته‌های پژوهش

در این بخش نتایج آنالیز سامانه هیبریدی پایدار به لحاظ اقتصادی، فنی و محیط‌زیستی و تحت ۵ سناریوی مختلف در شهر نجف‌آباد، ارائه خواهد شد:

نتایج بهینه‌سازی

در جدول شماره ۳، مشخصات فنی توربین بادی، پنل خورشیدی، الکترولایزر، مبدل، باتری و شبکه سراسری به عنوان ورودی و الکتریسیته تولیدی به عنوان خروجی برای هر سناریو ارائه شده است. خلاصه‌ای از نتایج بهینه‌سازی در جدول ۴ ارائه شده است. میزان بهینه بودن هر سناریو با مقایسه فاکتور هزینه انرژی امکان‌پذیر می‌باشد. هدف در این قسمت انتخاب سناریو بهینه با کمترین هزینه انرژی می‌باشد. سناریو اول در این مطالعه به عنوان سناریو پایه در نظر گرفته شد و مقایسه سایر سناریوها با این سناریو صورت پذیرفت. در این سناریو، تأمین الکتریسیته موردنیاز صرفاً از طریق شبکه سراسری الکتریسیته صورت می‌پذیرد و قطعاً هنگام مواجه شدن با کمبود الکتریسیته، خاموشی اتفاق می‌افتد. هزینه انرژی برای سناریوهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۰/۰۷۱۲، ۰/۰۸۳۹، ۰/۰۷۵۹، ۰/۰۹۶۶ و ۰/۰۷۷۷ دلار بر کیلووات‌ساعت گزارش شده است. سناریو اول به علت ارزان بودن سوخت در ایران و عدم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر کمترین میزان هزینه انرژی را به خود اختصاص داده است ولی به علت بروز خاموشی‌های متعدد و عدم قابلیت اطمینان در فرآیند تأمین نمی‌توان آن را به عنوان سناریو بهینه انتخاب کرد. بنابراین سناریو بهینه از سایر سناریوها که کمترین میزان هزینه انرژی را به خود اختصاص داده است و بتواند خاموشی‌ها را پوشش دهد انتخاب گردید. در مقایسه‌ای که بین ۴ سناریو باقیمانده صورت گرفت سناریو سوم کمترین میزان هزینه انرژی را به خود اختصاص داده است. این سناریو برای رسیدن به این هدف از ۳۴ عدد توربین بادی، ۴۹۸۴۴ کیلووات پنل خورشیدی، ۵۰۰۰ کیلووات الکترولایزر، ۲۹۲۶۸ کیلووات مبدل، ۳۴۵۰۰ کیلووات ساعت باتری و ۱۱۶۵۴۱/۵ مگاوات‌ساعت بر سال شبکه سراسری بهره گرفته است (جدول شماره ۳). بنابراین سناریو شماره ۳، با کمترین میزان هزینه انرژی، سهم مناسب انرژی‌های تجدیدپذیر در کل سامانه هیبریدی و کاهش ظرفیت بانک باتری نسبت به سایر سناریوها، پایدارترین سناریو برای تولید توان در نظر گرفته شد.

براساس مطالعه حسن و همکاران (۲۰۲۳) سیستم هیبریدی پنل خورشیدی/باتری/شبکه برای یک مجتمع مسکونی COE را تا ۵۳ درصد، NPC را تا ۲۶ درصد و هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۴ درصد کاهش داد. همچنین انتشار کل ۳۱ درصد کاهش یافت.

درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر در پنج سناریو به ترتیب صفر، ۴۵/۸٪، ۴۵/۵٪، ۴۹/۴٪ و ۳۴٪ گزارش گردید. بیشترین درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر مربوط به سناریو چهارم به علت بیشترین بهره‌گیری از توربین بادی برای جبران خاموشی‌ها می‌باشد. در سناریوی اول که صرفاً از شبکه برای تولید برق بهره گرفته شده است، درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر صفر و وابستگی به شبکه ۱۰۰ درصد می‌باشد.

باشد.

هزینه سرمایه اولیه برای پنج سناریو به ترتیب صفر، ۱۱۶، ۹۸/۲، ۱۶۱ و ۸۱ میلیون دلار محاسبه شده است. هزینه سناریو اول صفر فرض شده است. سناریو سوم و پنجم کمترین میزان هزینه سرمایه اولیه را دارند. بنابراین اعمال خاموشی در دوره‌های زمانی که پتانسیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر است منجر به هزینه‌های اولیه کمتری برای دولت خواهد شد. دلیل اصلی این رفتار را می‌توان در جدول سیاهه مشاهده کرد. بر این اساس، این نحوه اعمال خاموشی نه تنها منجر به کاهش ظرفیت نصب انرژی‌های تجدیدپذیر برای جبران خاموشی‌ها می‌گردد، بلکه به ظرفیت بانک باتری بسیار کمتری نسبت به دو سناریو دیگر نیاز دارد. این امر ناشی از آن است که اگر دولت تصمیم به اعمال خاموشی مطابق سناریو چهارم در زمان‌های اوج بار داشته باشد، جبران خاموشی‌ها نیاز به استفاده از ظرفیت‌های بالاتر توربین‌های بادی، باتری‌ها و مبدل‌ها دارد که منجر به افزایش ۳۵ درصدی هزینه انرژی می‌گردد.

در تحقیقی که توسط Ahmadi et al., (2023) برای بررسی تکنیکی، اقتصادی و محیط‌زیستی سیستم‌های مبتنی بر شبکه و بدون شبکه که در جزیره دور افتاده‌ای در ویتنام انجام شد نشان داد که هزینه انرژی در سیستم‌های هیبریدی دارای شبکه که دارای سطح مناسبی از پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی هستند نسبت به سیستم‌های هیبریدی بدون شبکه است بسیار پائین‌تر است (حدوداً ۰/۱ دلار بر کیلووات‌ساعت). میزان انتشارات محیط‌زیستی سیستم‌های هیبریدی دارای شبکه حدوداً ۴۵۰ درصد کمتر از انتشارات سیستم‌های بدون شبکه بود. در ادامه در جدول ۴ الکتریسیته مازاد در پنج سناریو به ترتیب صفر، ۷/۷۲٪، ۷/۶۸٪، ۱۱٪ و ۴/۵٪ گزارش شده است. بیشترین الکتریسیته مازاد تولیدی مربوط به سناریو چهارم است. الکتریسیته مازاد تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر بوسیله الکتروولایزر می‌تواند به هیدروژن تبدیل گردد.

جدول ۳. سیاهه‌برداری چرخه زندگی سامانه هیبریدی مورد استفاده تحت سناریوهای مختلف

عامل‌ها	واحد	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم	سناریو پنجم
(الف) ورودی‌ها						
توربین بادی	تعداد	۰	۳۲	۳۴	۶۱	۰
پنل خورشیدی	kW	۰	۵۲۰۹۳	۴۹۸۴۴	۳۹۸۶۸	۵۶۶۷۸
الکتروولایزر	kW	۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰
مبدل	kW	۰	۴۵۶۱۲	۲۹۲۶۸	۷۵۲۴۲	۳۳۶۵۸
باتری	kWh	۰	۸۱۴۰۰	۳۴۵۰۰	۱۷۲۹۰۰	۴۱۹۰۰
شبکه سراسری	MWh/year	۲۱۵۵۸۴	۱۱۵۱۸۱/۲	۱۱۶۵۴۱/۵	۱۰۷۵۲۱/۷	۱۴۰۹۲۷/۷
(ب) خروجی						
الکتریسیته	MWh/year	۲۱۵۵۸۴	۲۱۲۷۰/۴	۲۴۶۵۲۶/۸	۲۵۷۸۶۵/۵	۲۳۵۷۰۱/۳

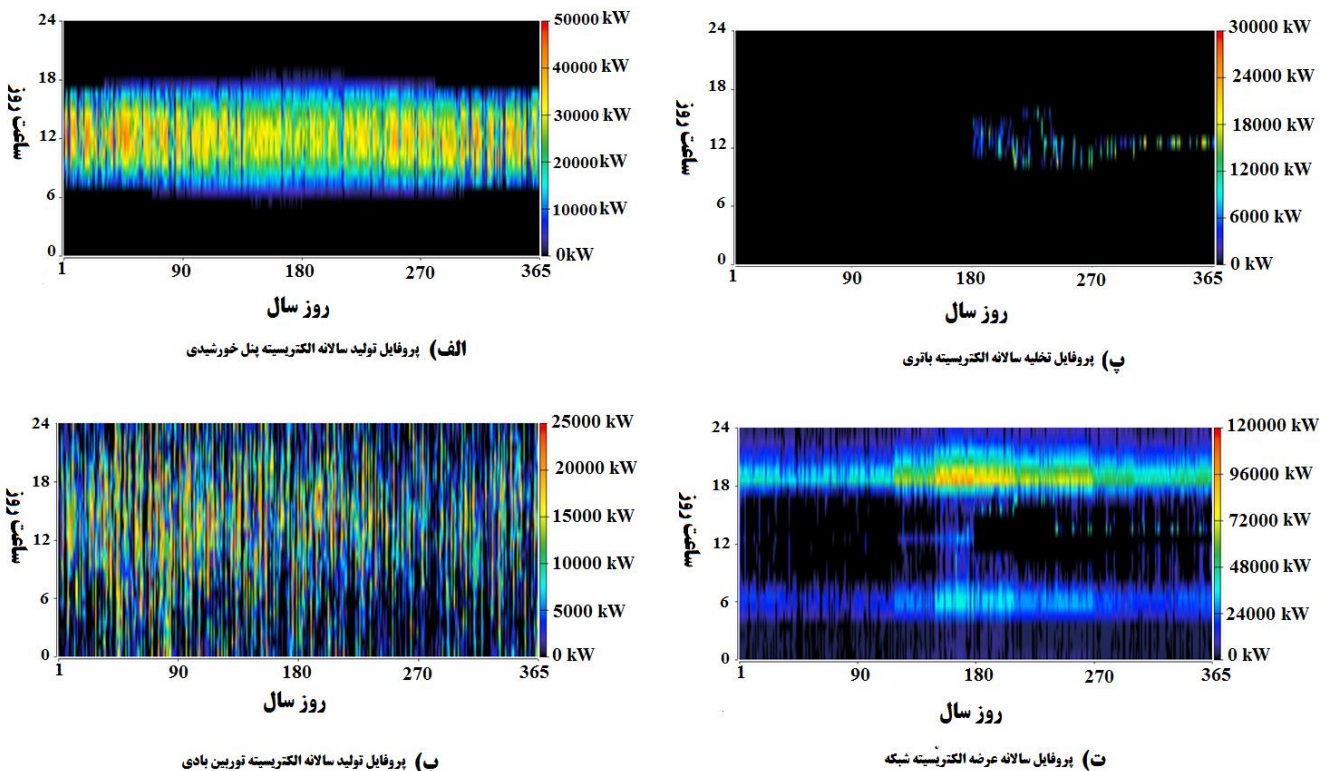
جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سامانه هیبریدی برای هر سناریو

آیتم‌ها	واحد	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم	سناریو پنجم
درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر	٪	۰	۴۵/۸	۴۵/۵	۴۹/۴	۳۴
سرمایه اولیه	میلیون دلار	۰	۱۱۶	۹۸/۲	۱۶۱	۸۱
هزینه انرژی	دلار/کیلووات‌ساعت	۰/۰۷۱۲	۰/۰۸۳۹	۰/۰۷۵۹	۰/۰۹۶۶	۰/۰۷۷۷
مازاد الکتریسیته	٪	۰	۷/۷۲	۷/۶۸	۱۱	۴/۵

عملکرد فنی سناریو بهینه

در شکل شماره ۳ توان تولیدی اجزای مختلف سامانه هیبریدی سناریو بهینه (سناریو شماره ۳) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، تولید الکتریسیته تجدیدپذیر توسط پنل خورشیدی و توربین بادی بین ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۶:۰۰ (قسمت الف) و (ب)) منجر به کاهش خرید الکتریسیته از شبکه (قسمت ت)) شد. بانک باتری که همواره بر ضرورت آنها در افزایش قابلیت اطمینان سامانه هیبریدی تأکید می‌گردد، تنها در شرایطی تخلیه می‌شود که شبکه در دسترس نباشد و منابع تجدیدپذیر نتوانند کل تقاضا را برآورده کنند (قسمت پ)). این نتایج نشان‌دهنده تأمین کارآمد الکتریسیته در ساعات قطعی توسط منابع تجدیدپذیر است، که منجر به استفاده مطمئن‌تر از شبکه در ساعات اوج مصرف از طریق مدیریت دقیق کمبود ظرفیت اولیه می‌شود. بنابراین هرکجا پروفایل تولید منابع تجدیدپذیر بر زمانهای وقوع

خاموشی منطبق تر باشد در نهایت RF بیشتر می شود که به معنای کاهش وابستگی به شبکه است.



شکل ۳. پروفایل تولید سالانه الکتریسیته اجزای مختلف سامانه هیبریدی در سناریو بهینه (سناریو شماره ۳).

نتایج محیط زیستی

در جدول ۵ و شکل ۴ اثرات محیط زیستی تولید هر کیلووات ساعت الکتریسیته تحت رده های اثر میانی برای پنج سناریو مورد بحث ارائه شده است. همان گونه که در قسمت بالا ذکر شد، در این مطالعه "گرمایش جهانی" بین بازه ۰/۷۲-۰/۲۳ کیلوگرم دی اکسیدکربن به ازای تولید هر کیلووات الکتریسیته برای سناریوهای مختلف متغیر است. در سناریو اول (سناریو پایه) که الکتریسیته مورد نیاز صرفاً از طریق شبکه سراسری الکتریسیته تأمین می شود به این دلیل که از هیچ انرژی تجدیدپذیری برای تولید الکتریسیته استفاده نمی شود و صرفاً از سوخت های فسیلی بهره گرفته شده است، بیشترین میزان اثر گرمایش جهانی را در میان سایر سناریوها به خود اختصاص داده است. سناریو دوم با کاهش ۵۲ درصدی، سناریو سوم با کاهش ۵۸ درصدی، سناریو چهارم با کاهش ۷۰ درصدی و سناریو پنجم با کاهش ۴۳ درصدی گرمایش جهانی نسبت به سناریو اول نشان از توانمندی این سناریوها در استفاده از منابع تجدیدپذیر در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای دارد. در مطالعه ای که توسط Smith et al., (2015) در تایلند انجام گردید چندین روش برق رسانی مورد مقایسه قرار گرفت و در نهایت نتایج نشان داد که کمترین میزان اثر گرمایش جهانی مربوط به استفاده از سامانه هیبریدی شامل دیزل/پنل خورشیدی/توربین بادی می باشد.

اثرات "تخریب لایه ازن" بر سلامت انسان ناشی از افزایش اشعه فرابنفش خورشیدی به سطح زمین است. اشعه فرابنفش ناشی از تابش خورشیدی دارای اثرات مضر زیادی بر سلامت انسان از ناحیه پوست و چشم می باشد (Solomon, 2008). سناریو اول به میزان $10 \times 3/14$ کیلوگرم تریکلوروفلورومتان معادل به ازای یک کیلووات ساعت الکتریسیته تولیدی به تخریب لایه ازن استراتوسفر منجر می شود و سناریو چهارم با کاهش حدوداً ۷۰ درصد نسبت به سناریو اول به حفظ لایه ازن و کاهش اثرات مخرب آن کمک می نماید. سناریوهای دوم، سوم و پنجم کاهش ۵۱٪، ۵۷٪ و ۴۱٪ اثر تخریب لایه ازن نسبت به سناریو اول داشتند.

همچنین، در رابطه با رده "تابش یونیزه کننده" سناریو اول به میزان $10^{-2} \times 2/2$ kBq Co-60 معادل به ازای تولید هر کیلووات ساعت الکتریسیته ایجاد می نماید. سناریوهای دوم، سوم، چهارم و پنجم با کاهش ۴۱٪، ۶۶٪، ۵۷٪ و ۵۱٪ در مقایسه با سناریو اول به کاهش

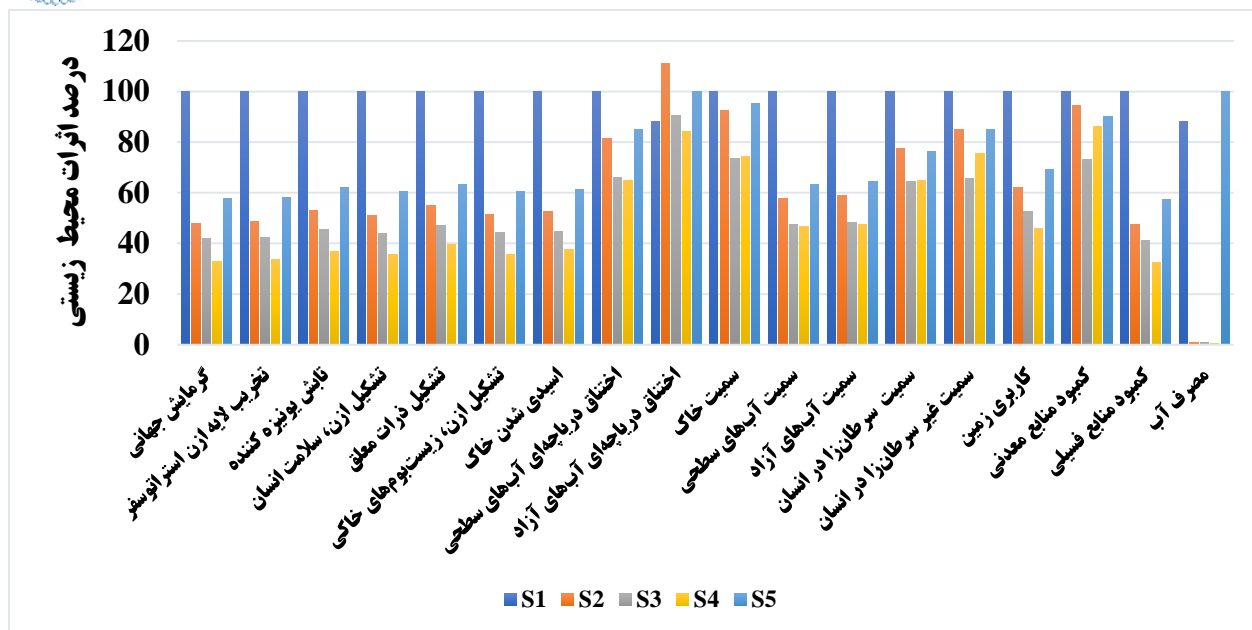
تابش یونیزه کننده کمک می کند. علت این امر این است که در سناریو اول تولید الکتريسيته صرفاً از طريق سوزاندن سوخت های فسیلی بوده و احتراق سوخت دیزل سبب تولید گرما و انتشار آلاینده ها شده و سبب تخریب لایه ازن می شود و به واسطه آن تابش هایی با قابلیت یونیزاسیون بیشتری به سطح زمین می رسد؛ بنابراین بیشترین میزان تابش یونیزه کننده را نسبت به سایر سناریو هایی که از منابع تجدید پذیر استفاده نموده اند به خود اختصاص داده است. در تحقیقی به ارزیابی اثرات محیط زیستی تولید الکتريسيته در طول چرخه زندگی نیروگاه های بادی کهک و آکند پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت دیزل در مرحله نصب و حمل و نقل در نیروگاه های مورد مطالعه بالاترین میزان شاخص تابش یونیزه را به همراه دارد (نوروزی پور و همکاران، ۱۴۰۲).

در رده "تشکیل ازن، سلامت انسان"، سناریو چهارم با کاهش ۶۵ درصدی در اثرات منفی آن بر سلامت انسان نسبت به سناریو اول تأثیر گذارتر است. علاوه بر این، سناریو چهارم در دسته "تشکیل ذرات معلق" باعث کاهش ۶۱ درصدی در تولید ذرات معلق می شود، که نشان از تأثیر مثبت آن در بهبود کیفیت هوا می باشد. همچنین، در رده "تشکیل ازن، زیست بوم های خاکی"، سناریو چهارم با کاهش ۶۵ درصدی در تأثیرات منفی بر زیست بوم های خاکی نسبت به سناریو اول اثر گذارتر است. در "اسیدی شدن خاک"، سناریو چهارم باعث کاهش ۶۳ درصدی در اسیدی شدن خاک می شود و در مقایسه با سناریو اول، نشان از ارزش افزوده این روش در بهبود کیفیت خاک دارد. همچنین، در "اختناق دریاچه های آب های سطحی" و "اختناق دریاچه های آب های آزاد"، سناریو چهارم با کاهش ۳۶ درصدی و ۴ درصدی به بهبود کیفیت آب کمک می کند. سمیت خاک اشاره به تأثیر مواد سمی منتشر شده از مصرف نهاده ها به زیست بوم های خاکی است. در این مطالعه مقادیر حاصل برای رده "مسمومیت خاک" برای سناریو های مورد بررسی در بازه ۱-۱/۳۶-۱/۴ DCB kg متغیر است. سناریو اول با افزایش ۳۰ درصدی میزان مسمومیت خاک نسبت به سناریو چهارم بیشترین تأثیر منفی را در محیط زیست خاکی اعمال نموده است.

در ادامه، در رده های "سمیت آب های سطحی" و "سمیت آب های آزاد" نیز سناریو چهارم با کاهش ۵۳ درصدی در سمیت آب به بهبود کیفیت آب کمک می کند. در رده های سمیت سرطانزا سناریو سوم و چهارم با کاهش ۳۵ درصدی و در رده سمیت غیر سرطانزا سناریو سوم کاهش ۳۵ درصدی نسبت به سناریو پایه داشته است.

جدول ۵. اثرات محیط زیستی تولید هر کیلووات ساعت الکتريسيته بر اساس رده های اثر میانی

سناریو پنجم	سناریو چهارم	سناریو سوم	سناریو دوم	سناریو اول	واحد	رده اثر
۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۳	۰/۳۴	۰/۷۲	kg CO ₂ eq	گرمایش جهانی
۱/۸۳ × ۱۰ ^{-۷}	۱/۰۵ × ۱۰ ^{-۷}	۱/۳۳ × ۱۰ ^{-۷}	۱/۵۳ × ۱۰ ^{-۷}	۳/۱۴ × ۱۰ ^{-۷}	kg CFC11eq	تخریب لایه ازن استراتوسفر
۱/۴ × ۱۰ ^{-۲}	۸/۳۵ × ۱۰ ^{-۲}	۱ × ۱۰ ^{-۲}	۱/۱۹ × ۱۰ ^{-۲}	۲/۲ × ۱۰ ^{-۲}	kBq Co-60 eq	تابش یونیزه کننده
۵/۹۱ × ۱۰ ^{-۴}	۳/۴۹ × ۱۰ ^{-۴}	۴/۳۲ × ۱۰ ^{-۴}	۵ × ۱۰ ^{-۴}	۹/۷۸ × ۱۰ ^{-۴}	kg NO _x eq	تشکیل ازن، سلامت انسان
۳/۲۳ × ۱۰ ^{-۴}	۲/۰۱ × ۱۰ ^{-۴}	۲/۳۸ × ۱۰ ^{-۴}	۲/۸ × ۱۰ ^{-۴}	۵/۰۹ × ۱۰ ^{-۴}	kg PM2.5eq	تشکیل ذرات معلق
۶/۱ × ۱۰ ^{-۴}	۳/۶ × ۱۰ ^{-۴}	۴/۴۶ × ۱۰ ^{-۴}	۵/۱۷ × ۱۰ ^{-۴}	۱۰ × ۱۰ ^{-۴}	kg NO _x eq	تشکیل ازن، زیست بوم های خاکی
۸/۸۶ × ۱۰ ^{-۴}	۵/۴۶ × ۱۰ ^{-۴}	۶/۴۸ × ۱۰ ^{-۴}	۷/۶ × ۱۰ ^{-۴}	۱۴/۴۵ × ۱۰ ^{-۴}	kg SO ₂ eq	اسیدی شدن خاک
۳/۷۹ × ۱۰ ^{-۵}	۲/۸۹ × ۱۰ ^{-۵}	۲/۹۴ × ۱۰ ^{-۵}	۳/۶۴ × ۱۰ ^{-۵}	۴/۴۶ × ۱۰ ^{-۵}	kg P eq	اختناق دریاچه های آب های سطحی
۳/۰۹ × ۱۰ ^{-۶}	۲/۲۹ × ۱۰ ^{-۶}	۲/۴۶ × ۱۰ ^{-۶}	۳/۰۲ × ۱۰ ^{-۶}	۲/۷۲ × ۱۰ ^{-۶}	kg N eq	اختناق دریاچه های آب های آزاد
۱/۳	۱/۰۱	۱	۱/۲۶	۱/۳۶	kg 1,4 DCB	سمیت خاک
۲/۰۷ × ۱۰ ^{-۲}	۱/۵۲ × ۱۰ ^{-۲}	۱	۱/۸ × ۱۰ ^{-۲}	۳ × ۱۰ ^{-۲}	kg 1,4 DCB	سمیت آب های سطحی
۲/۶ × ۱۰ ^{-۲}	۱/۹۲ × ۱۰ ^{-۲}	۱/۵۴ × ۱۰ ^{-۲}	۲/۳ × ۱۰ ^{-۲}	۴ × ۱۰ ^{-۲}	kg 1,4 DCB	سمیت آب های آزاد
۶/۹ × ۱۰ ^{-۳}	۵/۸۴ × ۱۰ ^{-۳}	۱/۹۵ × ۱۰ ^{-۳}	۶/۹۹ × ۱۰ ^{-۳}	۹ × ۱۰ ^{-۳}	kg 1,4 DCB	سمیت سرطانزا در انسان
۱/۵۵ × ۱۰ ^{-۱}	۱/۳۷ × ۱۰ ^{-۱}	۵/۸۱ × ۱۰ ^{-۲}	۱/۵۵ × ۱۰ ^{-۱}	۱/۸۲ × ۱۰ ^{-۱}	kg 1,4 DCB	سمیت غیر سرطانزا در انسان
۳/۱۷ × ۱۰ ^{-۳}	۲/۱ × ۱۰ ^{-۳}	۱/۱۹ × ۱۰ ^{-۱}	۲/۸۵ × ۱۰ ^{-۳}	۴/۵۸ × ۱۰ ^{-۳}	m ² a crop eq	کاربری زمین
۵/۵۵ × ۱۰ ^{-۳}	۵/۳ × ۱۰ ^{-۴}	۲/۴ × ۱۰ ^{-۳}	۵/۸۱ × ۱۰ ^{-۴}	۶/۱۴ × ۱۰ ^{-۳}	kg Cu eq	کمبود منابع معدنی
۰/۱۴۵	۰/۰۸۲	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۲۵۳	kg oil eq	کمبود منابع فسیلی
۱/۳۹ × ۱۰ ^{-۳}	۹/۰۱ × ۱۰ ^{-۴}	۱	۱/۳ × ۱۰ ^{-۳}	۱/۳۳ × ۱۰ ^{-۳}	m ³	مصرف آب



شکل ۴. اثرات محیط زیستی تولید الکتریسیته در سناریوهای مختلف بر اساس رده های اثر میانی

نتایج رده های آسیب محیط زیستی بر اساس خسارت پایانی برای پنج سناریو در تولید الکتریسیته در جدول شماره ۶ نشان داده شده است. در رده "سلامت انسان" سال های از کارافتادگی (سال های زندگی از دست رفته) یا سال های زندگی غیرفعال ناشی از مداخلات محیط زیستی بیان می شود. نتایج نشان داد که بالاترین آسیب به سطح سلامت انسان در تولید الکتریسیته مربوط به سناریو پنجم است که مقدار آن $6 \times 10^{-7} / 53$ دالی است. رده کیفیت زیست بوم، آسیب به زیست بومها توسط گونه های حذف شده در یک دوره زمانی از پیش تعیین شده در نتیجه حرکت به خشکی یا آب شیرین و سامانه های دریایی را در نظر می گیرد. در رده کیفیت زیست بوم بیشترین سطح مربوط به سناریو چهارم به میزان $9 \times 10^{-10} / 0.1$ species/yr است. رده آسیب به منابع به عنوان زیان اقتصادی توسط افزایش هزینه های استخراج منابع محاسبه می شود. از آنجائی که دسته اثرات محیط زیستی آسیب به منابع، تحت تأثیر دو عامل مهم مصرف انرژی های تجدیدناپذیر و استخراج مواد معدنی است و در این رده بیشترین سطح مربوط به سناریو اول به میزان $9 \times 10^{-2} / 4$ USD2013 به دلیل بیشترین استفاده از سوخت های فسیلی جهت تولید الکتریسیته است. در مطالعه ای که توسط Kiehadrouinezhad et al., (2022) بین سه سیستم هیبریدی انجام شد نتایج نشان داد که سیستم هیبریدی پنل خورشیدی/توربین بادی/دیزل ژنراتور/باتری به علت مصرف گازوئیل منجر به بیشترین آسیب به سطح سلامت انسان به میزان $2/27$ دالی و بیشترین آسیب به اکوسیستم در رده کیفیت زیست بوم به میزان $9 \times 10^{-10} / 0.1$ species/yr می شود.

بر اساس نتایج، مقادیر کل آلاینده های محیط زیستی در پنج سناریوی مورد مطالعه به ترتیب $38/23$ ، $29/14$ ، $20/17$ ، $36/38$ ، $16/17$ ، $29/14$ و $38/23$ (mPt kWh⁻¹) محاسبه شد. در شکل ۵ به مقایسه اثرات محیط زیستی شاخص های نهایی وزن دهی شده در سناریوهای مختلف پرداخته شده است. همانگونه که مشخص است سناریوی چهارم به لحاظ محیط زیستی، پایدارتر است. در این سناریو، خاموشی ها در پیک مصرف (ساعت ۱۷:۰۰ الی ۱۹:۰۰) اتفاق می افتد و جریان خاموشی ها با استفاده از پنل خورشیدی و توربین بادی صورت می گیرد. همانگونه که از جدول شماره ۳ مشخص است، تعداد توربین بادی که در این سناریو استفاده شده است از سایر سناریوها بیشتر است و نشان می دهد که پتانسیل منابع انرژی بادی منطقه در این ساعات برای تولید الکتریسیته مناسب است و می توان خاموشی را با بهره گیری از انرژی بادی و کمترین اثر محیط زیستی نسبت به سایر سناریوها جبران نمود. تحقیقی توسط Wang et al., (2019) در جزیره ای در هنگ کنگ برای بررسی نتایج محیط زیستی سه روش تولید الکتریسیته انجام گردید. نتایج نشان داد که اثرات محیط زیستی در استفاده از سامانه هیبریدی شامل پنل خورشیدی/توربین بادی/باتری ۸۵ درصد کمتر از استفاده از دیزل ژنراتورها و شبکه سراسری است.

Mayer et al., (2020) یک سیستم هیبریدی تجدیدپذیر شامل پنل خورشیدی/توربین بادی/باتری را برای تأمین الکتریسیته یک منزل مسکونی با به حداقل رساندن هزینه انرژی و انتشار دی اکسید کربن را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که در مورد سیستم های متصل به شبکه پنل های خورشیدی بهترین فناوری برای کاهش اثرات محیط زیستی است؛ ولی سیستم های بدون شبکه بهتر است برای

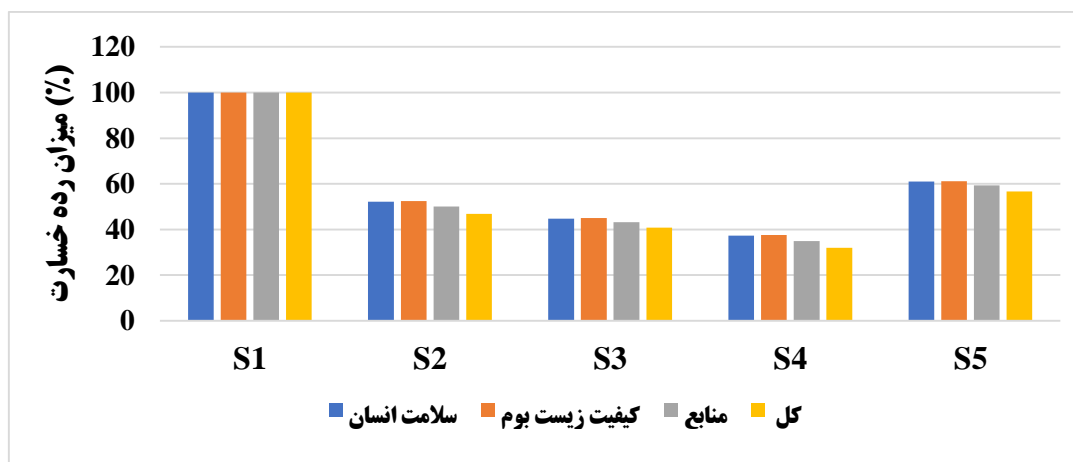
داشتن بیشترین سود از ترکیب متعادلی از منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر بهره بگیرند.

همچنین در تحقیقی که توسط Jims et al., (2023) انجام گردید به بررسی نتایج اقتصادی و محیط‌زیستی اندازه‌های مختلف یک سیستم هیبریدی مبتنی بر پنل خورشیدی/توربین بادی/باتری/دیزل پرداختند. نتایج آنها نشان داد استفاده از سیستم هیبریدی برای دست یافتن به کمترین اثرات محیط‌زیستی ۶۰ درصد هزینه را افزایش و همچنین سیستم با کمترین هزینه اقتصادی اثرات محیط‌زیستی را ۶۵ درصد افزایش می‌دهد.

به‌طورکلی این تحلیل نشان می‌دهد که سناریوی چهارم علی‌رغم داشتن کمترین میزان اثرات مخرب محیط‌زیستی، هزینه انرژی بالاتری نسبت به سایر سناریوها دارد و انتخاب بهترین سناریو وابسته به نظر سیاست‌گذار که هزینه انرژی را مدنظر قرار دهد و یا اثرات محیط‌زیستی را اولویت قرار دهد متغیر است. در واقع اگر نظر سیاست‌گذار این باشد که سامانه بهینه باید از نظر هزینه انرژی حداقل باشد سناریو اول سامانه بهتری برای تولید الکتریسیته است؛ ولی در این سناریو خاموشی قطعاً اتفاق می‌افتد و به لحاظ محیط‌زیستی هم سامانه مناسبی نمی‌باشد و در صورتی که شرایطی مدنظر باشد که از نظر محیط‌زیستی پایدار و همچنین بتواند خاموشی را جبران نماید، سناریو چهارم به‌عنوان سناریو بهینه انتخاب خواهد شد.

جدول ۶. اثرات محیط‌زیستی تولید هر کیلووات ساعت الکتریسیته بر اساس رده‌های خسارت پایانی

سناریو پنجم	سناریو چهارم	سناریو سوم	سناریو دوم	سناریو اول	واحد	رده خسارت
$6/53 \times 10^{-7}$	$4/01 \times 10^{-7}$	$4/8 \times 10^{-7}$	$5/61 \times 10^{-7}$	$1/07 \times 10^{-6}$	DALY	سلامت انسان
$1/53 \times 10^{-9}$	$9/01 \times 10^{-10}$	$1/12 \times 10^{-9}$	$1/29 \times 10^{-9}$	$2/58 \times 10^{-9}$	species/yr	کیفیت زیست‌بوم
$5/32 \times 10^{-2}$	3×10^{-2}	$3/83 \times 10^{-2}$	$4/39 \times 10^{-2}$	$9/4 \times 10^{-2}$	USD2013	منابع

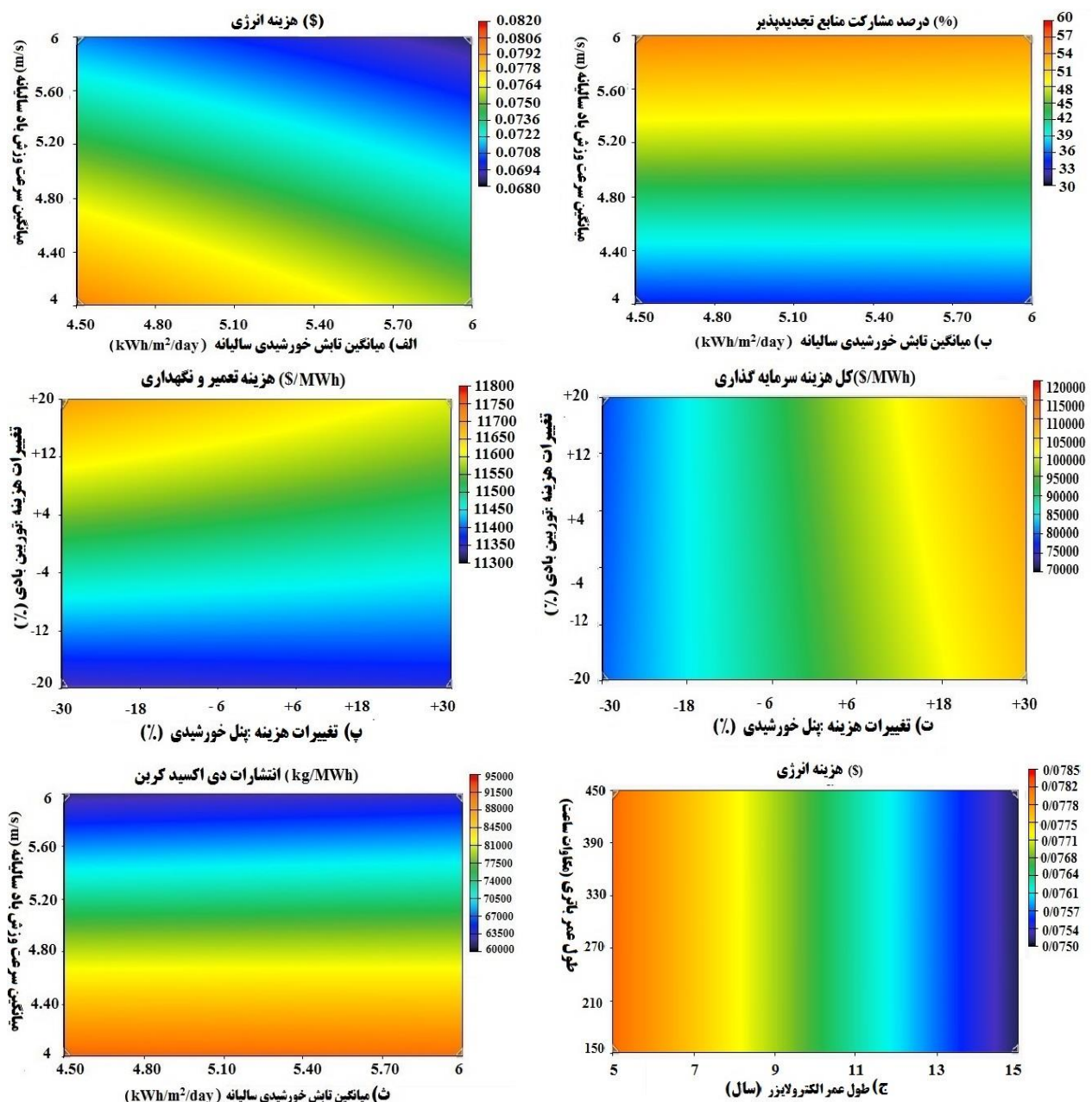


شکل ۵. مقایسه اثرات محیط‌زیستی شاخص‌های نهایی وزندهی شده در سناریوهای مختلف

تحلیل حساسیت

آنالیز حساسیت برای تجزیه و تحلیل متغیرهایی که تأثیر بیشتری بر روی سامانه دارند استفاده می‌شود. در این مطالعه آنالیز حساسیت در پنج حالت مورد بررسی قرار گرفت. حالت اول (شکل ۶ الف)) آنالیز حساسیت هزینه انرژی و حالت دوم (شکل ۶ ب)) آنالیز حساسیت درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر را تحت دو عامل میانگین تابش خورشیدی و میانگین سرعت باد را برای سامانه بهینه بررسی می‌کند. همان‌گونه که از شکل ۶ الف) مشاهده می‌گردد تغییرات هر دو عامل میزان تابش خورشیدی و سرعت باد هزینه انرژی را در بازه ۰/۰۶۸-۰/۰۸۲ دلار بر کیلووات‌ساعت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با این وجود، با تغییر ۱۰ درصدی در میانگین پتانسیل سالانه منابع تجدیدپذیر می‌توان به یک وضعیت نسبتاً پایدار از نظر هزینه انرژی در سامانه هیبریدی (از ۰/۰۷۲ تا ۰/۰۷۷ دلار در کیلووات‌ساعت) دست یافت. براساس شکل ۶ ب) باتوجه به پتانسیل تابش خورشیدی بالا در منطقه، تغییرات در بازه ۴/۵ الی ۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع بر روز به طور قابل توجهی بر فاکتور درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر تأثیر نمی‌گذارد. با این حال، افزایش میانگین سرعت باد سالانه از ۵ متر بر ثانیه تا ۶ متر بر ثانیه می‌تواند درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر را از ۴۵ درصد به تقریباً ۶۰ درصد افزایش دهد. بنابراین، انتخاب مکان دقیق برای سامانه‌های توربین بادی در منطقه مورد مطالعه بسیار مهم است، در حالی که پنل‌ها را می‌توان در سراسر منطقه از جمله پشت بام منازل نیز نصب کرد.

حالت سوم (شکل ۶ پ)) آنالیز حساسیت هزینه تعمیر و نگهداری و حالت چهارم (شکل ۶ ت)) آنالیز حساسیت هزینه سرمایه‌گذاری را تحت دو عامل تغییرات هزینه پنل خورشیدی و تغییرات هزینه توربین بادی و در نهایت حالت پنجم (شکل ۶ ث)) آنالیز حساسیت عملکرد محیط‌زیستی را تحت دو عامل میانگین تابش خورشیدی و میانگین سرعت باد برای سامانه بهینه بررسی می‌کند. براساس شکل ۶ پ)) تغییرات هزینه پنل خورشیدی تأثیر زیادی را بر هزینه تعمیر و نگهداری می‌گذارد. تغییرات هزینه پنل خورشیدی در بازه ۳۰-۱۸ درصد بر هزینه سرمایه‌گذاری تأثیر قابل توجهی گذاشته است (شکل ۶ پ)). دلیل این دو موضوع بیشتر بودن ظرفیت نصب پنل و در عین حال بالاتر بودن هزینه تعمیر و نگهداری توربین بادی است. همانگونه که از شکل ۶ ث)) مشاهده می‌شود که تغییر تابش روی انتشار دی‌اکسید کربن تأثیر زیادی نگذاشته است؛ چرا که به دلیل پتانسیل خوب تابش منطقه حتی در کمترین حالت تابش پنل قادر است که توان زیادی تولید کند، ولی به علت کم بودن متوسط کل سرعت باد منطقه افزایش سرعت باد سالیانه تأثیر زیادی در کاهش اثرات محیط‌زیستی به علت افزایش زیاد تولید توان توربین دارد. در نهایت شکل ۶ ج)) آنالیز حساسیت هزینه انرژی را تحت دو عامل طول عمر الکترولایزر و طول عمر باتری برای سامانه بهینه بررسی می‌کند.



شکل ۶. تجزیه و تحلیل حساسیت هزینه انرژی - درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر - هزینه تعمیر و نگهداری - هزینه سرمایه‌گذاری و عملکرد محیط‌زیستی

نتیجه گیری و پیشنهادها

در این مقاله، تحلیل فنی - اقتصادی و محیط‌زیستی یک سیستم انرژی هیبریدی برای جبران خاموشی برق در مناطق مسکونی در مقیاس بزرگ انجام شد. الکتريسيته مازاد توليدي انرژی‌های تجدیدپذیر توسط الکترولايزر برای تولید هیدروژن استفاده می‌شود، نتایج کلیدی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

اگر دولت قطع الکتريسيته را در ساعات‌های دارای تابش خورشیدی مناسب برنامه‌ریزی نماید (سناریو سوم) و تأمین الکتريسيته و جبران خاموشی‌ها با استفاده از پنل خورشیدی و توربین بادی صورت پذیرد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای جبران خاموشی‌ها حتی از زمان قطع برق در زمان پیک مصرف مقرون‌به‌صرفه‌تر خواهد بود.

در سناریو بهینه هزینه انرژی ۰/۰۷۵۹ دلار بر کیلووات‌ساعت - درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر ۴۵/۴٪ - هزینه سرمایه اولیه ۹۸/۲ میلیون دلار و مازاد الکتريسيته ۷/۶۸٪ گزارش گردید. که برای دستیابی به این هدف از ۳۴ عدد توربین بادی، ۴۹۸۴۴ کیلووات پنل خورشیدی، ۵۰۰۰ کیلووات الکترولايزر، ۲۹۲۶۸ کیلووات مبدل، ۳۴۵۰۰ کیلووات ساعت باتری و ۱۱۶۵۴۱/۵ مگاوات‌ساعت بر سال شبکه سراسری بهره گرفته است.

بیشترین درصد مشارکت منابع تجدیدپذیر مربوط به سناریو چهارم (۴۹/۴٪) به علت بیشترین بهره‌گیری از توربین بادی برای جبران خاموشی‌ها می‌باشد.

سناریو دوم با کاهش ۵۲ درصدی، سناریو سوم با کاهش ۵۸ درصدی، سناریو چهارم با کاهش ۷۰ درصدی و سناریو پنجم با کاهش ۴۳ درصدی گرمایش جهانی نسبت به سناریو اول نشان از توانمندی این سناریوها در استفاده از منابع تجدیدپذیر در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد.

مقادیر کل آلاینده‌های محیط‌زیستی در پنج سناریوی مورد مطالعه به ترتیب ۳۸/۳۶، ۱۶، ۱۷/۲۰، ۱۴/۲۹ و ۲۳/۳۸ (mPt kWh⁻¹) محاسبه شد. همان‌گونه که مشخص است سناریوی چهارم به لحاظ محیط‌زیستی، پایدارتر است.

پیشنهاد می‌شود سیاست‌های تشویقی نظیر تصویب تعرفه‌های مناسب خرید برق تجدیدپذیر یا ارائه تسهیلات مناسب در جهت کاهش هزینه‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر از طرف دولت اعمال گردد.

برای مطالعات آتی، توصیه می‌شود توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی با مدل‌ها و ظرفیت‌های متفاوت مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد و میزان انتشارات با کاهش یا افزایش ظرفیت مقایسه گردد. همچنین استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر با رویکرد مشابه، انجام تصمیم‌گیری چندمعیاره بر خروجی‌ها، استفاده از سایر منابع تجدیدپذیر در دسترس مانند بایوگاز ژنراتورها در سیستم هیبریدی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

خواجه رضائی، مهدی؛ یوسفی، غلامرضا؛ لطیفی، محمدمبین و شایسته، ابراهیم (۱۳۹۹). محاسبه هزینه قطع برق و نحوه بهینه تخصیص خاموشی به مشترکین. *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، ۱۸ (۳)، ۱۶۹-۱۷۷.

نوروزی پور، ماریه؛ طباطبایی کلور، رضا و متولی، علی (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید الکتريسيته در نیروگاه بادی (مطالعه موردی: کهک قزوین و آقکند میانه). *نشریه ماشینهای کشاورزی*، ۱۳ (۴)، ۴۲۲-۴۰۵.

REFERENCES

- Abdin, Z., & M'erida, W. (2019). Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: a techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 196, 1068-1079. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.068>.
- Ahmadi, M M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Le, QD., Tran, T Kh., Ikhwanuddin, M., Lam., Sh., Truong, Ph., Wanxi, P., Hong Quan, N., Aghbashlo, M., & Tabatabaei, M. (2021). A multi-approach framework for developing feasible, viable, and sustainable hybrid energy systems in remote areas: The case of Con Dao island in Vietnam. *Energy Conversion and Management*, 426, 139072. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114418>.
- Akhari, M. R., & Baneshi, M. (2019). Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable co-supply of electricity, heat and hydrogen system to enhance performance by recovering excess electricity for a large energy consumer. *Energy Conversion and Management*, 188, 131-141.
- Al-falahi, M.D., Jayasinghe, S.D., & Enshaei, H. (2017). A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system, *Energy Conversion and Management*,



- 143, 252–274, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.019>.
- Ali, F., Ahmar, M., Jiang, Y., & Al Ahmad, M. (2020). A techno-economic assessment of hybrid energy system in rural Pakistan. *Energy*, 215, 119103. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119103>.
- Asrari, A., Ghasemi, A., & Javidi, M.H. (2012). Economic evaluation of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Iran—a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 123–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.052>.
- Assaker, G., & O'Connor, P. (2021). eWOM platforms in moderating the relationships between political and terrorism risk, destination image, and travel intent: The case of Lebanon. *Journal of Travel Research*, 60(3), 503–519. <https://doi.org/10.1177/0047287520922317>.
- Ayodele, T.R., Ogunjuyigbe, A.S.O., & Akinola, O.A. (2017). n-split generator model: An approach to reducing fuel consumption, LCC, CO₂ emission and dump energy in a captive power environment. *Sustainable Production and Consumption*, 12, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.07.006>.
- Aziz, A.S., Tajuddin, M.F.N., Adzman, M.R., Azmi, A., Ramli, M.A.M. (2019). Optimization and sensitivity analysis of standalone hybrid energy systems for rural electrification: A case study of Iraq. *Renewable Energy*, 138, 775–792. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.004>.
- Baseer, M. A., Alqahtani, A., Rehman, S. (2019). Techno-economic design and evaluation of hybrid energy systems for residential communities: Case study of Jubail industrial city. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117806, 2019/11/10/ 2019.
- Belmili, H., Haddadi, M., Bacha, S., Almi, M.F., & Bendib, B. (2014). Sizing stand-alone photovoltaic-wind hybrid system: Techno-economic analysis and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30(2), 821–832. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.011>.
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*. Springer, Pages 249-274, 527-563.
- Brandoni, C., Bošnjaković, B., (2017). HOMER analysis of the water and renewable energy nexus for water-stressed urban areas in Sub-Saharan Africa. *Journal of Cleaner Production*, 155, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.114>.
- Come Zebra, E.I., Windt, H.J., Nhumaio, G., & Faaij, A.P.C. (2021). A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111036. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111036>.
- Duman, A.C., & Güler, Ö. (2018). Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustainable Cities and Society*, 42, 107-126. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.029>.
- Erdinc, O., & Uzunoglu, M. (2012). Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1412–1425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.011>.
- Ghenai, C., Salameh, T., & Merabet, A. (2020). Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(20), 11460–11470. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.110>.
- Han, X., Lv, F., Li, J., Zeng, F. (2024). Flexible interactive control method for multi-scenario sharing of hybrid pumped storage-wind photovoltaic power generation. *Journal of Energy Storage*. 100, 113590. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113590>.
- Haratian, M., Tabibi, P., Sadeghi, M., Vaseghi, B., Poustdouz, A. (2018). A renewable energy solution for stand-alone power generation: A case study of KhshU Site-Iran. *Renewable Energy*, 125, 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.078>.
- Hasan, S., Zeyad, M., Ahmed, S.M.M., Anubhove, M.S.T. (2023). Optimization and planning of <sc>renewable energy sources</sc> based microgrid for a residential complex. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. Energy 42. <https://doi.org/10.1002/ep.14124>
- Jahangir, M.H., Fakouriyan, S., Vaziri Rad, M.A., Dehghan, H. (2020). Feasibility study of on/off grid large-scale PV/WT/WEC hybrid energy system in coastal cities: A case-based research. *Renewable Energy*, 162, 2075–2095. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.131>.
- Kennedy, N., Miao, C., Wu, Q., Wang, Y., Ji, J., & Roskilly, T. (2017). Optimal hybrid power system using renewables and hydrogen for an isolated island in the UK. *Energy Procedia*, 105, 1388–1393. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.517>.
- Khajerezaei, M., Yousefi, Gh., Latify, Shayesteh, E. (2020). Calculating the cost of power outages and how to optimally allocate outages to subscribers. *Iranian Journal Of Electrical and Computer*

- Engineering*, 18(3), 169-177. <https://sid.ir/paper/392610/fa>. (In Persian).
- Kiehadrouinezhad, M., Merabet, A., Al-Durra, A., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Wright, M., El-Saadany, E., (2022). Towards a sustainable environment and carbon neutrality: Optimal sizing of standalone, green, reliable, and affordable water-power cogeneration systems. *Science of The Total Environment*, 912, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168668>.
- Kiehadrouinezhad, M., Merabet, A., Rajabipour, A., Cada, M., Kiehadrouinezhad, Sh., Khanali, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., (2024). Optimization of wind/solar energy microgrid by division algorithm considering human health and environmental impacts for power-water cogeneration. *Energy Conversion and Management*, 252, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115064>.
- Krishan, O., & Suhag, S. (2020). Grid-independent PV system hybridization with fuel cell-battery/supercapacitor: optimum sizing and comparative techno-economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100625. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100625>.
- Malheiro, A., Castro, PM., Lima, RM., & Estanqueiro, A. (2015). Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems. *Renewable Energy*, 83, 646-57.
- Mayer, M.J., Szil'agyi, A., Gr'of, G. (2020). Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Applied Energy*, 269, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115058>.
- Nagapurkar, P., Smith, J.D., (2019). Techno-economic optimization and environmental Life Cycle Assessment (LCA) of microgrids located in the US using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*, 181, 272-291, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.072>.
- Nowroozipour, M., Tabatabaei koloor, R., Motevali, A. (2023). Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh). *Journal of Agricultural Machinery*. 13(4),405-422. <https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102>. (In Persian).
- Olabi, AG., Ghoniem, RM., Alami, AH., & Abdelkareem, MA. (2023). Optimal Sizing and Management of Hybrid Renewable Energy System for DC-Powered Commercial Building. *Buildings*, 13,2109. <https://doi.org/10.3390/buildings13082109>.
- Sackey, D.M., Amoah, M., B. Jehuri, A., Owusu-Manu, D., Acapkovi, A. (2023). Techno-economic analysis of a microgrid design for a commercial health facility in Ghana- Case study of Zipline Sefwi-Wiawso. *Scientific African*. 19, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01552>.
- Smith, C., Burrows, J., Scheier, E., Young, A., Smith, J., Young, T., & Gheewala, Sh. (2015). Comparative Life Cycle Assessment of a Thai Island's diesel/PV/wind hybrid microgrid. *Renewable Energy*, 80, 85-100. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.003>.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., & Averyt, K. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC WG1 Fourth Assessment Report.
- Tamjid Shabestari, S., Kasaeian, A., Vaziri Rad, M. A., Forootan Fard, H., Yan, W. M., & Pourfayaz, F. (2022). Techno-financial evaluation of a hybrid renewable solution for supplying the predicted power outages by machine learning methods in rural areas. *Renewable Energy*, 194, 1303-1325. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.160>.
- Toopshekan, A., Ahmadi, E., Abedian, A., Vaziri Rad, M.A., (2024). Techno-economic analysis, optimization, and dispatch strategy development for renewable energy systems equipped with Internet of Things technology. *Energy*, 296, 131176. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131176>.
- Vaziri Rad, M.A., Forootan Fard, H., Khazanedari, K., Toopshekan, A., Ourang, S., Khanali, M., Gorjian, S., Fereidooni, L., Kasaeian, A. (2024). A global framework for maximizing sustainable development indexes in agri-photovoltaic-based renewable systems: Integrating DEMATEL, ANP, and MCDM methods. *Applied Energy*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122715>.
- Wang, R., Lam, C. M., Hsu, S. C., & Chen, J. H. (2019). Life cycle assessment and energy payback time of a standalone hybrid renewable energy commercial microgrid: a case study of Town Island in Hong Kong. *Applied Energy*, 250, 760-775. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.183>.



پیوست ۱- داده‌های تکنیکی - اقتصادی تجهیزات موجود در سیستم هیبریدی

توربین بادی (WT) (Haratian et al., 2018)	
VESTAS V47 with 3 blades	مدل
۶۶۰ kW	ظرفیت مازول
۴ m/s	سرعت شروع به حرکت توربین جهت تولید توان
۲۵ m/s	سرعت نامی
۲۰ years	طول عمر عملیاتی
۳ % Capital	هزینه تعمیر و نگهداری
۱۲۰۰ \$/kW	هزینه سرمایه گذاری
پنل خورشیدی (PV) (Jahangir et al., 2020)	
Flat-plate Monocrystalline	مدل
۳۵۰ W	ظرفیت مازول
۱۸/۱ %	راندمان
۴۷ °C	دمای اسمی سلول
-۰/۴ %/°C	ضریب تاثیر دما بر توان خروجی پنل
۲۰ years	طول عمر عملیاتی
۱ % Capital	هزینه تعمیر و نگهداری
۱۰۰۰ \$/kW	هزینه اولیه
۶/۷ m ² /kW	مساحت پنل
الکتروولایزر (Aziz et al., 2019)	
Polymer Exchange Membrane (PEM)	مدل
۱۵۰۰۰۰۰ kW	محدوده ظرفیت مازول
۵۰ kWh/kg _{H2}	مصرف ویژه الکتریسیته
۸۵%	بازده
۱۰ years	طول عمر عملیاتی
۵% capital	هزینه تعمیر و نگهداری
۱۰۰۰ \$/kW	هزینه سرمایه گذاری
دستگاه مبدل (Vaziri Rad et al., 2024)	
Generic-conventional	مدل
۱ kW	ظرفیت اسمی
۹۵ %	متوسط راندمان مبدل
۹۵ %	راندمان مبدل و یکسو کننده
۱۵ years	طول عمر عملیاتی
۱ % Capital	هزینه تعمیر و نگهداری
۲۰۰ kW	هزینه سرمایه گذاری
باتری (Brandoni and Bošnjaković, 2017)	
Model Lithium-ion (Li-Ion)	مدل
۱۰۰ kWh	ظرفیت مازول (هر واحد)
۹۰ %	بازدهی چرخه شارژی باتری
۲۰ %	حداقل شارژ
۳۰۰۰۰ kWh	توان عملیاتی
15 years	عمر مفید باتری
۱۶۷ A	حداکثر شارژ
۱ % Capital	هزینه تعمیر و نگهداری
۳۰۰۰ \$/unit (100 kWh Li-ion)	هزینه سرمایه گذاری
شبکه و منابع تجدیدپذیر (Toopshekan et al., 2024)	
۰/۰۸	تعرفه شبکه در پیک
۰/۰۷	تعرفه شبکه در میان باری
۰/۰۶	تعرفه شبکه در غیر پیک
۳۰ % of P _{PV}	ذخیره عملیاتی منابع خورشیدی
۲۰ % of P _{WT}	ذخیره عملیاتی منابع بادی
۲۰ years	طول عمر ایستگاه انرژی