

Karafan

Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University

Spring 2024, Vol. 21, No. 1, p. 203-235

Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en

doi:10.48301/KSSA.2024.417983.2717

TVU

Modeling and Optimization of Hybrid Energy Systems Using Techno-economic and Environmental Characteristics

Seyyed Amirreza Abdollahi[1*], Mahmoud Ahrari[2], Mahdi Ghazizadeh-Ahsaee[3]

[1]Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

[2,3]Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 09.28.2023
Revised: 01.08.2024
Accepted: 02.18.2024

Keyword:
Renewable Energy
Hybrid Energy System
Multi-objective Optimization
Multi-criteria Decision Analysis
Sustainable Development

***Corresponding Author:**
Seyyed Amirreza Abdollahi
Email:
s.amirreza.abdollahi1401@ms.tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

The development of energy technologies with high efficiency, reliability and free from environmental contaminants is of great importance for sustainable development. The main goal of this research was the multi-objective techno-economic-environmental optimization of hybrid renewable energy systems providing electrical and thermal loads for a large energy-consuming complex. The objective functions are the loss of power supply probability (technical index), net present cost (economic index) and life cycle emissions (environmental index), and hybrid energy system (HES) includes photovoltaic, wind turbine, grid electricity, fuel cell, electrolyzer, hydrogen tank, battery and inverter whose capacities are the design variables. To carry out the research, different configurations of the HES were modelled and simulated in HOMER software, and then by developing a program in MATLAB software, non-dominated designs were found among the simulated configurations. The final system was then found among the set of multi-objective optimal designs with the help of the TOPSIS multi-criteria decision-making method combined with the entropy weight method. A total of 700 optimal multi-objective systems including 592 on-grid and 108 off-grid systems were found with 45 different configurations. The set of Pareto designs included a wide range of techno-economic and environmental indicators, so the range (average) of the net present cost, loss of power supply probability and life-cycle emissions were 17.2-43.8 (27.5) M$, 0-10 (4.4)% and 196.6-358.6 (272.2) kton, respectively. It was observed that the selected HES with a technical efficiency equal to that of the conventional energy system had 13.8% less life-cycle emissions for an increase in net present cost of 22.3%.

©2024 the authors. Published by National University of Skills, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The harmful environmental effects of excessive consumption of fossil fuels such as air pollution and global warming are not hidden from anyone. Due to this issue, the use of clean energies such as solar, wind, geothermal and hydropower for energy supply has been the focus of many researchers in recent years. The main drawback of renewable technologies is their excessive dependence on environmental conditions. A suitable approach to overcome this issue is combining these resources with conventional fossil fuels. In this way, the advantages of one of these energy sources can be used to balance the weaknesses of others.

A great deal of research has been conducted on hybrid energy systems (HESs), and the general results indicate that the use of this technology leads to the improvement of the overall efficiency of the system. Determining the capacity and optimal configuration of technologies in such a way that the microgrid can provide the electrical and thermal loads continuously at the lowest cost in line with sustainable development is the main challenge of designing HESs. In previous research, the optimization of distributed energy systems was often single-objective (economic optimization) and in cases where multi-objective analysis was performed, different and complex configurations of the system were not considered, or the selection of objective functions was such that only techno-economic or economic-environmental optimizations were included.

In this regard, the aim of this research was the multi-objective optimization of techno-economic-environmental aspects of a HES consisting of photovoltaic, wind turbine, fuel cell (with electrolyzer and hydrogen tank), battery, inverter and grid electricity. Another important innovation of this research was to perform a life cycle assessment for evaluating the environmental consequences of installing a hybrid renewable energy system, while previous research has mainly considered the direct emission of carbon dioxide as an environmental index in their multi-objective optimization study. In addition, the application of multi-criteria decision-making methods to find the final design of the micro-grid among the non-dominant solutions has rarely been investigated in previous articles.

Methodology

Multi-objective optimization is carried out using three objective functions, namely loss of power supply probability (LPSPS), net present cost (NPC) and life cycle emission (LCE), which respectively represent important techno-economic and environmental indicators of a hybrid energy system. The energy units of the system include photovoltaic (PV), wind turbine (WT), fuel cell (FC), electrolyzer, hydrogen tank (Htank), battery, inverter, boiler and grid electricity. To achieve the goals of the research, the various configurations of the mentioned components were modeled and simulated in the HOMER software, and by developing the multi-objective optimization algorithm in the MATLAB software, the set of optimal multi-objective solutions was determined from the simulated energy systems. Finally, the final design was found among the non-dominated solutions using a multi-criteria decision-making method (TOPSIS).

Results and discussion

Statistical parameters of techno-economic and environmental indicators of optimal multi-objective HSEs are presented in Table 1. The difference between the minimum and maximum net present cost in the Pareto solutions is a significant amount of $26.5 million, which indicates the importance of proposed methods to select the final system for on-site installation among the non-dominated solutions.

Table 1. Statistical parameters for the objective functions in the Pareto set.

Objective function	Mean	STD	Min	Max	Range
Net present cost (M$)	27.5	7.5	17.2	43.8	26.5
Loss of power supply probability (%)	4.4	3.2	0	10	10
Life cycle emission	272.2	43.7	196.6	358.6	162.0

The Pareto surface of multi-objective optimal designs is illustrated in Figure 1. As shown, five configurations with the maximum number of members in the Pareto set are specifically identified in this graph. It is clear from this graph that by reducing the NPC of the design, the optimal solutions tend towards higher LPSP and LCE regions. The lower cost and higher emissions of the grid-connected designs relative to off-grid configurations for a given technical efficiency are evident. Moreover, off-grid scenarios at the Pareto set do not offer a safe technical efficiency, so their average LPSP is over 5%.

Conclusion

A summary of the research results is presented below:

- Approximately 85% of optimal multi-objective designs were grid-connected.
- The average capacity of PV, WT, maximum available grid power, FC, electrolyzer, Htank, battery and inverter at the Pareto surface were 5961.2 kW, 209.3 kW, 1486.9 kW (35.5%), 285.0 kW, 424.3 kW, 259.6 kg, 11171.9 kWh and 1786.8 kW, respectively.
- The range (average) of the NPC, LPSP and LCE of multi-objective optimal solutions were 17.2-43.8 (27.5) M$, 0-10 (4.4)% and 196.6-358.6 (272.2) kton, respectively.
- The selected final design comprised 6666.7 kW PV, 80% grid power and 4190.7 kW inverter with NPC, LPSP and LCE of 21.3 M$, 0% and 292.5 kton, respectively.
- The selected optimal techno-economic and environmental design had 49.5 kton (13.8%) less LCE than the conventional energy system.

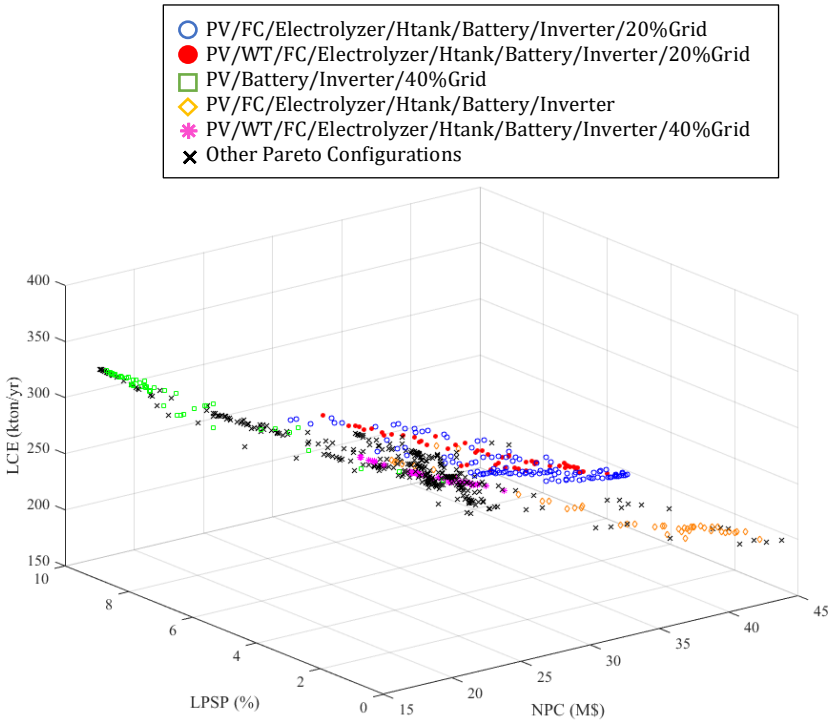


Figure 1. The Pareto surface of technical (LPSP), economic (NPC) and environmental (LCE) objectives obtained from multi-objective optimization.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
بهار ۱۴۰۳، دوره ۲۱، شماره ۱، ۲۳۵-۲۰۳
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2024.417983.2717



مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی هیبریدی با استفاده از شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی

سید امیررضا عبداللهی[1*]، محمود احراری[2]، مهدی قاضی‌زاده احسائی[3]

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲و۳- گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

کلید واژگان:
انرژی تجدیدپذیر
سیستم انرژی هیبریدی
بهینه‌سازی چندهدفه
تحلیل تصمیم‌گیری چندشاخصه
توسعهٔ پایدار

***نویسنده مسئول:** سید امیررضا عبداللهی
پست الکترونیکی:
s.amirreza.abdollahi1401@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده

توسعهٔ فناوری‌های انرژی دارای بازدهی بالا، مطمئن و فاقد آلاینده‌های زیست‌محیطی از اهمیت زیادی در راستای توسعهٔ پایدار برخوردار است. هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی چند هدفه فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی برای تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی یک مجموعه مصرف‌کننده بزرگ انرژی است. توابع هدف در نظر گرفته شده، احتمال عدم تأمین برق (شاخص فنی)، هزینهٔ خالص فعلی (شاخص اقتصادی) و انتشار چرخهٔ عمر (شاخص زیست‌محیطی) هستند و واحدهای سیستم انرژی هیبریدی شامل فتوولتائیک، توربین بادی، برق شبکه، پیل سوختی، الکترولایزر، مخزن هیدروژن، باتری و اینورتر بوده که ظرفیت آنها متغیرهای تصمیم‌گیری پروژه است. برای انجام پژوهش، پیکربندی‌های مختلف سیستم انرژی هیبریدی در نرم‌افزار HOMER مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده و با توسعهٔ برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB، طراحی‌های نامغلوب از میان پیکربندی‌های شبیه‌سازی شده پیدا می‌شود. سپس، سیستم نهایی از میان مجموعهٔ طراحی‌های بهینه چندهدفه با کمک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS ترکیب‌شده با روش وزنی انتروپی پیدا می‌شود. در مجموع، تعداد ۷۰۰ سیستم بهینه چندهدفه شامل ۵۹۲ سیستم متصل به شبکه و ۱۰۸ سیستم مستقل از شبکه با ۴۵ پیکربندی مختلف پیدا شد. مجموعهٔ طراحی‌های پارتو دربرگیرنده طیف وسیعی از شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی بودند؛ به‌طوری‌که محدوده (متوسط) هزینه خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخه عمر آنها به ترتیب ۴۳/۸-۱۷/۲ (۲۷/۵) میلیون دلار، ۱۰-۰ (۴/۴) درصد و ۳۵۸/۶-۱۹۶/۶ (۲۷۲/۲) کیلوتن بود. مشاهده شد که سیستم انرژی هیبریدی منتخب با دارا بودن بازدهی فنی در حد سامانهٔ تأمین انرژی مرسوم، ۱۳٪/۸ انتشار چرخهٔ عمر کمتری داشته ولی هزینهٔ خالص فعلی آن ۲۲/۳٪ بیشتر است.

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

©2024 the authors. Published by National University of Skills, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

پیش‌گفتار

مصرف انرژی در جهان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در حال افزایش است. برای نمونه، مصرف نهایی برق در جهان با متوسط رشد سالیانه ۴ درصدی، از مقدار ۱۴۱۵۸/۶ تراوات‌ساعت در ابتدای قرن حاضر به ۲۵۰۲۷/۳ تراوات‌ساعت در سال ۲۰۱۹ رسیده است. این موضوع منجر به افزایش روزافزون تولید انرژی شده است. آمار آژانس بین‌المللی انرژی[1] نشان می‌دهد که اگرچه کماکان منبع اصلی تولید انرژی در جهان، انواع سوخت‌های فسیلی نظیر زغال‌سنگ، گاز طبیعی و نفت است، ولی روند کلی استفاده از این منابع در تأمین انرژی جهانی کاهشی بوده است. این در حالی است که سهم منابع تجدیدپذیر و کم‌کربن در تولید انرژی جهانی افزایش قابل‌توجهی داشته است؛ برای نمونه، سهم فناوری‌های تجدیدپذیر در تولید برق از ۱۷/۱٪ در سال ۲۰۱۰ به ۲۳/۲٪ در سال ۲۰۱۹ رسیده است. این موضوع نشان از توجه ویژه بسیاری از کشورها به توسعهٔ پایدار دارد. هرچند برای کشور ایران در سال ۲۰۱۹، سهم فناوری‌های تجدیدپذیر در تولید برق کشور فقط حدود ۵٪ بوده است [۱].

پیامدهای مخرب زیست‌محیطی (آلودگی هوا و گرمایش جهانی) ناشی از مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی بر هیچ‌کس پوشیده نیست [۲; ۳]. با توجه به این موضوع و محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی، در سالیان اخیر به‌کارگیری انرژی‌های پاک نظیر خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی و برق‌آبی برای تأمین انرژی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۴-۶]. کشور ایران، علاوه بر دارا بودن ذخایر وسیع نفت و گاز، از منابع فراوان انرژی تجدیدپذیر نیز بهره‌مند است. برای نمونه، ظرفیت نامی انرژی بادی در ایران چیزی حدود ۶۰ هزار مگاوات تخمین زده می‌شود که پتانسیل تولید ۱۸ هزار مگاوات برق را دارد [۷]. همچنین با توجه به قرارگیری ایران بر روی کمربند خورشیدی، اغلب شهرهای کشور دارای حداقل ۳۰۰ روز آفتابی در سال هستند، به‌گونه‌ای که متوسط تابش خورشیدی روزانه کشور، مقدار قابل‌توجه ۵/۵ کیلوات‌ساعت بر مترمربع است [۸]. بر این اساس، گزارش می‌شود که در فقط ۱٪ از مساحت کشور، می‌توان بالغ بر ۹ میلیون مگاوات‌ساعت برق در یک روز به کمک سیستم‌های خورشیدی (دارای بازدهی ۱۰ درصدی) تولید کرد؛ این در حالی است که متوسط کل انرژی روزانه مورد نیاز کشور ۸/۷ میلیون مگاوات ساعت است [۹].

منابع انرژی تجدیدپذیر که در نواحی مختلف جغرافیایی در دسترس هستند، می‌توانند جایگزین مناسب سوخت‌های فسیلی برای تأمین نیازهای بشر در نظر گرفته شوند. اما مشکل اصلی فناوری‌های تجدیدپذیر، وابستگی بیش از حد آنها به شرایط محیطی است. یک رویکرد مناسب برای فائق آمدن بر این مسئله، ترکیب این منابع با سوخت‌های مرسوم فسیلی است. به این طریق می‌توان با بهره‌گیری از مزیت‌های یکی از این منابع انرژی برای متعادل نمودن ضعف‌های دیگری استفاده نمود. ویژگی اصلی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی، استفاده از چندین منبع انرژی (فناوری) مختلف برای تأمین نیازهای انرژی است؛ به‌طوری‌که حداقل یکی از این منابع، از نوع تجدیدپذیر باشد. هدف از به‌کارگیری چنین سیستمی، به‌حداقل‌رساندن مصرف سوخت‌های فسیلی است؛ به این طریق که فقط در زمان‌هایی که فناوری‌های تجدیدپذیر قادر به تأمین انرژی موردنیاز نیستند، از سوخت‌های فسیلی استفاده شود. قابل ذکر است که باتوجه به افزایش بازدهی و روند کاهشی قیمت فناوری‌های تجدیدپذیر به دلیل پیشرفت‌های اخیر و حمایت‌های دولتی، به‌کارگیری سیستم‌های هیبریدی در شرایطی خاص می‌تواند برای سرمایه‌گذاران از لحاظ اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه باشد [۱۰].

[1] International energy agency

مرور ادبیات پژوهش

با توجه به وابستگی فناوری‌های تجدیدپذیر به شرایط محیطی، پتانسیل سیستم‌های هیبریدی متشکل از آرایه‌های فتوولتائیک و توربین بادی در اقلیم‌های مختلف برای تأمین انواع الگوهای مصرف انرژی در مقیاس‌های کوچک و بزرگ در مقالات پیشین به وفور بررسی شده است [۱۱-۱۳]. اگرچه این سیستم‌های هیبریدی ساده بسیار زیست‌دوست هستند، برای برقرار کردن عملکرد فنی مورد انتظار می‌بایست اندازه‌های بسیار بزرگی داشته باشند که این امر می‌تواند منجر به اتلاف قابل‌توجه انرژی در شرایط کم‌باری شود. برای حل این مشکل، می‌توان از باتری‌ها برای ذخیره انرژی اضافی استفاده کرد که از طرفی خود منجر به افزایش هزینه‌های اولیه شده و در عمل، اغلب فاقد جذابیت اقتصادی برای سرمایه‌گذاران هستند [۱۴]. راهکار دیگر، اتصال سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی به شبکه برق سراسری یا افزودن یک منبع انرژی وابسته به سوخت‌های فسیلی به ریزشبکه است. واضح است که این نوع طراحی، اگرچه جذابیت فنی-اقتصادی دارد ولی از طرفی منجر به کاهش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی می‌شود [۱۵].

تحقیقات زیادی برای تحلیل سیستم‌های هیبریدی انجام شده که نتایج کلی حاکی از آن است که کاربرد این فناوری منجر به بهبود بازدهی کلی سیستم شده و تا حد زیادی مشکلات سیستم‌های انرژی مرسوم را برطرف می‌کند. برای نمونه، لائو[1] و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید انرژی هیبریدی فتوولتائیک-دیزل را در کشور مالزی ارزیابی کردند. ایشان گزارش کردند که این سیستم، هزینه تولید انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با یک ژنراتور دیزلی مستقل کاهش می‌دهد. فاضل پور و همکاران [۱۷] با استفاده از نرم‌افزار HOMER به مقایسه سیستم‌های هیبریدی متشکل از فناوری‌های تجدیدپذیر توربین بادی و پنل‌های فتوولتائیک، منبع انرژی غیرتجدیدپذیر دیزلی و همچنین باتری برای یک هتل واقع در کیش با انرژی مورد نیاز سالیانه بالغ بر ۲/۵ گیگاوات‌ساعت پرداختند. آن‌ها بیان کردند که برای مورد مطالعه، یک سیستم هیبریدی باد-دیزل-باتری انتخاب بهتری نسبت به سیستم‌های فتوولتائیک-دیزل-باتری و فتوولتائیک-باد-دیزل-باتری است. به‌طور خاص، سیستم بهینه در این تحقیق شامل یک ژنراتور دیزلی ۶۰۰ کیلوواتی، پنج توربین بادی ۲۰ کیلوواتی و ۳۵ باتری می‌شد که به موجب آن هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت انرژی ۰/۳۱۸ دلار تخمین زده شد.

رومرو رودریگز[2] و همکاران [۱۸] به بررسی فنی تأمین نیازهای برق، آب گرم مصرفی، گرمایش و سرمایش یک ساختمان مسکونی در اسپانیا با استفاده از یک سیستم هیبریدی مولد هم‌زمان حرارت و برق[3] (CHP) متشکل از کلکتور حرارت‌گیر خورشیدی، پنل‌های فتوولتائیک و موتور احتراق داخلی پرداختند. ایشان گزارش کردند که برای افزایش جذابیت اقتصادی سیستم‌های انرژی هیبریدی برای سرمایه‌گذاران، لازم است علاوه بر طراحی بهینه این سیستم‌ها، مشوق‌های مناسب‌تری نیز از طرف دولت در نظر گرفته شود.

در مطالعهٔ دیگری، استفاده از یک سیستم هیبریدی متشکل از زیست توده-فتوولتائیک-دیزل برای تأمین نیازهای انرژی یکی از روستاهای متصل به شبکهٔ نواحی شرقی ایران بررسی شد [۱۹]. با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی کشور در سال‌های اخیر، گزارش شد که سیستم بهینه هیبریدی متشکل از ۱۰ کیلووات ژنراتور بیوگاز، ۶۳ کیلووات فتوولتائیک و ۱۵ کیلووات ژنراتور دیزلی است. همچنین در یک تحلیل حساسیت نشان داده شد، هزینهٔ تولید انرژی در سیستم بهینه می‌تواند از ۰/۰۸۵ تا ۰/۲۳۸ دلار بر کیلووات‌ساعت با توجه به پارامترهای اقتصادی تغییر کند. در تحقیق مشابه جدیدتری، از سیستم هیبریدی زیست توده-باد-فتوولتائیک به همراه یک ژنراتور دیزلی و باتری سرب اسیدی[4] برای امکان‌سنجی فنی تأمین انرژی یک روستای غیرمتصل به شبکه در هند استفاده شد [۲۰]. در این تحقیق، هزینهٔ

[1] Lau
[2] Romero Rodríguez
[3] Combined heat and power (CHP)
[4] Lead acid

تولید انرژی و هزینهٔ خالص فعلی[1] سیستم هیبریدی به ترتیب ۰/۱۱۴ دلار بر کیلووات و ۸/۶ میلیون دلار برآورد شد. در مقالات اخیر، بیشترین توجه بر روی موضوعاتی نظیر بررسی ترکیب فناوری‌های تجدیدپذیر با سایر واحدهای مرسوم تولید انرژی، بهینه‌سازی چندهدفه اندازه اجزای سیستم با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف و نیز مدیریت بهینه انرژی بین اجزای سیستم هیبریدی بوده است [۲۱].

استفاده از بویلر برای تأمین نیازهای گرمایشی در ریزشبکه‌ها علاوه بر اثرات مخرب زیست‌محیطی، هزینهٔ خالص فعلی پروژه را نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد؛ به‌طوری‌که در مواردی هزینهٔ خرید سوخت از هزینه‌های ساخت و نگهداری ریزشبکه نیز بیشتر می‌شود. سیستم‌های انرژی هیبریدی دارای قابلیت تولید ترکیبی برق و حرارت (CHP) راهکاری بهینه برای حل این معضل شمرده می‌شوند. ژنراتور دیزلی، میکروتوربین گازی و پیل سوختی از انواع رایج محرک‌های اصلی[2] در سیستم‌های CHP هستند که در ظرفیت‌های مختلف تجاری‌سازی شده‌اند [۲۲]. محرک‌های اصلی از نظر فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی متفاوت هستند [۲۳]. به دلیل این خصوصیات متفاوت، در مقالاتی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای یافتن سایز بهینه فناوری‌های تجدیدپذیر در ترکیب با محرک‌های اصلی استفاده شده است.

در مرجع [۲۴] به بهینه‌سازی اندازهٔ یک سیستم تأمین انرژی پیچیده شامل فتوولتائیک/حرارت خورشیدی/پمپ حرارتی/چیلر جذبی/بویلر/موتور احتراق داخلی/میکروتوربین گازی برای کاربرد در ساختمانی متصل به شبکه بر اساس بازدهی اگزرژی و هزینهٔ کل سالیانه پرداخته شد. یافته‌ها نشان دادند که سیستم بهینه می‌تواند منجر به کاهش ۳۶ درصدی اگزرژی اولیه ورودی با افزایش سهم منابع کم اگزرژی (مانند حرارت بازیافتی و حرارت خورشیدی) در تأمین بار حرارتی شود. همچنین، طراحی بهینه چندهدفه دارای ۲۱٪ هزینهٔ کمتر نسبت به سیستم مرسوم متکی بر برق شبکه و بویلر گازی بود. مایر[3] و همکاران [۲۵] به بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی یک ریزشبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. متغیرهای تصمیم‌گیری توان نامی فتوولتائیک، کلکتور خورشیدی، توربین بادی و اینورتر، ظرفیت باتری و ضخامت عایق دیوارهای ساختمان بود. نتایج نشان داد که از میان فناوری‌های تجدیدپذیر، نصب آرایه‌های فتوولتائیک مقرون به‌صرفه‌ترین شیوه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. نسامالار[4] و همکاران [۲۶] به بهینه‌سازی فنی-اقتصادی سیستم فتوولتائیک، ژنراتور دیزلی، باتری و اینورتر برای پیکربندی‌های مستقل از شبکه و متصل به شبکه در کشور هند پرداختند. نتایج نشان داد که سیستم متصل به شبکه نسبت به سیستم مستقل از شبکه ارجحیت دارد. در مطالعهٔ جدیدتری، لوکارلی[5] و همکاران [۲۷] کاربرد یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ابتکاری را برای یافتن طراحی بهینه یک سیستم تولید انرژی سه گانه بر اساس توابع فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارزیابی کردند. واحدهای انرژی در نظر گرفته شده شامل انواع موتور احتراق داخلی، پیل سوختی، پمپ حرارتی و باتری بود. نتایج نشان داد که سیستم هیبریدی بهینه شامل ۵۰۰۰ کیلووات پیل سوختی اکسید جامد[6] (SOFC)، ۵۰۰ کیلووات باتری لیتیوم-یون[7]، ۳۹۰ کیلووات پمپ حرارتی جذبی به همراه پمپ‌های حرارتی تراکمی ۳۹۰ و ۱۶۰۰ کیلوواتی برای سرمایش و گرمایش بود.

[1] Net present cost (NPC)
[2] Prime movers
[3] Mayer
[4] Nesamalar
[5] Lucarelli
[6] Solid oxide fuel cell (SOFC)
[7] Lithium-ion

اهداف و نوآوری پژوهش

مسئله اصلی در سیستم‌های انرژی هیبریدی، یافتن ظرفیت و پیکربندی بهینه تجهیزات و فناوری‌های به‌کار گرفته شده است؛ به‌گونه‌ای که ریزشبکه بتواند انرژی الکتریکی موردنیاز مجموعه را به‌طور مداوم، با کمترین هزینه و در راستای توسعهٔ پایدار تأمین نماید. هدف پژوهش حاضر، بهینه‌سازی چندهدفه فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم هیبریدی متشکل از فتوولتائیک، توربین بادی، پیل سوختی (به همراه الکترولایزر[1] و منبع هیدروژن)، باتری، اینورتر و برق شبکه است.

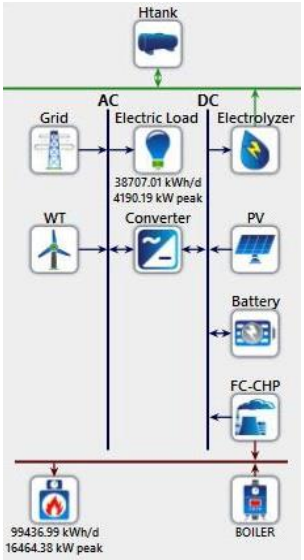
در پژوهش‌های پیشین، بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی هیبریدی اغلب تک‌هدفه بوده (بهینه‌سازی اقتصادی) و در مواردی که تحلیل چندهدفه انجام شده، پیکربندی‌های مختلف و پیچیده سیستم هیبریدی در نظر گرفته نشده است، یا این‌که توابع هدف به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که پژوهش فقط بهینه‌سازی‌های فنی-اقتصادی یا اقتصادی-زیست‌محیطی را دربرگرفته است. همچنین، در سیستم‌های هیبریدی متصل به شبکهٔ مطالعه شده در مقالات پیشین، دریافت نامحدود برق از شبکه برای تأمین کل انرژی مورد نیاز، از نظر فنی امکان‌پذیر بوده است؛ ولی در این پژوهش، حالت‌های مختلفی برای بیشترین توان قابل خریداری از شبکهٔ برق در نظر گرفته می‌شود. در واقع، میزان بیشینهٔ توان قابل دریافت از شبکه به‌عنوان متغیر طراحی مسئلهٔ بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. نوآوری مهم دیگر این تحقیق، انجام تحلیل چرخهٔ عمر[2] برای ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی نصب سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی است؛ درحالی‌که پژوهش‌های پیشین، عمدتاً انتشار مستقیم کربن‌دی‌اکسید را به‌عنوان شاخص زیست‌محیطی در بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته‌اند. علاوه بر این‌ها، در مقالات پیشین کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای یافتن طراحی نهایی سیستم انرژی هیبریدی از میان پاسخ‌های نامغلوب، به‌ندرت بررسی شده است. لذا علت انتخاب این پژوهش، عدم وجود دانش کافی در مقالات پیشین، اهمیت موضوع برای کاهش فشار بر روی شبکه سراسری برق و بهبود شرایط زیست‌محیطی کشور در راستای توسعه پایدار است.

مواد و روش

روش انجام پژوهش به‌این‌ترتیب است که ابتدا مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های انرژی هیبریدی در نرم‌افزار HOMER انجام شده و سپس نتایج شبیه‌سازی یعنی هزینهٔ خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخهٔ عمر پیکربندی‌های مختلف وارد نرم‌افزار MATLAB شده و در آنجا طراحی‌های نامغلوب مسئله به کمک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به دست آورده می‌شوند. دلیل این امر این است که بهینه‌سازی در نرم‌افزار HOMER، فقط بر حسب پارامتر اقتصادی هزینهٔ خالص فعلی برای یک محدودیت فنی مشخص انجام می‌شود که برای این پژوهش موضوعیت ندارد. در پایان، طراحی نهایی از میان مجموعه گزینه‌های بهینه چندهدفه با کمک تکنیک اولویت‌بندی بر اساس مشابهت به پاسخ ایده‌آل[3] (TOPSIS) ترکیب‌شده با روش وزنی انتروپی[4] (EWM) پیدا می‌شود.

در شکل ۱ شماتیکی از سیستم مدل شده در نرم‌افزار HOMER نشان داده شده است. اجزای سیستم شامل فتوولتائیک، توربین بادی، شبکهٔ برق، پیل سوختی، الکترولایزر، مخزن هیدروژن، باتری، اینورتر و بویلر هستند. کل انرژی الکتریکی مورد نیاز سالیانه مجموعه برابر ۱۴/۱ گیگاوات ساعت است. برق مورد نیاز روزانه در محدودهٔ ۲۴/۳ تا ۵۴/۵ مگاوات با متوسط ۳۸/۷ مگاوات ساعت است. بیشینه بار الکتریکی برابر ۴/۲ مگاوات در اوایل تابستان است. مقدار متوسط و بیشینه بار حرارتی به ترتیب برابر ۴/۱ و ۱۶/۵ مگاوات است.

[1] Electrolyzer
[2] Life cycle assessment
[3] Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)
[4] Entropy weight method (EWM)



شکل ۱. شماتیکی از سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی مدل شده در نرم‌افزار HOMER.

تحلیل فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم انرژی هیبریدی

تحلیل فنی

در تحلیل فنی سیستم هیبریدی، معمولاً سطح تأمین انرژی آن سنجیده می‌شود. برای این منظور، می‌توان از پارامتر احتمال عدم تأمین برق[1] (LPSP) استفاده کرد. این شاخص که در رابطه زیر تعریف شده است، معیاری برای تعیین قابلیت اعتماد سیستم انرژی هیبریدی است [۱۵]:

$$LPSP = \frac{E_{cs}}{E_{demand}} = \frac{\sum_{t=1}^{t_f} P_{cs}(t) \times \Delta t}{\sum_{t=1}^{t_f} P_{demand}\,(t) \times \Delta t} \quad (۱)$$

که E_{cs} و E_{demand} به ترتیب انرژی الکتریکی تأمین نشده و کل انرژی الکتریکی مورد نیاز در طول یک سال هستند. به‌طور مشابه، $P_{cs}(t)$ اختلاف بین بار الکتریکی (P_{demand}) و کل ظرفیت توان در دسترس واحدهای سیستم هیبریدی در زمان t است. همچنین Δt گام زمانی و t_f زمان نهایی در محاسبه LPSP است که در شبیه‌سازی‌های سالیانه معمولاً به ترتیب برابر ۱ و ۸۷۶۰ ساعت در نظر گرفته می‌شوند.

سهم فناوری‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی، پارامتر مهم دیگر یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$f_{ren} = 1 - \frac{E_{nonren} + H_{nonren}}{E_{served} + H_{served}} \quad (۲)$$

[1] Loss of power supply probability (LPSP)

در این رابطه، E_{nonren} و H_{nonren} به ترتیب انرژی الکتریکی و حرارتی تولید شده از منابع غیرتجدیدپذیر و E_{served} و H_{served} به ترتیب کل بارهای الکتریکی و حرارتی تأمین شده هستند.

همان‌گونه که بیان شد، اتلاف انرژی در سیستم‌های هیبریدی متشکل از منابع تجدیدپذیر می‌تواند قابل‌توجه باشد. نرم‌افزار HOMER نسبت برق اضافی را طبق رابطهٔ زیر محاسبه می‌کند [۲۸]:

$$f_{excess} = \frac{E_{excess}}{E_{prod}} \quad (۳)$$

که E_{excess} و E_{prod} به ترتیب کل توان اضافی و تولیدی سیستم هیبریدی در طول یک سال عملکرد آن هستند. مشاهده شد که شاخص‌های فنی فقط برای بار الکتریکی محاسبه شدند. دلیل این موضوع این است که نرم‌افزار HOMER برای تأمین بار حرارتی، بویلری با اندازه بی‌نهایت در نظر می‌گیرد که انرژی حرارتی تأمین نشده به‌وسیله واحدهای حرارتی سیستم (بازیافت حرارت در CHP یا بویلر برقی) را به‌طور کامل فراهم می‌کند؛ لذا پارامترهای فنی مذکور برای بارهای حرارتی قابل تعمیم نبوده و در نتایج نیز گزارش نمی‌شوند.

برای یافتن اندازهٔ بهینه اجزای سیستم هیبریدی، لازم است که عملکرد پیکربندی‌های مختلف سیستم شبیه‌سازی و تحلیل شود. برای این منظور، باید هر واحد انرژی سیستم به‌طور ریاضی مدل‌سازی شده که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

فتوولتائیک

توان DC تولیدی ماژول فتوولتائیک برای یک شرایط محیطی مشخص در زمان t را می‌توان توسط رابطهٔ زیر تخمین زد [۲۸]:

$$P_{PV}(t) = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T(t)}{G_{STC}}\right)\left[1 + \alpha_P\left(T_c(t) - T_{c,STC}\right)\right] \quad (۴)$$

در این رابطه، Y_{PV} ظرفیت نامی ماژول فتوولتائیک، f_{PV} ضریب اتلاف (ناشی از افت‌های سیم‌کشی، سایه، فرسایش و ...)، $G_T(t)$ تابش خورشیدی خالص دریافتی ماژول در زمان t، G_{STC} میزان تابش در شرایط استاندارد آزمایش (STC: ۱۰۰۰ W/m^2 & ۲۵ °C)، α_P ضریب دمایی توان، $T_c(t)$ دمای سلول فتوولتائیک در زمان t و $T_{c,STC}$ دمای سلول در شرایط استاندارد آزمایش است. به کمک تعادل انرژی و دمای سلول در شرایط عملکرد اسمی $T_{c,NOCT}$ (گزارش شده توسط شرکت سازنده ماژول)، تخمینی از دمای سلول در شرایط عملکرد واقعی بر حسب دمای محیط T_a توسط رابطهٔ زیر به دست می‌آید [۲۸]:

$$T_c(t) = T_a(t) + G_T(t)\left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}}\right)\left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha}\right) \quad (۵)$$

که $T_{a,NOCT}$ و $G_{T,NOCT}$ به ترتیب بیانگر دمای هوای محیط (20 C°) و تابش دریافتی ماژول (۸۰۰ W/m^2) در شرایط اسمی و $\alpha\tau$ حاصل‌ضرب ضرایب عبور و جذب سلول هستند. همچنین η_c بازدهی تبدیل انرژی سلول فتوولتائیک بوده که طبق رابطهٔ زیر متغیر با دمای محیط است [۲۸]:

$$\eta_c(t) = \eta_{c,STC}\left[1 + \alpha_P\left(T_c(t) - T_{c,STC}\right)\right] \quad (۶)$$

که $\eta_{c,STC}$ بازدهی سلول در شرایط استاندارد است. نرم‌افزار HOMER دمای سلول را از ترکیب معادلات (۵) و (۶) به دست آورده و از جایگذاری آن در معادله (۴) توان خروجی فتوولتائیک را در زمان‌های مختلف محاسبه می‌کند.

توربین بادی

توان تولیدی توربین بادی تابع سرعت باد در ارتفاع هاب است. با توجه به این‌که سرعت‌سنج‌ها معمولاً در ارتفاع بسیار کمتری نسبت به هاب توربین قرار دارند، می‌بایست سرعت باد در ارتفاع هاب تخمین زده شود. برای این منظور می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۲۸]:

$$v_{hub}(t) = v_{anem}(t)\frac{ln(z_{hub}/z_0)}{\ln\left(z_{anem}/z_0\right)} \quad (۷)$$

که v_{anem} بیانگر سرعت باد در ارتفاع بادسنج، z_{hub} و z_{anem} به ترتیب بیانگر ارتفاع هاب و بادسنج و z_0 معیاری از زبری سطح بر حسب طول است. سپس توان تولیدی توربین بادی در شرایط استاندارد دما و فشار (STP) را می‌توان توسط استراتژی کنترلی تعریف شده برای آن توسط شرکت سازنده که منحنی توان توربین نیز نامیده می‌شود، طبق رابطهٔ زیر تخمین زد [۲۹]:

$$P_{WT,STP}(t) = \begin{cases} 0 & v_{hub}(t) \le v_{cut-in} \\ P_i & v_{cut-in} < v_{hub}(t) < v_r \\ P_r & v_r < v_{hub}(t) < v_{cut-out} \\ 0 & v_{hub}(t) \ge v_{cut-out} \end{cases} \quad (۸)$$

طبق این استراتژی، توان تولیدی توربین برای سرعت‌های هاب کمتر از v_{cut-in} برابر صفر بوده، برای سرعت‌های بیشتر توان تولیدی توربین از P_i به‌طور پیوسته تا ظرفیت نامی P_r در سرعت هاب v_r روند افزایشی داشته، با افزایش بیشتر سرعت باد تا $v_{cut-out}$ توان خروجی ثابت مانده و پس از آن عملکرد توربین برای جلوگیری از آسیب قطعات توربین به تدریج متوقف می‌شود.

برای یافتن میزان توان تولیدی در شرایط واقعی عملکرد می‌توان از رابطهٔ خطی زیر استفاده نمود [۲۹]:

$$P_{WT}(t) = \frac{\rho}{\rho_0}P_{WT,STP}(t) \quad (۹)$$

که ρ و ρ_0 به ترتیب بیانگر چگالی هوای محیط در شرایط واقعی عملکرد و STP هستند.

برای یافتن توربین بادی مناسب برای یک منطقه، می‌توان از پارامتر ضریب ظرفیت[1] با توجه به داده‌های سرعت باد استفاده کرد. این ضریب از تقسیم متوسط توان خروجی توربین بر ظرفیت نامی آن بر حسب درصد تعیین می‌شود. برای یافتن توربین مناسب برای مجتمع مورد بررسی، عملکرد بالغ بر ۵۰ توربین بادی دارای ظرفیت‌های نامی بین ۱۰۰ کیلووات تا ۵ مگاوات موجود در کتابخانه نرم‌افزارهای HOMER و SAM شبیه‌سازی شدند. بر این اساس، توربین بادی

[1] Capacity factor

مدل Directwind ۲۵۰/۵۴، فاقد جعبه‌دنده بین پره‌ها و ژنراتور، ساخت شرکت EWT از کشور هلند دارای ضریب ظرفیت ۱۴/۴ درصدی در محل مورد بررسی برای استفاده در سیستم انرژی هیبریدی انتخاب شد.

محرک اصلی

برای مدل‌سازی پیل سوختی می‌بایست رابطهٔ بین میزان سوخت مصرفی و توان تولیدی آن مشخص شود. برای این منظور، می‌توان از رابطهٔ خطی زیر موسوم به منحنی سوخت استفاده کرد [۲۸]:

$$\dot{m}_{fuel}(t) = F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen}(t) \quad (۱۰)$$

که $\dot{m}_{fuel}$ دبی مصرف سوخت، Y_{gen} ظرفیت نامی ژنراتور، P_{gen} خروجی توان ژنراتور، F_0 و F_1 به ترتیب ضریب عرض از مبدأ و شیب منحنی سوخت هستند. از داده‌های تجربی، نرخ مصرف سوخت ژنراتور برای توان‌های خروجی مختلف به‌دست‌آمده و سپس از روش‌های رگرسیون خطی برای یافتن مقادیر F_0 و F_1 استفاده می‌شود.

بازدهی الکتریکی ژنراتور از تقسیم توان تولیدی به انرژی شیمیایی سوخت ورودی، طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$\eta_{gen} = \frac{P_{gen}}{\dot{m}_{fuel} LHV_{fuel}} = \frac{P_{gen}}{\left(F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen}(t)\right) LHV_{fuel}} \quad (۱۱)$$

در این رابطه، LHV_{fuel} ارزش حرارتی سوخت مصرفی پیل سوختی است که به‌طور خاص مقدار آن برای هیدروژن برابر ۱۲۰ مگاژول بر کیلوگرم است.

واحدهای پیل سوختی

پیل سوختی هیدروژنی یک سیستم الکتروشیمیایی است که در یک واکنش شیمیایی انرژی موجود در هیدروژن را به‌طور مستقیم به برق DC تبدیل می‌کند. با توجه به این‌که هیدروژن را مانند سوخت‌های مرسوم نمی‌توان به راحتی خریداری و منتقل کرد، معمولاً در سایت تولید می‌شود. برای این منظور، می‌توان از دستگاه‌هایی نظیر الکترولایزر یا ریفرمر[1] استفاده کرد. در الکترولایزر، با استفاده از ایجاد یک جریان الکتریکی آب به مولکول‌های تشکیل‌دهنده خود یعنی هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود که به آن فرایند الکترولیز[2] یا برق‌کافت گفته می‌شود. اما در ریفرمر، هیدروژن از حرارت دادن سوخت‌های مرسوم متشکل از هیدروکربن (نظیر بنزین، گاز طبیعی، متانول، پروپان و ...) تولید می‌شود.

در این تحقیق، از الکترولایزر با توجه به این‌که تولید آلاینده کمتری در مقایسه با ریفرمر دارد، استفاده شده است. ظرفیت نامی الکترولایزر حداکثر توان ورودی الکتریکی است که می‌تواند بپذیرد. مدل‌سازی فنی الکترولایزر در نرم‌افزار HOMER با تعیین راندمان آن انجام می‌شود که از تقسیم محتوی انرژی هیدروژن تولیدی (HHV_{H2}) بر مقدار برق مصرفی (P_{in}) طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$\eta_{el} = \frac{HHV_{H2}}{P_{in}} \quad (۱۲)$$

[1] Reformer
[2] Electrolysis

سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی و الکترولایزر می‌تواند همراه یک منبع ذخیره هیدروژن نیز باشد. هیدروژن تولیدی اضافی در بازه‌های زمانی که پیل سوختی برای تأمین بار به آن نیاز ندارد، در این مخزن ذخیره می‌شود. قابل ذکر است که ظرفیت منبع هیدروژن، بیشترین میزان هیدروژن بر حسب کیلوگرم است که می‌توان در آن ذخیره کرد.

منبع ذخیره باتری

میزان انرژی موجود در باتری در زمان t برای دو حالت شارژ و تخلیه طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۲۹]:

$$E_{batt}(t) = \begin{cases} E_{batt}(t-1)\times(1-\sigma) + \left[P_{prod}(t) - \dfrac{P_{demand}(t)}{\eta_{inv}}\right]\times\eta_{ch}, & for\ charging \\ E_{batt}(t-1)\times(1-\sigma) - \left[\dfrac{P_{demand}(t)}{\eta_{inv}} - P_{prod}(t)\right]/\eta_{dch}, & for\ discharging \end{cases} \quad (۱۳)$$

که $E_{batt}(t-1)$ بیانگر انرژی باتری در گام زمانی پیشین، σ نرخ خود تخلیه[1]، P_{prod} کل انرژی تولیدی مؤلفه‌های سیستم هیبریدی، P_{demand} بار الکتریکی مجموعه و η_{ch} و η_{dch} به ترتیب بازدهی شارژ و تخلیه باتری هستند.

در این تحقیق، از باتری لیتیوم-یون دارای ظرفیت ۱۰۰ kWh برای ذخیره انرژی الکتریکی در سیستم انرژی هیبریدی استفاده شد. مطالعات نشان می‌دهند این نوع باتری‌ها برای استفاده در سیستم‌های انرژی هیبریدی متشکل از فتوولتائیک و توربین بادی (دارای نوسانات تولید انرژی زیاد) از نظر فنی-اقتصادی بهینه هستند [۲۲]. ویژگی متمایز این نوع باتری اتلاف انرژی کم در شارژ و تخلیه است.

مشخصات فنی اجزای سیستم

خصوصیات فنی اجزای سیستم انرژی هیبریدی مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. نسبت بار کمینه پیل سوختی، کمترین میزان بار الکتریکی است که محرک اصلی می‌تواند عمل کند و بر حسب درصدی از ظرفیت نامی آن بیان می‌شود. همچنین بازدهی بویلر گازی و اینورتر به ترتیب ۸۰ و ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است [۳۰; ۳۱].

جدول ۱. مشخصات فنی واحدهای سیستم انرژی هیبریدی مورد استفاده در شبیه‌سازی.

فناوری	پارامتر	مقدار	فناوری	پارامتر	مقدار
ماژول فتوولتائیک [۳۲] SPR-E۳۰-۳۲۷	توان نامی در شرایط استاندارد	W ± ۵% ۳۲۷	توربین بادی [۳۳] EWT DW۵۴-۲۵۰	قطر روتور	m ۵۴
	بازدهی ماژول	۲۱.۴%		ارتفاع هاب	m ۵۰
	ولتاژ توان بیشینه	V ۵۴.۷		سرعت باد نامی	m/s ۷.۵
	جریان توان بیشینه	V ۵.۹۸		سرعت باد راه‌انداز	m/s ۲.۵
	ولتاژ مدار باز	V ۶۴.۹		سرعت باد قطع‌کننده	m/s ۲۵
	جریان اتصال کوتاه	A ۶.۴۶		کلاس باد IEC	IIIA
	دمای سلول در شرایط عملکرد اسمی	C° ۴۵	باتری [۳۴]	ظرفیت نامی	kWh ۱۰۰

[1] Self discharge

فناوری	پارامتر	مقدار	فناوری	پارامتر	مقدار
			Generic ۱۰۰ kWh Li-Ion		
	ضریب دمایی توان	-۰.۳۵٪/C°		ولتاژ نامی	V۶۰۰
	ضریب اتلاف	۰.۸		بیشینه جریان شارژ	A ۱۶۷
پیل سوختی (CHP) [۳۵]	بازده الکتریکی	۴۵%		بیشینه جریان تخلیه	A ۵۰۰
	بازده حرارتی	۳۷%		بازدهی شارژ و تخلیه	۹۵%
	بازده الکترولایزر	۸۵%			
	نسبت بار کمینه	۱۰%			
	سوخت	هیدروژن			

استراتژی مدیریت انرژی

در پایان این بخش، باید ذکر شود که هر سیستم انرژی هیبریدی دارای یک سیستم مدیریت انرژی برای کنترل جریان انرژی واحدهای مختلف ریزشبکه است که به آن استراتژی توزیع[1] می‌گویند. دو استراتژی کنترلی منطبق بر بار[2] و شارژ سیکل[3] در نرم‌افزار HOMER برای یافتن سایز بهینه اجزای سیستم تعبیه شده که در این پژوهش از استراتژی اول به‌دلیل مزایای فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی بهتر آن در سیستم‌های هیبریدی دارای منابع تجدیدپذیر استفاده می‌شود. در هر دو استراتژی، انرژی تولیدی فناوری‌های تجدیدپذیر برای تأمین بار اولویت داشته و انرژی تولیدی اضافی ابتدا صرف شارژ باتری و سپس الکترولایزر می‌شود. تفاوت این دو روش برای موقعی است که منابع تجدیدپذیر و انرژی ذخیره شده در باتری قادر به تأمین کامل بار نباشند؛ در راهبرد کنترلی منطبق بر بار، ژنراتور تنها بار خالص باقیمانده را تأمین کرده ولی در استراتژی شارژ سیکل، ژنراتور با تمام ظرفیت نامی خود عمل می‌کند [۳۶].

تحلیل اقتصادی

هزینهٔ خالص فعلی یک سیستم هیبریدی، مجموع ارزش فعلی هزینه‌های نصب و نگهداری تمام مؤلفه‌های سیستم منهای ارزش فعلی درآمدهای سیستم در طول مدت عملکرد آن است. به‌طورکلی، هزینه‌ها شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینهٔ نگهداری و تعویض مؤلفه‌های سیستم، هزینهٔ سوخت و جریمه‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینهٔ خرید برق از شبکه شده و درآمدها شامل فروش برق به شبکه و ارزش قطعات قابل‌بازیافت در زمان پایان عملکرد سیستم است. هزینهٔ خالص فعلی (NPC) کل سیستم در مدت طول عملکرد آن به طریق زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$NPC = I_0 + \frac{\sum_{n=1}^{N} C_n - R_n}{(1+i)^n} \quad (۱۴)$$

که I_0 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، C_n و R_n به ترتیب هزینه و درامد در سال n و i نرخ سود واقعی است.

[1] Dispatch strategy
[2] Load following
[3] Cycle charging

پارامتر مهم اقتصادی دیگر، متوسط هزینهٔ تولید هر کیلووات‌ساعت برق تولیدی سیستم است که طبق رابطهٔ زیر به دست می‌آید [۲۸]:

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - c_{boiler} H_{served}}{E_{served}} \quad (۱۵)$$

در این رابطه، $C_{ann,tot}$ هزینهٔ سالیانه کل، c_{boiler} هزینهٔ عملکرد بویلر و H_{served} و E_{served} به ترتیب کل بارهای حرارتی و الکتریکی تأمین شده هستند. هزینهٔ سالیانه کل از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$C_{ann,tot} = CRF(i,N) \times NPC \quad (۱۶)$$

که CRF فاکتور بازگشت سرمایه بوده که بر حسب نرخ بهره واقعی سالیانه (i) و مدت بهره‌برداری از پروژه (N) طبق رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۸]:

$$CRF(i,N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (۱۷)$$

هزینهٔ عملکرد بویلر (c_{boiler}) نیز از ضرب هزینهٔ سوخت در دبی سوخت ورودی بویلر محاسبه می‌شود. بدین طریق، نرم‌افزار HOMER هزینهٔ تأمین بارهای حرارتی را از متوسط هزینهٔ تأمین انرژی سیستم حذف کرده تا پارامتر COE فقط بیانگر متوسط هزینهٔ برق تأمین شده باشد.

در جدول ۲ مقدار پارامترهای مورد نیاز (هزینه‌های اولیه، جایگزینی، تعمیر و نگهداری به همراه مدت عملکرد اجزا) برای محاسبات اقتصادی سیستم انرژی هیبریدی پروژه آورده شده است. دیگر پارامترهای اقتصادی پروژه شامل متوسط نرخ خرید گاز طبیعی، برق شبکه و سود فروش برق شبکه به ترتیب ۰/۱۵ دلار بر مترمکعب، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ دلار بر کیلووات‌ساعت منظور شدند [۳۷; ۳۸]. همچنین، نرخ سود واقعی سالیانه و مدت کارکرد سیستم انرژی هیبریدی به ترتیب ۵٪ و ۲۰ سال در نظر گرفته شدند [۱۴].

جدول ۲. پارامترهای اقتصادی مربوط به واحدهای مختلف سیستم هیبریدی مدل شده.

مؤلفه سیستم	هزینهٔ اولیه	هزینهٔ جایگزینی	هزینهٔ تعمیر و نگهداری	مدت عملکرد	منبع
آرایه فتوولتائیک	kW/$ ۱۳۰۰	kW/$ ۱۳۰۰	kW/yr/$ ۱۰	yrs ۲۵	[۳۲]
توربین بادی	kW/$ ۲۰۰۰	kW/$ ۲۰۰۰	kW/yr/$ ۷۵	yrs ۲۰	[۳۳]
پیل سوختی	kW/$ ۳۰۰۰	kW/$ ۲۵۰۰	kW/hr/$ ۰.۰۳	hrs ۴۰۰۰۰	[۳۹]
الکترولایزر	kW/$ ۱۵۰۰	kW/$ ۱۰۰۰	kW/yr/$ ۲۰	yrs ۱۵	[۳۹]
منبع هیدروژن	kg/$ ۱۴۰۰	kg/$ ۸۶۷	kg/yr/$ ۲۰	yrs ۲۵	[۳۹]
ژنراتور دیزلی	kW/$ ۲۵۰۰	kW/$ ۱۹۰۰	kW/hr/$ ۰.۰۱	hrs ۴۰۰۰۰	[۳۵]
باتری	kWh/$ ۲۰۰	kWh/$ ۱۸۰	kWh/hr/$ ۵	yrs ۱۵	[۳۴]
اینورتر	kW/$ ۵۰۰	kW/$ ۴۵۰	kW/yr/$ ۵	yrs ۱۵	[۴۰]

تحلیل زیست‌محیطی

همان‌گونه که بیان شد، یکی از دلایل مهم به‌کارگیری سیستم‌های هیبریدی بهبود شرایط زیست‌محیطی است. لذا در این تحقیق، هدف سوم مسئله بهینه‌سازی، به‌حداقل‌رساندن اثرات زیست‌محیطی در کل چرخهٔ حیات اجزای سیستم انرژی هیبریدی است. این بدان معناست که نه‌تنها انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای مستقیم ناشی از بهره‌برداری و نگهداری سیستم، بلکه تولید و حمل و نقل قطعات و حامل‌های انرژی نیز در محاسبات انتشار چرخهٔ عمر[1] موردتوجه قرار گرفته است. انتشار چرخهٔ عمر (LCE) اجزای سیستم هیبریدی مورد بررسی در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳. انتشار معادل کربن‌دی‌اکسید در چرخهٔ عمر اجزای سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی مورد مطالعه.

فناوری	انتشار چرخه عمر ($kg\ CO_2\text{-}eq/kWh$)	منبع
فتوولتائیک	۰.۰۴۵	[۴۱]
توربین بادی	۰.۰۱۱	[۴۱]
پیل سوختی	۰.۰۳۱	[۴۱]
باتری	۰.۰۲۸	[۴۱]
برق شبکه	۰.۶۳۹	[۴۲]
بویلر	۰.۱۸۸	[۴۲]

بهینه‌سازی چندهدفه

مبانی نظری بهینه‌سازی چندهدفه

در مسائل مهندسی که اثر چند تابع هدف متضاد بر یافتن مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری موردتوجه باشد، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با m متغیر تصمیم‌گیری و n تابع هدف را می‌توان به کمک رابطه زیر تعریف کرد [۴۳]:

$$Minimize \quad y = f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x)) \tag{۱۸}$$

در رابطهٔ فوق:

$$x = (x_1, \dots, x_m) \in X \tag{۱۹}$$

$$y = (y_1, \dots, y_n) \in Y \tag{۲۰}$$

که x بردار شامل متغیرهای تصمیم‌گیری، X فضای طراحی، y بردار هدف و Y فضای هدف است. شرط لازم و کافی برای اینکه یک متغیر تصمیم‌گیری $a \in X$ متغیر دیگر $b \in X$ را مغلوب کند (نسبت به آن برتر باشد)، رابطهٔ زیر است [۴۳]:

[1] Life cycle emission (LCE)

$$a < b \leftrightarrow \begin{matrix} f_i(a) \leq f_i(b) & \forall\, i \in \{1, \dots, n\} \\ f_j(a) < f_j(b) & \exists\, j \in \{1, \dots, n\} \end{matrix} \quad (۲۱)$$

اگر این رابطه برقرار باشد، طراحی b از مجموعه پاسخ‌های بهینه حذف شده و اگر نه $a < b$ و نه $b < a$ باشد، آنگاه این دو متغیر تصمیم‌گیری نسبت به هم نامغلوب هستند. به بیانی دیگر، یک جواب نامغلوب برداری متشکل از توابع هدف مسئله بوده که هیچ کدام از مؤلفه‌های آن را نمی‌توان بدون تعدیل حداقل یکی دیگر از مؤلفه‌ها بهبود بخشید. بر این اساس، مجموعه جواب‌های نامغلوب که مجموعه پارتو[1] نیز نامیده می‌شود، به دست می‌آید.

بیان مسئله بهینه‌سازی پژوهش

توابع هدف برای بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های انرژی هیبریدی مستقل از شبکه و متصل به شبکه در زیر آورده شده است:

$$Minimize \quad y = f(x) = (LPSP(x), NPC(x), LCE(x)) \quad (۲۲)$$

شاخص فنی $LPSP$ بیانگر احتمال عدم تأمین برق، شاخص اقتصادی NPC بیانگر هزینه خالص فعلی و شاخص زیست‌محیطی LCE بیانگر انتشار معادل کربن دی‌اکسید اجزای سیستم انرژی هیبریدی در طول چرخه عمر آن‌ها است. در این رابطه، بردار x شامل متغیرهای طراحی مسئله است که برای ریزشبکه مورد بررسی در رابطهٔ زیر آورده شده است:

$$x_{gc} = [C_{PV}, C_{WT}, C_{Grid}, C_{FC}, C_{ELEC}, C_{Htank}, C_{BATT}, C_{INV}] \quad (۲۳)$$

در این روابط، پارامتر C بیانگر ظرفیت واحدهای سیستم انرژی هیبریدی شامل فتوولتائیک (PV)، توربین بادی (WT)، پیل سوختی هیدروژنی (FC)، الکترولایزر ($ELEC$)، مخزن هیدروژن ($Htank$)، باتری ($BATT$)، اینورتر (INV) و برق شبکه ($Grid$) است.

بیشینهٔ (گام) ظرفیت پیل سوختی و الکترولایزر برابر ۲۵۰۰ کیلووات (۲۵۰ کیلووات)، منبع هیدروژن برابر ۲۵۰۰ کیلوگرم (۲۵۰ کیلوگرم)، توربین بادی ۲۰ عدد (۱ عدد)، باتری ۵۰۰ عدد (۱ عدد) و برق شبکه ۱۰۰٪ (۲۰٪) بیشینه بار الکتریکی موردنیاز در نظر گرفته شد. ظرفیت‌های فتوولتائیک و اینورتر به‌طور پیوسته با بیشینه مقادیر به ترتیب ۱۵۰۰۰ و ۱۳۰۰۰ کیلووات در نظر گرفته شدند. کمینه اندازه همه فناوری‌های مذکور برابر صفر بوده که منجر به شبیه‌سازی پیکربندی‌های مختلف سیستم انرژی هیبریدی می‌شود.

قابل ذکر است که با انجام مطالعاتی پیش از شبیه‌سازی‌های اصلی، مقادیر کمینه و بیشینه ظرفیت واحدها به‌گونه‌ای پیدا شدند که پاسخ‌های بهینه چندهدفه نهایی را پوشش دهند. همچنین ذکر این نکته ضروری است که نرم‌افزار HOMER فقط امکان شبیه‌سازی فتوولتائیک و اینورتر را با ظرفیت پیوسته دارا است و برای سایر واحدهای انرژی می بایست یک گام مشخص برای ظرفیت در یک فضای گسسته در نظر گرفت. همچنین، این نرم‌افزار امکان بهینه‌سازی ظرفیت نامی بویلر را ندارد؛ در واقع، HOMER ظرفیت بویلر را به‌گونه‌ای در نظر می‌گیرد که بتواند انرژی حرارتی موردنیازی را که توسط CHP تأمین نشده است، به‌طور کامل فراهم کند.

[1] Pareto set

تصمیم‌گیری چندمعیاره

همان‌گونه که بیان شد، خروجی بهینه‌سازی چندهدفه مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب است. واضح است که برای یک مسئله کاربردی واقعی، می‌بایست در انتها یک طراحی منحصربه‌فرد انتخاب شود. ساده‌ترین راهکار، رسم مجموعه گزینه‌های بهینه در کنار یکدیگر و انتخاب یکی از آنها توسط تصمیم‌گیرنده است. این روش برای حالاتی که تعداد توابع هدف و یا تعداد اعضای مجموعه پارتو زیاد باشد، بسیار سخت است. به همین منظور، بعضی مقالات روش‌هایی برای انتخاب تعداد محدودی از جواب‌های بهینه چندهدفه و نمایش آنها به تصمیم‌گیرنده ارائه کرده‌اند [۴۴]. هرچند، توجه به این نکته ضروری است که حتی با کاهش تعداد انتخاب‌ها، نمی‌توان از انتخاب بهترین گزینه نامغلوب توسط تصمیم‌گیرنده، به دلیل امکان اعمال نظرات شخصی و همچنین وجود خطاهای انسانی مطمئن بود. برای حل این چالش، می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از شاخه‌های تحقیق در عملیات، استفاده نمود. چنین روش‌هایی با ارزیابی جواب‌های ممکن که اغلب وابسته هستند، آنها را رتبه‌بندی کرده و فرایند انتخاب یک جواب دارای سازش بهینه بین معیارهای مسئله را تسهیل می‌کنند.

تکنیک اولویت‌بندی بر اساس مشابهت به پاسخ ایده‌آل

از میان روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، روش TOPSIS در مسائل طراحی مهندسی که چندین معیار با واحدهای اندازه‌گیری متفاوت وجود دارند، به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۴۵-۴۷]. در این روش، گزینه نهایی (طراحی منتخب) بر اساس میزان مجاورت نسبی به پاسخ‌های فرضی ایده‌آل به دست می‌آید. ۵ مرحله انجام این روش در زیر توضیح داده شده است.

- نرمال‌سازی معیارها برای اهداف بی‌بعدسازی و امکان مقایسه شاخص‌های مختلف

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2}}, j \in [1, \dots, m] \quad (۲۴)$$

که x_{ij} درایه ماتریس تصمیم، n تعداد پاسخ‌های موجود و m تعداد معیارها است.

- اعمال وزن برای هر شاخص

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (۲۵)$$

w_j بیانگر وزن هر تابع هدف است.

- یافتن پاسخ‌های ایده‌آل فرضی

$$v_j^+ = \{best(v_{ij})\}_{i=1}^{n} \quad (۲۶)$$

$$v_j^- = \{worst(v_{ij})\}_{i=1}^{n} \quad (۲۷)$$

که v_j^+ و v_j^- به ترتیب پاسخ‌های ایده‌آل مثبت و منفی هستند. عبارت $best$ بیانگر عملگر کمینه برای شاخص‌های غیرمنفعت نظیر هزینه و عملگر بیشینه برای شاخص‌های منفعتی است. این استدلال برای $worst$ برعکس است.

- محاسبهٔ فاصلهٔ اقلیدسی بین هر گزینه و پاسخ‌های ایده‌آل

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \quad (۲۸)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \quad (۲۹)$$

مشخص است که d_i^+ و d_i^- در این رابطه، به ترتیب فاصلهٔ اقلیدسی طراحی i نسبت به پاسخ‌های ایده‌آل مثبت و منفی هستند.

- اندازه‌گیری میزان مجاورت نسبی هر گزینه به پاسخ ایده‌آل

$$C_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (۳۰)$$

به این پارامتر که مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر است، نمرهٔ ترکیبی نیز گفته می‌شود. در پایان، پاسخ‌های نامغلوب بر اساس بیشینه بودن نمرهٔ رتبه‌بندی می‌شوند. مشخص است که طراحی دارای نمرهٔ بالاتر نسبت به طراحی با نمرهٔ پایین‌تر ارجحیت دارد.

روش تعیین وزن انتروپی

وزن شاخص‌ها پارامتر ورودی در روش‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره است. روش‌های مختلفی برای محاسبهٔ وزن هر شاخص وجود دارد. ساده‌ترین روش، انتخاب وزن‌ها توسط تصمیم‌گیرنده است، به‌طوری‌که مجموع ضرایب برابر ۱ شود. این تکنیک که به روش ذهنی[1] معروف است، در مقابل روش عینی[2] که در آن از مدل‌های ریاضی برای وزن‌دهی معیارها استفاده می‌شود، قرار دارد. از جمله روش‌های عینی، می‌توان به روش انتروپی اشاره کرد. علاوه بر این، روش‌های میانه دیگری نیز نظیر تحلیل سلسله مراتبی[3] (AHP) وجود دارد که اساس وزن‌دهی در آنها، ترکیب گرایش تصمیم‌گیرنده و ریاضیات است. هر دو روش اشاره شده در ترکیب با روش TOPSIS در مقالات تصمیم‌گیری چندشاخصه به وفور استفاده شده‌اند [۴۸; ۴۹]. در این پژوهش، از روش عینی انتروپی که در آن وزن‌ها به‌طور کامل از ماتریس تصمیم به‌دست‌آمده و نظرات تصمیم‌گیرنده در آن دخیل نیست، استفاده می‌شود.

نخستین بار، شانون[4] [۵۰] در سال ۱۹۴۸ ایده روش وزن‌دهی انتروپی را مطرح کرد که پس از او، زلنی[5] آن را بهبود بخشید [۵۱]. در این روش، هیچ عامل بیرونی در انتخاب طرح نهایی دخالتی نداشته و فرایند انتخاب درونی است. از پارامتر انتروپی برای کمی کردن محتوای اطلاعات یک پیام (در اینجا ماتریس تصمیم) استفاده می‌شود. انتروپی زیاد احتمال وقوع کم یک پدیده را می‌رساند. بر اساس روش وزن انتروپی، هرچه میزان انتروپی کمتر، پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر است؛ لذا آن تابع هدف اهمیت بیشتری داشته و در نتیجه وزن بیشتری می‌گیرد. برای نمونه، مشخص است که اگر همه مقادیر یک شاخص در طراحی‌های مختلف مشابه باشند، می‌توان آن شاخص را از تصمیم‌گیری حذف کرد؛ به‌عبارتی‌دیگر، وزن انتروپی صفر داشته و اطلاعاتی مفیدی به تصمیم‌گیرنده نمی‌دهد.

[1] Subjective
[2] Objective
[3] Analytic hierarchy process
[4] Shannon
[5] Zeleny

ازآنجایی‌که شاخص‌ها دارای واحد یکسان نیستند، پیش از پردازش آنها می‌بایست طبق رابطهٔ زیر استاندارد شوند:

$$x'_{ij} = \frac{\left| x_{ij} - \{best(x_{ij})\}_{i=1}^{n} \right|}{\{max(x_{ij})\}_{i=1}^{n} - \{min(x_{ij})\}_{i=1}^{n}}, for\ j = 1, \dots, m \quad (۳۱)$$

حال، تمام درایه‌های ماتریس تصمیم در بازه ۰ تا ۱ قرار دارند. سپس، تأثیر مؤلفه‌های گزینه i بر شاخص j از تقسیم هر درایه به مجموع ستون آن درایه طبق رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} x'_{ij}}, for\ j = 1, \dots, m \quad (۳۲)$$

در ادامه، مقدار انتروپی بیانگر محتوی اطلاعات هر شاخص طبق رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^{n} p_{ij} \ln(p_{ij}), for\ j = 1, \dots, m \quad (۳۳)$$

قابل ذکر است که برای $p_{ij} = 0$، می‌بایست لگاریتم طبیعی آن برابر صفر قرار داده شود.
مرحلهٔ سوم یافتن درجهٔ پراکندگی هر شاخص طبق رابطهٔ زیر است:

$$div_j = 1 - e_j, for\ j = 1, \dots, m \quad (۳۴)$$

در انتها، وزن هر معیار طبق فرمول زیر به دست آورده می‌شود:

$$w_j = \frac{div_j}{\sum_{j=1}^{m} div_j}, for\ j = 1, \dots, m \quad (۳۵)$$

نتایج و بحث

همان‌گونه که بیان شد، در سیستم هیبریدی مورد بررسی امکان خرید برق از شبکه به‌طور محدود یا نامحدود بررسی می‌شود. برای این منظور، ۶ حالت زیر جهت بررسی عملکرد سیستم هیبریدی پیشنهاد شده در نظر گرفته شده است:

- **حالت ۱:** مدیریت انرژی با در نظر گرفتن سیستم مستقل از شبکه
- **حالت ۲:** مدیریت انرژی با امکان خرید توان از شبکه بالادست با در نظر گرفتن محدودیت خرید حداکثر ۲۰ درصد بیشینه بار
- **حالت ۳:** مدیریت انرژی با امکان خرید توان از شبکه بالادست با در نظر گرفتن محدودیت خرید حداکثر ۴۰ درصد بیشینه بار
- **حالت ۴:** مدیریت انرژی با امکان خرید توان از شبکه بالادست با در نظر گرفتن محدودیت خرید حداکثر ۶۰ درصد بیشینه بار
- **حالت ۵:** مدیریت انرژی با امکان خرید توان از شبکه بالادست با در نظر گرفتن محدودیت خرید حداکثر ۸۰ درصد بیشینه بار
- **حالت ۶:** مدیریت انرژی با امکان خرید غیرمحدود توان از شبکه بالادست

قابل ذکر است که در همه حالت‌ها، ریزشبکه می‌تواند برق تولیدی منابع تجدیدپذیر را به‌طور نامحدود به شبکهٔ برق سراسری به فروش برساند. همچنین، بازدهی فنی (LPSP) قابل قبول سیستم‌های انرژی هیبریدی در این تحقیق بین ۱۰-۰٪ در نظر گرفته شده است (محدودیت فنی).

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه در بخش‌های ۶-۱ و ۶-۲، انتخاب سیستم نهایی بر اساس تحلیل تصمیم‌گیری چندشاخصه در بخش ۶-۳ و ارزیابی فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم منتخب در بخش ۶-۴ آورده شده است.

فضای طراحی برای طراحی‌های بهینه چندهدفه

در مجموع، ۷۰۰ طراحی بهینه چندهدفه شامل ۵۹۲ (۸۴/۶٪) سیستم متصل به شبکه و ۱۰۸ (۱۵/۴٪) سیستم مستقل از شبکه پیدا شد. سیستم‌های متصل به شبکه شامل ۴۰ و مستقل از شبکه دارای ۵ پیکربندی مختلف بودند. در جدول ۴، تعداد ۱۰ پیکربندی که بیشترین عضو را در مجموعه جواب بهینه چندهدفه داشته‌اند، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پیکربندی فتوولتائیک/پیل سوختی/الکترولایزر، مخزن هیدروژن، باتری و اینورتر به همراه شبکه برق ۲۰٪ (حالت ۲) با ۱۱۸ عضو بیشترین تکرار را در مجموعه پارتو داشته است.

جدول ۴. پیکربندی‌های بهینه چندهدفه و تعداد پاسخ‌های نامغلوب در هر کدام.

	PV	WT	FC	ELEC	Htank	BATT	INV	Grid					Number
								۲۰%	۴۰%	۶۰%	۸۰%	۱۰۰%	
۱	●		●	●	●	●	●	●					۱۱۸
۲	●	●	●	●	●	●	●	●					۵۴
۳	●					●	●		●				۴۹
۴	●		●	●	●	●	●						۴۵
۵	●	●	●	●	●	●	●		●				۴۴
۶	●		●	●	●		●			●			۴۲
۷	●					●	●	●					۳۸
۸	●						●		●				۳۵
۹	●	●	●	●	●	●	●						۳۰
۱۰	●	●	●	●	●		●		●				۲۳

توصیف آماری ظرفیت مؤلفه‌های مختلف سیستم انرژی هیبریدی در مجموعه پارتو در جدول ۵ آورده شده است. مشخص است که از میان منابع تولیدکننده انرژی، متوسط ظرفیت فتوولتائیک به ترتیب بیشتر از برق شبکه، پیل سوختی و توربین بادی است. به‌طور خاص، میانگین ظرفیت فتوولتائیک در مجموعه پارتو حدود ۱/۵ برابر اوج بار الکتریکی است، درحالی‌که متوسط اندازه پیل سوختی و توربین بادی کمتر از ۵ درصد اوج بار است. این موضوع بیانگر این است که اگرچه پیل سوختی و توربین بادی باعث کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شوند، ولی به دلیل بازدهی پایین و هزینه‌های اقتصادی زیاد، در یک تحلیل چندهدفه، بهینه نیستند.

جدول ۵. پارامترهای آماری مربوط به ظرفیت واحدهای انرژی در مجموعهٔ پارتو.

مؤلفه سیستم هیبریدی	واحد	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
فتوولتائیک	kW	۵۹۶۱.۲	۳۳۹۹.۲	۰	۱۳۳۳۳.۳
توربین بادی	kW	۲۰۹.۳	۴۲۹.۵	۰	۲۵۰۰
بیشینه برق قابل خریداری	kW (٪)	۱۴۸۶.۹ (۳۵.۵)	۱۱۵۷.۰ (۲۷.۶)	۰ (۰)	۴۱۹۰.۲ (۱۰۰)
پیل سوختی	kW	۲۸۵	۲۹۱.۸	۰	۱۵۰۰
الکترولایزر	kW	۴۲۴.۳	۵۱۴.۴	۰	۲۵۰۰
منبع هیدروژن	kg	۲۵۹.۶	۲۸۱.۸	۰	۱۷۵۰
باتری	kWh	۱۱۱۷۱.۹	۱۱۷۸۷.۳	۰	۴۸۴۰۰
اینورتر	kW	۱۷۸۶.۸	۹۶۱.۴	۰	۶۲۸۶

فضای هدف برای طراحی‌های بهینه چندهدفه

پارامترهای آماری شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های بهینه چندهدفه در جدول ۶ آورده شده است. اختلاف بین کمینه و بیشینه هزینهٔ خالص فعلی در پاسخ‌های پارتو، مقدار قابل‌توجه ۲۶/۵ میلیون دلار است که این موضوع می‌تواند در انتخاب سیستم نهایی (برای نصب در محل) از میان جواب‌های نامغلوب بسیار مهم باشد. انحراف معیار مربوط به پارامتر احتمال عدم تأمین برق نسبت به میانگین به‌طور قابل‌توجهی بیش از توابع هدف دیگر (هزینهٔ خالص فعلی و انتشار چرخه عمر) است.

جدول ۶. پارامترهای آماری مربوط به توابع هدف در مجموعه پاسخ‌های بهینه چندهدفه.

تابع هدف	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	دامنه
هزینهٔ خالص فعلی (میلیون دلار)	۲۷.۵	۷.۵	۱۷.۲	۴۳.۸	**۲۶.۵**
احتمال عدم تأمین برق (٪)	۴.۴	۳.۲	۰	۱۰.۰	**۱۰.۰**
انتشار معادل کربن‌دی‌اکسید در چرخه عمر (کیلوتن)	۲۷۲.۲	۴۳.۷	۱۹۶.۶	۳۵۸.۶	**۱۶۲.۰**

در جدول ۷، مشخصات سیستم‌های بهینه تک‌هدفه اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی آورده شده است. مشاهده می‌شود که سیستم‌های بهینه اقتصادی و فنی-اقتصادی فقط شامل شبکهٔ برق، فنی-زیست‌محیطی شامل فتوولتائیک، باتری و اینورتر و زیست‌محیطی دارای فتوولتائیک، توربین بادی، باتری و اینورتر است. قابل ذکر است که اقتصادی‌ترین سیستم برای تأمین انرژی مجتمع، شبکه برق ۶۰٪ (حالت ۴) بدون نیاز به هیچ منبع انرژی دیگر است. هرچند، این سیستم قادر به تأمین ۱/۸٪ بارهای الکتریکی موردنیاز مجتمع نیست.

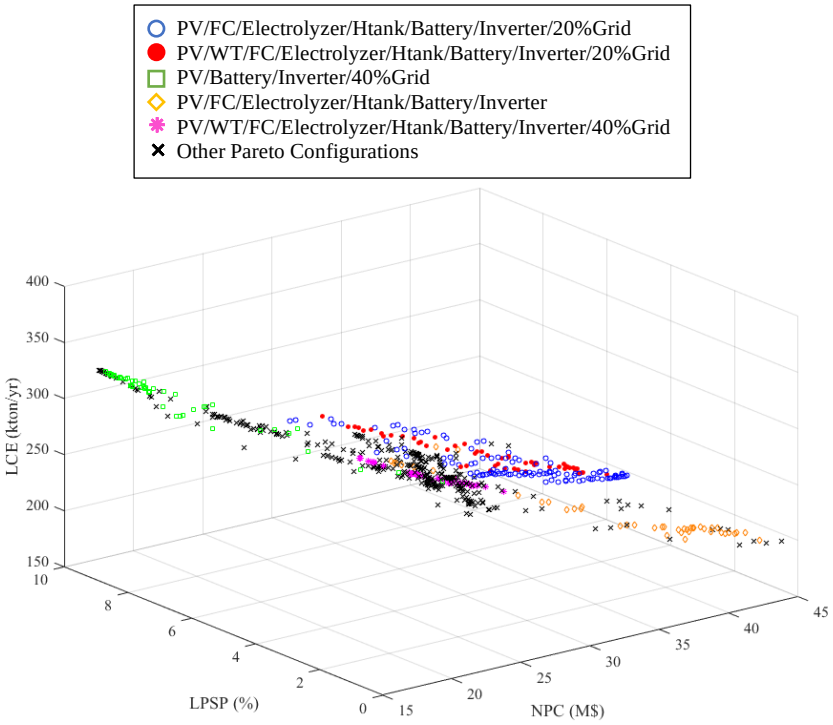
جدول ۷. مشخصات طراحی‌های بهینه تک‌هدفه از نظر معیارهای مختلف.

معیار		NPC (M$)	LPSP (٪)	LPSP (kton)	PV (kW)	WT (kW)	Grid (٪)	FC (kW)	ELEC (kW)	Htank (kg)	BATT (kWh)	INV (kW)
اقتصادی		۱۷.۲	۱.۸	۳۵۵.۳	۰	۰	۶۰	۰	۰	۰	۰	۰
فنی*	اقتصادی	۱۷.۴	۰.۰	۳۵۸.۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰
	زیست‌محیطی	۴۳.۸	۰.۰	۲۰۳.۴	۱۳۳۳۳.۳	۰	۰	۰	۰	۰	۴۸۴۰۰	**۴۱۹۰.۷**

معیار	NPC (M$)	LPSP (٪)	LPSP (kton)	PV (kW)	WT (kW)	Grid (٪)	FC (kW)	ELEC (kW)	Htank (kg)	BATT (kWh)	INV (kW)
زیست‌محیطی	۳۳.۴	۱۰.۰	۱۹۶.۶	۹۴۰۲.۵	۲۵۰	۰	۰	۰	۰	۲۷۹۰۰	**۲۶۶۲.۲**

* تعداد ۵۷ سیستم دارای LPSP صفر بوده که طراحی‌های دارای کمترین هزینهٔ اقتصادی و انتشار کربن (زیست‌محیطی) در جدول گزارش شده‌اند.

سطح پارتو شامل طراحی‌های بهینه چندهدفه در شکل ۲ آورده شده است. تعداد ۵ پیکربندی با بیشینهٔ اعضا، مشخص شده در جدول ۴ که حدود نیمی از اعضای پارتو را تشکیل می‌دهند، به‌طور خاص در این شکل مشخص شده است. از این نمودار مشخص است که با کاهش هزینهٔ خالص فعلی طراحی، جواب‌های بهینه به سمت افزایش احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخهٔ عمر بیشتر میل می‌کنند. هزینهٔ کمتر و انتشار آلایندهٔ بیشتر طراحی متصل به شبکه نسبت به پیکربندی‌های مستقل از شبکه برای یک بازدهی فنی مشخص در این شکل واضح است. سیستم‌های هیبریدی مستقل از شبکه موجود در سطح پارتو بازدهی فنی مناسبی ندارند؛ به‌طوری‌که متوسط پارامتر LPSP برای آن‌ها ۵/۳٪ است. همچنین از تحلیل دقیق‌تر این شکل مشخص می‌شود که دست‌یابی به بازدهی فنی بالاتر برای یک سیستم بهینه چندهدفه وابستگی شدیدی با افزایش انتشار آلاینده زیست‌محیطی داشته و چندان تحت تأثیر افزایش هزینه‌های اقتصادی نیست. برای نمونه، متوسط انتشار کربن‌دی‌اکسید طراحی‌های پارتو دارای پتانسیل تأمین کامل انرژی (LPSP = 0%) ۲۱٫۶٪ بیشتر از میزان متوسط مجموعهٔ پارتو است؛ درحالی‌که هزینهٔ خالص فعلی آنها حدود ۲۵ درصد کمتر از میزان متوسط در سطح پارتو است.



شکل ۲. سطح پارتو نشان‌دهندهٔ مصالحه بین توابع هدف مسئله برای مجموعهٔ پارتو.

انتخاب طراحی نهایی

در این قسمت، طراحی نهایی از میان مجموعه گزینه‌های بهینه چندهدفه به کمک روش TOPSIS انتخاب می‌شود. وزن شاخص‌ها با استفاده از روش انتروپی محاسبه و در جدول ۸ گزارش شده است. طبق روش انتروپی، بر اساس ماتریس تصمیم، پارامترهای فنی و اقتصادی بیش از شاخص زیست‌محیطی در انتخاب طراحی نهایی مؤثر هستند.

جدول ۸. وزن‌های کلی شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی محاسبه شده از روش انتروپی.

پارامتر	وزن
هزینه خالص فعلی	۰.۳۶۴
احتمال عدم تأمین برق	۰.۳۷۷
انتشار چرخه عمر	۰.۲۵۹

در جدول ۹، مشخصات ۵ طراحی با بیشترین نمره در تحلیل تصمیم‌گیری با استفاده از روش TOPSIS در ترکیب با روش وزنی انتروپی رتبه‌بندی شده است. مشاهده می‌شود که بهترین طراحی‌ها از نوع متصل به شبکه هستند. سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی متشکل از ۶/۷ مگاوات فتوولتائیک، ۴/۲ مگاوات اینورتر با محدودیت خرید حداکثر ۸۰٪ بیشینه بار برق از شبکه (حالت ۵)، طراحی منتخب است. با وجود این‌که سیستم منتخب فاقد باتری است، توانسته است کل برق موردنیاز مجتمع را به‌وسیله انرژی فتوولتائیک و توان شبکه تأمین کند. این ریزشبکه ۲۳/۵٪ هزینهٔ خالص فعلی بیشتر و ۴۸/۸٪ انتشار معادل کربن‌دی‌اکسید بیشتر به ترتیب نسبت به طراحی‌های تک‌هدفه اقتصادی و زیست‌محیطی دارد.

جدول ۹. مشخصات ۵ طراحی دارای بیشتر نمره به‌دست‌آمده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه TOPSIS.

رتبه	سایز واحدهای سیستم انرژی هیبریدی نهایی								عملکرد فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی		
	PV (kW)	WT (kW)	Grid (٪)	FC (kW)	ELEC (kW)	Htank (kg)	BATT (kWh)	INV (kW)	NPC ($M)	LPSP (٪)	LCE (kton)
۱	۶۶۶۶.۷		۸۰					۴۱۹۰.۷	۲۱.۳	۰	۲۹۲.۵
۲	۶۶۶۶.۷		۱۰۰					۴۱۹۰.۷	۲۱.۳	۰	۳۰۴.۳
۳	۳۳۳۳.۳		۱۰۰	۲۵۰	۲۵۰			۲۰۹۵.۳	۲۱.۲	۰	۳۰۴.۴
۴	۳۳۳۳.۳		۱۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰		۱۸۸۵.۸	۲۱.۳	۰	۳۰۵.۰
۵	۳۷۵۱.۷		۱۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰		۱۸۳۸.۸	۲۱.۵		۳۰۲.۹

ارزیابی سیستم منتخب

در این قسمت، به ارزیابی و تحلیل دقیق فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی طراحی منتخب پرداخته می‌شود. در جدول ۱۰ تولید انرژی الکتریسیته (E)، حرارتی (H) و سایر خصوصیات فنی سیستم انرژی هیبریدی منتخب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پنل‌های فتوولتائیک بیشترین سهم را در تأمین انرژی داشته و اگرچه سیستم فاقد باتری بوده، به دلیل فروش برق به شبکه، انرژی اضافی بسیار ناچیز است؛ مشخص است که این اتلاف انرژی به دلیل محدودیت ظرفیت اینورتر است.

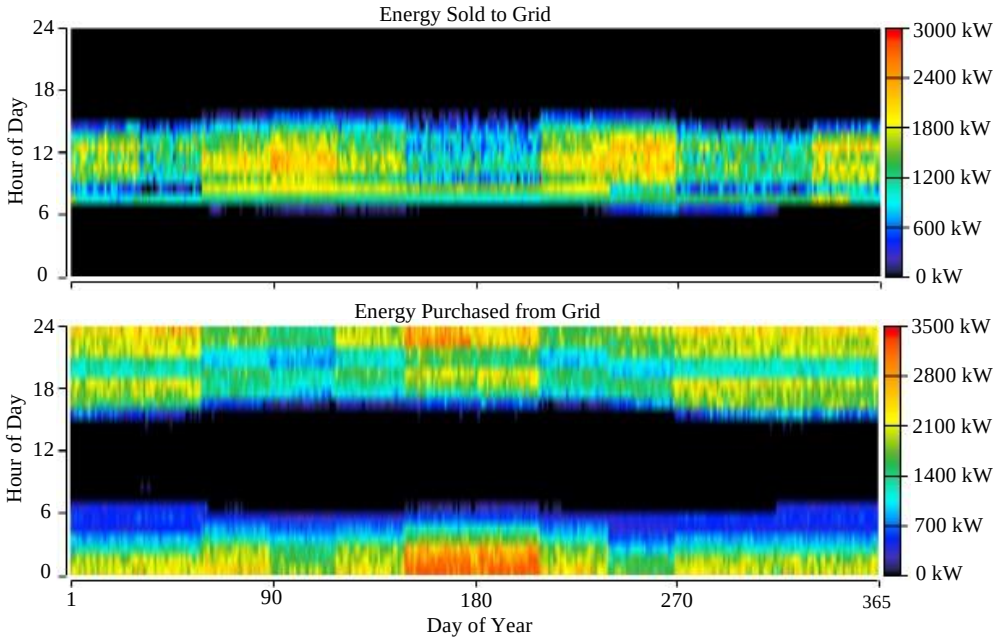
جدول۱۰. مشخصات فنی سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی منتخب نهایی.

Excess electricity (MWh/yr)	f_{ren} (٪)	H_{Boiler} (MWh/yr)	Grid sell (MWh/yr)	Grid purchase (MWh/yr)	E_{PV} (MWh/yr)
۲۳.۰	۱۸.۳	۳۶۲۹۴.۵	۴۰۵۰.۴	۸۱۶۹.۰	**۱۱۱۲۵.۳**
*(٪۰.۱)		**(٪۱۰۰)	**(٪۲۲.۳)	*(۴۲.۳)	***(۵۷.۷)**

* نسبت به کل انرژی تولیدشده

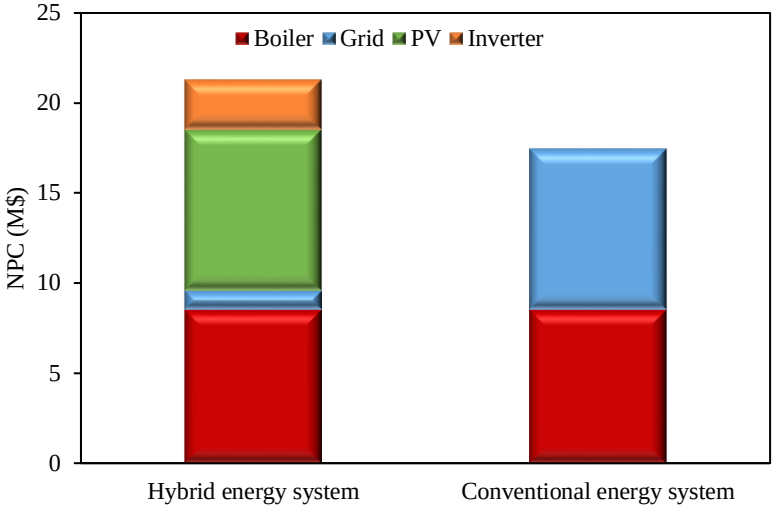
** نسبت به کل بار تأمین شده

در شکل ۳، میزان انرژی خریداری شده و فروخته شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در روز (بین ساعات ۶-۱۵) برق فتوولتائیک فروخته شده به شبکه بیشینه بوده و در بقیهٔ ساعات انرژی از شبکه سراسری خریداری می‌شود.



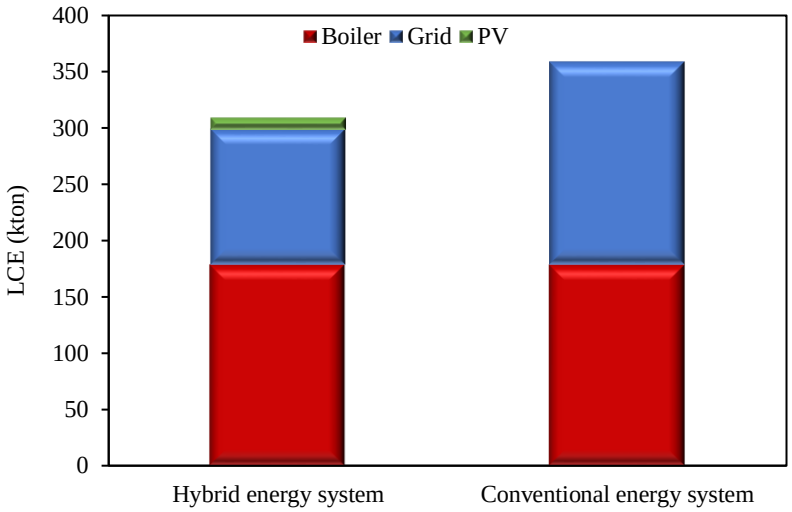
شکل ۳. میزان توان فروخته شده (بالا) به و خریداری شده (پایین) از شبکه در ساعات سال.

هزینهٔ خالص فعلی اجزای سیستم هیبریدی بهینه منتخب و سیستم تأمین انرژی مرسوم بر پایه برق شبکه و بویلر گازی در شکل ۴ خلاصه شده است. قابل ذکر است که هزینهٔ اجزا شامل مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، جایگزینی، عملکرد و نگهداری و سوخت منهای ارزش اسقاط است. برای سیستم منتخب متصل به شبکه (حالت ۵)، فتوولتائیک با ۴۱/۶٪ بیشترین سهم را در هزینهٔ خالص فعلی پروژه داشته و پس از آن بویلر (٪۴۰/۴)، اینورتر (٪۱۳/۱) و برق شبکه (٪۴/۹) قرار دارند. از مقایسه با سیستم انرژی مرسوم، مشاهده می‌شود که اتصال سیستم به شبکه می‌تواند هزینهٔ خالص شبکه برق را به دلیل سود ناشی از فروش برق اضافی فتوولتائیک به‌طور قابل توجهی نسبت به سیستمی که فقط برق از شبکه خریداری می‌کند، کاهش دهد.



شکل ۴. سهم واحدهای مختلف در هزینهٔ خالص فعلی سیستم انرژی مرسوم (سمت راست) و سیستم انرژی هیبریدی بهینه منتخب (سمت چپ).

در شکل ۵، سیستم‌های هیبریدی بهینه منتخب و مرسوم از نظر زیست‌محیطی مقایسه شده‌اند. بر این اساس، به‌کارگیری سیستم انرژی هیبریدی بهینه برای تأمین انرژی مجتمع مورد بررسی منجر به کاهش انتشار ۴۹/۵ کیلوتن معادل کربن دی‌اکسید (۱۳/۸٪) آلاینده زیست‌محیطی در طول ۲۰ سال عملکرد سیستم انرژی می‌شود. قابل ذکر است که سهم بویلر، برق و فتوولتائیک در انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم انرژی هیبریدی منتخب به ترتیب ۵۷/۶، ۳۹/۱ و ۳/۲ درصد است.



شکل ۵. سهم واحدهای انرژی در انتشار چرخهٔ عمر برای سیستم‌های انرژی هیبریدی بهینه و مرسوم.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم انرژی هیبریدی پیچیده شامل مجموعه‌ای از فناوری‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر برای تأمین نیازهای انرژی الکتریکی و حرارتی یک مجموعه مصرف‌کنندهٔ بزرگ انرژی در دو حالت مستقل از شبکه و متصل به شبکه بود. بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از سه تابع هدف احتمال عدم تأمین برق، هزینهٔ خالص فعلی و انتشار معادل کربن دی‌اکسید در چرخهٔ عمر انجام شد که به ترتیب بیانگر شاخص‌های مهم فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم انرژی هیبریدی هستند. واحدهای انرژی سیستم هیبریدی شامل فتوولتائیک، توربین بادی، پیل سوختی، الکترولایزر، منبع هیدروژن، باتری، اینورتر، بویلر و برق شبکه بود. برای تحقق اهداف پژوهش، پیکربندی‌های مختلف اجزای مذکور در نرم‌افزار HOMER مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده و با توسعهٔ برنامهٔ الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در نرم‌افزار MATLAB، مجموعهٔ پاسخ‌های بهینه چندهدفه از میان سیستم‌های انرژی شبیه‌سازی شده مشخص شد. پس از یافتن سطح پارتو، طراحی نهایی از میان جواب‌های نامغلوب به کمک یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (TOPSIS) انتخاب شد. در نهایت، شاخص‌های فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی طراحی نهایی ارزیابی و با سیستم انرژی مرسوم مقایسه شد. در ادامه خلاصه نتایج مهم پژوهش گزارش شده است. همچنین، با توجه به اهمیت بررسی بیشتر سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی، در پایان موضوعاتی برای مطالعه بیشتر این سیستم‌ها پیشنهاد شده است.

یافته‌ها

جمع‌بندی نتایج پژوهش انجام شده به شرح زیر است:

- حدود ۸۵ درصد طراحی‌های بهینه چندهدفه متصل به شبکه بودند.
- پیکربندی غالب در سطح پارتو، فتوولتائیک/پیل سوختی/الکترولایزر/مخزن هیدروژن/باتری/اینورتر/شبکه برق ٪۲۰ (حالت ۲) و بویلر بود (شامل ۱۶/۹٪ اعضای مجموعه پارتو).
- میانگین ظرفیت فتوولتائیک، توربین بادی، بیشینه برق قابل خریداری، پیل سوختی، الکترولایزر، مخزن هیدروژن، باتری و اینورتر در سطح پارتو به ترتیب ۵۹۶۱/۲ کیلووات، ۲۰۹/۳ کیلووات، ۱۴۸۶/۹ کیلووات (۳۵٪/۵)، ۲۸۵/۰ کیلووات، ۴۲۴/۳ کیلووات، ۲۵۹/۶ کیلوگرم، ۱۱۱۷۱/۹ کیلووات‌ساعت و ۱۷۸۶/۸ کیلووات بود.
- محدوده (متوسط) هزینهٔ خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار چرخهٔ عمر پاسخ‌های بهینه چندهدفه در طراحی‌های بهینه چندهدفه به ترتیب ۴۳/۸-۱۷/۲ (۲۷/۵) میلیون دلار، ۱۰-۰ (۴/۴) درصد و ۳۵۸/۶-۱۹۶/۶ (۲۷۲/۲) کیلوتن بود.
- وزن‌های کلی شاخص‌های هزینه خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و انتشار کربن‌دی‌اکسید برای ماتریس تصمیم شامل پاسخ‌های نامغلوب به ترتیب ۰/۳۶۴، ۰/۳۷۷ و ۰/۲۵۹ با استفاده از روش انتروپی محاسبه شد.
- طراحی نهایی منتخب شامل ۶۶۶۶/۷ کیلووات فتوولتائیک، ۸۰٪ برق شبکه (حالت ۵) و ۴۱۹۰/۷ کیلووات اینورتر بوده و هزینهٔ خالص فعلی، احتمال عدم تأمین برق و چرخهٔ عمر آن به ترتیب ۲۱/۳ میلیون دلار، ۰ درصد و ۲۹۲/۵ کیلوتن بود.
- در طراحی منتخب، فتوولتائیک و برق شبکه به ترتیب ۵۷/۷ و ۴۲/۳٪ انرژی الکتریکی مورد نیاز مجتمع را تأمین کرده و کل بار حرارتی به‌وسیلهٔ بویلر گازی تأمین می‌شود. همچنین، در این طراحی به میزان ۲۲٪/۳ کل بار تأمین شده، برق به شبکه فروخته شده و نسبت تجدیدپذیر و توان اضافی به ترتیب ۱۸/۳ و ۰/۱ درصد بود.

- در طراحی منتخب، سهم خالص فتوولتائیک، بویلر، اینورتر و برق شبکه در هزینه خالص فعلی سیستم انرژی هیبریدی به ترتیب ۴۱/۶، ۴۰/۴، ۱۳/۱ و ۴/۹ درصد بود.
- طراحی منتخب ۱۳/۸٪ انتشار چرخه عمر کمتری نسبت به سیستم انرژی مرسوم دارد.

پیشنهادها

اگرچه این مقاله بر اساس اهداف تعیین شده به خوبی نشان داد که انتخاب ظرفیت اجزای سیستم‌های انرژی هیبریدی بر اساس بهینه‌سازی چندهدفه، می‌تواند مزایای فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد، محدودیت‌هایی نیز در انجام آن وجود داشت. برای نمونه، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی انجام نشده و باتوجه‌به امکانات محدود نرم‌افزار، بهینه‌سازی ظرفیت بویلر میسر نشد. به‌علاوه این موارد، موضوع‌های زیر برای تحقیق بیشتر بر روی سیستم‌های انرژی هیبریدی پیشنهاد می‌شود:

- بررسی اثر سایر واحدهای انرژی حرارتی نظیر پمپ حرارتی و منبع ذخیره حرارت در بهینه‌سازی چندهدفه سیستم انرژی هیبریدی
- ارزیابی اثر تحلیل حساسیت بر سطح پارتو و طراحی منتخب منتج شده از تصمیم‌گیری چندمعیاره
- معرفی توابع هدف جدید نظیر اگزرژی و مصرف انرژی‌های اولیه در بهینه‌سازی چندهدفه و مقایسه نتایج
- بررسی کاربرد سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و وزن‌دهی در انتخاب طراحی نهایی
- بهینه‌سازی چندهدفه برای سایر الگوهای مصرف برای تولید آب گرم، حرارت، سرمایش و برق
- تحقیق در مورد سیستم‌های مدیریت انرژی مدرن و اثر آنها بر نتایج بهینه‌سازی چندهدفه

References

[1] International Energy Agency. (n.d.). *Data and statistics.* https://www.iea.org/data-and-statistics

[2] Faisal, F., Khan, M. N., Pervaiz, R., Muhamad, P. M., & Rashdan, M. O. J. (2021). Exploring the role of fossil fuels, hydroelectricity consumption, and financial sector in ensuring sustainable economic development in the emerging economy. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(5), 5953-5965. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10608-3

[3] Johnsson, F., Kjärstad, J., & Rootzén, J. (2019). The threat to climate change mitigation posed by the abundance of fossil fuels. *Climate Policy*, *19*(2), 258-274. https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1483885

[4] Shoaib, M., Siddiqui, I., Rehman, S., Khan, S., & Alhems, L. M. (2019). Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. *Journal of Cleaner Production*, *216*(7), 346-360. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.128

[5] Gyanwali, K., Komiyama, R., & Fujii, Y. (2020). Representing hydropower in the dynamic power sector model and assessing clean energy deployment in the power generation mix of Nepal. *Energy*, *202*, 117795. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117795

[6] Nowotny, J., Dodson, J., Fiechter, S., Gür, T. M., Kennedy, B., Macyk, W., Bak, T., Sigmund, W., Yamawaki, M., & Rhaman, K. A. (2018). Towards global sustainability: Education on environmentally clean energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 2541-2551. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.060

[7] British Petroleum Company. (2022). *Statistical Review of World Energy*. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf

[8] Renewable Energy and Energy Efficiency Organization(SATBA). (2008, November 10) . *Press conference of the respected CEO of Iran's New Energy Organization*. https://www.satba.gov.ir/fa/news/24/

[9] Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Yusaf, T., & Azmi, W. H. (2015). Solar energy in Iran: Current state and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *49*, 931-942. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.056

[10] Rinaldi, F., Moghaddampoor, F., Najafi, B., & Marchesi, R. (2021). Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *23*(3), 731-748. https://doi.org/10.1007/s10098-020-01906-y

[11] Bakić, V., Pezo, M., Stevanović, Ž., Živković, M., & Grubor, B. (2012). Dynamical simulation of PV/Wind hybrid energy conversion system. *Energy*, *45*(1), 324-328. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.063

[12] Sawle, Y., Gupta, S. C., & Kumar Bohre, A. (2016). PV-wind hybrid system: A review with case study. *Cogent Engineering*, *3*(1), 1189305. https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1189305

[13] Vick, B. D., & Neal, B. A. (2012). Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems. *Solar Energy*, *86*(5), 1197-1207. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.012

[14] Baneshi, M., & Hadianfard, F. (2016). Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions. *Energy Conversion and Management*, *127*, 233-244. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.008

[15] Barakat, S., Ibrahim, H., & Elbaset, A. A. (2020). Multi-objective optimization of grid-connected PV-wind hybrid system considering reliability, cost, and environmental aspects. *Sustainable Cities and Society*, *60*, 102178. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102178

[16] Lau, K. Y., Yousof, M. F. M., Arshad, S. N. M., Anwari, M., & Yatim, A. H. M. (2010). Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions. *Energy*, *35*(8), 3245-3255. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.008

[17] Fazelpour, F., Soltani, N., & Rosen, M. A. (2014). Feasibility of satisfying electrical energy needs with hybrid systems for a medium-size hotel on Kish Island, Iran. *Energy*, *73*, 856-865. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.097

[18] Romero Rodríguez, L., Salmerón Lissén, J. M., Sánchez Ramos, J., Rodríguez Jara, E. Á., & Álvarez Domínguez, S. (2016). Analysis of the economic feasibility and reduction of a building's energy consumption and emissions when integrating hybrid solar thermal/PV/micro-CHP systems. *Applied Energy*, *165*, 828-838. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.080

[19] Kasaeian, A., Rahdan, P., Rad, M. A. V., & Yan, W-M. (2019). Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: A case study. *Energy Conversion and Management*, *198*, 111810. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111810

[20] Misra, A., & Sharma, M. P. (2021). Development of Hybrid Energy System for a Rural Area. In D. Goyal, P. Chaturvedi, A. K. Nagar, & S. D. Purohit (Eds.), *Proceedings of Second International Conference on Smart Energy and Communication* (pp. 477-487). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6707-0_47

[21] Agajie, T. F., Ali, A., Fopah-Lele, A., Amoussou, I., Khan, B., Velasco, C. L. R., & Tanyi, E. (2023). A Comprehensive Review on Techno-Economic Analysis and Optimal Sizing

of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage Systems. *Energies*, *16*(2), 642. https://doi.org/10.3390/en16020642

[22] Basrawi, F., Yamada, T., & Obara, S. Y. (2014). Economic and environmental based operation strategies of a hybrid photovoltaic–microgas turbine trigeneration system. *Applied Energy*, *121*, 174-183. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.011

[23] Mehr, A. S., Lanzini, A., Santarelli, M., & Rosen, M. A. (2021). Polygeneration systems based on high temperature fuel cell (MCFC and SOFC) technology: System design, fuel types, modeling and analysis approaches. *Energy*, *228*, 120613. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120613

[24] Di Somma, M., Yan, B., Bianco, N., Graditi, G., Luh, P. B., Mongibello, L., & Naso, V. (2017). Multi-objective design optimization of distributed energy systems through cost and exergy assessments. *Applied Energy*, *204*, 1299-1316. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.105

[25] Mayer, M. J., Szilágyi, A., & Gróf, G. (2020). Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Applied Energy*, *269*, 115058. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115058

[26] Nesamalar, J. J. D., Suruthi, S., Raja, S. C., & Tamilarasu, K. (2021). Techno-economic analysis of both on-grid and off-grid hybrid energy system with sensitivity analysis for an educational institution. *Energy Conversion and Management*, *239*, 114188. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114188

[27] Lucarelli, G., Genovese, M., Florio, G., & Fragiacomo, P. (2023). 3E (energy, economic, environmental) multi-objective optimization of CCHP industrial plant: Investigation of the optimal technology and the optimal operating strategy. *Energy*, *278*, 127837. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127837

[28] Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources. (n.d.). *HOMER Pro User Manual*. https://homerenergy.com/products/pro/docs/index.html

[29] Alberizzi, J. C., Frigola, J. M., Rossi, M., & Renzi, M. (2020). Optimal sizing of a Hybrid Renewable Energy System: Importance of data selection with highly variable renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*, *223*, 113303. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113303

[30] Romero-Izquierdo, A. G., Gómez-Castro, F. I., Gutiérrez-Antonio, C., Barajas, R. C., & Hernández, S. (2019). Development of a biorefinery scheme to produce biofuels from waste cooking oil. In A. A. Kiss, E. Zondervan, R. Lakerveld, & L. Özkan (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (pp. 289-294). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50049-7

[31] Pettongkam, W., Roynarin, W., & Intholo, D. (2018). Investigation of PV and Wind Hybrid System for Building Rooftop. *International Energy Journal*, *18*(4), 331-352. http://reric journal.ait.ac.th/index.php/reric/article/view/1841

[32] Das, B. K., Hassan, R., Tushar, M. S. H. K., Zaman, F., Hasan, M., & Das, P. (2021). Techno-economic and environmental assessment of a hybrid renewable energy system using multi-objective genetic algorithm: A case study for remote Island in Bangladesh. *Energy Conversion and Management*, *230*(8), 113823. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113823

[33] Charabi, Y., & Abdul-Wahab, S. (2020). Wind turbine performance analysis for energy cost minimization. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, *7*(1), 5. https://doi.org/10.1186/s40807-020-00062-7

[34] Abid, H., Thakur, J., Khatiwada, D., & Bauner, D. (2021). Energy storage integration with solar PV for increased electricity access: A case study of Burkina Faso. *Energy*, *230*(8), 120656. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120656

[35] Jing, R., Wang, M., Brandon, N., & Zhao, Y. (2017). Multi-criteria evaluation of solid oxide fuel cell based combined cooling heating and power (SOFC-CCHP) applications for public buildings in China. *Energy*, *141*, 273-289. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.111

[36] Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Ramli, M. A. M., & Mekhilef, S. (2019). Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy. *Sustainability*, *11*(3), 683. https://doi.org/10.3390/su11030683

[37] Almutairi, K., Hosseini Dehshiri, S. S., Hosseini Dehshiri, S. J., Mostafaeipour, A., Issakhov, A., & Techato, K. (2021). Use of a Hybrid Wind—Solar—Diesel—Battery Energy System to Power Buildings in Remote Areas: A Case Study. *Sustainability*, *13*(16), 8764. https://doi.org/10.3390/su13168764

[38] Taghavifar, H., & Zomorodian, Z. S. (2021). Techno-economic viability of on grid micro-hybrid PV/wind/Gen system for an educational building in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *143*(9), 110877. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110877

[39] Mubaarak, S., Zhang, D., Chen, Y., Liu, J., Wang, L., Yuan, R., Wu, J., Zhang, Y., & Li, M. (2020). Techno-Economic Analysis of Grid-Connected PV and Fuel Cell Hybrid System Using Different PV Tracking Techniques. *Applied Sciences*, *10*(23), 8515. https://doi.org/10.3390/app10238515

[40] Rezk, H., Alghassab, M., & Ziedan, H. A. (2020). An Optimal Sizing of Stand-Alone Hybrid PV-Fuel Cell-Battery to Desalinate Seawater at Saudi NEOM City. *Processes*, *8*(4), 382. https://doi.org/10.3390/pr8040382

[41] Katsigiannis, Y. A., Georgilakis, P. S., & Karapidakis, E. S. (2010). Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables. *Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation*, *4*(5), 404-419. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2009.0076

[42] Ministry of Energy. (n.d.). *Stats & Information Network*. https://isn.moe.gov.ir/?lang=en-us

[43] Vianna Neto, J. X., Guerra Junior, E. J., Moreno, S. R., Hultmann Ayala, H. V., Mariani, V. C., & Coelho, L. D. S. (2018). Wind turbine blade geometry design based on multi-objective optimization using metaheuristics. *Energy*, *162*(2), 645-658. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.186

[44] Ishibuchi, H., Masuda, H., & Nojima, Y. (2014, October 05-08). *Selecting a small number of non-dominated solutions to be presented to the decision maker*. 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, California, USA. https://doi.org/10.1109/SMC.2014.6974525

[45] Xu, C., Ke, Y., Li, Y., Chu, H., & Wu, Y. (2020). Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS. *Energy Conversion and Management*, *215*, 112892. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112892

[46] Elkadeem, M. R., Younes, A., Sharshir, S. W., Campana, P. E., & Wang, S. (2021). Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis. *Applied Energy*, *295*, 117071. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117071

[47] Wang, Y., Wang, X., Yu, H., Huang, Y., Dong, H., Qi, C., & Baptiste, N. (2019). Optimal design of integrated energy system considering economics, autonomy and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, *225*(11), 563-578. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.025

[48] Kumar, C., Rana, K. B., & Tripathi, B. (2020). Performance evaluation of diesel–additives ternary fuel blends: An experimental investigation, numerical simulation using hybrid Entropy–TOPSIS method and economic analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, *20*(10), 100675. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100675

[49] Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (2017). A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *78*, 1410-1423. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.039

[50] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*(3), 379-423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

[51] Zeleny, M. (2012). *Multiple Criteria Decision Making Kyoto 1975*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45486-8