



Thermodynamic and economic investigation of a new multiple generation system based on a double-effect absorption heat transformer combined with compressed air energy storage

Ali Eyvazi^{1*} | Hadi Ghaebi²

1. Corresponding Author, Phd Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. Email: alieyvazi1996@gmail.com

2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabi, Iran. Email: hghaebi@uma.ac.ir

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Research Paper	This study investigates a multi-generation system that allows for power generation, cooling capacity, and hydrogen production. The system consists of a gas cycle unit, an absorption heat transformer, a proton exchange membrane electrolysis, an air energy storage system, and an air heat exchanger generator. The energy analysis in the case study of the proposed system aims to calculate key parameters such as net output power, hydrogen production rate, and energy efficiency. The exergy evaluation performed in the studied system is of great importance in identifying exergy degradation in the system components to improve performance. In addition, a parametric analysis was performed to understand how different operating conditions affect the system performance. The innovative aspect of the present study is that the gas turbine losses are recovered and directly used to supply the energy consumption of the electrolyzer for hydrogen production. The results of the thermodynamic evaluation show that the energy efficiency of the proposed system is 26% while the exergy efficiency is 12%. The results show that this system is capable of producing hydrogen at a rate of 0.037 kg/h, which can meet the needs of a part of the target consumer. The total exergy destruction in the studied system is 1479 kW and the output power is 49.5 kW. The economic analysis shows the total cost of the system to be \$0.204 per gigajoule. In addition, the break-even cost of electricity production is \$4.379 and the cost of hydrogen production is \$1.741.
Article History: Received 01 February 2025 Revised 15 March 2025 Accepted 05 April 2025 Published Online 22 June 2025	
Keywords: Multiple generation system, Absorption heat transformer, Heat recovery, Compressed air energy storage.	

Cite this article: Eyvazi, A. & Ghaebi, H. (2025). Thermodynamic and economic investigation of a new multiple generation system based on a double-effect absorption heat transformer combined with compressed air energy storage. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (3), 285-309. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.392283.1129>



© Ali Eyvazi, Hadi Ghaebi

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.392283.1129>

1. Introduction

Many researchers have investigated energy storage techniques to overcome this challenge. Notably, compressed air energy storage offers a simple and effective way to deal with the variability of renewable energy sources. Compressed air energy storage effectively manages energy supply and demand while reducing carbon dioxide emissions compared to alternative storage methods. Compressed air energy storage systems use excess electricity to compress air when available. This compressed air can then be used to generate power in a gas turbine. The use of compressed air energy storage in combined cooling, heating, and power systems is receiving increasing attention. When these multiple generation systems are integrated with renewable energy sources, they increase efficient energy production and environmental benefits. Cooling can be provided by an absorption chiller that uses heat recovered from the exhaust gas. Efficiency and performance in compressed air energy storage systems can be achieved by recovering excess heat from the exhaust gas of a gas turbine. The

method of producing hydrogen using electrolysis was first studied in 1830 by the English scientist Michael Faraday. In this method, a direct current of electricity is passed through a solution containing water and electrodes, and hydrogen and oxygen gases are produced from the water. Each electrolysis cell consists of two electrodes immersed in an electrolyte solution, which are connected to a direct current power supply. The necessary electrical potential is applied between the electrodes, and hydrogen and oxygen are collected on the cathode and anode separately. The hydrogen economy seeks to extract hydrogen from renewable sources and in the near future, hydrogen will replace fossil fuels.

2. Methodology

A comprehensive thermodynamic and economic model of the multiple generation system was developed in this study. The modeling process uses the Engineering Equation Solver (EES) software that provides functions to calculate the thermodynamic properties. The thermodynamic equations are solved simultaneously assuming steady state. The proposed system is examined from different perspectives and the system performance is quantified through output parameters. In addition, a parametric study is carried out to evaluate the system performance by varying the performance parameters under specific operating conditions. A multidimensional analysis is carried out to evaluate the performance of the proposed system from energy, exergy and economic perspectives. The purpose of the energy analysis of the system in a case study is to discuss the values of net power output, hydrogen production rate, system cooling load and energy efficiency. The mentioned parameters are essential factors to evaluate the energy performance of the proposed configuration. In addition, the performance quality of the proposed system is evaluated through an exergy study. Exergy analysis attempts to maximize the work output from a cycle. In this analysis, inefficient thermodynamic processes are identified and investigated by quantifying exergy losses through exergy balance. Possible improvements are determined based on avoidable and unavoidable exergy losses. Unavoidable exergy losses represent the minimum exergy degradation that is limited by current technology and economic factors. Therefore, avoidable losses highlight the potential for process optimization. Therefore, exergy analysis quickly identifies inefficiencies and potential improvements in a system. An economic analysis is also performed to determine the profitability of the proposed system. An understanding of thermoeconomics, applied to thermodynamic systems, including renewable energy systems, is essential to balance thermodynamic and economic considerations in order to achieve optimal system performance. By applying economic principles to the technical design of energy systems, we can identify and implement equipment operating conditions that minimize the overall production costs.

3. Results

This section analyzes the economic and engineering results obtained from the system modeling. It includes a detailed parametric study that examines how different factors affect the system efficiency. Furthermore, it presents optimization findings to determine the optimal operating parameters. This study investigates a new system concept by integrating a new generation system and an air energy storage system with an absorption cooling system to determine the optimal performance. Based on the thermodynamic analysis, the system showed an energy efficiency of 26% and an exergy efficiency of 12%, indicating both successful operation and an optimal thermodynamic architecture. The output power of the studied system is calculated to be 49.5 kW. The analysis of exergy loss among the various sub-components of an energy system is performed with a detailed examination of irreversibility. This includes considering aspects such as temperature gradients, pressure differences, and flow restrictions. Such analysis is critical for quantifying the exergy loss that occurs during energy conversion, thereby illuminating system inefficiencies and identifying potential improvements. By determining the sources of exergy loss, engineers can make changes that enhance the system's efficiency in operation and environmental friendliness. In the proposed system, an exergy loss of 1479 kW occurs, of which the electrolyzer experiences the highest exergy loss, while the primary air compressor exhibits the lowest exergy loss.

4. Conclusion

This research takes an effective step towards optimizing energy consumption and reducing environmental pollution. This research proposes and analyzes a novel combined heat and power system consisting of a gas cycle, an air energy storage system, a double-effect absorption cooling subsystem, a steam heat exchanger generator, and a proton exchange membrane electrolyzer. This study presents an innovative energy system that utilizes the integration of compressed air energy storage and an absorption cooling cycle. This integrated system drives a multiple generation process for power, heating, and cooling. The system performance is evaluated through the use of both energy and exergy analysis. A detailed examination at the component level reveals critical areas for improvement and potential weaknesses in the design. This study also examines the sensitivity of the overall system performance to changes in key design parameters. This work focuses on an absorption cooling system and shows significant improvements in thermodynamic performance compared to existing research findings. This work describes a novel integrated multi-system with air energy storage capability. The results of the thermodynamic analysis of the system show that the maximum exergy destruction occurs in the electrolyzer, and to improve the system performance, the maximum exergy destruction can be reduced and the system efficiency increased by increasing the electrolyzer inlet temperature.



بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید چندگانه جدید مبتنی بر ترنسفورمر گرمای جذبی دو اثره همراه با ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده

علی عیوضی^{۱*} | هادی غائبی^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: alieyvazi1996@gmail.com

۲. استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: hghaebi@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه:

سیستم تولید چندگانه،
ترنسفورمر گرمای جذبی،
بازیابی حرارتی،
ذخیره‌سازی انرژی هوا فشرده.

این مطالعه نوعی سیستم تولید چندگانه را بررسی می‌کند که امکان تولید نیرو، ارائه ظرفیت خنک‌کننده و تولید هیدروژن را فراهم می‌آورد. این سیستم یک واحد چرخه گازی، ترنسفورمر گرمای جذبی، یک الکترولیز غشای تبادل پروتون، یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا، و یک ژنراتور مبدل حرارتی هوا دارد. هدف از تحلیل انرژی در مطالعه موردی صورت گرفته روی سیستم پیشنهادی، محاسبه پارامترهای اساسی همچون توان خروجی خالص، نرخ تولید هیدروژن و راندمان انرژی است. ارزیابی اگزرژی انجام شده در سیستم مورد مطالعه اهمیت زیادی در شناسایی تخریب اگزرژی در اجزای سیستم به منظور بهبود عملکرد دارد. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای درک چگونگی تأثیر شرایط عملیاتی متفاوت بر عملکرد سیستم انجام شد. جنبه نوآوری مطالعه حاضر بر این اساس است که اتلاف‌های توربین گازی بازیابی می‌شود و به صورت مستقیم برای تأمین انرژی مصرفی الکترولایزر به منظور تولید هیدروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج ارزیابی ترمودینامیکی نشان می‌دهد بازده انرژی سیستم پیشنهادی ۲۶ درصد است، در حالی که راندمان اگزرژی ۱۲ درصد است. نتایج نشان می‌دهد این سیستم قادر است هیدروژن را با نرخ ۰/۰۳۷ کیلوگرم در ساعت تولید کند که این میزان می‌تواند نیاز بخشی از مصرف‌کننده هدف را تأمین کند. مجموع تخریب اگزرژی در سیستم مورد مطالعه ۱۴۷۹ کیلووات است و توان خروجی ۵/۴۹ کیلو وات حاصل می‌شود. تجزیه و تحلیل اقتصادی هزینه کل سیستم ۰/۲۰۴ دلار به ازای هر گیگاژول را نشان می‌دهد. علاوه بر این، هزینه تراز تولید برق ۴/۳۷۹ و هزینه تولید هیدروژن ۱/۷۴۱ است.

استناد: عیوضی، علی و غائبی، هادی (۱۴۰۴). بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید چندگانه جدید مبتنی بر ترنسفورمر گرمای جذبی دو اثره همراه با ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۴ (۳) ۲۸۵-۳۰۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.392283.1129>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© علی عیوضی، هادی غائبی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.392283.1129>



۱. مقدمه

جمعیت جهان از سال ۱۹۶۱ تا کنون دو برابر شده، استفاده از کود شیمیایی بیش از سه برابر و تعداد اتومبیل‌ها در جهان چهار برابر شده که پیامدهای زیست محیطی مهمی به همراه داشته است. از سال ۱۹۶۱ مقدار کربن دی‌اکسید موجود در جو، حدود ۱۵ درصد افزایش یافته و وسعت جنگل‌های بارانی جهان به یک سوم کاهش یافته است [۱]. افزایش آلودگی جو، لایه ازن که نقش حفاظتی در برابر تابش سرطان‌زای فرابنفش دارد را نیز تحت تأثیر قرار داده است. بخش حمل‌ونقل به طور قابل توجهی به احتراق سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند که به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی منجر می‌شود [۲]. پیش‌بینی‌ها از چشم‌انداز انرژی جهانی بیانگر افزایش ۴۵ درصدی تقاضای انرژی برای این بخش تا سال ۲۰۳۰ است. افزایش مصرف انرژی ارتباط تنگاتنگی با استراتژی‌های تولید و مصرف انرژی دارد که مستقیم بر اثرات زیست‌محیطی بخش حمل‌ونقل تأثیر می‌گذارد [۳]. اثرات آن شامل آلودگی هوا، تغییرات آب و هوایی و کاهش منابع طبیعی محدود است. از این رو، با توجه به اضطراب شرایط، موافقت‌نامه‌های بین المللی برای تنظیم و کاهش انتشارات مضر ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی ایجاد شده است. شکی نیست که جمعیت جهان در سده بیست و یکم نیز به رشد خود ادامه خواهد داد که این خود به‌تنهایی نیاز به مقادیر عظیم منابع جدید را در پی خواهد داشت. نتیجه این رشد ناگزیر افزایش تأثیر انسان بر محیط زیست جهانی خواهد بود [۴]. امروزه، تأمین انرژی از اساسی‌ترین پیش‌نیازهای توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورها به شمار می‌رود. در حالی که روش‌های تأمین و تولید انرژی خود از عوامل تعیین‌کننده در آلوده کردن محیط زیست هستند، سرعت تهی شدن منابع تجدیدناپذیر انرژی و افزایش آلودگی‌ها به بحران‌های انرژی و محیط زیست در هزاره سوم مبدل شده‌اند که تأکید بر جایگزینی و استفاده از انرژی‌های نو دارند [۵]. با توجه به محدودیت منابع فسیلی و اثرات مخرب زیست‌محیطی آن‌ها، استفاده از سیستم‌های تولید چندانگانه مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک راهکار پایدار مورد توجه قرار گرفته است. انرژی عامل تعیین‌کننده‌ای در توسعه صنعتی و اقتصادی است. در آینده دسترسی به انرژی از بسیاری جهات مشکل‌تر خواهد بود. در رأس این مشکلات، مسئله افزایش بی‌سابقه جمعیت جهان قرار دارد. پیش‌بینی می‌شود که در کشورهای جهان سوم به علت زیاد بودن تعداد جوانان، رشد جمعیت بسیار بیشتر خواهد شد. افزایش تقاضا برای انرژی در دهه‌های اخیر چالش‌های زیست‌محیطی جهانی را تشدید کرده است. روش‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند پانل‌های فتوولتائیک خورشیدی و توربین‌های بادی، ذاتاً متناوب هستند و به طور مداوم طی روز برق تولید نمی‌کنند. علاوه بر این، در دسترس بودن انرژی تجدیدپذیر ممکن است با دوره‌های اوج تقاضا ارتباط نداشته باشد [۶]. بسیاری از محققان تکنیک‌های ذخیره انرژی را برای غلبه بر این چالش بررسی کرده‌اند. نکته قابل توجه، ذخیره انرژی هوای فشرده یک روش ساده و مؤثر برای مقابله با تغییرپذیری منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌کند [۷]. ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به طور مؤثری عرضه و تقاضای انرژی را مدیریت می‌کند و در عین حال انتشار دی‌اکسید کربن را در مقایسه با روش‌های ذخیره‌سازی جایگزین کاهش می‌دهد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده از الکتریسیته اضافی برای فشرده‌سازی هوا در صورت وجود استفاده می‌کنند [۸]. در مرحله بعد می‌توان از این هوای فشرده در یک توربین گاز نیرو تولید کرد. استفاده از ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در سیستم‌های ترکیبی سرمایش، گرمایش و قدرت توجه روزافزونی را به خود جلب می‌کند. هنگامی که این سیستم‌های تولید چندانگانه با منابع انرژی تجدیدپذیر ادغام می‌شوند، تولید انرژی کارآمد و مزایای زیست‌محیطی را افزایش می‌دهند. خنک‌کننده را می‌توان توسط یک چیلر جذبی که از گرمای بازبازی شده از گاز خروجی استفاده می‌کند، تأمین می‌شود. بهره‌وری و عملکرد در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را می‌توان از طریق بازبازی حرارت اضافی از گاز خروجی توربین گاز به دست آورد [۹]. روش تولید هیدروژن با استفاده از روش الکترولیز اولین بار در سال ۱۸۳۰ میلادی توسط دانشمند انگلیسی، میشل فارادی، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این روش، جریان برق مستقیم از میان محلولی که شامل آب و الکترودها است، عبور داده می‌شود و گازهای هیدروژن و اکسیژن از آب تولید می‌شود. هر سلول الکترولیز شامل دو الکتروود است که داخل محلول الکترولیت غوطه‌ور است که این دو الکتروود به یک منبع تغذیه جریان مستقیم متصل هستند. پتانسیل الکتریکی لازم بین الکترودها اعمال می‌شود و هیدروژن و اکسیژن روی کاتد و آند جداگانه جمع می‌شوند. اقتصاد هیدروژنی به دنبال آن است که هیدروژن را از منابع تجدیدپذیر استخراج کند و در آینده نزدیک هیدروژن را جایگزین سوخت‌های فسیلی کند. عواملی مانند مسئله نفت و محدودیت منابع آن، آلودگی هوا و خطرات زیست‌محیطی جهانی باعث شده تا

اقتصاد هیدروژنی چنین هدفی را دنبال کند. مجموعه‌ای از عوامل مختلف از جمله محدودیت منابع فسیلی، تأثیرات منفی زیست محیطی، بهره‌گیری از منابع هیدروکربنی، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، منازعات سیاسی و تأثیرات آن روی ارائه انرژی پایدار از جمله دلایلی هستند که بسیاری از سیاستمداران و متخصصان مباحث انرژی و محیط زیست را در حرکت به سوی ایجاد ساختاری نوین مبتنی بر امنیت ارائه انرژی، حفظ محیط زیست و ارتقای کارایی سیستم انرژی وادار کرده است. بر این اساس، هیدروژن یکی از بهترین گزینه‌ها برای ایفای نقش حامل انرژی در این سیستم جدید ارائه انرژی است. هیدروژن به عنوان فراوان‌ترین عنصر موجود در سطح زمین به روش‌های مختلف قابل تولید است. در یک سیستم ایده‌آل انرژی بر پایه هیدروژن با هدف تأمین امنیت ارائه انرژی، حفظ محیط زیست و ارتقای کارایی سیستم انرژی، هیدروژن از الکتریسته تولیدی از منابع تجدیدپذیر نظیر باد، خورشید، زمین‌گرمایی و نظایر آن تولید شده و پس از ذخیره‌سازی و انتقال به محل‌های مصرف، در کاربردهای مختلف از جمله تجهیزات الکترونیکی کوچک، صنعت حمل‌ونقل و صنایع نیروگاهی قابل به‌کارگیری است. با این رویکرد بسیاری بر این باورند که سوخت نهایی بشر هیدروژن بوده و بشر در آینده‌ای نه چندان دور عصر هیدروژن را تجربه خواهد کرد. از جمله ویژگی‌هایی که هیدروژن را از سایر گزینه‌های مطرح سوختی متمایز می‌کند، می‌توان به فراوانی، مصرف تقریباً منحصربه‌فرد، انتشار بسیار ناچیز آلاینده‌ها، برگشت‌پذیر بودن چرخه تولید آن و کاهش اثرات گلخانه‌ای اشاره کرد. سیستم انرژی هیدروژنی به دلیل استقلال از منابع اولیه انرژی، سیستمی دائمی، پایدار، فناپذیر، فراگیر و تجدیدپذیر است و پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نه چندان دور تولید و مصرف آن به عنوان حامل انرژی به سراسر اقتصاد جهانی سرایت کند و اقتصاد هیدروژنی تثبیت شود، با این‌وجود نباید انتظار داشت که هیدروژن در بدو ورود از نظر قیمتی بتواند با سایر حامل‌های انرژی رقابت کند. در آینده هیدروژن و پیل‌های سوختی می‌توانند نقش محوری و کنترل‌کنندگی در آلودگی شهرها داشته باشند. عمل تبدیل انرژی شیمیایی موجود در هیدروژن به انرژی الکتریکی توسط پیل سوختی انجام می‌پذیرد که متناسب با کاربرد و خواص ساختاری آن‌ها، پیل‌های سوختی خود به انواع مختلف تقسیم می‌شوند. در واقع، اهمیت فناوری پیل سوختی در یک سیستم انرژی بر پایه هیدروژن به گونه‌ای است که بسیاری آن را به قطار توسعه عصر هیدروژن تشبیه کرده‌اند. علاوه بر فناوری پیل سوختی به عنوان مصرف‌کننده هیدروژن در عصر هیدروژن، فناوری‌های تولید، ذخیره سازی، عرضه و انتقال هیدروژن نیز از اجزای اصلی ساختار انرژی این عنصر خواهند بود [۱۰ و ۱۱]. وانگ و همکاران [۱۲] رویکردی را برای یک سیستم تولید چندگانه ارائه کردند که بر اساس فناوری هیبریدی توزیع‌شده خورشیدی بود. سیستم پیشنهادی از پانل‌های فتوولتائیک/حرارتی برای عملیات خود استفاده می‌کند. برای سیستم پیشنهادی اندازه بهینه از طریق فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در سطح بالایی به دست آمد که عوامل هزینه، انرژی و عملکرد محیطی را در نظر می‌گیرد. رویکرد عملیاتی توسط یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با پیچیدگی کمتر تعیین شد. لیو و همکاران [۱۳] اجرای یک سیستم تولید چندگانه را برای ساختار اولیه یک شرکت گازرسانی پیشنهاد کردند. فرایند بهینه‌سازی توانایی نیروی اولیه با تمرکز بر عوامل مختلفی از جمله تأثیرات محیطی، دوام اقتصادی، کارایی انرژی، و همچنین ملاحظات اگزرژی انجام شد. پس از مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی برای نشان دادن دقت و سازگاری بیشتر تعیین شد. ظرفیت بهینه مکانیزم محرک اولیه ۷۸/۱۴۶ کیلووات تعیین شد. تجزیه و تحلیل پارامتریک روی معیارها و زیرمعیارهای ارزیابی انجام شد. مطالعه یادشده یک روش جامع برای بهینه‌سازی سیستم‌های تولید چندگانه ارائه می‌کند که می‌تواند به عنوان یک منبع ارزشمند برای طراحان چنین سیستم‌هایی مورد استفاده قرار گیرد. لوکارلی و همکاران [۱۴] استفاده از یک تکنیک بهینه‌سازی چندهدفه جدید برای سیستم‌های سه مولد تولید برق را پیشنهاد کردند که بر اساس سه تابع هزینه متمایز از جمله اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی است. بهینه‌سازی مورد بررسی برای مدل‌سازی عملکرد روزانه سیستم سه مولد استفاده شد که به مدل‌سازی تجمعی انجامید. پس از آن، تجزیه و تحلیل دقیق اطلاعات جمع‌آوری شده و به دنبال آن، ارزیابی مقایسه‌ای مورد مطالعه انجام شد. این ارزیابی بر اساس عوامل مختلفی از جمله موتورهای احتراق داخلی، پمپ‌های حرارتی گاز جذبی و تراکمی، دو نوع غشای تبادل پروتون و اکسید جامد سلول‌های سوختی، و همچنین باتری‌های سرب - اسید و لیتیوم - یون بودند. مورد مطالعه حاضر مربوط به یک مصرف‌کننده قابل توجه در صنعت است که در آن میانگین بار برق طی دوره مرجع ۴۹۷۰ وات ثبت شده است. مناسب‌ترین تأسیسات سه‌گانه برای چنین مصرف‌کننده‌ای متشکل از یک پیل سوختی اکسید جامد ۵ مگاواتی با انرژی متان، سیستم ذخیره‌سازی یون لیتیوم با حداکثر ظرفیت ۱۰۵ وات، پمپ‌های

حرارتی فشرده سازی گاز و جذبی هر دو با ظرفیت های ۱۰۴ وات برای تولید انرژی و پمپ حرارتی ۱۰ وات برای تولید انرژی حرارتی ۱۰ وات تعیین شد. اندرسون [۱۵] رویکردی را برای دستیابی به طراحی بهینه یک سیستم تولید چندگانه معرفی کرد. نقطه کانونی تحقیق یادشده یک توربین با سوخت گاز بود که به طور خاص برای استقرار در یک منطقه دورافتاده واقع در شهرستان ژاوپینگ، چین طراحی شده بود. روش آموزش گروهی اصلاح شده به منظور بهینه سازی (MGTO) برای دستیابی به نتایجی که دقت و همگرایی برتر را نشان می دهند، استفاده شد. بررسی مقایسه ای اثربخشی روش مبتنی بر MGTO ارائه شده در مقابل تکنیک های ژنتیکی و اصلاح شده مبتنی بر بهینه سازی جغد ارائه شد. نتایج کارایی برتر روش مبتنی بر MGTO را نشان داد. توربان و همکاران [۱۶] پیکربندی بهینه و مدیریت انرژی یک سیستم ریزشکه هیبریدی را مطالعه کردند که منابع انرژی توزیع شده مختلف مانند باتری، واحدهای صرفه جویی در انرژی حرارتی، دیگ بخار، پیل سوختی و آرایه های فتوولتائیک را ادغام می کند. هدف از پژوهش یادشده، به حداقل رساندن هزینه های عملیاتی در حین تأمین نیازهای برق، گرمایش و سرمایش بود. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات برای تعیین استراتژی مدیریت انرژی بهینه و تخصیص ظرفیت برای هر منبع استفاده شد. این مطالعه نشان داد استفاده از اتلاف های مسکونی و شهری باعث کاهش مصرف گاز طبیعی توسط سلول های سوختی و کاهش قابل توجه انتشار دی اکسید کربن هنگام استفاده از گرما توسط سلول های سوختی می شود. این امر استراتژی مدیریت توان بهینه پیشنهادی را برای ریزشکه های یکپارچه تأیید کرد. اکبرناتاج و همکاران [۱۷] مطالعه یک سیستم ترکیبی سرمایش، گرمایش و برق جدید و به صرفه را برای یک ساختمان آموزشی با حداقل انتشار دی اکسید کربن توسعه می دهند و بهینه می کنند. اجزای اصلی سیستم شامل چرخه توربین گاز، پیل سوختی کربنات مذاب، سیستم گرمایش، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی است. سیستم تولید چندگانه بهینه شده دارای هزینه واحد محصول ۵۲/۴۴ دلار در ساعت با بازده کلی اکسرژی ۴۴/۳۴ درصد است که ۰/۳۹ کیلوگرم دی اکسید کربن بر کیلووات ساعت تولید می کند. یک سیستم انرژی جدید که از پیل سوختی اکسید جامد و تبدیل به گاز زیست توده برای سرمایش، گرمایش و قدرت با جذب کربن یکپارچه استفاده می کند، توسط وانگ و همکارانش [۱۸] ارزیابی می شود. راندمان کل انرژی و انرژی مدل سرمایش به ترتیب ۶۷/۲ و ۴۸/۳ درصد است، در حالی که مدل گرمایش به ترتیب ۷۱/۶ و ۴۹ درصد را به دست آورده است. لو و همکاران [۱۹] یک سیستم خنک کننده، گرمایش و نیرو ترکیبی جدید با سلول سوختی کربنات مذاب، سیکل ترکیبی گاز و بخار خورشیدی و سیستم تبرید لیتیوم بروماید جذبی دو اثره پیشنهاد کردند. با توجه به اصل استفاده از آبشار انرژی، بخشی از گازهای با دمای بالا تخلیه شده توسط به ژنراتور بخار بازیابی گرما برای استفاده بیشتر از گرمای اتلافی هدایت می شود. نتایج پژوهش یادشده نشان می دهد سیستم تولید چندگانه جدید می تواند ۴۹۴/۱ مگاوات توان الکتریکی، ۷۵۵۷/۰۹ کیلووات بار خنک کننده و ۵۷۹۵۶۳/۲۵ کیلووات بار گرمایشی تولید کند. راندمان انرژی و بازده انرژی سیستم جدید به ترتیب ۶۱/۶۹ و ۶۱/۶۴ درصد است. اکمن و همکاران [۲۰] مطالعه ای را در مورد طراحی و بررسی یک چرخه رانکین فرابحرانی انجام دادند. آن ها از طریق ارزیابی های ترمودینامیکی و محیطی، آن ها دریافتند که عملکرد کلی سیستم از نظر عملکرد کلی انرژی ۲/۵ درصد بهبود یافته است که به کاهش سالانه ۶۷۸/۱ تنی انتشار دی اکسید کربن منجر می شود. یکی دیگر از کاربردهای مهم بازیابی گرما، تولید آب شیرین در واحد نمک زدایی از طریق فرایند سازگار با محیط زیست است. بو و همکاران [۲۱] یک طرح تولید سه گانه را برای یک کشتی معرفی کردند که از بازیابی حرارت از موتور خود برای تولید خنک کننده، آب شیرین و برق استفاده می کرد. این سیستم دارای چرخه های خنک کننده کالینا و اجکتوری و همچنین، یک زیرسیستم نمک زدایی رطوبت زدایی رطوبت بود. راندمان انرژی بهینه به دست آمده ۵۸ درصد با هزینه ویژه مربوط به محصولات ۶۶/۷ دلار بر گیگاوات بود. اویانگ و همکاران [۲۲] یک سیستم تولید توان و خنک کننده پیشنهاد کردند که از چرخه های قدرت دی اکسید کربن و کالینای فوق بحرانی و یک چرخه جذب با اثر دوگانه استفاده می کرد. نتایج بهینه سازی افزایش قابل توجهی در توان خروجی به میزان ۱۵/۳ درصد نشان داد. دمیر و همکاران [۲۳] یک طرح بازیابی گرمای چندگانه برای کشتی ها ارائه کردند که شامل وظایف مختلفی مانند تولید برق، سرمایش، گرمایش، تولید هیدروژن و تولید آب شیرین است. این سیستم یک چیلر جذبی، یک چرخه رانکین، یک الکترولیز غشایی تبادل پلیمری و یک واحد نمک زدایی فلاش تک مرحله ای را یکپارچه کرده است. این فرایند بازده انرژی و انرژی کل را به ترتیب ۲۵ و ۱۳ درصد نشان داد. زی و همکاران [۲۴] یک بررسی و بهینه سازی عملی بودن اجرای یک چرخه دی اکسید کربن فوق بحرانی در یک سیستم بازیابی حرارت انجام دادند.

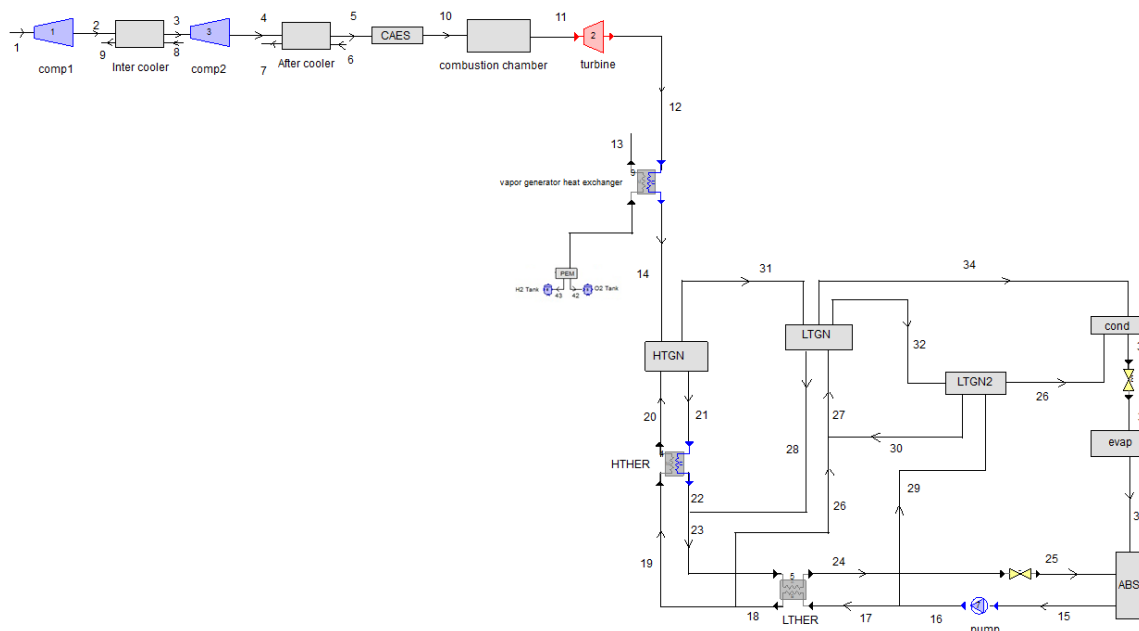
یافته‌های پژوهش یادشده نشان داد هنگام کار در شرایط بهینه، حداکثر توان خروجی خالص به ۲۱/۵۴ کیلو وات افزایش یافت. کاتو و همکاران [۲۵] نوعی آرایش چندگانه را پیشنهاد کردند که برای بازیابی گرمای هدررفته و تولید نیرو، خنک‌کننده و آب شیرین طراحی شده است. این ترتیب شامل یک چرخه رانکین احیاکننده، یک چیلر جذبی و یک نمک‌زدایی بود. این مطالعه نشان داد وقتی سیستم در شرایط بهینه خود کار می‌کند که بازده انرژی بهینه به ۴۳ درصد رسیده است. یو و همکاران [۲۶] نوعی سیستم تولید چندگانه و واحد نمک‌زدایی چنداثره با پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز میکرو را با تجزیه و تحلیل‌های انرژی - اقتصادی معمولی و پیشرفته ارزیابی کردند که بزرگ‌ترین تخریب انرژی را در مشعل نشان داد و به دنبال آن سیستم نمک‌زدایی چند اثره قرار گرفت. لیو و همکاران [۲۷] نوعی سیستم تولید چندگانه همراه با گاز طبیعی مایع و بازیابی حرارت گازهای دودکش را پیشنهاد کردند. خروجی بهینه‌سازی آن‌ها هزینه هر واحد انرژی ۱۸/۰۵ دلار بر گیگاژول را نشان داد. غلامیان و همکاران [۲۸] نوعی سیستم تولید چندگانه خورشیدی با چیلر دو اثره به منظور بازیابی گرمای اتلاف برای رفع نیازهای مسکونی شهر تهران در ایران توسعه دادند و حداکثر راندمان حرارتی را ۳۴ درصد گزارش کردند. اوزتورک و همکاران [۲۹] از بسترهای سنگی به عنوان ذخیره انرژی برای حفظ عملکرد مداوم سیستم استفاده کردند و راندمان انرژی ۳۷/۳ درصد را گزارش کردند. سونگ و همکاران [۳۰] نوعی سیستم انرژی تولید چندگانه با انرژی خورشیدی را معرفی کردند، که علاوه بر تأمین سرمایش، گرمایش و تولید برق در ساختمان‌های عمومی در یکی از شهرهای چین، از نیروی اضافی برای تولید هیدروژن در تأسیسات هیدروژنی استفاده می‌کند. میزان تولید هیدروژن بهینه از سیستم ۷۰۰ کیلوگرم در روز بود. عصاره و همکاران [۳۱] یک تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی ترکیبی از یک سیستم تولید چندگانه چند منبع تجدیدپذیر همراه با باتری‌ها و یک زیرسیستم تولید هیدروژن برای ارزیابی هزینه چرخه سیستم انجام دادند و حداکثر کارایی را برای زیرسیستم‌های کلیدی به دست آوردند. زارعی و همکاران [۳۲] نوعی سیستم تولید چندگانه جدید طراحی شده را بررسی کردند که توسط یک کلکتور حرارتی فتوولتائیک و چرخه رانکین تغذیه می‌شد. راندمان انرژی ۱۰/۷ درصد برای میرد R123 با مدت بازپرداخت ۶ سال گزارش شد. نشان داده شده است که استفاده از چرخه رانکین در کاربردهایی که در آن‌ها بازیابی گرمای هدررفته برای گرم کردن آب به حالت فوق گرم آن تلاش می‌کند امیدوارکننده است. عصاره و همکاران [۳۳] نوعی سیستم تولید چندگانه مبتنی بر چند منبع تجدیدپذیر را با زیرسیستم‌های اصلی کلکتورهای فتوولتائیک/حرارتی و توربین‌های بادی، سیستم‌های ذخیره باتری و یک پمپ حرارتی با رویکرد فنی و اقتصادی بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی سیستم نشان داد بیشترین سهم تولید برق متعلق به زیرسیستم پیل سوختی و کلکتورهای فتوولتائیک/حرارتی با توان ۷۵ کیلووات و ۵۲ کیلووات است. قربانی و همکاران [۳۴] یک مطالعه ترمودینامیکی جامع با استفاده از جنبه‌های سه‌گانه و بهینه‌سازی یک سیستم تولید چندگانه جدید با زیرسیستم‌هایی از جمله اجکتور، چرخه رانکین و چرخه کالینا با استفاده از بازیابی حرارت انرژی زمین‌گرمایی به عنوان منبع اصلی انرژی توسعه دادند. بررسی‌ها نشان داد راندمان حرارتی و انرژی کل سیستم به ترتیب ۲۳/۰۴ درصد و ۲۶/۵۵ درصد است. پرون و همکاران [۳۵] تحقیق جامعی روی یک سیستم تولید چندگانه انجام دادند که از یک موتور احتراق داخلی با گاز شدن دو نوع سوخت زیست‌توده چوب (W1 و W2) استفاده می‌کرد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد راندمان سیستم با استفاده از سوخت W1 ۵۱/۲ درصد بود، کمی بیشتر از راندمان سوخت W2، که ۵۰/۳ درصد بود. این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از یک سیستم تولید چندگانه با استفاده از سوخت زیست‌توده راه‌حلی امکان‌پذیر با خودپایداری قابل توجه ارائه می‌دهد. چیلرهای تک‌اثره از اجزا و ساختار ساده‌تری برخوردار هستند، اما در چیلر دو اثره برای اینکه جداسازی بخار آب از لیتیوم بروماید افزایش پیدا کند و لیتیوم بروماید غلیظ‌تر شود، از دو ژنراتور استفاده می‌شود. همان‌طور که اشاره کردیم، چیلر جذبی دو اثره شامل دو ژنراتور دما بالا و دما پایین است که سبب تغلیظ لیتیوم بروماید می‌شود. غلیظ شدن لیتیوم بروماید به طور کامل باعث می‌شود تا بتواند در محفظه ایزوربر به‌خوبی و با راندمان بالا بخار آب را به خود جذب کند. با افزایش تعداد مراحل گرما دادن به لیتیوم بروماید و آب می‌توان آب را به طور کامل از آن جدا کرد. هر چقدر لیتیوم بروماید غلیظ‌تر شود، راندمان بیشتری برای جذب بخار آب در محفظه ایزوربر ایجاد می‌شود. پس چیلرهای جذبی دو اثره از راندمان بیشتری نسبت به نوع تک‌اثره برخوردارند. در کار حاضر از ترنسفورمر جذبی دو اثره برای ایجاد ظرفیت سرمایشی لازم استفاده می‌شود و با مقایسه سیستم پیشنهادی با سیستم تحقیقات قبلی همچون دمیر و همکاران که از واحد سرمایش جذبی یک اثره استفاده کرده‌اند شاهد بازده انرژی بالاتری هستیم که از مزایای

سیستم مورد مطالعه در کار حاضر است. علی‌رغم ارزیابی‌های متعدد سیستم‌های تولید چندگانه برای تولید برق، خنک‌کننده و تولید هیدروژن، فرصت‌های قابل توجهی برای بهینه‌سازی استفاده از انرژی اتلافی توربین گاز در طیف وسیع‌تری از کاربردها وجود دارد. اجرای سیکل‌های ترکیبی ترمودینامیکی با راندمان بالا برای مهار نیرو از منابع گرمایی موجود، یک عنصر حیاتی از استراتژی‌های انرژی پایدار است. کار مفید تولیدشده توسط توربین، توان خالص سیکل ترکیبی را تشکیل می‌دهد. توان خالص خروجی سیکل به طور مستقیم با کار مفید انجام‌شده توسط توربین متناسب است. تا کنون در مطالعات قبلی به استفاده مستقیم از اتلاف‌های انرژی توربین برای به‌کارگیری هم‌زمان در فراهم کردن ظرفیت سرمایشی ترنسفورمر جذبی دو اثره و انرژی مصرفی الکترولایزر غشا تبادل پروتونی پرداخته نشده است. این تحقیق با پیشنهاد یک سیستم تولید هم‌زمان که از انرژی اتلافی توربین گاز برای تولید هم‌زمان هیدروژن و ظرفیت سرمایشی در چرخه تبرید جذبی استفاده می‌کند، به توسعه ادبیات موجود در دانش فعلی کمک می‌کند. سیستم مورد مطالعه با ترکیب فناوری‌های پیشرفته مانند توربین گاز، سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، ترنسفورمر جذبی دو اثره، الکترولایزر غشای تبادل پروتون و سیستم‌های بازیابی گرما، راندمان تبدیل انرژی و بهینه‌سازی استفاده از منابع را افزایش می‌دهد. هدف این تحقیق، رفع شکاف‌های موجود با بررسی استفاده ترکیبی از فناوری‌های مختلف برای بهبود بهره‌وری انرژی، به حداقل رساندن اتلاف گرما، و تولید مؤثر برق، گرمایش و سرمایش است. این مطالعه بر ارزیابی مزایا و معایب ادغام این فناوری‌های پیشرفته در یک سیستم منسجم تأکید دارد. اصالت این مطالعه در روش منحصربه‌فرد آن برای ادغام این چرخه‌ها و ارزیابی عملکرد آن‌ها در یک سیستم تولید چندگانه نهفته است، موضوعی که در ادبیات فعلی به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. این روش، دیدگاه‌های تازه‌ای را در مورد بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و افزایش فناوری‌های تولید چندگانه ارائه می‌دهد. ادغام مشارکتی کارایی کلی را بهبود می‌بخشد، هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و مدیریت منابع پایدار را ارتقا می‌دهد. این مقاله یک سیستم خنک‌کننده، گرمایش و برق ترکیبی جدید را معرفی و ارزیابی می‌کند که به طور مؤثر گرمای تلف‌شده در دمای بالا را از خروجی توربین گاز مهار می‌کند. بسیاری از مطالعات قبلی روی انرژی، آگزوری، یا تجزیه و تحلیل‌های حرارتی به طور جداگانه هنگام بررسی سیستم‌های خنک‌کننده، گرمایش و قدرت ترکیبی متمرکز شده‌اند. در حالی که تجزیه و تحلیل انرژی، بر اساس قانون اول ترمودینامیک، می‌تواند راه‌حل‌های عملیاتی بهینه را برای یک چرخه ارائه دهد، اما برگشت‌ناپذیری در بخش‌های مختلف سیستم را در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، نه آنالیز آگزورژتیک و نه آنالیز ترموآکونومیک به‌تنهایی سیستم‌های انرژی را ارزیابی نمی‌کنند. این مقاله یک تجزیه و تحلیل عمیق از یک سیستم تولید چندگانه با استفاده از تجزیه و تحلیل انرژی، آگزوری و اصول ترمودینامیک ارائه می‌دهد. این تحقیق به دلیل ارزیابی کامل آن از جنبه‌های ترمودینامیکی و اقتصادی حائز اهمیت است و اطمینان می‌دهد که سیستم هم کارآمد و هم به‌صرفه است. تجزیه و تحلیل پارامتری دقیق پستوانه این مطالعه، اثرات متغیرهای عملیاتی مختلف را با هدف افزایش کارایی سیستم بررسی می‌کند. هدف این مطالعه، ایجاد نوعی راه حل بهینه انرژی تجدیدپذیر با استفاده از فناوری‌های در دسترس و کارآمد است که آن را برای جوامع کوچک تا متوسط که در آن پروژه‌های در مقیاس بزرگ امکان‌پذیر نیست، ایده‌آل می‌کند. این سیستم انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری را ارائه می‌دهد و به آن اجازه می‌دهد تا نیازهای انرژی منحصربه‌فرد را برآورده کند و در عین حال از منبع تغذیه مطمئن و سازگار با محیط زیست اطمینان حاصل کند. در نیروگاه‌های معمولی برای تولید یک مگاوات ساعت برق ۰/۲ تن کربن دی‌اکسید آزاد می‌شود. انتشار یک تن کربن دی‌اکسید باعث هزینه زیست‌محیطی ۲۴ دلار می‌شود. در نتیجه با نصب سیستم پیشنهادی می‌توان از هزینه‌های زیست‌محیطی در سال نیز جلوگیری کرد و باعث گسترش فضای سبز و گیاهان شد. کار حاضر اثرات زیست‌محیطی بسیار مطلوبی را دارد و با ترکیب ذخیره‌سازی هوای فشرده و بازیابی اتلاف‌های انرژی به صورت هم‌زمان قادر به تولید هیدروژن، الکتریسیته، گرما و ظرفیت سرمایشی با انتشار کربن دی‌اکسید بسیار ناچیز نزدیک به صفر است و انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها در کار حاضر بسیار ناچیز است. این مقاله یک طراحی جدید سیستم خنک‌کننده، گرمایش، و قدرت را معرفی می‌کند. این سیستم یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را با یک سیستم تبرید جذبی ادغام می‌کند. سیستم پیشنهادی چندین مزیت را ارائه می‌دهد. یکی از مزیت‌های کلیدی، مناسب بودن آن به عنوان یک سیستم ذخیره‌سازی است که امکان فراهم کردن انرژی در زمان اوج بار را فراهم می‌کند. یکی دیگر از قابلیت‌های آن، تولید برق، سرمایش و گرمایش به طور هم‌زمان است. نوآوری مطالعه حاضر بر این اساس استوار است که گرمای اتلافی در توربین گازی

توسط مبدل حرارتی بازیابی می‌شود و به صورت هم‌زمان برای کاربرد دوگانه به منظور تأمین انرژی مصرفی الکترولایزر برای تولید هیدروژن و به علاوه فراهم کردن بار سرمایشی ترنسفورمر جذبی دو اثره مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم گرمای تلف‌شده خود را بازیابی می‌کند و کارایی سیستم را افزایش می‌دهد. تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی عملکرد سیستم را ارزیابی می‌کند و به دنبال آن، یک تحلیل پارامتریک برای بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای کلیدی در شرایط کاری گوناگون روی عملکرد ترمودینامیکی سیستم انجام می‌شود.

۲. توصیف سیستم

شماتیک سیستم تولید هم‌زمان با ذخیره انرژی هوای بررسی شده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. ابتدا یک کمپرسور کم‌فشار هوای اطراف را فشرده می‌کند و سپس، قبل از ورود به مرحله تراکم بالا خنک می‌شود. پس از سرد شدن در یک پس‌کولر تا نزدیک به انجماد، هوا قبل از ورود به محفظه احتراق گرم می‌شود. احتراق متان جریان هوا ورودی به توربین را گرم می‌کند. هوای خروجی در داخل توربین منبسط می‌شود تا زمانی که به فشار محیط برسد و نیرو تولید می‌کند. سیال پس از انبساط به یک مبدل حرارتی برای تأمین گرما هدایت می‌شود. سیستم جذبی با اثر دوگانه مورد بررسی در این مطالعه از اجزای ژنراتور با دمای بالا، ژنراتور دمای پایین، مبدل حرارتی با دمای بالا، مبدل حرارتی با دمای پایین، کندانسور، جذب‌کننده، انبساط‌کننده و پمپ تشکیل می‌شود. این سیستم با گرفتن گرمای اتلافی از چرخه گازی، کارایی سیستم را بهبود می‌بخشد. سپس گرمای بازیافتی هم فرایند خنک‌سازی را از طریق اوپراتور و هم فرایند گرمایش را از طریق کندانسور انجام می‌دهد. در الکترولایزر غشای تبادل پروتون با استفاده از بازیابی اتلاف‌های توربین انرژی اولیه مورد نیاز برای الکترولیز آب فراهم شده و هیدروژن تولید می‌شود. این سیستم جذبی دوگانه با استفاده از گرمای هدررفته، سرمایش و گرمایش کارآمد را ارائه می‌کند. این رویکرد انرژی یکپارچه استفاده از انرژی حرارتی موجود را بهینه می‌کند و تخلیه گرمای اتلافی را به حداقل می‌رساند. آب به عنوان مبرد استفاده می‌شود که به دلیل ویژگی‌های ترمودینامیکی مطلوب و اثر بخشی آن در فرایندهای تبرید جذبی انتخاب شده است.



شکل ۱. شماتیک سیستم پیشنهادی

۳. روش‌شناسی

یک مدل جامع ترمودینامیکی و اقتصادی از سیستم تولید چندگانه در این مطالعه توسعه داده شد. فرایند مدل‌سازی از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی (EES) استفاده می‌کند که توانایی را برای محاسبه خواص ترمودینامیکی فراهم می‌کند. معادلات ترمودینامیکی

با فرض حالت پایدار به طور همزمان حل می‌شوند. سیستم پیشنهادی از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و عملکرد سیستم از طریق پارامترهای خروجی کمی‌سازی می‌شود. علاوه بر این، یک مطالعه پارامتریک برای ارزیابی عملکرد سیستم با تغییر پارامترهای عملکردی در شرایط کاری مشخص انجام می‌شود. یک تحلیل چندبعدی برای ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی از دیدگاه‌های انرژی، اگزرژی و اقتصادی انجام می‌شود. تجزیه و تحلیل انرژی برای درک عملکرد و کارایی یک سیستم انرژی ضروری است. یک ارزیابی عمیق از عملکرد انرژی سیستم، تلفات انرژی و استفاده کلی از انرژی می‌تواند از طریق تجزیه و تحلیل انرژی انجام شود. این اطلاعات حیاتی به عنوان پایه‌ای برای شناسایی مناطق با پتانسیل برای بهبود، بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش پایداری سیستم عمل می‌کند. پیاده‌سازی تحلیل انرژی مستلزم جمع‌آوری داده‌ها در مورد ورودی‌ها، خروجی‌ها و تبدیل‌های انرژی سیستم است. در پی آن، این داده‌ها با استفاده از روش‌های مختلف با هدف کمی کردن جریان‌های انرژی، تلفات و بازده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. یافته‌ها بینش‌های ارزشمندی را در مورد عملکرد سیستم، حوزه‌های خاصی که در آن‌ها معیارهای حفظ انرژی یا استراتژی‌های بهینه‌سازی می‌توان به کار گرفت، ارائه می‌دهد. هدف از تحلیل انرژی سیستم در یک مطالعه موردی بحث در مورد مقادیر توان خروجی خالص، نرخ تولید هیدروژن، بار خنک‌کننده سیستم و راندمان انرژی است. پارامترهای یادشده فاکتورهای اساسی برای ارزیابی عملکرد انرژی پیکربندی پیشنهادی هستند. علاوه بر این، کیفیت عملکرد سیستم پیشنهادی از طریق یک بررسی اگزرجتیک ارزیابی می‌شود. تجزیه و تحلیل اگزرژی نقش حیاتی در ارزیابی و طراحی سیستم‌های انرژی ایفا می‌کند. این یک درک جامع از کیفیت و اثربخشی جریان‌های انرژی ارائه می‌دهد، که از تمرکز محدود بر کمیت موجود در تجزیه و تحلیل انرژی فراتر می‌رود. با در نظر گرفتن هر دو جنبه کمی و کیفی، تجزیه و تحلیل اگزرژی به طور دقیق کارایی یک سیستم را ارزیابی می‌کند و مناطقی را که در آن انرژی هدر می‌رود شناسایی می‌کند. قانون دوم ترمودینامیک ابزار ایجادشده برای انجام تحلیل اگزرژی در این مطالعه است. تجزیه و تحلیل اگزرژی تلاش می‌کند تا خروجی کار را از یک چرخه به حداکثر برساند. در این تحلیل فرایندهای ترمودینامیکی ناکارآمد با کمی کردن تلفات اگزرژی از طریق تعادل اگزرژی شناسایی و بررسی می‌شود. بهبودهای احتمالی بر اساس تلفات اگزرژی قابل اجتناب و اجتناب‌ناپذیر تعیین می‌شود. تلفات اگزرژی اجتناب‌ناپذیر نشان‌دهنده حداقل تخریب اگزرژی است که توسط فناوری فعلی و عوامل اقتصادی محدود شده است. بنابراین، زبان‌های قابل اجتناب، پتانسیل بهینه‌سازی فرایند را برجسته می‌کند. بنابراین، تجزیه و تحلیل اگزرژی به سرعت ناکارآمدی‌ها و بهبودهای بالقوه را در یک سیستم مشخص می‌کند. همچنین، برای تعیین سودآوری سیستم پیشنهادی، یک آنالیز اقتصادی انجام می‌شود. درک ترمو اقتصادی، به کار رفته در سیستم‌های ترمودینامیکی از جمله سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم، متعادل کردن ملاحظات ترمودینامیکی و اقتصادی ضروری است. با استفاده از اصول اقتصادی در طراحی فنی سیستم‌های انرژی، می‌توانیم شرایط عملیاتی تجهیزات را شناسایی و اجرا کنیم که هزینه‌های کلی تولید را به حداقل می‌رساند.

ایجاد الگوریتم‌های محاسباتی برای انعکاس دقیق دینامیک و تعاملات درون سیستم‌های انرژی ضروری است. این الگوریتم‌ها برای بهبود طراحی و کارایی عملیاتی سیستم‌ها جدایی‌ناپذیر هستند، زیرا عملکرد سیستم را در موقعیت‌ها و شرایط مختلف پیش‌بینی می‌کنند. برای مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه مفروضات زیر منظور می‌شوند [۳۶]:

- کارکرد اجزای سیستم در شرایط پایا است.
- دمای سکون ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال فرض شده است.
- افت فشار و انتقال حرارت در سیستم نادیده گرفته شده است.
- از تأثیر انرژی‌های جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است.
- پمپ‌ها، توربین‌ها و کمپرسورها دارای بازده ایزوتروپیک ثابت هستند.

۴. تحلیل ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی

تجزیه و تحلیل انرژی یک سیستم مستلزم یک ارزیابی کامل است که انرژی مصرف‌شده و تولیدشده را اندازه‌گیری می‌کند و کارایی سیستم و مناطق اتلاف انرژی را مشخص می‌کند. از قوانین ترمودینامیکی برای ارزیابی اثربخشی مکانیسم‌های تبدیل

انرژی استفاده می‌کند. چنین تحلیلی برای اصلاح معماری و عملکرد سیستم، ترویج استفاده از انرژی به شیوه‌ای پایدار و ماهرانه حیاتی است. چارچوب مفهومی برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های انرژی به شرح زیر است [۳۷ و ۳۸]:

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (۱)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (۲)$$

در زمینه داده شده، علامت «h» نشان‌دهنده آنتالپی مرتبط با جریان‌های مایع خاص است. به طور هم‌زمان، عبارت‌های «in» و «out» به ترتیب نشان‌دهنده جریان‌هایی هستند که در حال ورود و خروج از سیستم هستند. تجزیه و تحلیل انرژی سیستم‌های انرژی ظرفیت کار و ناکارآمدی‌های منتج به اتلاف انرژی را ارزیابی می‌کند. استفاده از قانون دوم ترمودینامیک برای ارزیابی کیفیت جریان‌های انرژی و کارایی فرایندهای تبدیل استفاده می‌شود. این رویکرد تحلیلی ساختار گسترده‌ای برای درک و اجرای مفاهیم اکسرژی در سیستم‌های انرژی ارائه می‌دهد. اصول اساسی تعادل اکسژتیک به شرح زیر است:

$$\dot{E}_{xQ} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_i ex_i + \dot{E}_{xD} \quad (۳)$$

تجزیه و تحلیل اکسرژی چارچوبی را برای درک خروجی سیستم‌های انرژی ارائه می‌کند و در عین حال، ناکارآمدی‌هایی را که به اتلاف انرژی کمک می‌کنند، شناسایی می‌کند. با اعمال قانون دوم ترمودینامیک، این رویکرد کیفیت جریان انرژی و اثربخشی فرایندهای تبدیل انرژی را ارزیابی می‌کند و در نهایت، بینش جامعی برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد سیستم‌های انرژی ارائه می‌کند. اکسرژی فیزیکی به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (۴)$$

که در آن مقادیر h_0 ، T_0 و s_0 به ترتیب به عنوان آنتالپی، دما و آنتروپی حالت مرده تعریف می‌شوند. اکسرژی شیمیایی ویژه با رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$ex^{ch} = \sum y_i ex_i^{ch,0} + RT_0 \sum y_i \ln(y_i) \quad (۵)$$

ضریب عملکرد ترنسفورمر جذبی دو اثره به صورت رابطه ۶ ارائه می‌شود:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{absorber}}{\dot{Q}_{generator} + \dot{Q}_{evaporator}} \quad (۶)$$

روابط ریاضی برای مدل‌سازی اجکتور که در تحقیقات قبلی توسعه داده شده و در جدول ۱ خلاصه شده‌اند، در این مطالعه استفاده شدند. ضرایب a، b و c به ترتیب مقادیر ۳/۳۸۲، ۰/۹۷ و ۵/۹۲۸ هستند.

جدول ۱. روابط مورد استفاده برای مدل‌سازی الکترولایزر [۳۹ و ۴۰]

پارامتر	رابطه
کار الکترولایزر PEM	$W_{PEM} = 0.25 \times W_{Total}$
مقدار هیدروژن تولیدی	$M_{H2out} = a_{H2} \times W_{PEM}^{b_{H2}} + c_{H2}$
نرخ تولید هیدروژن در ساعت	$N_{H2out} = 3600 \times M_{H2out}$
انرژی نظری برای تولید هیدروژن	$\Delta G = \Delta H + T \Delta S$
انرژی الکتریکی مورد نیاز	$E_{elec} = JV$
ولتاژ الکترولایزر	$V = V_0 + V_{ohm} + V_{act,a} + V_{act,c}$
ولتاژ نرنست	$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{PEM} - 298)$
مازاد پتانسیل آند و کاتد	$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_0} \right)$
چگالی جریان مبادله	$J_0 = J^{ref} \exp \left(-\frac{E_{act,i}}{RT} \right)$
ولتاژ اهمی	$V_{ohm} = J R_{PEM}$
مقاومت کلی اهمی	$R_{PEM} = \int_0^L \frac{dx}{\sigma \lambda(x)}$
هدایت یونی محلی	$\sigma \lambda(x) = [0.5139 \lambda(x) - 0.326] \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$

بازده انرژی و انرژی سیستم مورد مطالعه با روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود:

$$\eta_{energy} = \frac{W_{ORC} + W_{chiler} + W_{claude} - W_{PEM}}{m_1 h_1} \quad (7)$$

$$\eta_{exergy} = \frac{W_{ORC} + W_{chiler} + W_{claude} - W_{PEM} + Ex_{55} + E_{cooling}}{m_1 e_1} \quad (8)$$

این مطالعه عملکرد سیستم را تحت شرایط عملیاتی ارزیابی می‌کند. جدول ۲ فهرستی جامع از داده‌های ورودی کلیدی مورد استفاده در شبیه‌سازی را ارائه می‌کند و بینش‌های ضروری را در مورد چارچوب عملیاتی ارائه می‌دهد.

جدول ۲. داده‌های اولیه ترمودینامیکی مورد استفاده برای مدل‌سازی

پارامتر	مقدار
راندمان ایزنتروپیک کمپرسور (%)	۸۰
راندمان ایزنتروپیک توربین (%)	۷۵
راندمان ایزنتروپیک پمپ (%)	۷۰
دمای ورودی پمپ (C)	۱
فشار ورودی پمپ (kPa)	۹/۱۲۷
دمای یک ورودی کمپرسور (C)	۱۵
فشار یک ورودی کمپرسور (kPa)	۱۰۱
دمای ورودی کمپرسور ۲ (C)	۴۰
فشار ورودی دو کمپرسور (kPa)	۳۱۹/۳۹
دمای ورودی توربین (C)	۸۰۰
فشار ورودی توربین (kPa)	۷۰۰

۵. تحلیل اقتصادی

ترمواکونومیک شاخه‌ای از مهندسی است که ارزیابی ترمودینامیکی را از طریق تجزیه و تحلیل انرژی با اصول اقتصادی ادغام می‌کند و اطلاعات ارزشمندی را برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم در اختیار طراحان قرار می‌دهد. هدف از تحلیل ترمواکونومیک در سیستم‌های ترمودینامیکی، تعیین قیمت واحد محصولات انرژی با محاسبه تخریب انرژی در هر یک از اجزای سیستم است. ارزیابی اقتصادی سیستم‌های انرژی، امکان‌سنجی مالی و اثربخشی عملیاتی آن‌ها را با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری‌های اولیه، هزینه‌های جاری و درآمد بالقوه ارزیابی می‌کند. یکی از جنبه‌های کلیدی این تجزیه و تحلیل، محاسبه نرخ هزینه سالانه است که نشان‌دهنده کل بار مالی، از جمله راه‌اندازی، بهره‌برداری و نگهداری سیستم است. در تحلیل اقتصادی، معادله تعادل برای هزینه‌های سیستم در حالت ثابت با رابطه ۹ بیان می‌شود [۴۱]:

$$C_{P, total} = C_{F, total} + Z_{total}^{CI} + Z_{total}^{OM} \quad (9)$$

معادله ۹ مشخص می‌کند که هزینه کل جریان‌های انرژی خروجی از سیستم برای یک جزء معین برابر با کل هزینه‌های متحمل‌شده برای تعیین این هزینه است، که شامل جریان اکسرژی ورودی در کنار سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های جانبی می‌شود. برای هر جزء k ، نسبت اکسرژی ورودی و خروجی با استفاده از روابط انرژی محاسبه می‌شود. با پیش‌بینی این هزینه‌ها، رابطه تعمیم‌یافته برای نسبت هزینه مرتبط با هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری برای جزء k را می‌توان به صورت رابطه ۱۰ بیان کرد [۴۲]:

$$C_{CIM} = CRF \times \frac{\varphi_r}{(N \times 3600)} \times PEC_k \quad (10)$$

هزینه عملیاتی سالانه (AOC) به شرح زیر تعیین می‌شود:

$$AOC = (TOC \phi CRF) \quad (11)$$

در این رابطه TOC مجموع هزینه‌های عملیاتی و ϕ ضریب تعمیر و نگهداری است که دارای مقدار $1/0.6$ است [۴۲]. n و i به ترتیب نرخ بهره و دوره بهره‌برداری نیروگاه را نشان می‌دهد. پارامتر CRF ضریب بازافت سرمایه را نشان می‌دهد که به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود [۴۳]:

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

عملکردهای مختلفی برای ارزیابی ترمواقصدی سیستم‌های ترمودینامیکی وجود دارد. در این تحقیق هزینه تراز شده انرژی (LCOE) و هزینه تراز شده هیدروژن (LCOH) برای سیستم به صورت ۱۳ تعریف شده است [۴۴ و ۴۵]:

$$LCOE = \frac{AOC}{(W_{total} + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (13)$$

$$LCOH = \frac{AOC}{((LHV_{H_2} \dot{N}_{H_2} \dot{m}_{H_2}) + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (14)$$

در روابط یادشده، ساعت‌های عملیاتی سالانه سیستم با τ نشان داده می‌شود که ۸ هزار ساعت در سال فرض می‌شود. در مطالعه حاضر، متغیرهای اقتصادی از جمله قیمت سرمایه سالانه (Cacap)، قیمت جایگزینی (Carep) و قیمت تعمیر و نگهداری (Camain) محاسبه می‌شود. Cacap بیان کننده هزینه‌های خرید تجهیزات سیستم است که با رابطه ۱۵ نشان داده می‌شود [۴۶]:

$$Cacap = Ccap \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

به صورتی که در این رابطه Ccap قیمت کل سیستم خریداری شده است، i نرخ بهره واقعی و CRF ضریب بازگشت سرمایه است. نرخ سود واقعی با رابطه ۱۶ بیان می‌شود:

$$i = \frac{j - f}{1 + f} \quad (16)$$

که در این رابطه f میزان تورم سالانه و j میزان سود اسمی را بیان می‌کند. در ارزیابی اقتصادی که روی سیستم مورد مطالعه انجام می‌شود، میزان تورم سالانه و میزان بهره اسمی به ترتیب ۱۷ و ۲۰ سال فرض می‌شود. کل قیمت سیستم خریداری شده (Ccap) با رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$Ccap = 1.1 \times Z_{total} \quad (17)$$

برای محاسبه قیمت جایگزینی سیستم (Carep) روابط ۱۸ و ۱۹ به کار گرفته می‌شود:

$$Carep = Crap \times \frac{0.2}{(1+i)^n - 1} \quad (18)$$

$$Crap = Ccap \times (1+i)^n \quad (19)$$

Camain بیان کننده هزینه‌های نگهداری دوره‌ای است که با رابطه ۲۰ نشان داده می‌شود:

$$Camain = 0.5 \times Z_{all \text{ part}} \quad (20)$$

(ACS) هزینه سالانه سیستم است که با استفاده از رابطه ۲۱ محاسبه می‌شود:

$$ACS = Cacap + Ccap + Carep + Camain + Crap \quad (21)$$

با محاسبه، تمام هزینه‌ها و درآمدها طی عمر مفید سازه‌های یکپارچه به زمان جاری یا زمان شروع پروژه تبدیل می‌شود. NPV ارزش فعلی خالص سیستم است که طبق رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$NPV = \frac{ACS}{\left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)} \quad (22)$$

برای دستیابی به تعادل بین تولید انرژی و هزینه در سیستم پیشنهادی، مجموعه‌ای از روابط، همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. ایجاد تعادل بین این عوامل از نظر اقتصادی برای دستیابی به اهداف تولید انرژی مورد نظر و در عین حال مدیریت مؤثر هزینه‌ها امکان‌پذیر است. به کارگیری این روابط عملکرد کلی سیستم را افزایش می‌دهد و تضمین می‌کند که ملاحظات هزینه به اندازه کافی مورد توجه قرار می‌گیرند.

جدول ۳. توابع هزینه اجزای مختلف سیستم [۴۷-۵۰]

تابع هزینه	اجزای سیستم
$z = \left(\frac{39.5 \times m_2}{0.9 - \eta_{comp}} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$	کمپرسور هوا
$z = \left(\frac{46.08 \times m_{11}}{0.995 - \frac{P_{10}}{P_{11}}} \right) (1 + \exp(0.018 \times T_{11} - 26.4))$	محفظه احتراق
$z = \left(\frac{479.34 \times m_{12}}{0.92 - \eta_{tur}} \right) \ln \left(\frac{P_{11}}{P_{12}} \right) (1 + \exp(0.036 \times T_{12} - 54.4))$	توربین گازی
$z = 2143 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.5}$	مبدل حرارتی
$z = 17500 \times \left(\frac{A_{Gen}}{100} \right)^{0.6}$	ژنراتور سیکل خنک‌کننده جذبی
$z = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100} \right)^{0.6}$	کندانسور سیکل خنک‌کننده جذبی
$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Absorb}}{100} \right)^{0.6}$	جاذب سیکل خنک‌کننده جذبی
$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Evap}}{100} \right)^{0.6}$	اوپراتور سیکل خنک‌کننده جذبی
$z = 12000 \times \left(\frac{A_{SHE}}{100} \right)^{0.6}$	مبدل حرارتی بخار سیکل خنک‌کننده جذبی
$Z = 1000 \times (W_{elec})$	چرخه الکترولیز PEM

۶. اعتبارسنجی

کد محاسباتی در نرم‌افزار EES برای نشان دادن دقت ریاضی معادلات نوشته شده است. در این راستا، دو معیار بسیار کمک‌کننده به عنوان موارد آزمایشی انتخاب شده و هر مورد به طور جداگانه شبیه‌سازی می‌شود. در همین شرایط، کار حاضر تطابق بسیار خوبی را با نتایج مرجع نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده دقت مدل‌سازی ریاضی از سیستم سه‌گانه پیشنهادی است. در مطالعه حاضر، آرایش جدیدی از سیستم تولید چندانگانه با ترکیب ذخیره‌ساز انرژی هوا بر اساس ترنسفورمر جذبی دو اثره مورد ارزیابی ترمودینامیکی قرار گرفته است. نتایج حاصل سیستم مورد مطالعه با کار فانی و همکاران [۵۱] اعتبارسنجی شده و نتایج در جدول ۴ مقایسه شده، به صورتی که اختلاف ناچیز بین نتایج به‌دست‌آمده با مرجع معرفی شده نشان‌دهنده دقت زیاد اعتبارسنجی صورت گرفته است. مدل مورد بررسی بر اساس شرایط و فرضیات اولیه از جمله دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال خواهند بود. سپس، نتایج با هم مقایسه خواهند شد. تغییرات فشار و گرما بر اثر عبور از اجزای سیستم ناچیز است. در شرایط تعادل، محلول‌های خروجی از جاذب و ژنراتور با توجه به دماها و غلظت‌های جداگانه اشباع فرض می‌شوند. مبرد خروجی از کندانسور و بخار خروجی از اوپراتور، هر دو در دمای اشباع مربوطه، اشباع در نظر گرفته می‌شوند. بخار مبرد خروجی از ژنراتور

در حالت فوق گرم بوده و در دمای ژنراتور قرار دارد. این تجزیه و تحلیل از شرایط واقعی، از جمله حالت‌های غیرتصادفی در ورودی‌های ژنراتور و جاذب، و همچنین وضعیت‌های خروجی پمپ محلول و مبدل حرارتی محلول استفاده می‌کند.

جدول ۴. اعتبارسنجی سیستم پیشنهادی با کار فانی و همکاران [۵۱]

پارامتر	نتایج به دست آمده	نتایج مرجع
دمای ورودی کمپرسور هوای ۱ (c)	۱۵	۱۵
دمای خروجی کمپرسور هوای ۱ (c)	۱۴۷/۶	۱۴۷/۲۵
فشار ورودی کمپرسور هوای ۲ (kPa)	۳۱۹/۴	۳۱۹/۳۹
فشار خروجی کمپرسور هوای ۲ (kPa)	۱۰۵۴	۱۰۱۰
کار کمپرسور هوای ۱ (kW)	۱۲/۸۵	۱۳/۸۹
کار کمپرسور هوای ۲ (kW)	۱۵/۴۵	۱۴/۸۸

۷. نتایج و بحث

فرایند شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی (EES) انجام شد. نرم‌افزار EES به دلیل پایگاه داده جامع سیالات کاری متعدد و چارچوب قابل انطباق برای فرمول‌بندی معادلات متنوع، به عنوان ابزاری قوی برای انجام شبیه‌سازی‌های ترمودینامیکی و انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شود. این بخش تجزیه و تحلیل جامعی از نتایج اقتصادی و مهندسی حاصل از مدل‌سازی سیستم ارائه می‌دهد. این شامل یک مطالعه پارامتری عمیق است که اثرات پارامترهای مختلف را بر عملکرد سیستم بررسی می‌کند. در این تجزیه و تحلیل، سیستم به دقت تحت شرایط عملیاتی ارزیابی می‌شود. جدول ۵ نتایج کلیدی به دست آمده در شبیه‌سازی سیستم را تشریح می‌کند و درک مهمی از چارچوب عملیاتی ارائه می‌دهد.

جدول ۵. نتایج تحلیل ترمودینامیکی

پارامتر	مقدار
بازده انرژی سیستم (%)	۲۶
بازده اگزرژی سیستم (%)	۱۲
کار توربین گاز (kW)	۲۲/۸
کار کمپرسور ۱ (kW)	۱۲/۸۵
کار کمپرسور ۲ (kW)	۴۵/۱۵
انتقال حرارت ژنراتور دمای پایین دوم (kW)	۴۳۶۱
انتقال حرارت جاذب (kW)	۴/۰۰۳
انتقال حرارت مبدل حرارتی با دمای پایین (kW)	۶۰/۲۱
انتقال حرارت کندانسور (kW)	۱۱۷/۲
انتقال حرارت افتر کولر (kW)	۱۵/۴۵
انتقال حرارت اواپراتور (kW)	۳۳/۹۷
انتقال حرارت اینتر کولر (kW)	۱۰/۴۴
انتقال حرارت ژنراتور دما بالا (kW)	۹۰/۳۶
انتقال حرارت مبدل حرارتی دما بالا (kW)	۴۴۳۱
انتقال حرارت ژنراتور دمای پایین اول (kW)	۴۲۴۲

این بخش نتایج اقتصادی و مهندسی به دست آمده از مدل‌سازی سیستم را تحلیل می‌کند. این شامل یک مطالعه پارامتری دقیق است که بررسی می‌کند چگونه عوامل مختلف بر کارایی سیستم تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، یافته‌های بهینه‌سازی را برای تعیین پارامترهای عملیاتی بهینه ارائه می‌دهد. این مطالعه یک مفهوم سیستم جدید را با ادغام یک سیستم تولید جدید و یک سیستم ذخیره انرژی هوا با یک سیستم خنک‌کننده جذبی برای تعیین عملکرد بهینه بررسی می‌کند. بر اساس تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی، سیستم بازده انرژی ۲۶ درصد و بازده اگزرژی ۱۲ درصد را نشان داد که هم عملکرد موفق و هم یک معماری ترمودینامیکی بهینه را نشان می‌دهد. توان خروجی سیستم مورد مطالعه ۵/۴۹ کیلو وات محاسبه می‌شود. تجزیه و تحلیل اتلاف

اگرژی در میان اجزای مختلف فرعی یک سیستم انرژی با بررسی دقیق برگشت‌ناپذیری انجام می‌شود. این شامل در نظر گرفتن جنبه‌هایی مانند گرادیان دما، تفاوت در فشار و محدودیت در جریان است. چنین تحلیلی برای تعیین کمیت کاهش اگرژی که طی تبدیل انرژی رخ می‌دهد، حیاتی است و در نتیجه، ناکارآمدی‌های سیستم را روشن می‌کند و بهبودهای بالقوه را شناسایی می‌کند. با تعیین منابع اتلاف اگرژی، مهندسان می‌توانند تغییراتی را انجام دهند که کارایی سیستم در عملکرد و سازگاری با محیط زیست آن را تقویت کند. نتایج حاصل از نابودی اگرژی اجزای سیستم در جدول ۶ نشان داده شده است. در سیستم پیشنهادی به مقدار ۱۴۷۹ کیلووات نابودی اگرژی صورت می‌گیرد که از این مقدار الکترولایزر بالاترین تخریب اگرژی را تجربه می‌کند، در حالی که کمپرسور هوا اول کمترین میزان تخریب اگرژی را نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج نابودی اگرژی اجزای مختلف سیستم

پارامتر	مقدار
افت کولر (kw)	۹/۶
ذخیره‌ساز انرژی هوا (kw)	۴۱/۴۱
محفظه احتراق (kw)	۲۵/۶۹
کمپرسور هوای ۱ (kw)	۱/۹
کمپرسور هوای ۲ (kw)	۲/۰۶
جاذب (kw)	۹۹/۷۴
توربین گازی (kw)	۲/۳۹۵
ژنراتور دما بالا (kw)	۱۰۳/۹
کندانسور (kw)	۱۰/۰۶
مبدل حرارتی دما بالا (kw)	۱۱۵/۳
اینتر کولر (kw)	۴/۵۱
ژنراتور دما پایین اول (kw)	۳۷۲/۱
ژنراتور دما پایین دوم (kw)	۵۸۰/۷
اوپراتور (kw)	۵۰/۹۸
مبدل حرارتی دما پایین (kw)	۶۱/۰۴
الکترولایزر (kw)	۴۵۳۶

سیستم پیشنهادی از دیدگاه اقتصادی تحلیل می‌شود و توابع هزینه تجدیدنظر شده برای اجزای مختلف آن ایجاد می‌شود تا از کارایی اقتصادی بالا در برنامه‌های مختلف اطمینان حاصل شود. جدول ۷ نتایج تحلیل اقتصادی شامل هزینه‌های مرتبط با اجزای مختلف سیستم را ارائه می‌دهد. الکترولایزر اول بیشترین سهم را در نرخ هزینه بین اجزای سیستم دارد و کمترین نرخ هزینه در سیستم متعلق به کمپرسور هوای اول است.

جدول ۷. نتایج نرخ هزینه اجزای مختلف سیستم

پارامتر	مقدار
محفظه احتراق (\$/GJ)	۵۸۹
کمپرسور هوای ۱ (\$/GJ)	۱۴۴
کمپرسور هوای ۲ (\$/GJ)	۱۷۲/۱
ژنراتور دما پایین ۱ (\$/GJ)	۵۴۸۱۰
مبدل حرارتی (\$/GJ)	۲۰۲۴
توربین گازی (\$/GJ)	۳۹۷/۹
ژنراتور دما پایین دوم (\$/GJ)	۲۵۶۳۱
اوپراتور (\$/GJ)	۱۸۸۶
مبدل حرارتی دما پایین (\$/GJ)	۴۵۱۳
کندانسور (\$/GJ)	۱۷۱۸
ژنراتور دما بالا (\$/GJ)	۳۰۶۷
مبدل حرارتی دما بالا (\$/GJ)	۴۹۹۰۶
الکترولایزر (\$/GJ)	۵۱۲۵۴۸۱

علاوه بر این، یک تجزیه و تحلیل خارجی اقتصادی برای ارزیابی سودآوری سیستم پیشنهادی انجام می‌شود که نرخ کل هزینه ۰/۲۰۴ دلار بر گیگاژول را برای مطالعه موردی تحلیل شده نشان می‌دهد. ارزیابی اقتصادی انجام شده با دوره بازگشت سرمایه به مقدار ۰/۱۸ نشان دهنده توجیه اقتصادی بالای کار حاضر است، به صورتی که سیستم تولید چندانگانه با گذشت کمتر از سه ماه به سود می‌رسد. برخی از نتایج اساسی برای تحلیل اقتصادی در جدول ۸ ارائه شده است. هزینه تولید برق (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) دو پارامتر مهم در ارزیابی اقتصادی سیستم هستند که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۴/۳۷۹ سنت در هر کیلووات ساعت و ۱/۷۴۱ دلار به ازای هر کیلوگرم تعیین شده است.

جدول ۸. نتایج ارزیابی اقتصادی

پارامتر	مقدار
هزینه تولید برق (cent/kwh)	۴/۳۷۹
هزینه تولید هیدروژن (\$/kg)	۱/۷۴۱
هزینه کل سیستم (\$/GJ)	۰/۲۰۴
هزینه سالانه سیستم (\$)	۱۴/۵۲
قیمت سرمایه سالانه (\$/year)	۰/۲۲
کل قیمت دستگاه خریداری شده (\$)	۰/۴۵
ارزش فعلی خالص (\$/year)	۰/۰۲
نرخ بازگشت سرمایه	۰/۲
دوره بازگشت سرمایه	۰/۱۸

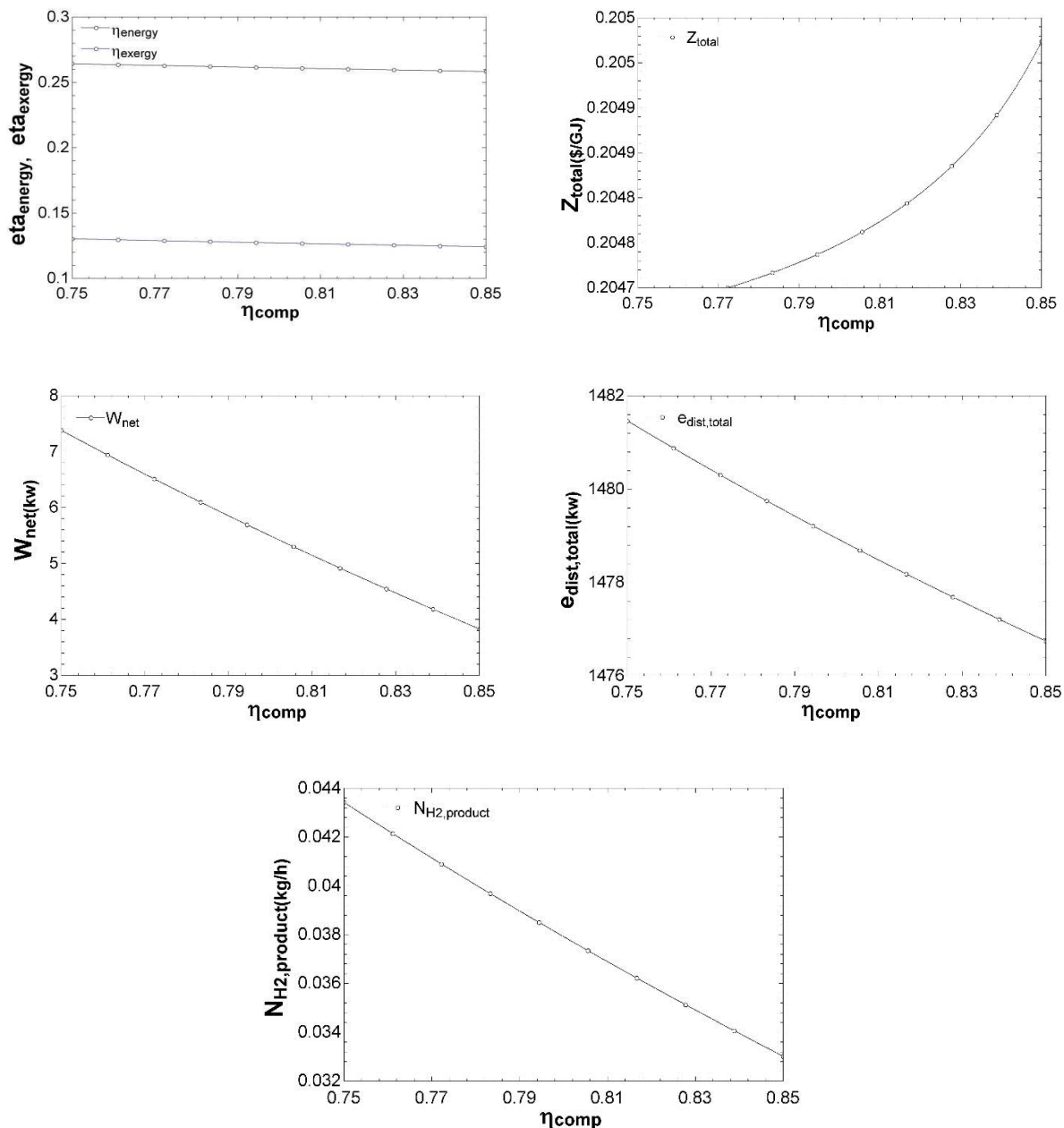
۷-۱. تحلیل پارامتریک

تجزیه و تحلیل پارامتریک روشی مؤثر برای ارزیابی عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف است که درک جامعی از سیستم مورد نظر ارائه می‌دهد. برای بهینه‌سازی طراحی و استراتژی‌های عملیاتی، تجزیه و تحلیل کامل متغیرها با هدف شناسایی عوامل کلیدی که به طور قابل توجهی بر بهره‌وری انرژی و پایداری بلندمدت سیستم تأثیر می‌گذارند، ضروری است. این مطالعه به بررسی تأثیر این عوامل حیاتی بر عملکرد فنی و اقتصادی سیستم می‌پردازد. در سیستم پیشنهادی، اثرات پارامترهای کلیدی طراحی شامل راندمان ایزنتروپیک توربین، راندمان ایزنتروپیک کمپرسور و دمای ورودی کمپرسور روی بازده انرژی و اگزرژی سیستم، نابودی اگزرژی، توان خروجی و نرخ هزینه سیستم بررسی می‌شود.

۷-۱-۱. اثر تغییرات بازده ایزنتروپیک کمپرسور بر عملکرد سیستم

تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک کمپرسور بر عملکرد سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است. وقتی بازده ایزنتروپیک کمپرسور از ۷۵ درصد تا ۸۵ درصد افزایش می‌یابد روی بازده انرژی و اگزرژی سیستم تأثیر مثبت می‌گذارد. عملکرد ترمودینامیکی سیستم با افزایش بازده ایزنتروپیک کمپرسور بهبود می‌یابد و اتلاف‌ها در سیستم کاهش می‌یابد و شاهد نابودی اگزرژی کمتری در سیستم هستیم. هنگامی که مقدار بازده ایزنتروپیک کمپرسور افزایش یافت، کار مصرفی کمپرسور کاهش می‌یابد و در نتیجه، با توجه به رابطه مستقیم بازده اگزرژی و کار می‌توان نتیجه گرفت که رشد بازده اگزرژی سیستم باعث می‌شود که کار مصرفی کمتری توسط کمپرسور مورد نیاز باشد. این کاهش در تولید توان و هیدروژن به یک واکنش زنجیره‌ای نسبت داده می‌شود: کاهش راندمان کمپرسور باعث اختلال در جریان سیکل می‌شود که به نوبه خود سرعت فرایند چرخه را کاهش می‌دهد و به کاهش خروجی کار توربین در سرعت‌های عملیاتی پایین‌تر منجر می‌شود. در نتیجه، کاهش توان الکتریکی بر عملکرد الکترولیز تأثیر منفی می‌گذارد و در نهایت، به کاهش تولید هیدروژن منجر می‌شود. کاهش اگزرژی به این دلیل اتفاق می‌افتد که راندمان اگزرژی مستقیم با توان خروجی سیستم مرتبط است. در نتیجه، کاهش کار سیستم به کاهش متناظر در اگزرژی سیستم منجر می‌شود. الکترولیزها که در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر به کار می‌روند، هیدروژن را با عبور جریان مستقیم از آب خالص تولید می‌کنند و در نتیجه آن را از طریق فرایند الکترولیز آب به هیدروژن و اکسیژن تقسیم می‌کنند. اگزرژی این سیستم پتانسیل آن را برای کار مفید کمی می‌کند. کاهش در کل خروجی کار به طور مستقیم بازده اگزرژی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، این

خروجی کار کاهش یافته امکان استفاده از تجهیزات ارزان تر را فراهم می کند و در نهایت، هزینه های عملیاتی کلی سیستم را کاهش می دهد. برای کاهش کار مصرفی کمپرسور و افزایش یافتن بازده سیستم به تجهیزات گران قیمت نیاز است و نرخ هزینه کل سیستم با رشد بازده ایزنتروپیک کمپرسور افزایش می یابد.

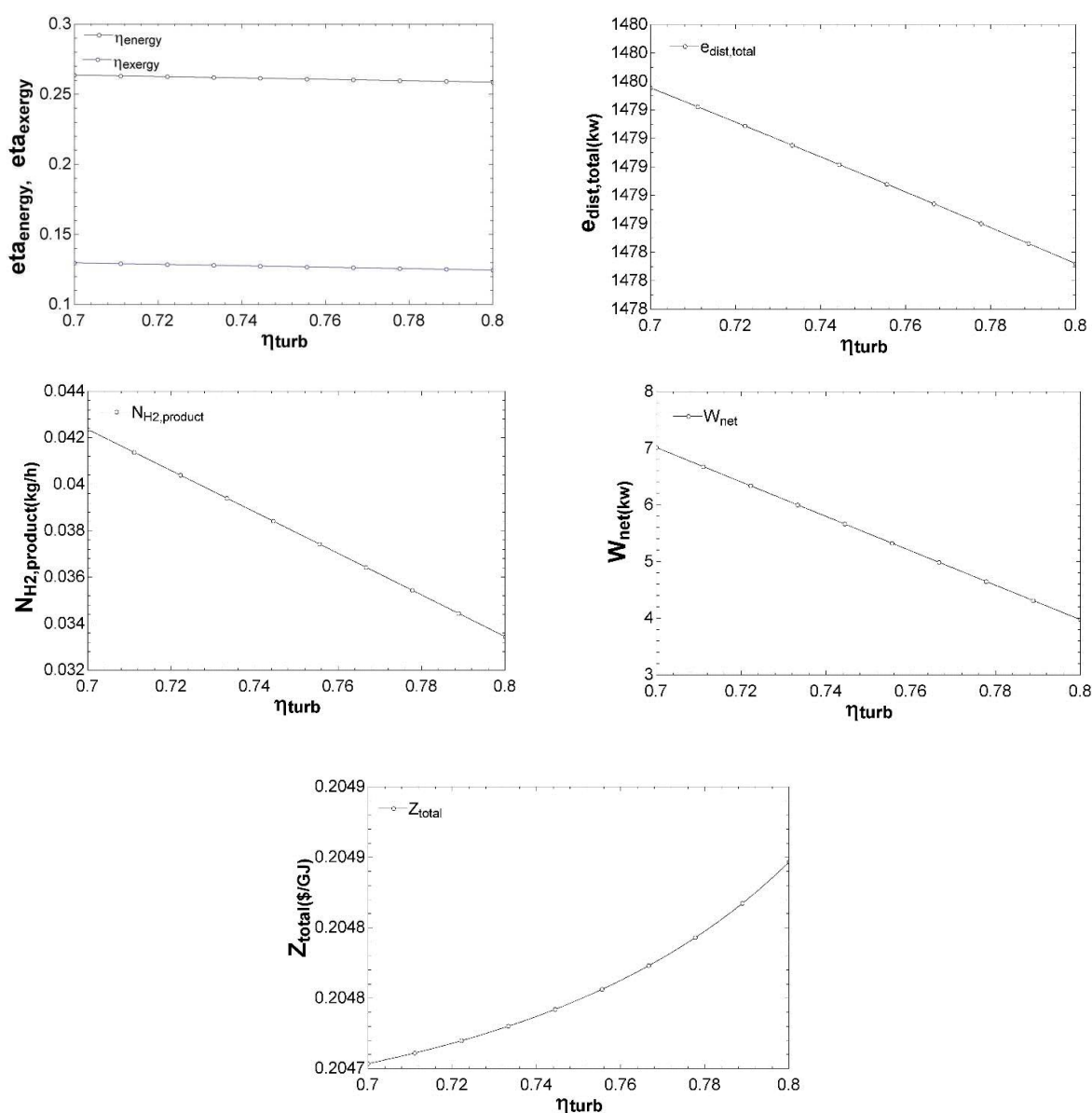


شکل ۲. تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک کمپرسور بر عملکرد سیستم

۷-۱-۲. اثر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

طبق شکل ۳، تأثیر تغییر بازده ایزنتروپیک توربین روی کارکرد سیستم بررسی شده است. همان طور که نشان داده شده است، با افزایش بازده ایزنتروپیک توربین از ۷۰ درصد تا ۸۰ درصد شاهد عملکرد بهتری از سیستم هستیم و بازده انرژی و انرژی رشد پیدا می کند. مقدار بزرگ تر بازده ایزنتروپیک توربین شرایط کارکردی توربین را بهبود می دهد و قابلیت دسترس پذیری سیستم افزایش می یابد و اتلاف های انرژی کمتری خواهیم داشت. رشد بازده ایزنتروپیک توربین و مقدار نابودی انرژی کمتر ناشی از آن به کار مصرفی کمتری در سیستم منجر می شود. برای رسیدن به سطح بالاتری از بازده انرژی در سیستم نیاز است که

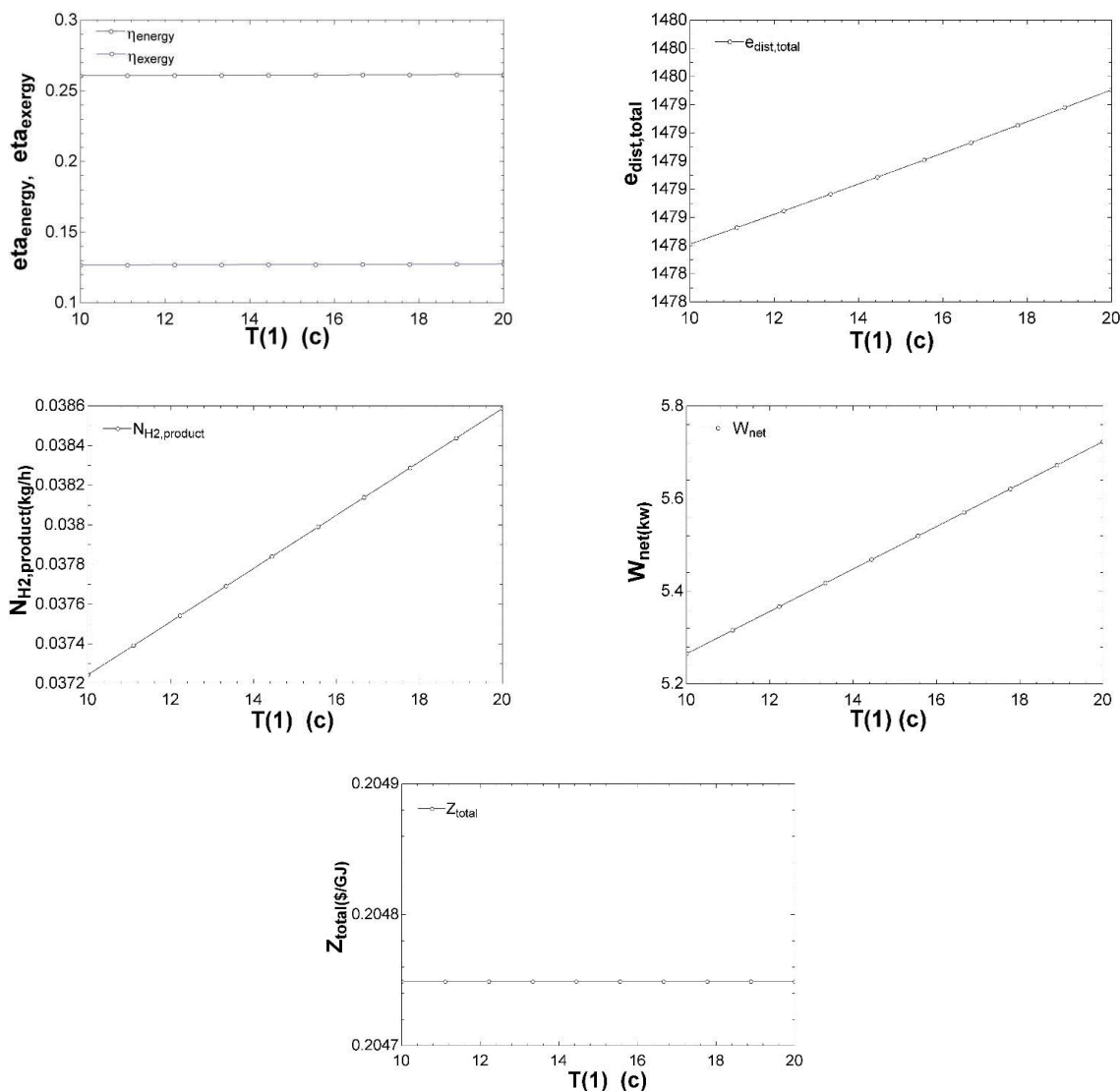
هزینه بیشتری صرف خرید توربین با بازده ایزنتروپیک بیشتر شود و در نتیجه، نرخ هزینه سیستم افزایش یابد. افزایش نرخ هزینه را می‌توان به عوامل مختلفی نسبت داد. نخست، با افزایش توان کل سیستم، هزینه‌های مربوط به سیستم نیز افزایش می‌یابد که به تجهیزات بزرگ‌تر و جامع‌تری نیاز دارد. علاوه بر این، سایر عوامل مؤثر در افزایش نرخ هزینه شامل افزایش کلی در هزینه‌های تولید، هزینه‌های انرژی و هزینه‌های متحمل‌شده به دلیل عدم تولید در زمان توقف سیستم است. توجه به این نکته ضروری است که از آنجا که برای هر زیرسیستم مورد استفاده در سیستم اصلی هزینه‌ای متحمل شده است، ظرفیت تولید نسبت به هزینه‌های انجام‌شده به‌صرفه نبوده و در نهایت به افزایش هزینه کلی سیستم منجر می‌شود. از آنجا که توربین به عنوان منبع اصلی الکتریسیته عمل می‌کند و الکترولیز برای تولید هیدروژن به این الکتریسیته متکی است، توربین کارآمدتر الکتریسیته بیشتری تولید می‌کند که به نوبه خود عملکرد الکترولیزر را افزایش می‌دهد و به کاهش انرژی مصرفی الکترولیزر منجر می‌شود. افزایش راندمان توربین باعث بهبود راندمان اگزرژی سیستم شده، اما به افزایش نرخ هزینه سیستم نیز منجر شده است. افزایش مشاهده‌شده در نرخ اگزرژی مستقیم با همبستگی مثبت بین بازده اگزرژی و توان خروجی سیستم مرتبط است. کار مصرفی کمتر در سیستم به نرخ اگزرژی بالاتر منجر می‌شود.



شکل ۳. تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

۷-۱-۳. اثر تغییرات دمای ورودی کمپرسور بر عملکرد سیستم

با افزایش دمای ورودی کمپرسور از ۱۰ تا ۲۰ درجه سلسیوس شرایط کارکردی سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرد و تغییرات پارامترهای کارکردی کلیدی سیستم با افزایش دما ورودی کمپرسور در شکل ۴ به نمایش درآمده است. وقتی دمای ورودی کمپرسور افزایش می‌یابد، روی بازده انرژی و اگرژی سیستم تأثیر منفی می‌گذارد و شاهد افت بازده سیستم هستیم. افت کارکرد سیستم ناشی از اتلافات بیشتر قابلیت انجام کار و دسترس‌پذیری در سیستم است. دمای ورودی کمپرسور بالاتر به تخریب اگرژی بیشتر منجر شده و کار مصرفی بیشتری را شاهد هستیم. وقتی که دمای ورودی کمپرسور افزایش می‌یابد نرخ هزینه سیستم به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. افزایش دمای ورودی کمپرسور باعث می‌شود نسبت تراکم بیشتری را در کمپرسور شاهد باشیم. با افزایش نسبت فشار، تولید توان افزایش می‌یابد. کار مورد نیاز کمپرسور هوا در نسبت‌های فشار کمتر نسبت به کمپرسورهای بالاتر کمتر است. علاوه بر این، سرعت افزایش کار کمپرسور در نسبت‌های فشار کمتر کندتر است. این فعل و انفعال به رسیدن تولید توان خالص به حداکثر قبل از کاهش با ادامه افزایش نسبت فشار منجر می‌شود. علاوه بر این، تخریب اگرژی با افزایش نسبت فشار افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این است که نسبت فشار بالاتر، تفاوت اگرژی بین هوای فشرده و تخلیه کمپرسور را کاهش می‌دهد. با افزایش نسبت تراکم، تولید سرما افزایش می‌یابد، تولید گرما کاهش می‌یابد و توان خالص ابتدا در نسبت‌های تراکم پایین‌تر قبل از کاهش در نسبت‌های بالاتر افزایش می‌یابد.



شکل ۴. تأثیر تغییرات دمای ورودی کمپرسور بر عملکرد سیستم

۸. نتیجه‌گیری

در این تحقیق گامی مؤثر به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط زیست برداشته شد. این تحقیق یک سیستم ترکیبی گرمایش و برق جدید متشکل از یک چرخه گازی، یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا، یک زیرسیستم سرمایش جذبی دو اثره، یک ژنراتور مبدل حرارتی بخار و یک الکترولایزر غشای تبادل پروتون را پیشنهاد و تحلیل کرده است. این مطالعه نوعی سیستم انرژی نوآورانه را ارائه می‌کند که از ادغام ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و یک چرخه خنک‌کننده جذبی استفاده می‌کند. این سیستم یکپارچه فرایند تولید چندگانه را برای تولید برق، گرمایش و سرمایش هدایت می‌کند. عملکرد سیستم از طریق استفاده از هر دو تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی ارزیابی می‌شود. بررسی دقیق در سطح مؤلفه، زمینه‌های حیاتی برای بهبود و ضعف‌های بالقوه در طراحی را نشان می‌دهد. ارزیابی و پیاده‌سازی سیستم‌های انرژی تا حد زیادی بر اهمیت انجام تحلیل‌های زیست‌محیطی متکی است. این عمل درک کل‌نگر از پیامدهای اکولوژیکی احتمالی تولید، توزیع و مصرف انرژی را تسهیل می‌کند. دامنه چنین تحقیقاتی فراتر از ارزیابی‌های انرژی متعارف است و عوامل مختلفی مانند انتشار کربن، تخریب زیستگاه و کاهش منابع را در نظر می‌گیرد. با ادغام ملاحظات زیست‌محیطی در فرایند تصمیم‌گیری، ذی‌نفعان می‌توانند به طور مؤثر اثرات نامطلوب بالقوه را شناسایی کنند و کاهش دهند و در عین حال، اقدامات پایداری و حفظ منابع را ترویج کنند. در نتیجه، یکسان‌سازی تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی، توسعه و مدیریت سیستم‌های انرژی را به گونه‌ای امکان‌پذیر می‌کند که ردپای اکولوژیکی آن‌ها را به حداقل برساند و به آینده‌ای پایدار و انعطاف‌پذیر کمک کند. این مطالعه همچنین حساسیت عملکرد کلی سیستم را به تغییرات در پارامترهای طراحی کلیدی بررسی می‌کند. این کار روی یک سیستم خنک‌کننده جذبی متمرکز است و در مقایسه با یافته‌های تحقیقاتی موجود، بهبود قابل توجهی در عملکرد ترمودینامیکی نشان می‌دهد. این کار یک سیستم چندتایی یکپارچه جدید با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی هوا را توصیف می‌کند. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی سیستم نشان می‌دهد بیشترین نابودی انرژی در الکترولایزر صورت می‌گیرد و برای بهبود عملکرد سیستم می‌توان با افزایش دادن دمای ورودی الکترولایزر نابودی انرژی بیشینه را کاهش داد تا بازدهی سیستم افزایش یابد. مدل‌سازی ترمودینامیکی بازده انرژی ۲۶ درصد و بازده انرژی ۱۲ درصد را پیش‌بینی می‌کند. یک ارزیابی اقتصادی، شامل توابع هزینه به‌روزشده و پارامترهای اولیه خاص، نرخ کل هزینه ۰/۲۰۴ دلار بر گیگاژول را نشان می‌دهد. با استفاده از این سیستم در محل مصرف انرژی، هزینه‌های انتقال توان تولیدشده از شبکه تولید به محل مصرف را می‌توان کاهش داد. استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما گامی کارآمد برای افزایش راندمان و راندمان تولید برق و از نظر کاهش مصرف انرژی است. از میان اجزای ترمودینامیکی سیستم بیشترین سهم از نرخ هزینه سیستم متعلق به الکترولایزر است. این نتایج امکان‌سنجی اقتصادی سیستم و پتانسیل آن را برای پیشبرد توسعه صنعتی و راه‌حل‌های ذخیره انرژی اتلافی نشان می‌دهد.

پیشنهادهای

۱. استفاده از واحدهای سرمایش اچکتوری
۲. به‌کارگیری از منابع انرژی تجدیدپذیر همچون انرژی زمین‌گرمایی و خورشیدی
۳. بهینه‌سازی سیستم با الگوریتم‌های مورد نظر
۴. تولید هیدروژن با استفاده از فناوری‌های جدید

منابع

- [1] Liu L, Mei Q, Jia W. A flexible diesel spray model for advanced injection strategy. *Fuel*. 2022 Apr 15;314:122784.
- [2] Chen R, Zhao B, He T, Tu L, Xie Z, Zhong N, Zou D. Study on coupling transient mixed lubrication and time-varying wear of main bearing in actual operation of low-speed diesel engine. *Tribology International*. 2024 Mar 1;191:109159.
- [3] Shi W, Zhang R, Li H, Wu Y, Toan S, Sun Z, Sun Z. Modulating mxene-derived Ni-Mom-Mo2-mTiC2Tx structure for intensified low-temperature ethanol reforming. *Advanced Energy Materials*. 2023 Oct;13(40):2301920.
- [4] Huo J, Peng C. Depletion of natural resources and environmental quality: Prospects of energy use, energy imports, and economic growth hindrances. *Resources policy*. 2023 Oct 1;86:104049.
- [5] Qi X, Yu F, Meng Z, Sun Z, Zhang N, Guo Z. Preliminary design of the suppressive containment system based on HPR1000. *Nuclear Engineering and Design*. 2023 Dec 15;415:112743.
- [6] Ifaei P, Nazari-Heris M, Charmchi AS, Asadi S, Yoo C. Sustainable energies and machine learning: An organized review of recent applications and challenges. *Energy*. 2023 Mar 1;266:126432.
- [7] Shinde TU, Dalvi VH, Patil RG, Mathpati CS, Panse SV, Joshi JB. Thermal performance analysis of novel receiver for parabolic trough solar collector. *Energy*. 2022 Sep 1;254:124343.
- [8] Dan M, He A, Ren Q, Li W, Huang K, Wang X, Feng B, Sardari F. Multi-aspect evaluation of a novel double-flash geothermally-powered integrated multigeneration system for generating power, cooling, and liquefied Hydrogen. *Energy*. 2024 Feb 15;289:129900.
- [9] Guzović Z, Duić N, Piacentino A, Markovska N, Mathiesen BV, Lund H. Paving the way for the Paris Agreement: Contributions of SDEWES science. *Energy*. 2023 Jan 15;263:125617.
- [10] Arslan O, Arslan AE. Multi-criteria optimization of a new geothermal driven integrated power and hydrogen production system via a new index: economic sustainability (EcoSI). *Fuel*. 2024 Feb 15;358:130160.
- [11] Awad M, Said A, Saad MH, Farouk A, Mahmoud MM, Alshammari MS, Alghaythi ML, Aleem SH, Abdelaziz AY, Omar AI. A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application. *Alexandria Engineering Journal*. 2024 Jan 1;87:213-39.
- [12] Wang J, Chen B, Che Y. Bi-level sizing optimization of a distributed solar hybrid CCHP system considering economic, energy, and environmental objectives. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023 Feb 1;145:108684.
- [13] Liu X, Hayati H. CCHP optimization for a building through optimal size of the prime mover considering energy, exergy, economics, and environmental aspects. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022 Nov 1;39:102403.
- [14] Lucarelli G, Genovese M, Florio G, Fragiaco P. 3E (energy, economic, environmental) multi-objective optimization of CCHP industrial plant: Investigation of the optimal technology and the optimal operating strategy. *Energy*. 2023 Sep 1;278:127837.
- [15] Anderson A. Optimum sizing of CCHP system using modified Group teaching optimization algorithm. *Journal of Smart Systems and Stable Energy*. 2022 Dec 1;1(4):303-18.
- [16] Tooryan F, HassanzadehFard H, Dargahi V, Jin S. A cost-effective approach for optimal energy management of a hybrid CCHP microgrid with different hydrogen production considering load growth analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022 Feb 1;47(10):6569-85.
- [17] Akbarnataj K, Saffaripour M, Houshfar E. Novel design of a CCHP system to boost nearly zero-carbon building concept. *Energy Conversion and Management*. 2024 Jun 1;309:118468.
- [18] Wang J, Al-attab K, Heng TY. Techno-economic and thermodynamic analyses of a novel CCHP system driven by a solid oxide fuel cell integrated with a biomass gasification unit and a double-effect LiBr-water absorption chiller or heat cycle and carbon capture. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024 Jul 3:1-26.
- [19] Lu Z, Duan L, Wang Z. Performance evaluation of a novel CCHP system integrated with MCFC, ISCC and LiBr refrigeration system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022 Jun 5;47(48):20957-72.

- [20] Akman M, Ergin S. Thermo-environmental analysis and performance optimisation of transcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery of a marine diesel engine. *Ships and offshore structures*. 2021 Nov 26;16(10):1104-13.
- [21] Bo Z, Mihardjo LW, Dahari M, Abo-Khalil AG, Al-Qawasmi AR, Mohamed AM, Parikhani T. Thermodynamic and exergoeconomic analyses and optimization of an auxiliary tri-generation system for a ship utilizing exhaust gases from its engine. *Journal of Cleaner Production*. 2021 Mar 10;287:125012.
- [22] Ouyang T, Wang Z, Wang G, Zhao Z, Xie S, Li X. Advanced thermo-economic scheme and multi-objective optimization for exploiting the waste heat potentiality of marine natural gas engine. *Energy*. 2021 Dec 1;236:121440.
- [23] Demir ME, Çıtakoğlu F. Design and modeling of a multigeneration system driven by waste heat of a marine diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022 Dec 8;47(95):40513-30.
- [24] Xie L, Yang J, Hu N. Parameter optimization of supercritical CO₂ Brayton cycle for flue gas waste heat recovery of Marine high-speed diesel engine. In 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS) 2023 Aug 4 (pp. 1637-1641). IEEE.
- [25] Cao Y, Delpisheh M, Yousefiasl S, Athari H, El-Shorbagy MA, Jarad F, Dahari M, Wae-hayee M. Examination and optimization of a novel auxiliary trigeneration system for a ship through waste-to-energy from its engine. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022 Mar 1;31:101860.
- [26] You, H.; Han, J.; Liu, Y. Conventional and advanced exergoeconomic assessments of a CCHP and MED system based on solid oxide fuel cell and micro gas turbine. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020, 45, 12143–12160.
- [27] Liu, Y.; Han, J.; You, H. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a CCHP system based on LNG cold energy utilization and flue gas waste heat recovery with CO₂ capture. *Energy* 2020, 190, 116201.
- [28] Gholamian, E.; Ahmadi, P.; Hanafizadeh, P.; Ashjaee, M. Dynamic feasibility assessment and 3E analysis of a smart building energy system integrated with hybrid photovoltaic-thermal panels and energy storage. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2020, 42, 100835.
- [29] Ozturk, M.; Dincer, I.; Javani, N. Thermodynamic modeling of a solar energy based combined cycle with rock bed heat storage system. *Sol. Energy* 2020, 200, 51–60.
- [30] Song, Y.; Mu, H.; Li, N.; Shi, X.; Zhao, X.; Chen, C.; Wang, H. Techno-economic analysis of a hybrid energy system for CCHP and hydrogen production based on solar energy. *Int. J. Hydrogen Energy* 2022, 47, 24533–24547.
- [31] Assareh, E.; Dejdari, A.; Ershadi, A.; Jafarian, M.; Mansouri, M.; Azish, E.; Saedpanah, E.; Aghajari, M.; Wang, X. Performance analysis of solar-assisted-geothermal combined cooling, heating, and power (CCHP) systems incorporated with a hydrogen generation subsystem. *J. Build. Eng.* 2023, 65, 105727.
- [32] Zarei, A.; Akhavan, S.; Rabiee, M.B.; Elahi, S. Energy, exergy and economic analysis of a novel solar driven CCHP system powered by organic Rankine cycle and photovoltaic thermal collector. *Appl. Therm. Eng.* 2021, 194, 117091.
- [33] Assareh, E.; Dejdari, A.; Ershadi, A.; Jafarian, M.; Mansouri, M.; Azish, E.; Saedpanah, E.; Lee, M. Techno-economic analysis of combined cooling, heating, and power (CCHP) system integrated with multiple renewable energy sources and energy storage units. *Energy Build.* 2023, 278, 112618.
- [34] Ghorbani, S.; Deymi-Dashtebayaz, M.; Dadpour, D.; Delpisheh, M. Parametric study and optimization of a novel geothermaldriven combined cooling, heating, and power (CCHP) system. *Energy* 2023, 263, 126143.
- [35] Perrone, D.; Castiglione, T.; Morrone, P.; Pantano, F.; Bova, S. Numerical and experimental assessment of a micro-combined cooling, heating, and power (CCHP) system based on biomass gasification. *Appl. Therm. Eng.* 2023, 219, 119600.
- [36] Liu X, Hu G, Zeng Z. Performance characterization and multi-objective optimization of integrating a biomass-fueled brayton cycle, a kalina cycle, and an organic rankine cycle with a claude hydrogen liquefaction cycle. *Energy*. 2023 Jan 15;263:125535.
- [37] Bouzgarrou S, Abed AM, Chauhan BS, Alsenani TR, Alharbi FS, Alkhalaf S, Albaijan I, Abdullaeva BS, Deifalla A. Thermo-economic-environmental evaluation of an innovative solar-

- powered system integrated with LNG regasification process for large-scale hydrogen production and liquefaction. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024 Jan 1;53:103904.
- [38] Emadi MA, Mahmoudimehr J. Modeling and thermo-economic optimization of a new multi-generation system with geothermal heat source and LNG heat sink. *Energy Conversion and Management*. 2019 Jun 1;189:153-66.
- [39] Emadi MA, Mahmoudimehr J. Modeling and thermo-economic optimization of a new multi-generation system with geothermal heat source and LNG heat sink. *Energy Conversion and Management*. 2019 Jun 1;189:153-66.
- [40] Kianfard H, Khalilarya S, Jafarmadar S. Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC. *Energy conversion and management*. 2018 Dec 1;177:339-49.
- [41] Turton R, Bailie RC, Whiting WB, Shaeiwitz JA. Analysis, synthesis and design of chemical processes. Pearson Education; 2008 Dec 24.
- [42] Valero, A., & Torres, C. Relative free energy function and structural theory of thermoeconomics. In *Proceedings* (Vol. 58, No. 1, p. 28). MDPI. 2020, September.
- [43] Razmi AR, Janbaz M. Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*. 2020 Jan 15;204:112320.
- [44] Sayyaadi H. Multi-objective approach in thermoenvrionomic optimization of a benchmark cogeneration system. *Applied Energy*. 2009 Jun 1;86(6):867-79.
- [45] Wang L, Bu X, Wang H, Ma Z, Ma W, Li H. Thermoeconomic evaluation and optimization of LiBr-H₂O double absorption heat transformer driven by flat plate collector. *Energy Conversion and Management*. 2018 Apr 15;162:66-76.
- [46] Taghavi M, Salarian H, Ghorbani B. Economic evaluation of a hybrid hydrogen liquefaction system utilizing liquid air cold recovery and renewable energies. *Renewable Energy Research and Applications*. 2023 Jan 1;4(1):125-43.
- [47] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SM. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*. 2017 Apr 1;124:625-39.
- [48] Kianfard H, Khalilarya S, Jafarmadar S. Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC. *Energy conversion and management*. 2018 Dec 1;177:339-49.
- [49] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SM. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*. 2017 Apr 1;124:625-39.
- [50] Cavalcanti EJ. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Jan 1;67:507-19.
- [51] Sadreddini A, Fani M, Aghdam MA, Mohammadi A. Exergy analysis and optimization of a CCHP system composed of compressed air energy storage system and ORC cycle. *Energy conversion and management*. 2018 Feb 1;157:111-22.