

## Multi-objective Optimization Based on Transient Simulation Method and Response Surface (RSM) in Energy Production systems

Abbas Motallebi,<sup>1</sup> seyed Ahmad Shayanniya,<sup>2\*</sup> Mehdi Amirmiandargh,<sup>3</sup> Ebrahim Niknaghsh<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Management, Firuzkoh Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
motallebi4saipa@gmail.com

<sup>2</sup> Department of Industrial Management, Firuzkoh Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
sheibat@yahoo.com

<sup>3</sup> Department of Mathematics, Firuzkoh Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
miandargh@iaufb.ac.ir

<sup>4</sup> Department of Industrial Management, Firuzkoh Branch, Islamic Azad University, Firozko, Iran  
niknaghsh@yahoo.com

**Keywords:**  
simulation  
renewable energies  
optimization  
transient systems  
multi-response optimization

**Abstract:** The aim of this research is to optimize the combined system consisting of solar photovoltaic panels and a diesel generator as two independent decision variables and five responses or the optimization objective function, including system electricity consumption, system gas consumption, diesel fuel consumption, the amount of bio-pollutants reduction. The environment and the return on investment are dependent variables of this research; an optimization method is used to achieve the best possible design in Transis software, and the response level method is used to find the best combination of selected factors in the system. The main purpose of the response surface is to estimate and predict the effect of independent variables on the dependent variable after implementing the system in Transis software and optimizing by the response surface method. The results showed that the area of photovoltaic panels in the optimal state is equal to 11770 square meters and the optimal diesel generator power is equal to 984 kW. Also, in optimal conditions, the system has the best performance, and the combined utility is equal to 0.740, which indicates that the performance of the optimal system is close to the ideal state, i.e., one. In terms of energy consumption, the optimal system achieves a total electricity consumption of 1026860 kilowatts, a total gas consumption of 205182 cubic meters, a total diesel fuel consumption of 1338030 liters, an amount of environmental pollutants of 3693.23 kilograms, and an investment return period of 1.679 years. Also, strategy one, which includes the direct purchase of the total electricity demand from the grid and the direct sale of the total electricity produced by the system to the grid, seems to be economically more economical. The results of the simulation showed that the investigated combined system is a suitable solution to simultaneous energy production. It is electric and thermal, and it is capable of producing electric and thermal energy throughout the year.

### Original Research Article

**Paper History:**

Received: 14/02/2024

Revise: 29/05/2024

Accepted: 02/06/2024

**How to cite this article:** Motallebi, A., Shayanniya, H., Amirmiandargh, M., Niknaghsh, E., "Multi-objective optimization based on transient simulation method and response surface (RSM) in energy production systems", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 30-45, Spring 2024. <https://doi.org/10.22052/EEM.2024.254398.1052>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Introduction

The purpose of the research is to optimize an energy production system with a focus on the use of renewable energy and reducing environmental pollutants using a transient simulation method and an experimental design using the response surface method. Three independent factors, including the area of installed solar panels, the power of the diesel generator, and the solar collectors used to produce the spa have been selected as the main design variables of the proposed system. In the following, five answers or optimization objective functions were selected. To be considered from the point of view of energy are total electricity consumption, total gas consumption, total diesel fuel consumption, and the production rate of environmental pollutants. A return on investment was chosen as an economic answer for optimization. After that, it was checked through two strategies of transmission and of the purchase of electricity to the main grid and also through two modes, with battery storage and without battery.

## Materials and Methods

In order to simulate the combined energy production system centered on renewable energies, TRNSYS software has been used. In this research, solar panels, as a source of electricity production, and a diesel generator, as a support for the solar system or transmission to the power grid, have been used; one of the advantages of this plan is the high maneuverability in the use of equipment so there is a high overlap. It is very important to support the production lines during power outages occurring due to the problems which lead to the stoppage of the production lines; in addition to other support cases such as the use of diesel heat or the use of solar water heaters for pre-operation, the use of boiler heating in absorption chillers will be investigated. To obtain the best energy-economical performance of the investigated system, the response surface method was used. Also, the effect of changes in the effective factors of the combined system was studied on the specified energy-economic responses. Factors are independent variables for accurate decision-making in the discussion of the design of the researched hybrid system. On the other hand, the answers show the energy-economic indicators of the performance of the combined system under the influence of the factors selected for optimization. The response surface is a statistical method that is used to optimize a specific response, where the response is influenced by several factors based on the selected factors. The response surface is a set of experiments, which design and suggest computer simulations that evaluate and simulate answers at those points.

## Results

In the results of this research, it was observed that the coupled cogeneration system using solar panels and diesel generators can be a suitable solution to the simultaneous production of electrical and thermal energy, considering the needs of buildings. This system provides the ability to adjust and optimize fuel consumption and reduce energy costs. The simulation results showed that the investigated combined system is able to produce electrical and thermal energy throughout the year, according to the weather conditions of the study area.

The simulation results, using the response surface method, showed that the area of solar panels in the optimal state was equal to 11770 square meters, and the power of the optimal diesel generator was equal to 984 kilowatts. Also, in optimal conditions, the system performs best; the combined utility, which is equal to 0.740, indicated that the performance of the optimal system was close to the ideal state. In terms of energy consumption, the optimal system achieved a total electricity consumption of 1026,860 kilowatts, a total gas consumption of 205,182 cubic meters, a total diesel fuel consumption of 1,338,030 liters, an amount of environmental pollutants of 3,693.23 kilograms, and an investment return period of 1,679 years.

## Discussion and Conclusion

From the analysis of the results, it can be concluded that the optimal system combined with diesel generators and solar panels is able to provide the total electricity required by the complex not only in peak hours (when the demand for electricity is high) but also in low peak hours (when the demand is low). This system demonstrates that at certain time there is the ability to generate excess electricity that can be sold to the public power grid. This feature has important advantages:

- The use of renewable energy sources: the simultaneous use of diesel generators and solar panels exploits renewable energy sources. This helps reduce dependence on fossil fuels and helps preserve the environment.

- Stable electricity supply: The combined optimal system has the ability to supply stable electricity and provides the required electricity for the complex at all times, even during low load hours.

- Reducing fuel costs: using solar panels during off-peak hours reduces diesel generators fuel consumption. This enhancement in system efficiency reduces fuel costs and system payback period.

- The sale of excess electricity: at times when the electricity production by the diesel generator and solar panels is more than the electricity demand of the complex, this excess electricity can be sold to the public power grid and be used as an additional source of income.

## بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر روش شبیه‌سازی گذری و سطح پاسخ (RSM) در سیستم‌های تولید انرژی

عباس مطلبی<sup>۱</sup>، سید احمد شایان‌نیا<sup>۲\*</sup>، مهدی امیر میاندرق<sup>۳</sup>، ابراهیم نیک‌نقش<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاداسلامی، فیروزکوه، ایران،

motallebi4saipa@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاداسلامی، فیروزکوه، ایران، sheibat@yahoo.com

<sup>۳</sup> استادیار، گروه ریاضی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاداسلامی، فیروزکوه، ایران، miandargh@iaufb.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاداسلامی، فیروزکوه، ایران، nikhaghsh@yahoo.com

### واژه‌های کلیدی:

شبیه‌سازی  
انرژی‌های تجدیدپذیر  
بهینه‌سازی  
سیستم‌های گذری  
بهینه‌سازی چندپاسخی

**چکیده:** هدف این پژوهش بهینه‌سازی سیستم ترکیبی متشکل از پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی و دستگاه دیزل ژنراتور به‌عنوان ۲ متغیر تصمیم مستقل و ۵ پاسخ و یا تابع هدف بهینه‌سازی شامل مصرف برق سیستم، مصرف گاز سیستم، مصرف سوخت دیزل، میزان کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و همچنین بازگشت سرمایه به‌عنوان متغیرهای وابسته تحقیق‌اند. برای دستیابی به بهترین طراحی ممکن در نرم‌افزار ترنسیس از یک روش بهینه‌سازی استفاده می‌شود. درضمن برای پیدا کردن بهترین ترکیب فاکتورهای انتخاب‌شده در سیستم، از روش سطح پاسخ استفاده شده است. هدف اصلی سطح پاسخ، برآورد و پیش‌بینی تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است. پس از پیاده‌سازی سیستم در نرم‌افزار ترنسیس و بهینه‌سازی توسط روش سطح پاسخ نتایج نشان داد که مساحت پنل‌های فتوولتائیک در حالت بهینه برابر با ۱۱۷۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور بهینه برابر با ۹۸۴ کیلووات است. همچنین در شرایط بهینه، سیستم بهترین عملکرد را داشته و مطلوبیت ترکیبی برابر با ۰/۷۴۰ است. این عدد نشان می‌دهد که عملکرد سیستم بهینه و نزدیک به حالت ایدئال یعنی ۱ است. از نظر مصرف انرژی، سیستم بهینه به مصرف کل برق ۱۰۲۶۸۶۰ کیلووات، کل مصرف گاز ۲۰۵۱۸۲ متر مکعب، کل مصرف سوخت دیزل ۱۳۳۸۰۳۰ لیتر، میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی ۳۶۹۳/۲۳ کیلوگرم و دوره بازگشت سرمایه ۱/۶۷۹ سال دست پیدا می‌کند. همچنین استراتژی ۱ که شامل خرید مستقیم کل دیماند برق از شبکه و فروش مستقیم کل برق تولیدی سیستم به شبکه است، از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر به نظر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم ترکیبی مورد بررسی، یک راهکار مناسب برای تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی بوده و قادر به تولید انرژی الکتریکی و حرارتی در طول سال است.

### مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

## ۱. مقدمه

با توجه به قانون ۱۶ جهش تولید دانش‌بنیان، صنایع موظف‌اند بخشی از برق مصرفی خود را از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده کنند. در ضمن به دلیل محدودیت‌های مصرف برق در فصل گرم سال و قطع برق صنایع، شرکت‌ها برای جلوگیری از توقفات خطوط تولیدی ملزم به استفاده از این تجهیزات شده‌اند. از این رو اهمیت بررسی سیستم‌های پشتیبان که به صورت موازی وظیفه تولید انرژی برق را دارند بیشتر شده است. یکی از مهم‌ترین تجهیزات قابل استفاده در محل پروژه انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی است. در مطالعه به بررسی و بهینه‌سازی استفاده از سیستم هیبریدی شامل پنل‌های خورشیدی و دستگاه دیزل ژنراتور برای پشتیبانی از خطوط تولیدی در یک شرکت تولید قطعات بدنه خودرو پرداخته شده است. در خصوص بهینه‌سازی سیستم‌های هیبریدی مطالعاتی انجام شده است که در ادامه بررسی خواهد شد.

آژانس بین‌المللی انرژی،<sup>۱</sup> انرژی تجدیدپذیر را انرژی ناشی از فرایندهای طبیعی، به‌طور دائمی و پایدار تکرارپذیر، و در اشکال مختلف مشتق از خورشید یا حرارت تولیدی از اعماق زمین تعریف و انرژی تولیدی از منابع خورشید، باد، زیست‌توده، زمین‌گرمایی، برق آبی، اقیانوس، سوخت‌های زیستی و هیدروژن ناشی از منابع تجدیدپذیر را به‌عنوان انرژی‌های تجدیدپذیر دسته‌بندی می‌کند [۱].

در مطالعه‌ای که درخصوص استفاده از سیستم‌های ترکیبی تولید انرژی انجام شده، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای اندازه‌گیری و راه‌اندازی یک سیستم انرژی هیبریدی متشکل از فتوولتائیک خورشیدی، انرژی باد، ژنراتور دیزل و ذخیره‌سازی باتری بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که روش پیشنهادی طول عمر دیزل ژنراتور را تا ۲۲/۹ درصد افزایش می‌دهد. درصد بارگذاری بهینه دیزل ژنراتور ۷۵ درصد است. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی هزینه کل و انتشار کربن سیستم انرژی هیبریدی را به ترتیب ۳/۵٪ و ۰/۷٪ کاهش داد. هزینه هم‌سطح انرژی و دوره بازپرداخت سیستم ریزشبه‌هیبریدی پیشنهادی به ترتیب ۰/۱۶ دلار/کیلووات و ۸ سال است که تأیید می‌کند که سیستم پیشنهادی از نظر اقتصادی امکان‌پذیر است [۲]. در مطالعه‌ای دیگر که در کشور نپال و منطقه کاتماندو انجام شده است، به بررسی میزان مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده زیست‌محیطی پرداخته و امکان کاهش آن‌ها را از طریق تشکیل یک ریزشبه‌هیبریدی بررسی می‌کند. در این تحقیق دو سیستم تولید انرژی شامل پنل فتوولتائیک و دیزل ژنراتور توسط نرم‌افزار هومر مورد تحلیل و

بهینه‌سازی قرار گرفت. بهینه‌سازی انجام‌شده ریزشبه‌هیبریدی بر دیزل ژنراتور و پنل خورشیدی منجر به کاهش مصرف سوخت ویژه تا ۱۹٪ و کاهش هزینه تا ۵٪ شده است. همچنین انتشار آلاینده اصلی هوا کاهش می‌یابد. در ضمن اگر از ریزشبه‌هیبریدی مبتنی بر پنل خورشیدی استفاده شود، انتشار گازهای گلخانه‌ای را می‌توان تا ۱۰٪ کاهش داد، اما هزینه ۲۷ درصد افزایش می‌یابد [۳]. در تحقیق دیگری که در کشور هند و در منطقه کشمیر انجام شده است، امکان‌سنجی سیستم مبتنی بر پنل خورشیدی و دیزل ژنراتور را با استفاده از نرم‌افزار هومر مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار می‌دهد. با توجه به نتایج بهینه‌سازی، راه‌حل ایدئال استفاده از پنل‌های خورشیدی ۱۶۱۵۷ دلار است. آرایه‌های پنل‌های خورشیدی مورد استفاده ۱/۹۸ کیلووات هستند و ژنراتور ۱/۴۰ کیلووات برای سیستم پیشنهادی مورد نیاز است. سیستم پیشنهادی دارای تلفات حرارتی سطح ۰/۴۲۸۰ دلار است. همچنین از ۸۸۰ راه‌حل شبیه‌سازی شده، ۶۸۰ مورد امکان‌پذیر بود. سیستم پیشنهادی متشکل از نانوذرات سیلیکونی است که سلول‌های خورشیدی را به دلیل کارایی بالا تقویت می‌کنند [۴]. در مطالعه دیگری که در یکی از روستاهای هند شرقی انجام شده است، با استفاده از منابع انرژی خورشیدی، زیست‌توده، دیزل ژنراتور با استفاده از مدل بهینه‌سازی ترکیبی سیستم بهینه ارائه می‌شود. این تحقیق از چهار مدل استفاده کرده و نتایج نشان داد که هزینه برق و هزینه خالص فعلی مناسب‌ترین پیکربندی هیبریدی بهینه‌سازی شده کم‌هزینه (۶۰۰ کیلووات فتوولتائیک خورشیدی/ژنراتور زیست‌توده ۱۰ کیلووات/ژنراتور دیزلی ۵۰ کیلووات/باتری ۱۰۰۰ کیلووات ساعت/مبدل دوطرفه ۲۰۰ کیلووات) است. این سیستم از نظر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود اقتصاد سیستم سود می‌برد. استفاده از منبع انرژی خورشیدی در مدل‌سازی بهینه سیستم دوره بازپرداخت ۲/۰۴ سال و بازپرداخت ۲/۲۵ سال از سیستم فتوولتائیک خورشیدی را فراهم می‌کند [۵]. پژوهشی که در منطقه چاد انجام شده است، امکان‌سنجی استفاده از پنل‌های خورشیدی، دیزل، باد و باتری هیبریدی مستقل برای پاسخ‌گویی به تقاضای بار الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار متلب ارزیابی می‌شود. پس از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی انجام‌شده مشاهده شد که پیکربندی‌های بهینه عبارت‌اند از: پنل‌های خورشیدی، دیزل ژنراتور و باتری برای مصرف‌کنندگان و سایت‌های مختلف در محدوده ۰/۳۶۷ و ۰/۵۲۹ دلار بر کیلووات که نشان می‌دهد بازدهی برخی از سایت‌ها کمتر از هزینه تولید انرژی در منطقه است و بنابراین سودآور است. استفاده از این سیستم‌های هیبریدی در مقایسه با دیزل ژنراتور تکی منجر به انتشار کمتر آلاینده‌های

راهکار مناسب شناخته می‌شود [۱۰]. در یکی دیگر از تحقیقات انجام شده، یک سیستم ترکیبی پنل خورشیدی و استفاده از دیزل ژنراتور برای سه مدل مختلف، یعنی سری، سوئیچ و موازی بررسی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. افزایش سهم تولید برق خورشیدی فتوولتائیک از ۲۱/۳ به ۸۲/۱ درصد، وابستگی به مجموعه دیزل ژنراتور را از ۷۸/۷ به ۱۷/۹ کاهش می‌دهد [۱۱]. تحقیقی در کشور اندونزی و در بخش جزیره لامپونگ درزمینه بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل یک سیستم هیبریدی نیروگاه خورشیدی و نیروگاه دیزلی که سازگار با محیط‌زیست و قابل اعتماد باشد بررسی شد. نتایج نشان داد که نیروگاه خورشیدی در سیستم پیشنهادی متشکل از ۴۶۰ پنل خورشیدی است که ۲۳ آرایه را تشکیل می‌دهند که در آن واحد یک پنل دارای ظرفیت ۳۷۰ وات است. مقادیر انرژی خروجی حاصل از شبیه‌سازی و محاسبات دستی خوب است و دقت بالای ۹۰٪ را نشان می‌دهد؛ که نشان‌دهنده خوب بودن نتایج تحقیق است [۱۲]. در تحقیقی که در این زمینه انجام شده است، بر روی مطالعه فنی-اقتصادی و اندازه بهینه انرژی خورشیدی، بادی، ژنراتور زیستی دیزل و ساختار ذخیره انرژی تمرکز دارد. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که اگر هزینه سوخت زیستی ۵۰/۸٪ کاهش یابد، هزینه‌های انرژی حدود ۳۶/۶٪ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، اگر هزینه ژنراتور زیستی دیزل ۱۷ درصد کاهش یابد، هزینه‌های انرژی ۲/۷ درصد کاهش می‌یابد. در نهایت، اگر مقدار حدی قابلیت اطمینان از ۲ به ۰٪ کاهش یابد، ۱۳/۲٪ افزایش می‌یابد [۱۳]. اتیوپی نزدیک به خط استوا و دارای پتانسیل عظیمی به‌عنوان منبع انرژی خورشیدی است که هنوز محقق نشده است. در تحقیقی که در دانشگاه دبر مارکوس انجام شده است، یک مطالعه اولیه بر روی امکان‌سنجی فنی-اقتصادی مجموعه دیزل ژنراتور موجود و سیستم پنل‌های فتوولتائیک با توان نامی ۵۰۰ کیلووات را مورد بررسی قرار می‌دهد. همان‌طور که مقایسه اقتصادی نقطه سر به سر نشان می‌دهد، مجموعه ژنراتور مبتنی بر دیزل پس از ۵ سال به دلیل هزینه‌های عملیاتی و نگهداری بالا مقرون‌به‌صرفه نیست. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، سیستم اولویت پنل خورشیدی همراه با باتری پیشنهادی با ژنراتور دیزلی برای انعطاف‌پذیری سازگارتر با محیط‌زیست است و رد پای کربن را تا ۹۴ درصد کاهش می‌دهد [۱۴]. در مطالعه‌ای دیگر که در پنج شهر مختلف در منطقه جنوب صحرائی آفریقا شامل بوگو، بوگمورو، دانتیکا، گارل و کاسولا انجام شده، به یک طراحی و انتخاب بهینه بر روی چهار سیستم انرژی شامل منبع تغذیه، هزینه انرژی، انتشار کل و ضریب مشارکت دیزل ژنراتور با استفاده از روش

زیست‌محیطی در سال (بین ۰ تا ۱۵۶۷۰ کیلوگرم در سال) می‌شود [۶]. در مطالعه‌ای دیگر که در کشور کامرون و شهر فیگویل انجام شده، بهینه‌سازی یک سیستم فتوولتائیک ترکیبی چندمنبعی شامل پنل‌های خورشیدی، باد، دیزل ژنراتور و پیل سوختی برای برآورده کردن سه حالت واقعی تقاضا برای فعالیت‌های سنگین، متوسط و کوچک بهینه‌سازی شده است. نتایج نشان داد که سیستم پنل‌های خورشیدی، باد، دیزل ژنراتور و پیل سوختی از نظر اقتصادی بهترین انتخاب برای تأمین انرژی است. پیکربندی پنل‌های خورشیدی، باد، دیزل ژنراتور و پیل سوختی یک گزینه مناسب است. انتشار کلی آلاینده‌های زیست‌محیطی سالانه ۲۹۴۶/۱، ۲۰۴۳/۲ و ۱۵۰۴/۲ کیلوگرم مربوط به مصرف کل سوخت سالانه است. ۱۱۱۵/۹، ۷۷۴/۱ و ۵۶۹/۸ لیتر به ترتیب برای فعالیت‌های سنگین، متوسط و کوچک است [۷]. در تحقیق دیگری، به‌طور بهینه طراحی و ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم پایدار هیبریدی فتوولتائیک/بیوگاز/دیزل/باتری برای پاسخ‌گویی به بار برق روستایی در شرق چین بررسی شده است؛ نتایج نشان داد که سیستم هیبریدی شامل پنل‌های خورشیدی و دیزل ژنراتور و باتری شامل ماژول‌های ۴۰۰ کیلووات، یک ژنراتور بیوگاز ۱۰۰ کیلووات و ۴۰۰ وات باتری است. اگر ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شود، ادغام پنل خورشیدی دیزل ژنراتور در سیستم‌های انرژی پایدار هیبریدی ممکن است انتخاب خوبی برای روستاهای کشورهای در حال توسعه باشد [۸]. پژوهش دیگری که در یکی از شهرهای کشور عراق انجام شده، به بررسی طراحی بهینه سیستم ترکیبی شامل پنل‌های خورشیدی، دیزل و باتری خارج از شبکه پرداخته است؛ نتایج نشان می‌دهد که مقادیر به ترتیب ۴/۱۹ میلیون دلار، ۳۳/۹ درصد و ۹۵۷۴۷۷ کیلوگرم محاسبه شده است. تحلیل حساسیت نیز برای کاهش اثر پارامترهای ورودی بر نتایج بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای بحرانی انجام می‌شود. یافته‌های تحقیق می‌تواند نقشی مهم در توسعه سیستم‌های مدیریت انرژی مؤثرتر داشته باشد [۹]. از مطالعات انجام شده در کشور ایران و شهر هرمزگان به بررسی امکان‌سنجی استفاده از سیستم چندمنبعی متشکل از توربین بادی و پنل‌های خورشیدی به‌عنوان منابع تجدیدپذیر و سیستم پشتیبانی متشکل از مبدل، واحد باتری و دیزل ژنراتور برای تأمین انرژی ساختمان‌های این شهر پرداخته شده است. مناسب‌ترین پیکربندی سیستم شامل تمام اجزای تعریف شده، به‌ویژه پنل‌های خورشیدی با ظرفیت ۱۰ کیلووات، یک توربین بادی با ظرفیت ۲۰ کیلووات به دست آمده است. یک مبدل با ظرفیت ۱۰ کیلووات، ۲۰ باتری و دیزل ژنراتور با ظرفیت ۲۰ کیلووات یک

برای پیش‌گرمایش دیگ آب گرم نیز بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

- کاربری محل پروژه: در مطالعات بررسی شده بیشتر در بخش خانگی تحلیل صورت پذیرفته است که پارامترهای مورد نیاز برای عملیات بهینه‌سازی محدود می‌باشد. حال تحقیق انجام شده در مکان صنعتی است و بررسی در این مکان نیازمند تحلیل پارامترهای متعدد تولیدی نظیر شیفتهای تولیدی، تغییر تعداد نفرات در زمانهای مختلف تولید، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، هزینه توقفات خطوط تولید، نوع محصول تولیدی، مصرف انرژی در دقیقه برای کل شرکت و تفکیک مکان‌های مورد استفاده و سایر پارامترهای مهم مورد نیاز است.

## ۲. اهداف سیستم مورد مطالعه

هدف این پژوهش بهینه‌سازی سیستم ترکیبی متشکل از پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی و دستگاه دیزل ژنراتور به‌عنوان دو متغیر تصمیم مستقل و ۵ پاسخ و یا تابع هدف بهینه‌سازی شامل مصرف برق سیستم، مصرف گاز سیستم، مصرف سوخت دیزل، میزان کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و همچنین بازگشت سرمایه به‌عنوان متغیرهای وابسته تحقیق هستند. برای دستیابی به بهترین طراحی ممکن در نرم‌افزار ترنسیس از یک روش بهینه‌سازی استفاده می‌شود. درضمن پس از آن در دو استراتژی انتقال و خرید برق به شبکه اصلی و همچنین در دو حالت با ذخیره‌ساز باتری و بدون باتری نیز بررسی می‌شود. جدول (۱) و جدول (۲)، اطلاعات ساعت و تعداد افراد حاضر در محل و اطلاعات ساختمان‌های تولیدی و اداری در پروژه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): جزئیات ساعت حضور و تعداد افراد در محل

ردیف	شیفت	ساعت کارکرد	تعداد نفرات	محل فعالیت
۱	یک	۷ تا ۱۶	۵۰۰	تولیدی و ستادی
۲	دو	۱۶ تا ۲۴	۱۵۰	تولیدی
۳	سه	۲۴ تا ۷	۱۵۰	تولیدی

جدول (۲): اطلاعات مصرف انرژی ساختمان‌های تولیدی و اداری

نام ساختمان	کاربری	متراژ (متر مربع)	تعداد نفرات شاغل در محل	میزان مصرف برق کیلووات
سالن تولید	پرسکاری	۱۷۰۰۰	۳۰۰	۱۱۰۰
سالن مونتاژ	جوشکاری	۳۰۰۰	۲۰۰	۴۰۰
ساختمان اداری	ستادی	۱۱۰۰	۳۰	۳۰۰

بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه پرداخته شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که صرفه‌جویی قابل توجهی با استراتژی مدیریت سمت تقاضا انجام می‌شود و پیکربندی ۱ با مدیریت سمت تقاضا بهترین سیستم انرژی برای جوامع بوگو، گارال و کاسولا است [۱۵]. در مطالعه‌ای که در شهر کالیفرنیا انجام شده، به دلیل مشکلات این شهر استفاده از پنل‌های خورشیدی به‌جای دیزل ژنراتور مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق ارزش اقتصادی و مزایای زیست‌محیطی جایگزینی ژنراتورهای پشتیبان دیزلی با پنل‌های خورشیدی برای ساختمان‌های عمومی در کالیفرنیا را تعیین می‌کند، که هدف انتشار خالص کربن صفر در بخش برق تا سال ۲۰۴۵ است. با استفاده از مدل یکپارچه‌سازی و بهینه‌سازی انرژی، این مطالعه نشان می‌دهد که جایگزینی ژنراتورهای پشتیبان دیزلی تنها در یک ساختمان تقریباً ۳ میلیون دلار در هزینه‌های عمومی صرفه‌جویی می‌کند و بیش از ۱۰۰۰۰ تن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی را در یک دوره ۲۰ ساله کاهش می‌دهد [۱۶].

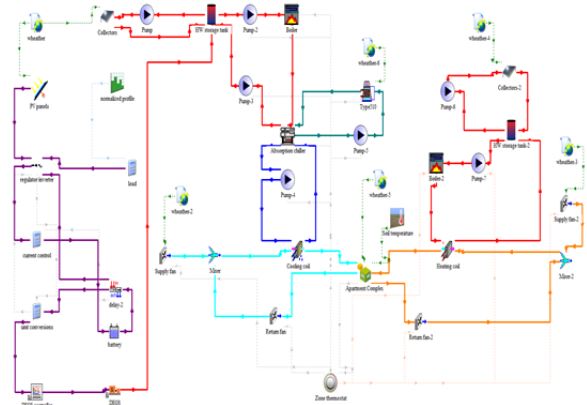
براساس پیشینه تحقیق ارائه شده در کشورهای مختلف و با کاربری‌های متفاوت، مشخص شد که سیستم هیبریدی یک گزینه مناسب برای تولید برق پاک است. درضمن در مقایسه با مدل پیشنهادی تحقیق در تمامی توابع هدف شامل میزان تولیدی، میزان سوخت مورد نیاز، میزان کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و بازگشت سرمایه سیستم بهینه می‌باشد. لازم به توضیح است که نوآوری تحقیق انجام شده در چند بخش ارائه می‌شود:

- حل مسئله: در مطالعات بررسی شده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی نظیر نرم‌افزار هومر، متلب و با الگوریتم‌های مختلف استفاده شده است، حال در تحقیق انجام شده با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس و روش پاسخ سطح سیستم بهینه می‌شود، روش پاسخ سطح یک روش آماری است تا تعاملات بین متغیرهای مستقل در فرایندها را بررسی کند و بهینه‌سازی آن‌ها را انجام دهد. هدف اصلی سطح پاسخ، برآورد و پیش‌بینی تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است. برای این منظور، از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود که رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته را توصیف می‌کنند.

- توابع هدف: با بررسی مطالعات گذشته مشخص شد که توابع هدف شامل میزان مصرف برق مصرفی، میزان مصرف سوخت، میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی و بازگشت سرمایه مورد بررسی قرار گرفته است. حال در تحقیق انجام شده علاوه بر موارد اعلام شده موارد میزان گاز مصرفی، قابلیت اتصال به شبکه سراسری، استفاده از گرمای دیزل

### ۳. پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار TRANSYS

برای شبیه‌سازی سیستم تولید انرژی ترکیبی با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر از نرم‌افزار ترنسیس<sup>۱</sup> استفاده شده است. در ضمن شکل (۱) که برگرفته از نرم‌افزار ترنسیس است، نحوه پیاده‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): سیستم چندمنبعی با پنل فتوولتائیک و کلکتور خورشیدی مدل‌شده در نرم‌افزار ترنسیس

#### ۱.۳. بررسی سیستم

در این تحقیق استفاده از پنل‌های فتوولتائیک به‌عنوان یک منبع تولید برق و در کنار آن استفاده از دیزل ژنراتور به‌عنوان پشتیبان سیستم خورشیدی و یا انتقال به شبکه برق بوده و از مزایای این طرح قدرت مانور بالا در استفاده از تجهیزات است؛ به‌طوری‌که همپوشانی بالا برای پشتیبانی خطوط تولید در زمان قطع برق و در نتیجه مشکلات بعد از آن، که منجر به توقف خطوط تولیدی می‌گردد، از اهمیت بالایی برخوردار است. در ضمن موارد نظیر استفاده از گرمای دیزل و یا استفاده از آبگرمکن‌های خورشیدی برای عملیات پیش‌گرمایش دیگ برای استفاده در چیلر جذبی نیز بررسی خواهد شد.

#### ۲.۳. معادلات حاکم بر بهینه‌سازی سیستم

برای به دست آوردن بهترین راندمان انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی سیستم بررسی شده، از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ استفاده شده است. همچنین، تأثیر تغییرات فاکتورهای مؤثر سیستم ترکیبی مورد بررسی بر روی هدف و پاسخ‌های مشخص‌شده انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفت. فاکتورها متغیرهای مستقلی برای تصمیم‌گیری دقیق در بحث طراحی سیستم ترکیبی مورد تحقیق هستند. از طرفی، پاسخ‌های شاخص‌های انرژی،

زیست‌محیطی و اقتصادی عملکرد سیستم ترکیبی را تحت تأثیر فاکتورهای انتخاب‌شده برای بهینه‌سازی نشان می‌دهند. سطح پاسخ یک روش آماری است که برای بهینه‌سازی یک پاسخ خاص، در جایی که پاسخ تحت تأثیر فاکتورهای متعددی باشد، استفاده می‌شود [۱۸]. بر اساس فاکتورهای انتخاب‌شده، سطح پاسخ مجموعه‌ای از آزمایش‌ها و یا شبیه‌سازی‌های کامپیوتری را طراحی و پیشنهاد می‌کند که پاسخ‌ها باید در آن نقاط ارزیابی و شبیه‌سازی شوند. سطح پاسخ یک معادله درجه دوم برای پیش‌بینی رابطه بین هدف‌های انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی انتخاب‌شده و فاکتورهای مستقل بهینه‌سازی تشکیل می‌دهد، که مطابق معادله زیر استفاده می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{N_f} \beta_i z_i + \sum_{i=1}^{N_f} \beta_{ii} z_i^2 + \sum_{i < j = 2}^{N_f} \sum \beta_{ij} z_i z_j \quad (1)$$

که  $y$  نشان‌دهنده پاسخ انرژی-اقتصادی در نظر گرفته شده است،  $z$  فاکتور (عامل) انتخابی برای بهینه کردن را نشان می‌دهد،  $i$  و  $j$  نشان‌دهنده شمارنده تعداد فاکتورهای مستقل اند و  $N_f$  تعداد فاکتورهاست. علاوه بر این،  $\beta$ ها ضرایب مجهول استفاده شده‌اند که با معادلات و تحلیل رگرسیون به دست می‌آیند [۱۸].

#### ۱.۲.۳. بهینه‌سازی چندپاسخی

هدف این پژوهش بهینه‌سازی سیستم ترکیبی مورد نظر با در نظر گرفتن جنبه‌های انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی به‌طور همزمان است؛ یعنی باید بیش از یک پاسخ بهینه شود. برای این هدف از متدی به اسم تابع مطلوبیت<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. در این متد، هر پاسخ به یک تابع مطلوبیت بخصوصی تبدیل می‌شود. تابع مطلوبیت مورد نظر بین مقادیر صفر و یک تغییر می‌کند؛ یعنی برای بدترین حالت ممکن، مقدار عددی تابع مطلوبیت صفر است؛ درحالی‌که تابع مطلوبیت برابر با یک نشان‌دهنده حالتی با شرایط ایدئال است. بعد از این، توابع مطلوبیت پاسخ‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند و مطلوبیت ترکیبی<sup>۴</sup> (CD) به دست می‌آید که مطلوبیت کلی پژوهش بر این اساس، CD به شرح معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$CD = (de_1 \times de_2 \times \dots \times de_{N_r})^{\frac{1}{N_r}} = (\prod_{i=1}^{N_r} de_i)^{\frac{1}{N_r}} \quad (2)$$

که مقصود بهینه‌سازی چندهدفه، به حداکثر رساندن مطلوبیت ترکیبی است.

2. Simulation
3. Desirability function
4. Composite Desirability (CD)

1. Transient Simulation

### ۲.۲.۳. مصرف کل برق

میانگین انرژی تولیدشده در روز از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$E_{ave} = (E_t \times 5psh) \quad (7)$$

$E_{ave}$  میانگین انرژی تولیدشده در روز،  $E_t$  برق تولیدی از پنل و 5psh ساعات آفتابی در طول روز است.

میزان کل تولید آلاینده‌ها از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$ENV = (E_{ave} \times 218 \times 0.417) \quad (8)$$

$ENV$  میزان آلاینده‌ها،  $E_{ave}$  میانگین انرژی تولیدشده در روز، عدد ۲۱۸ تعداد روزهای آفتابی و عدد ۰/۴۱۷ نیز میزان تولید آلاینده به‌ازای هر کیلووات ساعت برق در شهر تهران است.

### ۶.۲.۳. مدل‌سازی سیستم از جنبه اقتصادی

برای بررسی عملکرد سیستم از دیدگاه اقتصادی، در این پژوهش پارامتر مهم اقتصادی به نام دوره بازگشت سرمایه<sup>۱</sup> (PBP)، مورد استفاده قرار گرفت. بازگشت سرمایه یکی از شاخص‌های مالی است که در تجزیه و تحلیل پروژه‌ها و سرمایه‌گذاری‌ها استفاده می‌شود. این شاخص به ما نشان می‌دهد که چه مدت‌زمان لازم است تا سرمایه اولیه سرمایه‌گذاری به‌صورت نقدینگی به سرمایه گذار برگردد. به عبارت دیگر، مدت‌زمانی که صرف می‌شود تا جریان نقدی ناخالص پروژه، سرمایه اولیه سرمایه‌گذاری را تأمین کند.

بازگشت سرمایه را می‌توان به‌صورت زمانی که سرمایه اولیه سرمایه‌گذاری به تعداد دوره‌هایی که درآمد ناخالص سالانه پروژه با جریان نقدی ناخالص سالانه برابر می‌شود، تعریف کرد. به عبارت دیگر، زمانی که مجموع جریان نقدی ناخالص دریافتی، برابر یا بزرگ‌تر از سرمایه اولیه سرمایه‌گذاری شود.

### ۳.۳. عامل‌ها و پاسخ‌های در نظر گرفته‌شده برای

#### بهینه‌سازی

دو متغیر تصمیم، شامل مساحت پنل‌های فتوولتائیک و توان دیزل ژنراتور<sup>۲</sup> به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرهای طراحی سیستم انتخاب شد. دامنه تغییرات متغیرها در جدول (۶) مشخص شده است. مساحت مفید پنل‌های فتوولتائیک نصب‌شده اثر بسیار بالایی در میزان برق تولیدی سیستم، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و میزان توان مورد نیاز دیزل ژنراتور دارد. حداکثر فضای در دسترس برای نصب پنل‌های

مجموع برق مصرفی توسط انواع تجهیزات مصرف‌کننده برق نظیر انواع موتورهای الکتریکی و موتورهای تجهیزات پرس و یا جوشکاری در طول سال، مصرف برق سالانه سیستم را مشخص می‌کند، که از معادله (۳) به دست می‌آید:

$$AEG = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (PC_{pump} \cdot f_{pump} + PC_{fan} \cdot f_{fan} + PC_{HW} \cdot f_{HW} + PC_{DW})}{3600} \quad (3)$$

$N_t$  تعداد قدم‌های زمانی در حل عددی برای کل مدت‌زمان شبیه‌سازی است. از طرفی PC مصرف انرژی برحسب kJ h-1 است. همچنین،  $f$  ضریبی است که وضعیت روشن یا خاموش بودن هریک از اجزا را نشان می‌دهد. هنگامی که وسیله مصرف‌کننده روشن باشد،  $f$  برابر یک و زمانی که خاموش باشد،  $f$  برابر صفر است.

### ۳.۲.۳. کل مصرف گاز طبیعی

همان‌طور که قبلاً بحث شد، یک دیگ کمکی با سوخت مصرفی گاز طبیعی، برای پشتیبانی کردن از چرخه خورشیدی و به‌منظور بازیابی چرخ دسبکنت استفاده شده است. برای افزایش دمای سیال عامل تا یک دمای مشخص ( $T_{set}$ )، مصرف سالانه گاز طبیعی (ANGC) از معادله (۴) به دست می‌آید:

$$ANGC = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (\dot{m}_f c_f (T_{set} - T_{f,in}) \cdot f_{boiler})}{\eta_{boiler} LHV} \quad (4)$$

که در آن  $\eta_{boiler}$  بازده دیگ و LHV ارزش حرارتی پایینی گاز طبیعی مصرفی است.

### ۴.۲.۳. کل مصرف سوخت دیزل

کل مصرف سوخت دیزل براساس تعداد سیستم‌های مولد انرژی دیزلی (یعنی  $N_{DEGS}$ ) و منحنی مصرف سوخت (یعنی  $(a + bX)$ ) که از تولیدکننده دیزل ژنراتور گزارش می‌کند، به دست می‌آید:

$$TDC = N_{DEGS} \times (a + bX) \quad (5)$$

### ۵.۲.۳. میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی

کاهش مصرف آلاینده‌های زیست‌محیطی از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$E_T = (A_p / 1.82) \times 0.37 \quad (6)$$

که  $E_T$  برق تولیدی از پنل خورشیدی،  $A_p$  مساحت پنل‌ها برحسب متر مربع، عدد ۱/۸۲ مساحت هر پنل خورشیدی و عدد ۰/۳۷ میزان تولید برق در هر متر مربع پنل است.

1. Pay Back Period (PBP)

2. Diesel Energy Generator System (DEGS)



#### ۴. نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی گزارش می‌شود.

##### ۱.۴. شرایط آب‌وهوایی محل مطالعه

شرایط آب‌وهوایی شهر تهران براساس داده‌های NASA<sup>۱</sup> برای شهر تهران در نظر گرفته شده است؛ عرض جغرافیایی ۵۳/۳۷ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۴/۵ درجه شرقی، ارتفاع از سطح دریا ۱۲۱۹ متر، دمای خشک تابستانی ۳۷ درجه سانتی‌گراد، دمای مرطوب تابستانی ۲۳ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۱/۴۰٪ و سرعت متوسط سالانه باد ۳/۵ متر بر ثانیه است. همچنین تغییرات دمای هوای بیرون و تشعشع خورشیدی در طول سال و سطح تشعشع خورشیدی در محل مورد نظر بین ۰ تا ۳۷۰۰ کیلوژول بر متر مربع تغییر می‌کند.

جدول (۵) که داده‌های بانک مرکزی و اداره برق استان تهران در آن آمده، داده‌های اقتصادی و انرژی استفاده‌شده در محاسبات را نشان می‌دهد. شایان ذکر است با در نظر گرفتن نرخ دلار ۵۰۰۰۰ هزار ریال، همه محاسبات بر مبنای دلار صورت گرفته است.

##### جدول (۵): مشخصات اقتصادی اعمال‌شده در آنالیز اقتصادی سیستم

مقدار	مشخصه اقتصادی
۴۱/۲٪	نرخ تورم
۱۸٪	نرخ تنزیل
۰/۰۰۳۲۴ کیلووات ساعت دلار	تعرفه خرید برق از شبکه
۰/۰۴۴ کیلووات ساعت دلار	تعرفه فروش برق به شبکه
۰/۰۱۲ متر مکعب دلار	تعرفه مصرف گاز طبیعی
۵۰۰۰۰۰ ریال	نرخ تبدیل هر دلار به ریال
۲۰ آبان ۱۴۰۲	تاریخ استعلام اطلاعات

#### ۲.۴. نتایج بهینه‌سازی

برای محاسبه بهترین ترکیب متغیرهای انتخاب‌شده، روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده شد. جدول (۶) مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط سطح پاسخ برای متغیرها را به گونه‌ای که به سیستم بهینه دست پیدا کنیم، نشان می‌دهد. همچنین مقادیر هر هدف برای شرایط بهینه در جدول (۷) مشخص شده است. مطلوبیت ترکیبی ۰/۷۴۰ برای جواب بهینه، که نزدیک به ایدئال ۱ است، به دست آمد.

خورشیدی ۱۲۰۰۰ متر مربع است. به همین دلیل حد بالا ۱۲۰۰۰ متر مربع در نظر گرفته شده است. در ضمن حد پایین نیز صفر در نظر گرفته شده است؛ یعنی هیچ پنبلی در مدار نباشد. بنابراین بازه صفر تا ۱۲۰۰۰ متر مربع برای پنبلی‌های فتوولتائیک برای عامل اول و برای عامل دوم یعنی توان دیزل زرناتور نیز صفر تا ۱۵۰۰ کیلووات که بیشترین حد مصرف برق کل می‌باشد، در نظر گرفته شده است. همچنین میزان ظرفیت کلکتور حرارتی خورشیدی برای تولید آبگرم نیز با بازه تغییرات صفر تا ۳۰۰۰ لیتر در نظر گرفته شده است. آبگرم تولیدی برای استفاده در چیلر جذبی است [۱۹].

##### جدول (۳): دامنه تغییرات متغیرهای در نظر گرفته‌شده در سطح پاسخ

عامل	دامنه تغییرات	واحد
مساحت پنبلی‌های خورشیدی	۰ - ۱۲۰۰۰	متر مربع
توان دیزل ژنراتور	۰ - ۱۵۰۰	کیلووات

برای عامل‌ها و متغیرهای انتخاب‌شده، در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت روش طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ تعداد ۲۰ آزمایش (در اینجا، اجرای شبیه‌سازی<sup>۱</sup>) همراه با طراحی مرکب مرکزی<sup>۲</sup> را پیشنهاد داد [۲۰]. شایان ذکر است که طراحی آزمایش<sup>۳</sup> و محاسبات سطح پاسخ با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت [۲۱] انجام شد.

این تحقیق، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را با در نظر گرفتن پاسخ‌های انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی ارائه می‌کند. در این پژوهش، ۵ پاسخ یا تابع هدف بهینه‌سازی انتخاب شد که در شکل (۴) آمده است. لازم است گفته شود که پاسخ مصرف کل برق از کم کردن مصرف برق در مجموعه و میزان برق تولیدی سیستم به دست می‌آید. در نتیجه زمانی که میزان تولیدی برق از میزان مصرف بیشتر باشد، این مورد منفی خواهد شد. هدف از بهینه‌سازی کمینه‌سازی هر ۵ پاسخ (تابع هدف) در نظر گرفته‌شده به صورت همزمان است [۲۲].

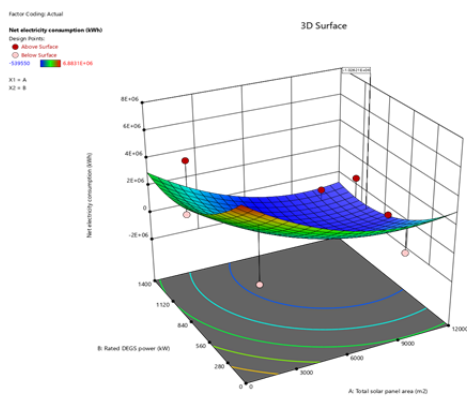
##### جدول (۴): هدف‌های در نظر گرفته‌شده در بهینه‌سازی سطح پاسخ

جنبه‌های انرژی - اقتصادی	پاسخ‌ها	پاسخ
انرژی	مصرف خالص برق	۱
انرژی	کل مصرف گاز طبیعی	۲
انرژی	کل مصرف سوخت دیزل	۳
اقتصادی	بازگشت سرمایه	۴
محیط‌زیست	آلاینده محیطی	۵

1. Simulation Runs
2. Central Composite Design
3. Design of Experiment (DOE)

سیستم دارد. در واقع، این آنالیز حساسیت<sup>۱</sup> به ما نشان می‌دهد که با تنظیم بهینه این عوامل، می‌توان به دستیابی به تابع مطلوبیت بالا و نزدیک به حالت ایده‌آل (تابع مطلوبیت برابر با ۱) نزدیک شد.

شکل (۳) که خروجی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است، در مورد تأثیر عوامل مساحت پنل‌های فتوولتائیک و توان دیزل ژنراتور بر مصرف کل برق صحبت می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش مقدار توان دیزل ژنراتور از صفر تا ۱۵۰۰ کیلووات، میزان مصرف کل برق از حدود ۳۵۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت در سال به تقریباً ۱۲۵۰۰۰۰ کیلووات ساعت در سال کاهش می‌یابد. به‌منظور بهینه‌سازی سیستم، از روش سطح پاسخ استفاده شده است. نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها برابر با ۱۱۷۷۰ متر مربع و در توان دیزل ژنراتور برابر با ۹۸۴ کیلووات قرار دارد. در این نقطه بهینه، مصرف کل برق برابر با ۱۰۲۶۲۵۰ کیلووات ساعت در سال است.



شکل (۳): اثر تغییر عامل‌های مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور روی مصرف کل برق

شکل (۴) که خروجی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است، نشان می‌دهد که تغییر عوامل مساحت پنل‌های فتوولتائیک و توان دیزل ژنراتور چه تأثیری بر کل مصرف گاز سیستم و مجموعه دارد. با توجه به داده‌های نمودار، افزایش توان دیزل ژنراتور از صفر تا حدود ۱۵۰۰ کیلووات منجر به کاهش چشمگیری در مصرف گاز می‌شود. در واقع، مصرف گاز به مقدار ۷۹/۴٪ کاهش می‌یابد، که معادل ۷۵۰۰۰۰ مترمکعب در سال به حدود ۱۵۰۰۰۰ مترمکعب در سال است. به‌علاوه، این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش مقدار توان دیزل ژنراتور از ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ کیلووات، نتیجه عکس به وجود می‌آید و مصرف گاز دوباره افزایش می‌یابد. از طریق بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور با اندازه ۹۸۴ کیلووات

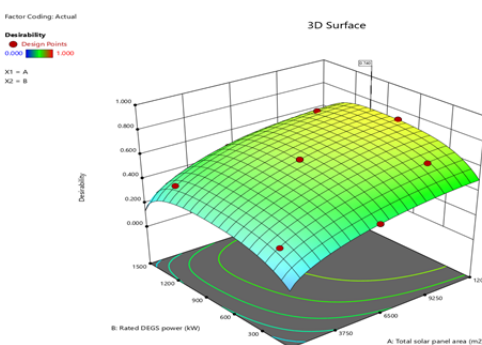
## 2. Sensitivity Analysis

جدول (۶): مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای متغیرهای انتخاب‌شده در

بهینه‌سازی پاسخ سطح		
عامل	مقدار بهینه	واحد
مساحت پنل‌های خورشیدی	۱۱۷۷۰	متر مربع
توان دیزل ژنراتور	۹۸۴	کیلووات

جدول (۷): مقادیر به‌دست‌آمده برای هدف‌ها در سیستم بهینه پاسخ

سطح		
جنبه‌های انرژی-اقتصادی	پاسخ‌ها	نتایج بهینه
انرژی	مصرف کل برق	-۱۰۲۶۲۵۰ کیلووات ساعت
اقتصادی	کل مصرف گاز	۲۰۴۸۴۶ متر مکعب
	کل مصرف سوخت دیزل	۱۳۳۸۴۲۰ لیتر
زیست‌محیطی	دوره بازگشت سرمایه	۱/۶۷۹ سال
	کل تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی	۳۶۹۳/۲۳ کیلوگرم

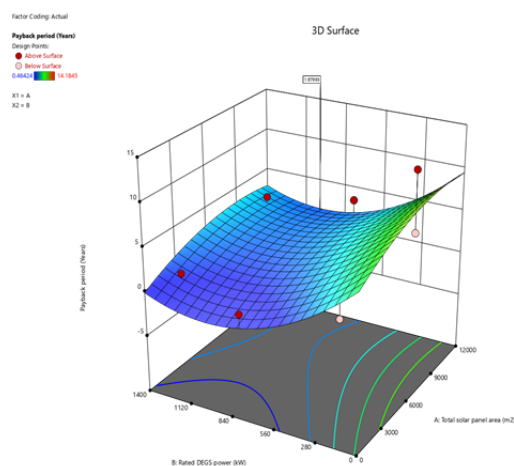


شکل (۲): اثر تغییر عامل‌های مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور روی تابع مطلوبیت

شکل (۲) که خروجی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است، نموداری است که اثر تغییر متغیرهای مساحت پنل‌های فتوولتائیک و توان دیزل ژنراتور را بر تابع مطلوبیت<sup>۱</sup> نمایش می‌دهد. از نمودار مشخص است که بیشترین مقدار تابع مطلوبیت برابر با ۰/۷۴۰ است. این نتیجه نشان می‌دهد که با استفاده از ترکیب بهینه از عوامل مذکور، سیستم به یک حالت بهینه (سیستم بهینه) می‌رسد و مقدار تابع مطلوبیت به ۰/۷۴۰ نزدیک می‌شود. این مقدار نزدیک به بیشترین مقدار ممکن تابع مطلوبیت ۱ است. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در عوامل مساحت پنل‌های فتوولتائیک و توان دیزل ژنراتور تأثیر قابل توجهی بر تابع مطلوبیت و عملکرد بهینه

## 1. Utility Function

شکل (۶) که خروجی نرم افزار دیزاین اکسپرت است، نشان می‌دهد که تغییر عوامل مساحت پنل‌های فتوولتائیک و توان دیزل ژنراتور چگونه بر دوره بازگشت سرمایه تأثیر می‌گذارد. افزایش مساحت پنل‌های خورشیدی تأثیر کمتری بر دوره بازگشت سرمایه دارد. از سوی دیگر، افزایش توان دیزل ژنراتور تا حدود ۱۵۰۰ کیلووات، به کاهش شدیدی در دوره بازگشت سرمایه منجر می‌شود. اما با افزایش بیشتر توان دیزل ژنراتور به بیش از ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلووات، دوره بازگشت سرمایه افزایش می‌یابد. با استفاده از بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور با اندازه ۹۸۴ کیلووات مشخص شده است. در این نقطه بهینه، دوره بازگشت سرمایه برابر با ۱/۶۷۹ سال است. بنابراین، با تحلیل دقیق داده‌های موجود در شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور تأثیر قابل توجهی بر دوره بازگشت سرمایه دارد و با بهینه‌سازی این عوامل، می‌توان دوره بازگشت سرمایه را به حداقل رساند. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی<sup>۱</sup>، نقطه بهینه با مساحت پنل‌ها به اندازه ۱۱۷۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور به اندازه ۹۸۴ کیلووات مشخص می‌شود. در این نقطه بهینه، دوره بازگشت سرمایه برابر با ۱/۶۷۹ سال است.

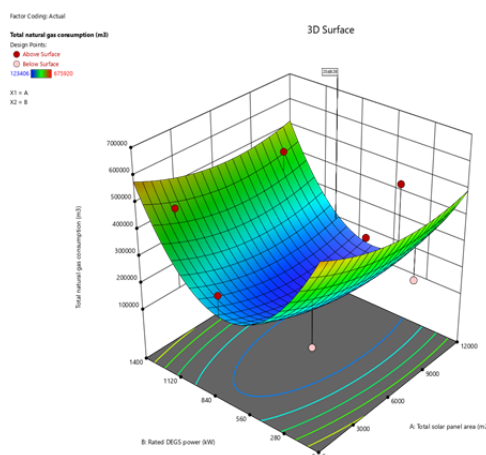


شکل (۶): اثر تغییر عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور روی دوره بازگشت سرمایه

شکل (۷) نشان می‌دهد که تغییر عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و استفاده از کلکتورهای خورشیدی بر کاهش مصرف آلاینده تأثیر عکس داشته و با افزایش ظرفیت این دو عامل این مورد کاهش می‌یابد؛ ولی تغییر آن با افزایش ظرفیت دیزل ژنراتور افزایشی است؛ به طوری که با افزایش ظرفیت دیزل ژنراتور میزان

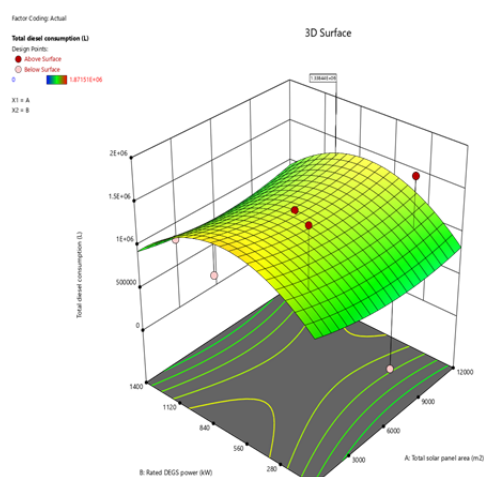
## 1. Optimization Algorithm

مشخص شده است. در این نقطه بهینه، مصرف گاز کلی برابر با ۲۰۴۸۴۶ متر مکعب در سال است.



شکل (۴): اثر تغییر عامل‌های مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور روی کل مصرف گاز

شکل (۵) نشان می‌دهد که تغییر عوامل مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور چگونه بر مصرف سوخت دیزل تأثیر می‌گذارد. این نمودار نشان می‌دهد که تغییرات مصرف گاز و مصرف سوخت دیزل در دیزل ژنراتور روندی برخلاف یکدیگر دارند. در واقع، کاهش همزمان مصرف گاز و مصرف سوخت دیزل در دیزل ژنراتور امکان‌پذیر نیست و روند آن‌ها عکس یکدیگر است. با استفاده از بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور با اندازه ۹۸۴ کیلووات مشخص شده است. در این نقطه بهینه، مصرف کلی سوخت دیزل برابر با ۱۳۳۸۴۲۰ لیتر در سال است.

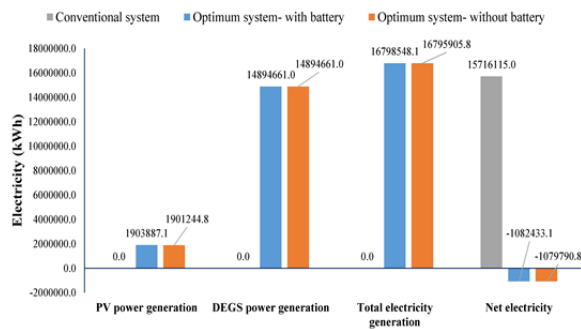


شکل (۵): اثر تغییر عامل‌های مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور روی کل مصرف سوخت دیزل

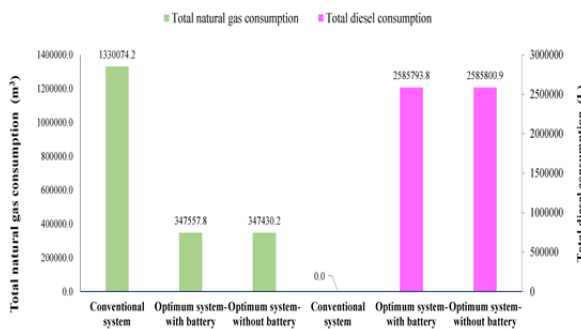
همچنین، حالت بدون باتری می‌تواند مقداری دوره بازگشت سرمایه بهتری داشته باشد. این بدان معناست که سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز برای سیستم بهینه بدون باتری به مدت کمتری بهبود پیدا می‌کند و سود سرمایه‌گذاری سریع‌تر بازگشت می‌یابد؛ درحالی‌که در سیستم بهینه با باتری، نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتری برای خرید و نصب باتری‌ها وجود دارد و مدت‌زمان برای بازگشت سرمایه بیشتر است.

به‌طورکلی، در این مقایسه، استراتژی ۱ و حالت بدون باتری به‌لحاظ اقتصادی و دوره بازگشت سرمایه بهتر است. بااین‌حال، در نظر گرفتن تمام عوامل مرتبط با تعرفه برق، قوانین محلی و شرایط محیطی می‌تواند بهترین راهکار را برای شرایط خاص محل پروژه تعیین کند.

در سیستم بهینه با باتری، از باتری‌های لید اسیدی با عمر ۷ سال و با مجموع ظرفیت ۸۶۱۰/۸ آمپر ساعت استفاده شده است. این مقدار ظرفیت باتری به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی برای استفاده در زمان‌هایی که تولید انرژی خورشیدی کم است یا نیست استفاده می‌شود.

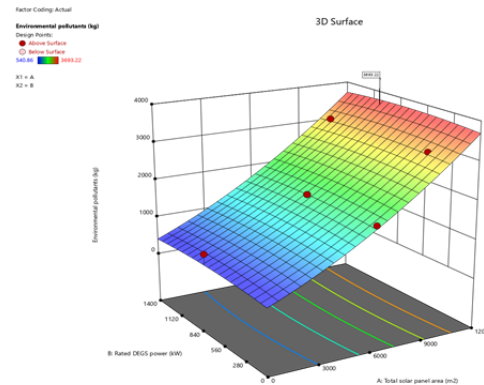


شکل (۸): مقایسه مصرف و تولید برق سیستم بهینه با باتری، سیستم بهینه بدون باتری و سیستم مرسوم



شکل (۹): مقایسه کل مصرف گاز و سوخت دیزل در سیستم بهینه با باتری، سیستم بهینه بدون باتری و سیستم مرسوم

تولید آلاینده نیز افزایش می‌یابد. با استفاده از بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور با اندازه ۹۸۴ کیلووات مشخص شده است. در این نقطه بهینه، میزان کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی برابر با ۳۶۹۳/۲۳ کیلوگرم در سال است؛ یعنی با اجرای این طرح در سال کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوس است.



شکل (۷): اثر تغییر عامل‌های مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور روی آلاینده‌های زیست‌محیطی

### ۳.۴. مقایسه بازگشت سرمایه سیستم بهینه در دو استراتژی خرید برق از شبکه

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، استراتژی ۱ که شامل خرید مستقیم کل دیماند برق از شبکه و فروش مستقیم کل برق تولیدی سیستم به شبکه است، از لحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر به نظر می‌رسد. این به این معناست که در این استراتژی، درآمد حاصل از فروش برق تولیدی از پنل‌ها و دیزل ژنراتور به شبکه، بیشتر از هزینه خرید برق از شبکه است. این تفاوت در قیمت خرید و فروش برق می‌تواند به دلیل سیاست‌های موجود در تعرفه برق و نرخ تفاوت قیمت خرید و فروش برق در بازار باشد.

از طرف دیگر، استراتژی ۲ که شامل تأمین کل دیماند برق از طریق برق تولیدی سیستم، خرید مقدار کمبود برق از شبکه و فروش مازاد برق تولیدی به شبکه است، ممکن است از لحاظ اقتصادی کمتر به‌صرفه باشد. این می‌تواند به دلیل اختلاف زیاد نرخ خرید برق از شبکه و نرخ فروش برق به شبکه باشد. اگر نرخ فروش برق تولیدی به شبکه کمتر از نرخ خرید برق از شبکه باشد، درآمد حاصل از فروش برق تولیدی به شبکه کمتر از هزینه خرید برق از شبکه خواهد بود.

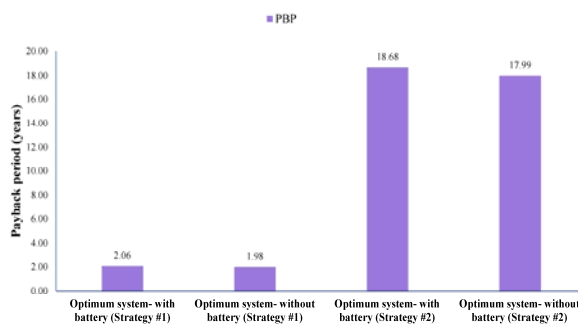
## 1. Environmental Pollutants

۲. در تحقیق حاضر، تأثیر عوامل مساحت پنل های فتولتائیک و توان دیزل ژنراتور بر مصرف کل برق بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان دیزل ژنراتور از صفر تا ۱۵۰۰ کیلووات، مصرف کل برق از حدود ۳۵۰۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت در سال به تقریباً ۱۲۵۰۰۰۰ کیلووات ساعت در سال کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که سیستم تولید برق بیشتر از نیاز مصرفی مجموعه تولید می‌کند و بخشی از برق تولیدی به شبکه برق عرضه می‌شود.

۳. در نتایج حاصل از پژوهش، تأثیر تغییرات عوامل مساحت پنل های فتولتائیک و توان دیزل ژنراتور بر کل مصرف گاز سیستم و مجموعه بررسی شده است. با افزایش توان دیزل ژنراتور از صفر تا حدود ۱۵۰۰ کیلووات، مصرف کل گاز با کاهش ۷۹/۴٪، معادل ۷۵۰۰۰۰ مترمکعب در سال به تقریباً ۱۵۰۰۰۰ مترمکعب در سال کاهش می‌یابد. این افت در مصرف گاز به دلیل استفاده از گرمای هدررفته در دیزل ژنراتور و افزایش دمای آب مخزن ذخیره آب گرم ایجاد می‌شود. با افزایش دما، نیاز به استفاده از بویلر در سیستم کمتر می‌شود و بویلر کمتری برای تأمین گرمای مورد نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴. همچنین تأثیر تغییرات عوامل مساحت پنل های فتولتائیک و توان دیزل ژنراتور بر مصرف سوخت دیزل بررسی شده است. می‌توان از نتایج شبیه‌سازی نتیجه گرفت که تغییرات مصرف گاز و مصرف سوخت دیزل در دیزل ژنراتور روندی برخلاف یکدیگر دارند. نتایج نشان می‌دهد که باید تصمیم‌گیری درباره استفاده بیشتر از کدام سوخت صورت گیرد. بسته به کمبود گاز طبیعی در کشور و کاهش فشار در شبکه، می‌توان تمرکز را بر روی افزایش توان دیزل ژنراتور تا ۱۵۰۰ کیلووات قرار داد. در این صورت، مصرف گاز کمتری رخ می‌دهد؛ اما مصرف سوخت دیزل بیشتر است. با استفاده از بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور با اندازه ۹۸۰ کیلووات مشخص شده است. در این نقطه بهینه، مصرف کلی سوخت دیزل برابر با ۱۳۳۸۰۳۰ لیتر در سال است.

۵. با بهینه‌سازی این عوامل، می‌توان مصرف سوخت را کاهش داد و بهینه‌ترین عملکرد را داشت. همچنین تأثیر استفاده از پنل‌های خورشیدی، کلکتورهای آبگرم و دیزل ژنراتور بر روی تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور با اندازه ۹۸۴ کیلووات مشخص شده است. در این نقطه بهینه، میزان تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی برابر با ۳۶۹۳/۲۳ کیلوگرم در سال



شکل (۱۰): کانتورهای اثرات تغییر عامل‌های مساحت پنل‌های خورشیدی و توان دیزل ژنراتور روی پاسخ‌های انرژی-اقتصادی انتخاب‌شده

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در نتایج این پژوهش، مشاهده شد که سیستم تولید همزمان کویل‌شده با استفاده از پنل‌های فتولتائیک و دیزل ژنراتور می‌تواند یک راهکار مناسب برای تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن نیازهای ساختمان‌ها باشد. این سیستم قابلیت تنظیم و بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های انرژی را فراهم می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم ترکیبی مورد بررسی با توجه به شرایط آب‌وهوایی محل مطالعه، قادر به تولید انرژی الکتریکی و حرارتی در طول سال است.

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ نشان داد که مساحت پنل‌های فتولتائیک در حالت بهینه برابر با ۱۱۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور بهینه برابر با ۹۸۴ کیلووات است. همچنین در شرایط بهینه، سیستم بهترین عملکرد را دارد. مطلوبیت ترکیبی که برابر با ۰/۷۴۰ است، نشان می‌دهد که عملکرد سیستم بهینه نزدیک به حالت ایدئال است. از نظر مصرف انرژی، سیستم بهینه به مصرف کل برق ۱۰۲۶۸۶۰ کیلووات، کل مصرف گاز ۲۰۵۱۸۲ متر مکعب، کل مصرف سوخت دیزل ۱۳۳۸۰۳۰ لیتر، میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی ۳۶۹۳/۲۳ کیلوگرم و دوره بازگشت سرمایه ۱/۶۷۹ سال دست پیدا می‌کند.

۱. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بهینه، مساحت ۱۱۷۰ متر مربع پنل‌های فتولتائیک و توان ۹۸۴ کیلووات دیزل ژنراتور بهترین عملکرد را دارند. مطلوبیت ترکیب بهینه با مقدار ۰/۷۴۰ نشان می‌دهد که عملکرد سیستم بهینه نزدیک به حالت ایدئال (معادل ۱) است. این نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از روش سطح پاسخ، می‌توان با دقت بیشتری به مسائل بهینه‌سازی پرداخت و با ترکیب بهینه فاکتورها، به عملکرد بهتر و نزدیک‌تر به حالت ایدئال دست یافت.

۸. در مقایسه میان سیستم بهینه با باتری، سیستم بهینه بدون باتری و سیستم مرسوم، چند نکته مهم مطرح شده است که می‌تواند در انتخاب بهترین راهکار برای نیازهای انرژی صنعتی کمک کند:

الف) سیستم بهینه با باتری

- از باتری‌های لید اسیدی با عمر ۷ سال و ظرفیت ۸/۸۶۱۰ آمپر ساعت برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود.

- این سیستم قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در زمان‌هایی را دارد که تولید انرژی خورشیدی کم است یا نیست.

- طول عمر باتری و ظرفیت آن برای تأثیر بر دوره بازگشت سرمایه و بهره‌وری سیستم بسیار حائز اهمیت است.

ب) سیستم بهینه بدون باتری

- این سیستم بدون نیاز به باتری مستقیماً انرژی تولیدشده توسط پنل‌های خورشیدی را به شبکه برق تزریق می‌کند.

- این روش مناسب است در صورتی که دسترسی به شبکه برق پایدار و قابل اطمینان داریم.

- نیازی به خرید و نگهداری باتری‌ها ندارد که ممکن است هزینه‌ها را کاهش دهد.

ج) سیستم مرسوم

- این سیستم ممکن است مشابه سیستم بهینه بدون باتری عمل کند و انرژی تولیدشده را به شبکه برق تزریق کند.

- در این سیستم، ممکن است عوامل دیگری نیز در نظر گرفته شده باشند که در سیستم بهینه با باتری وجود ندارند.

- نکته مهم این است که بهینه‌سازی هزینه‌ها و بهره‌وری در این سیستم ممکن است به گونه‌ای نباشد که در سیستم‌های بهینه‌تر انجام می‌شود.

با توجه به موارد فوق، انتخاب بین این سه گزینه باید با توجه به نیازها، محدودیت‌ها، هزینه‌ها و عوامل دیگر صورت گیرد. مقایسه دقیق‌تر براساس شرایط خاص هر پروژه می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری و انجام بهترین انتخاب منجر شود.

## ۵. پیشنهادها

با توجه به پژوهش صورت گرفته و نتایج به دست آمده از این مطالعه، مواردی که در ادامه می‌آید، به عنوان پیشنهادهایی برای مطالعات آینده معرفی می‌شود: بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر بهره‌وری سیستم‌های پایداری سیستم‌های انرژی CCHP ترکیبی با انرژی خورشیدی؛ بهینه‌سازی معماری سیستم با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی؛ تحلیل محیط زیستی چرخه عمر براساس نتایج بهینه‌سازی.

است؛ این بدان معناست که با اجرای این طرح در سال کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوس است.

۶. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مساحت پنل‌های فتوولتائیک باعث افزایش دوره بازگشت سرمایه و با شیب کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش مساحت پنل‌های خورشیدی تأثیر کمتری بر دوره بازگشت سرمایه دارد. از سوی دیگر، افزایش توان دیزل ژنراتور تا حدود ۱۵۰۰ کیلووات، به کاهش شدیدی در دوره بازگشت سرمایه منجر می‌شود؛ اما با افزایش بیشتر توان دیزل ژنراتور به بیش از ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلووات، دوره بازگشت سرمایه افزایش می‌یابد. با استفاده از بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، نقطه بهینه در مساحت پنل‌ها با اندازه ۱۱۷۷۰ متر مربع و توان دیزل ژنراتور با اندازه ۹۸۴ کیلووات مشخص شده است. در این نقطه بهینه، دوره بازگشت سرمایه برابر با ۱/۶۷۹ سال است.

۷. از تحلیل نتایج می‌توان نتیجه گرفت که سیستم بهینه ترکیبی با دیزل ژنراتور و پنل‌های فتوولتائیک، نه تنها در ساعات پربار (زمانی که تقاضای برق بالاست) بلکه در ساعات کم‌بار نیز (زمانی که تقاضای برق کمتر است) قادر به تأمین کل برق مورد نیاز مجموعه است. این سیستم توانایی تولید برق اضافی را در برخی اوقات نشان می‌دهد که می‌تواند به شبکه برق عمومی فروخته شود. این ویژگی مزیت‌های مهمی دارد:

- استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر: در تولید انرژی با استفاده از پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود؛ لذا تولید انرژی با این روش باعث کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کمک به حفظ محیط‌زیست می‌شود.

- تأمین برق پایدار: سیستم بهینه ترکیبی توانایی تأمین برق پایدار را دارد و در تمام زمان‌ها، حتی در ساعات بار پایین، برق مورد نیاز مجموعه را تأمین می‌کند.

- کاهش هزینه‌های سوخت: استفاده از پنل‌های خورشیدی در ساعات کم‌بار میزان مصرف سوخت دیزل ژنراتور را کاهش می‌دهد. این بهبود در بهره‌وری سیستم باعث کاهش هزینه‌های سوخت و مدت بازگشت سرمایه سیستم می‌شود.

- فروش برق اضافی: در زمان‌هایی که تولید برق توسط دیزل ژنراتور و پنل‌های خورشیدی بیشتر از تقاضای برق مجموعه است، می‌توان این اضافه‌برق را به شبکه برق عمومی فروخت و به عنوان یک منبع درآمد اضافی استفاده کرد.

## مراجع

- [1] IEA., "Deploying Renewables Best and Future Policy Practice. OECD/IEA Paris International Energy Agency", 2011. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/878ce35d-81d2-46ba-81ee-a8fa387e835d/DeployingRenewables-BestandFuturePolicyPractice.pdf>
- [2] Premadasa, P., Silva, C., Chandima, D., "A multi-objective optimization model for off-grid hybrid energy microgrid metering with optimal distribution of a diesel generator", *Journal of Energy Storage*, Vol. 68, No. 15, pp. 107621 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107621>
- [3] Shakya, S., Bajracharya, d., Ananda, R., Bhave, P., "Estimation of air pollutant emission from diesel generators and its reduction potential through microgrid and solar energy", *Energy Reports*, Vol. 7, No. 4, pp. 2485, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.084>
- [4] Muskan, H., Channi, H., Ahmadzadeh, F., "Optimum design of system based on PV-diesel generator using HOMER software", *Materials Today Proceedings*, Vol. 10, No. 2, pp. 102547, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.053>
- [5] Kumar, P., Pal, P., Sharma, H., "Optimization and Techno-Economic Analysis of a Solar Photovoltaic/Biomass/Diesel/Battery Hybrid Power Generation System for Remote Rural Electrification in Eastern India", *Energy*, Vol. 247, No. 15, pp. 123560, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123560>
- [6] Kelly, E., Nouadje, B., Djiela, R., "Off-grid PV/diesel/wind/battery energy system options for electrifying isolated areas of Chad", Vol. 16, No. 8, pp. 299-311, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13906>
- [7] Koholé, Y., Ngouleu, C., Fohagui, F., "Optimization of Off-Grid Hybrid Photovoltaic/Wind/Diesel/Fuel Cell System for Residential Power Generation Applications Using Evolutionary Algorithms", *Renewable Energy*, Vol. 224, No. 15, pp. 120131, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120131>
- [8] Li, CH., Zhang, C., Qiu, F., "Optimization and Eco-Economic Evaluation of Hybrid Sustainable Energy Systems: A Case Study of a Photovoltaic/Biogas/Diesel/Battery System in Xuzhou, China", *Energy Strategy Reviews*, Vol. 40, No. 15, pp. 100852, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.10085>
- [9] Saleh Aziz, A., Naim Tajuddin, MF., Khalil, T., "Techno-Economic and Environmental Evaluation of PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using Improved Distribution Strategy", *Renewable Energy*, Vol. 8, No. 8, pp. 67946814, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.021>
- [10] Almutairi, KH., Dehshiri, S., "Using wind-solar-diesel-battery hybrid energy system to supply energy to buildings in remote areas: a case study", Vol. 13, No. 16, pp. 8764, 2021. <https://doi.org/10.3390/su1316876>
- [11] Rajashekar, P., Mandi, G., "Reva University, Solar PV system with energy storage and diesel generator", *Industrial and Information Systems*, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51343-0-22>, 2010, <https://www.researchgate.net/publication/224175591>
- [12] Azman, N., Sulistiawan, R., "Design and Performance Evaluation of an Off-Grid Hybrid Solar System in a Remote Location: A Case Study of Lagondi Island", *MethodsX*, Vol. 12, No. 12 pp. 102716, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102716>
- [13] Fan, J., Zhou, X., "Optimization of a hybrid solar/wind/storage system with bio-generator for a household by emerging metaheuristic optimization algorithm", *Journal of Energy Storage*, Vol. 73, No. 10, PP. 108967, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108967>
- [14] Aeggegn, D., Agajie, T., Workie, W., "Feasibility and techno-economic analysis of PV battery priority grid connection system with diesel flexibility: a case study", *Heliyon*, Vol. 9, PP. 19387, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19387>
- [15] Hermann, D., Donatien, N., "Techno-Economic and Environmental Feasibility Study with Photovoltaic/Wind/Hydropower/Battery/Diesel Demand Management: A Case Study in Sub-Saharan Africa", *Energy Conversion and Management*, Vol. 10, PP. 1016, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115494> Get rights and content
- [16] Hwang, S., Tongsopit, S., "Transition from diesel backup generators to PV-plus storage microgrids in California public buildings", *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 38, pp. 252-265, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.04.001>
- [17] Mao, M., Song, M., "Comparative studies on using RSM and TOPSIS methods to optimize residential air conditioning systems", *energy*, Vol. 10, pp. 11160, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.11.160,2018>
- [18] LujanMoreno, G., Howard, F., "Montgomery Design of experiments and response surface methodology to tune machine learning hyperparameters, with a random forest case-study", *Expert Systems With Applications*, Vol. 11, PP. 195-205, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.05.024,2018>
- [19] Derringer, G., Suich, R., "Simultaneous optimization of several response variables", *Journal of quality technology*, Vol. 12, PP. 214-219, 1980. <https://doi.org/10.1080/00224065.11980968,1980>
- [20] Li, L., Lu, L., Yang, H., "Energy and economic performance analysis of an open cycle solar desiccant

- dehumidification air-conditioning system for application in Hong Kong*", Solar energy, Vol. 84, pp. 2085-2095, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.solener.09.006>
- [21] Myers, R., Montgomery, D., Anderson, C., *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, ISBN:978-1-118-91601-8 February 856 Pages,
- [22] Varghese, E., Hemavathi, M., "*Design Expert Software for RSM and ME: Overview, Design Generation and Analysis*", Vol. 25, pp. 286-315, 2023. <http://eprints.cmfri.org.in/17377/>