



Thermodynamic and Economic Analysis of a New Multiple Generation System Combined with Compressed Air Energy Storage and Sulfur Dioxide-Based Ejector Cooling System.

Ali Eyvazi*¹

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Abstract

A novel compressed air energy storage system integrated with combined cooling, heating and power is proposed and investigated in this study. The system under study uses sulfur dioxide as the working fluid under the ejector refrigeration system to produce coolant, which has not been used in previous studies, and the waste heat is recovered and stored in the compressed air storage device, which shows the innovative aspect of the present study. A complete and comprehensive thermodynamic and economic analysis is performed on the proposed system. The proposed system is examined from different perspectives and the system performance is quantified through output parameters. Using up-to-date cost functions, the studied system is examined from an economic perspective to clearly demonstrate the cost-effectiveness of the proposed system. In addition, a parametric analysis is performed to evaluate the system behavior by changing key parameters under different operating conditions. The results of the thermodynamic analysis indicate the optimal thermodynamic performance of the proposed system, such that an energy efficiency of 21% and an exergy efficiency of 55% are achieved for the studied system. In addition, an economic analysis yields a total system cost of 232\$ per gigajoule.

Keywords

Compressed Air Storage
Ejector Refrigeration
Exergy
Sulfur Dioxide
Economic Analysis

Received: 09.27.2024

Revised: 12.23.2024

Accepted: 12.28.2024

*Corresponding Author

Ali Eyvazi

Email

alieyvazi1996@gmail.com

1- Introduction

The standard of living of human beings has always depended on the amount and manner of energy use for their activities, so that identifying energy sources and their optimal exploitation has been considered one of the important tools for the development and economic self-sufficiency of each country since the beginning of history. Energy saving in buildings is one of the important measures used to reduce energy shortages and further sustainable development. The energy consumption of ventilation duct systems has attracted much attention. Considering the effects of energy in various economic, industrial, political, social and environmental areas and the need for a comprehensive approach to this important and vital issue, what is needed today more than ever is to examine the role and importance of energy in the

quality of life of societies and the need to optimize its consumption. The amount of energy consumption in buildings is increasing every year. On the other hand, the reduction of non-renewable resources and the harmful effects of using fossil fuels, such as global warming and greenhouse gas emissions, create limitations for the energy supply of buildings. Therefore, the use of renewable energy sources seems essential to address the energy demand in buildings. To achieve this, the construction of sustainable buildings and structures is required so that future urbanization is taken into account by societies. The transportation of sour gas to the refinery is a critical issue that can destroy the inner walls of the pipes due to the presence of toxic and corrosive hydrogen sulfide and lead to an explosion. These losses are so significant that a



large part of the literature and developments in developed countries are dedicated to the introduction of various useful corrosion control technologies. Undoubtedly, the close and tight relationship between energy and industrial development and the increase in energy consumption and prices in recent years, on the one hand, and the role of energy in the cost of manufactured and industrial goods, as well as the pressure of the economy and global trade on the economies of countries to reduce product prices, on the other hand, have caused the importance of efficient energy consumption to be more important than ever before for policymakers and managers of economic and industrial enterprises in the country. Early human societies met their needs using simple and primitive tools, and the only energy they received from nature to continue their lives was the energy stored in food. Gradually, humanity's familiarity with fire increased the scope of using resources and energies available in nature by using wood. Although humanity was aware of the existence of fuels such as crude oil, for centuries the main source of energy for societies was wood and the chemical energy contained in it. After the discovery of oil resources in the world and the beginning of the industrialization of societies to produce various products, which was a consequence of industrialization, human energy needs became much broader and included various resources such as oil, coal, and natural gas. After two centuries of unlimited use of oil resources and reserves, when the life of some oil reservoirs in different regions of the world was approaching its end and its price increased, experts in different countries began to think about replacing other energy carriers with fossil fuels. However, the environmental issue has always been raised alongside the issue of limited fossil fuel resources. Carbon dioxide, as the largest representative of greenhouse gases, has been affecting the climate for more than 1000 years and, by absorbing infrared radiation reflected by the earth, causes global warming. This phenomenon has affected the world in terms of climate stress, and this may cause damages such as drought, acid rain and rising sea levels. In this regard, many efforts have been made, and the use of energies such as natural

gas, solar energy, wind energy, and geothermal energy has assumed special importance and is expanding rapidly. With the expansion of research in the field of renewable energy sources, it is expected that in the not too distant future, these sources, especially in distributed energy production systems, will gain the necessary economic justification to replace fossil fuels. The main goal of evaluating and investigating renewable sources is to find a suitable and cheaper place for consumption sources. Researchers succeeded in storing excess electricity by using electricity generated from renewable energies and compressing air underground. This method is low-cost and more efficient than electricity storage batteries. The use of solar panels and wind farms is increasing day by day; but storing the energy obtained by using renewable energies and using it in power supply networks has become a major challenge for scientists. European scientists have recently succeeded in achieving a low-cost method for energy storage. In this method, air is used to store energy. Although scientists have been able to partially solve the problem of storing electricity generated using renewable energy by using flow batteries and smart power grids, European researchers have recently been able to create a new technology for storing electricity using the air compression method. In this method, which has been around for several decades, excess electricity is used to compress air and then the compressed air is stored in a cave-like place underground. To use the electricity stored by this method, called CAES, it is enough to direct the compressed air to a gas turbine so that the turbine can generate electricity with its help. This method is theoretically an efficient and practical method because it can be used at a very low cost and is in fact the cheapest method for storing energy. On the other hand, using this method does not require any special geographical conditions compared to other methods such as creating reservoirs for hydroelectric power generation, which must be installed in the mountains. Traditional compressed air energy storage uses a gas turbine to generate electricity in the energy release phase, which not only consumes fossil fuels, but also emits greenhouse gases.

2- Methodology

In this study, a complete and comprehensive thermodynamic and economic modeling of the multiple production system has been carried out. For modeling, EES software, which includes functions related to thermodynamic properties, is used. The thermodynamic equations are solved in steady state and simultaneously. In the economic analysis section, the cost-effectiveness of the proposed system is evaluated by applying up-to-date prices and cost rates. Then, a parametric analysis is performed to evaluate the effect of changes in functional parameters on the main performance of the system.

3- Results

In this study, by introducing a new multi-generation system with air energy storage combined with a sulfur dioxide-based ejector cooling system, we witness the optimal performance of the proposed system. The proposed system is investigated using energy, exergy, and economic approaches, and the cycle carbon dioxide emissions are determined during the operation phase. A detailed examination of each system component is carried out to find critical points and system defects. By changing the design parameters, the effect of their change on the system performance is examined in the following. The results of the system analysis are shown in this section. It should be noted that the thermodynamic properties of the working fluids are calculated using the EES software. Having the thermodynamic properties of each flow, the system performance indicators can be calculated. The present study allows the simultaneous generation of electricity, heating, and cooling, and by using a compressed air storage device, it provides the ability to provide energy during peak consumption times and has wide application in residential, commercial, and industrial places. Thermodynamic analysis of the proposed system shows an energy efficiency of 21% and an exergy efficiency of 55%, indicating proper system operation and optimal arrangement of the thermodynamic components of the system. The use

of sulfur dioxide as a working fluid allows the maximum output power of the proposed system to be produced by the sulfur dioxide turbine, and the system efficiency increases significantly. To improve the performance of the proposed system, the maximum exergy destruction among the thermodynamic components of the system is calculated and by providing methods to reduce the maximum exergy destruction in the system, the system efficiency increases significantly. One of the methods to reduce energy consumption and improve the thermodynamic performance of the multiple generation system is to increase the maximum temperature and reduce the minimum temperature. In the present work, to improve the efficiency of the system, after identifying the maximum exergy destruction among the system components, we reduce the maximum exergy destruction by increasing the input temperature to the component with the highest exergy destruction, which has a greater effect on increasing the system efficiency compared to previous methods. The total exergy loss of the system is calculated to be 49,189 kW, and the highest exergy loss occurs in the sulfur dioxide turbine, and the air compressor has the lowest exergy loss among the components of the proposed system. To expand the application of the proposed system in various commercial, industrial and residential industries to provide electricity, heating and cooling simultaneously at the point of energy consumption and eliminate the cost of transferring electricity from the power plant to the point of consumption and the possibility of storing energy and selling excess energy to the grid, which is considered an important achievement of the present study in the field of electricity generation and preventing power outages during peak consumption and sustainable power supply, a new working fluid of sulfur dioxide is used in the ejector cooling system and the use of thermodynamic components with efficient and up-to-date cost functions improves the economic justification of the system. According to the results of the economic evaluation of the system, the total cost of the proposed system is calculated to be 232\$/GJ and the return on investment in the present work is 18 years, which indicates the appropriate commercialization

capability and high economic justification of the present work. According to the results of the economic evaluation of the studied system, the ejector has the highest share of the cost rate among the system components and the lowest cost rate in the system belongs to the air compressor.

4- Conclusion

A novel integrated compressed air energy storage subsystem along with a multiple generation system based on sulfur dioxide ejector cooling system is proposed and investigated in this study. The proposed system is investigated using energy, exergy and economic approaches. A detailed investigation of each system component is carried out to find critical points and system defects. By changing the design parameters, the effect of their change on the system performance is further investigated. In the present study, by using sulfur dioxide in the ejector cooling system, we witness an improvement in the thermodynamic performance of the proposed system compared to previous research and a novel arrangement of the multiple generation system is presented which is combined with the air energy storage subsystem. The basic results of thermodynamic modeling showed that the energy and exergy efficiency of the system are 21 and 55 percent, respectively. By applying up-to-date and efficient cost functions for the system components and by economic analysis with assumed initial economic data, the basic results of economic analysis showed that the overall cost rate of the

system is calculated to be 232\$ per gigajoule. The results of the thermodynamic and economic analysis show that the proposed system has a good performance and is economically viable and can take a significant step in the industrial development and storage of waste energy of energy systems.

5- References

- [1] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Jan;136:1-9.
- [2] Haghghatjoo H, Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel. *The European Physical Journal Plus*. 2022 Sep 13;137(9):1042.
- [3] Yadegari M, Ghassemi M. Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*. 2022 Mar 1;23(1):122-46.
- [4] Mamorian, Akbari, Seydamirhossein, Javanshir. Energy and exergy analysis of organic Rankine cycle used to recover waste heat from cement industry. *Science and technology in mechanical engineering*. 2023.



تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید چندگانه نوین ترکیب شده با ذخیره انرژی هوای فشرده و سیستم سرمایه‌ش اجکتوری مبتنی بر گوگرد دی‌اکسید

علی عیوضی^{*۱}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

چکیده

یک سیستم جدید ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده که با سرمایه‌ش، گرمایش و برق ترکیبی یکپارچه شده است در این مطالعه پیشنهاد و بررسی می‌شود. سیستم مورد بررسی از گوگرد دی‌اکسید به عنوان سیال کاری زیرسیستم تبرید اجکتوری جهت تولید خنک‌کننده استفاده می‌کند که تاکنون در مطالعات قبلی به کار گرفته نشده است و حرارت اتلافی بازیابی شده و در ذخیره‌ساز هوای فشرده ذخیره می‌شود که جنبه نوآورانه مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی کامل و جامعی روی سیستم پیشنهادی انجام می‌شود. سیستم پیشنهادی از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و عملکرد سیستم از طریق پارامترهای خروجی کمی سازی می‌شود. با استفاده از توابع هزینه به‌روز سیستم مورد مطالعه از جنبه اقتصادی بررسی می‌شود تا مقرون به‌صرفه بودن سیستم پیشنهادی به خوبی نمایان شود. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای ارزیابی رفتار سیستم با تغییر پارامترهای کلیدی در شرایط کاری گوناگون انجام می‌شود. نتایج تحلیل ترمودینامیکی نشان‌دهنده عملکرد ترمودینامیکی مطلوب سیستم پیشنهادی است به صورتی که بازده انرژی ۲۱ درصد و بازده انرژی ۵۵ درصد برای سیستم مورد مطالعه حاصل می‌شود. به‌علاوه، با تحلیل اقتصادی صورت گرفته هزینه کل سیستم ۲۳۲ دلار بر گیگاژول بدست می‌آید.

کلمات کلیدی

ذخیره‌سازی هوای فشرده
تبرید اجکتوری
انرژی
گوگرد دی‌اکسید
تحلیل اقتصادی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

*نویسنده مسئول

علی عیوضی

ایمیل

alieyvazi1996@gmail.com

۱- مقدمه

تقاضا برای مصرف انواع انرژی به‌ویژه سوخت‌های فسیلی، انرژی به‌طور عام و نفت و گاز به‌طور خاص در استراتژی‌های توسعه ملی و جهانی و سیاست‌گذاری‌های کلان، جایگاهی بسیار مهم پیدا کرده و در حقیقت به یک عامل کلیدی و استراتژیک در حیات ملت‌ها و دولت‌ها تبدیل شده‌است. تولید و انتشار آلاینده‌ها به همراه افزایش مصرف سوخت در کلان‌شهرها از مسائل جدی مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس گزارش منتشرشده توسط سازمان جهانی بهداشت، سالانه بیش از ۳۰۰ میلیون نفر بر اثر تنفس هوای آلوده جان خود را از دست می‌دهند. آلاینده‌های هوا مانند دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ازن و مونوکسید کربن، پیامدهای ناگوار متعددی را بر سلامتی انسان‌ها و مرگ‌های زودرس به دنبال دارند. بر اساس مطالعات انجام‌شده، حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد آلودگی هوا ناشی از خودروها و سایر وسایل نقلیه است و مابقی ناشی از صنعت و سایر منابع است؛ بنابراین کنترل آلاینده‌های هوا برای ایجاد محیطی پاک و دلپذیر بسیار مهم است [۴].

سطح زندگی بشر همواره به میزان و نحوه کاربرد انرژی برای انجام فعالیت‌های خود بستگی داشته است، به‌طوری‌که شناسایی منابع انرژی‌زا و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها، یکی از ابزارهای مهم در جهت توسعه و خودکفایی اقتصادی هر کشور از آغاز تاریخ تاکنون محسوب شده است. صرفه‌جویی در انرژی در ساختمان‌ها یکی از اقدامات مهمی است که برای کاهش کمبود انرژی و توسعه پایدار بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف انرژی سیستم‌های کانال تهویه توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مصرف انرژی فن ناشی از مقاومت سیستم‌های تهویه تقریباً ۲۰ تا ۴۰ درصد انرژی مصرفی ساختمان‌های عمومی است. برای برخی از ساختمان‌ها، نرخ‌ها حتی بالاتر از آنهایی است که با سیستم‌های خنک‌کننده تهویه مرتبط هستند؛ بنابراین، تعیین نحوه بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های کانال تهویه، در نتیجه کاهش مقاومت و کاهش مصرف انرژی فن، به یک موضوع کلیدی تبدیل شده است [۳-۱]. در پی صنعتی شدن کشورها و توسعه شهرنشینی و افزایش



موجود در طبیعت را با به‌کارگیری چوب افزایش داد. گرچه بشر از وجود سوخت‌هایی نظیر نفت خام آگاهی داشت اما برای قرن‌ها عمده‌ترین ماده تأمین‌کننده انرژی جوامع، همان چوب و انرژی شیمیایی نهفته شده در آن بود. پس از اکتشاف منابع نفت در جهان و شروع حرکت صنعتی شدن جوامع، جهت تولید محصولات مختلف که پیامد صنعتی شدن بود، نیازهای انرژی بشر به‌مراتب گسترده‌تر شد و منابع مختلفی مانند نفت، زغال‌سنگ و گاز طبیعی را دربرگرفت.

پس از دو قرن استفاده نامحدود از منابع و ذخایر نفتی، هنگامی که عمر برخی از مخازن نفتی در مناطق مختلف جهان به پایان خود نزدیک شد و قیمت آن افزایش یافت، کارشناسان در کشورهای مختلف به فکر جایگزینی حامل‌های انرژی دیگر با سوخت‌های فسیلی افتادند. باین‌حال، همواره در کنار مسئله‌ی محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، بحث زیست‌محیطی نیز مطرح بوده است. دی‌اکسید کربن به‌عنوان بزرگ‌ترین نماینده گازهای گلخانه‌ای به‌تنهایی بیش از ۱۰۰۰ سال بر روی آب‌وهوا تأثیر می‌گذارد و با جذب اشعه مادون‌قرمز منعکس‌شده توسط زمین، موجب پدیده گرمایش زمین می‌شود. این پدیده، جهان را از نظر تنش آب‌وهوایی تحت تأثیر قرار داده است و این مسئله ممکن است خساراتی از جمله خشک‌سالی، باران‌های اسیدی و افزایش سطح دریاهای را به همراه داشته باشد [۸]. در این راستا تلاش‌های زیادی انجام‌گرفته و به‌کارگیری انرژی‌هایی نظیر گاز طبیعی، انرژی خورشیدی، انرژی باد و انرژی زمین‌گرمایی اهمیت ویژه‌ای به خود گرفته و با سرعت فراوانی رو به گسترش می‌باشند. با گسترش تحقیقات در زمینه منابع تجدید پذیر انرژی، انتظار می‌رود در آینده‌ای نه‌چندان دور، این منابع، به‌خصوص در سیستم‌های تولید پراکنده انرژی، توجیه اقتصادی لازم برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی را به دست آورند. هدف اصلی از ارزیابی و بررسی منابع تجدید پذیر، یافتن جایگاهی مناسب و ارزان قیمت‌تر برای منابع مصرفی می‌باشد. پژوهشگران موفق شدند توسط برق تولیدشده از انرژی‌های تجدید پذیر و با فشرده‌سازی هوا در زیرزمین برق مازاد بر مصرف را ذخیره کنند. این روش کم‌هزینه بوده و نسبت به باتری‌های ذخیره‌کننده برق کارایی بیشتری دارد. استفاده از پانل‌های خورشیدی و مزارع بادی به‌طور روزافزونی در حال افزایش است؛ اما ذخیره‌سازی انرژی به‌دست‌آمده با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و استفاده از آن در شبکه‌های برق‌رسانی، به یک چالش بزرگ برای دانشمندان تبدیل شده‌است.

با توجه به تأثیرات انرژی در حوزه‌های گوناگون اقتصادی، صنعتی، سیاسی، اجتماعی و زیست‌محیطی و ضرورت نگرش جامع به این مقوله مهم و حیاتی، آنچه امروز نیاز آن بیش از گذشته احساس می‌شود، بررسی نقش و اهمیت انرژی در کیفیت زندگی جوامع و لزوم بهینه‌سازی مصرف آن می‌باشد. میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها هر سال در حال افزایش است. از سوی دیگر، کاهش منابع تجدید ناپذیر و تأثیرات زیان‌بار استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، محدودیت‌هایی را برای تأمین انرژی ساختمان‌ها ایجاد می‌کند. از این‌رو، استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر برای رسیدگی به تقاضای انرژی در ساختمان‌ها ضروری به نظر می‌رسد. برای تحقق این امر، ساخت ساختمان‌ها و سازه‌های پایدار موردنیاز است تا شهرنشینی آینده توسط جوامع موردتوجه قرار گیرد. مدیریت و بهبود اقدامات بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها سناریوی آینده اولویت‌بندی شده تا سال ۲۰۵۰ است.

یکی از عوامل مهم در تخریب تجهیزات صنعتی، خوردگی است که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات صنعت شناخته می‌شود. علاوه بر اتلاف مواد و انرژی مرتبط با خوردگی، خسارات اقتصادی نیز به دنبال دارد و اثرات مخرب ناشی از خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین تلفات جانی را چندین برابر می‌کند. دمای بالا، فشار بالا و محیط شیمیایی بسیار خورنده از ویژگی‌های اصلی خطوط لوله گاز ترش است. انتقال گاز ترش به پالایشگاه موضوعی حیاتی است که می‌تواند دیواره‌های داخلی لوله‌ها را به دلیل وجود هیدروژن گوگرد سمی و خورنده تخریب کرده و منجر به انفجار راه‌اندازی شود. این تلفات به‌قدری مهم هستند که بخش بزرگی از ادبیات و پیشرفت‌های موجود در کشورهای توسعه‌یافته به معرفی فناوری‌های مختلف کنترل خوردگی مفید اختصاص یافته است [۷-۵]. بی‌تردید روابط نزدیک و تنگاتنگ انرژی و توسعه صنعتی و افزایش مصرف و بهای انرژی طی سال‌های اخیر از یک طرف و نقش انرژی در بهای تمام‌شده کالاهای تولیدی و صنعتی و نیز فشار اقتصاد و تجارت جهانی بر اقتصاد کشورها در جهت کاهش قیمت محصولات از سوی دیگر موجب شده است که اهمیت مصرف بهینه انرژی بیش از گذشته موردتوجه سیاست‌گذاران و مدیران بنگاه‌های اقتصادی و صنعتی کشور قرار گیرد.

جوامع اولیه انسانی، نیازهای خود را با استفاده از ابزارآلات ساده و ابتدایی برآورده می‌نمودند و تنها انرژی که از طبیعت برای ادامه حیات خود دریافت می‌نمودند، همان انرژی ذخیره شده در مواد غذایی بوده است. به تدریج آشنایی بشر با آتش، دامنه استفاده از منابع و انرژی‌های

کردند. علاوه بر این، سرعت چرخش برای تحقق بهترین کارایی با فشارهای ذخیره‌سازی مختلف بهینه‌سازی شد.

چن و همکاران [۱۴] یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده آدیاباتیک ایزوباریک جدید بر اساس یک سیال فرار را معرفی کردند که هوای فشرده و سیال فرار محفظه ذخیره گاز را به دو قسمت تقسیم می‌کند تا فشار محفظه ذخیره گاز ثابت بماند. آن‌ها گزارش دادند که راندمان سیستم پیشنهادی ۶/۲۶ درصد بیشتر از سیستم سنتی است. لی و همکاران [۱۵] یک سیستم بهبودیافته ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده که از مواد تغییر فاز دهنده و آب برای ذخیره گرما استفاده می‌کند را طراحی کردند. مشخصه سیستم پیشنهادی تولید سرمایش، گرمایش و توان خروجی به‌طور هم‌زمان می‌باشد. یائو و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید هم‌زمان متشکل از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، یک موتورگازی و سیستم تبرید آب آمونیاک را پیشنهاد دادند و بهینه‌سازی کردند. چن و همکاران [۱۷] یک ادغام جدید بین یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و سیستم تولید چندگانه را پیشنهاد کردند. آن‌ها همچنین یک بهینه‌سازی را با استفاده از دو تابع هدف شامل هزینه و عملکرد حرارتی سیستم انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که در زمستان هزینه سیستم، راندمان انرژی و راندمان انرژی به ترتیب ۳۳۳۰ دلار، ۲۲ درصد و ۱۶/۹ درصد است. از سوی دیگر، در تابستان این مقادیر به ترتیب ۳۵۰۷ دلار، ۱۴/۷ و ۶۰ درصد می‌باشد. در مطالعه دیگری، یک سیستم تولید هم‌زمان که شامل یک چرخه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بود توسط روشناس و همکاران [۱۸] پیشنهاد شد. سیستم تولید هم‌زمان پیشنهادی گرمایش و برق را به‌طور هم‌زمان تولید می‌کند. سیستم پیشنهادی از نظر رویکرد انرژی و انرژی موردبررسی قرار گرفت. آن‌ها همچنین میزان انتشار کربن دی‌اکسید در محیط را محاسبه کردند. آن‌ها گزارش دادند که بازده انرژی و بازده انرژی به ترتیب ۵۸ درصد و ۷۸ درصد می‌باشد. فراهم کردن قابلیت ذخیره‌سازی انرژی اتلافی در سیستم‌های تولید چندگانه می‌تواند باعث رشد چشمگیر کارایی سیستم تولید چندگانه شود که تاکنون در مطالعات قبلی به این مورد پرداخته نشده است. برای ارائه سیستم تولید چندگانه کارآمد بازبایی حرارت اتلافی امری بسیار حیاتی محسوب می‌شود. به‌علاوه امکان ذخیره‌سازی انرژی اتلافی بازبایی شده باعث بهبود چشمگیر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه می‌شود که در کار حاضر با به‌کارگیری از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده این مهم محقق می‌شود. بررسی مطالعات گذشته نشان داد که اکثر سیستم‌های بررسی‌شده

دانشمندان اروپایی به‌تازگی موفق شده‌اند به یک روش کم‌هزینه برای ذخیره‌سازی انرژی دست پیدا کنند. در این روش از هوا برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. باوجوداینکه دانشمندان توانسته‌اند با استفاده از باتری‌های جریان و شبکه‌های برق‌رسانی هوشمند تا حدودی مشکل ذخیره‌سازی برق تولیدشده را با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر حل کنند، اما به‌تازگی محققان اروپایی توانسته‌اند با استفاده از روش فشرده‌سازی هوا، نیز فناوری جدیدی برای ذخیره‌سازی نیروی برق ایجاد است. در این روش که چندین دهه سابقه دارد، از برق مازاد بر مصرف برای فشرده‌سازی هوا استفاده می‌شود و سپس هوای فشرده‌شده در مکانی غار مانند در زیرزمین ذخیره می‌گردد. برای استفاده از برق ذخیره‌شده توسط این روش که CAES نام دارد، کافی است هوای فشرده‌شده به سمت یک توربین گازی هدایت شود تا توربین به کمک آن برق تولید کند. این روش از نظر تئوری، روشی کارآمد و کاربردی است؛ زیرا با هزینه بسیار کمی می‌توان از آن استفاده کرد و در واقع ارزان‌ترین روش برای ذخیره‌سازی انرژی است. از سویی دیگر استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های دیگر همانند ایجاد مخازنی برای تولید نیروی برق آبی که باید تجهیزات خاصی در کوه‌ها نصب شوند، نیازمند هیچ‌گونه شرایط جغرافیایی خاصی نیست. ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده سنتی از یک توربین گاز برای تولید الکتریسیته در مرحله آزادسازی انرژی استفاده می‌کند که نه تنها سوخت‌های فسیلی را مصرف می‌کند، بلکه گازهای گلخانه‌ای نیز منتشر می‌کند [۹]؛ بنابراین، یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده آدیاباتیک پیشرفته (AA-CAES) برای ذخیره گرمای فشرده با استفاده از یک دستگاه ذخیره گرما پیشنهاد شد تا دیگر سوخت اضافی در مرحله تخلیه موردنیاز نباشد [۱۰].

موزایینی و همکاران [۱۱] تحلیل انرژی و پارامتریک سیستم یک مرحله‌ای ذخیره‌سازی انرژی هوافشرده را انجام دادند. آن‌ها دریافته‌اند که بیشترین تخریب انرژی در سیستم موردبررسی در بسط دهنده‌ها صورت می‌گیرد و راندمان ایزونتروپیک دستگاه روی نابودی انرژی تأثیر زیادی دارد. گو و همکاران [۱۲] یک سیستم چندمرحله‌ای ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را مدل‌سازی کردند و عملکردهای غیر طراحی آن را با دو حالت عملیاتی مقایسه و تحلیل کردند. آن‌ها قانون عملیاتی بهینه هر مرحله از جمله توزیع نسبت فشار و توزیع بازده را تعیین کردند. یائو و همکاران [۱۳] با بررسی عملکرد کمپرسور گریز از مرکز چندمرحله‌ای سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، تأثیرات سرعت چرخش و زاویه ورودی تیغه بر راندمان سیستم را ارزیابی

کسری از گوگرد دی‌اکسید با خروج از توربین در مبدل حرارتی اول پیش گرم می‌شود و سپس قبل از ورود به واحد اجکتور خنک می‌شود. بقیه گوگرد دی‌اکسید به فشارهای کمتر منبسط می‌شود و قبل از ورود به مبدل حرارتی دوم از توربین خارج می‌شود. گوگرد دی‌اکسید به‌عنوان جریان محرکه نامیده می‌شود که در ورودی نازل محرک در مرحله اول اجکتور منبسط می‌شود. گوگرد دی‌اکسید به نازل مکش وارد می‌شود، جایی که در مرحله بعدی اجکتور با گوگرد دی‌اکسید خارج شده از نازل محرک مخلوط می‌شود. جریان مخلوط در آخرین مرحله اجکتور وارد واحد انتشار می‌شود و فشار آن افزایش و سرعت کاهش می‌یابد. جریان دو فاز در واحد جداکننده مکانیکی جدا می‌شود. گوگرد دی‌اکسید مایع اشباع قبل از تولید سرمایه در واحد تبخیرکننده وارد یک شیر انبساط می‌شود و گوگرد دی‌اکسید بخار اشباع قبل از مخلوط شدن با جریان خنک شده از مبدل حرارتی دوم وارد کمپرسور می‌شود. جریان مخلوط در مبدل حرارتی چهار خنک و متراکم می‌شود و چرخه تکرار می‌شود.

۳- تحلیل ترمودینامیکی

معادلات حاکم بر ترمودینامیکی و اقتصادی در این بخش توضیح داده شده است. در مدل‌سازی حاضر مفروضات زیر مطرح شده است:

- سیستم در حالت پایدار کار می‌کند.
- تلفات حرارتی لوله‌ها و اتصالات صفر است.
- تلفات فشار در لوله‌ها و اتصالات صفر است.
- تغییرات در انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است.
- دمای سکون ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال است.

برای تحلیل ترمودینامیکی سیستم نیاز است که خواص ترمودینامیکی هر نقطه از سیستم با استفاده از معادله موازنه جرم و انرژی مورد بررسی قرار بگیرد [۱۹].

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (1)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (2)$$

در این رابطه Q و W به ترتیب گرما و کار انتقال یافته در سیستم است. اگر انرژی مخصوص سیستم با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰].

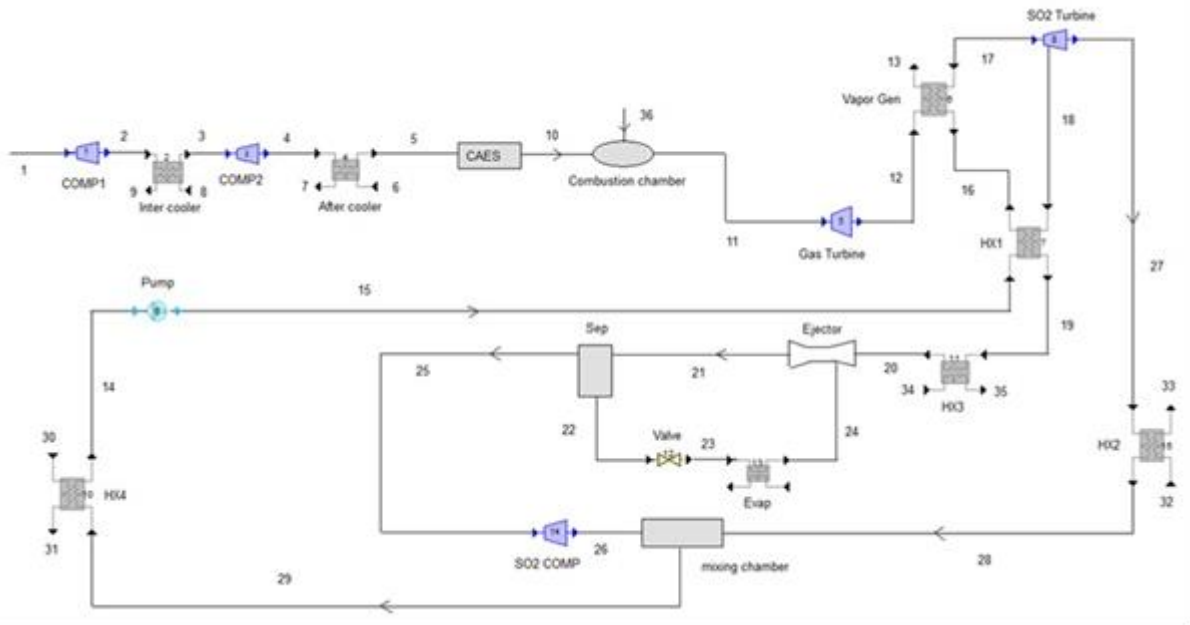
$$\exp h = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

در رابطه بیان شده T_0 دمای سکون، h_0 آنتالپی سکون و S_0 آنتروپی سکون است. داده‌های اولیه برای مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

تولید هم‌زمان ترکیب شده با سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا از راندمان حرارتی پایین رنج می‌برند؛ بنابراین در تحقیق حاضر آرایش جدیدی از ترکیب سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا با سیستم تولید هم‌زمان معرفی شده است که بازده حرارتی بالایی را به ارمغان می‌آورد. انرژی اتلافی در سیستم تولید چندانگانه بازیابی شده و قابلیت ذخیره‌سازی انرژی اتلافی توسط سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده فراهم می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که ترکیب چرخه سرمایه‌گذاری اجکتوری-رانکین بر اساس سیال عامل گوگرد دی‌اکسید در مقایسه با مطالعات قبلی که از واحد سرمایه‌گذاری برای تولید ظرفیت سرمایه‌گذاری سیستم تولید چندانگانه استفاده کرده‌اند، عملکرد زیرسیستم سرمایه‌گذاری را بهبود می‌دهد و تا به حال در مطالعات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته است که جنبه نوآورانه تحقیق حاضر می‌باشد. به علاوه، تحلیل فراگیر ترمودینامیکی و اقتصادی به همراه ارزیابی پارامتریک روی سیستم پیشنهادی صورت گرفته است. ورودی‌های سیستم یکپارچه برق برای فشرده‌سازی هوا و سوخت برای فرآیند احتراق است. از طرف دیگر، خروجی‌های این چرخه گرمایش تولید شده از اینترکولر، افترکولر و مبدل حرارتی دوم، بار خنک‌کننده در واحد اواپراتور و برق در توربین‌های گاز و گوگرد دی‌اکسید است. هدف این تحقیق ارائه تحلیل کامل ترمودینامیکی و اقتصادی برای سیستم نوین ترکیبی تولید هم‌زمان با ذخیره‌سازی انرژی هوا بر اساس چرخه سرمایه‌گذاری اجکتوری گوگرد دی‌اکسید است.

۲- توصیف سیستم

شماتیک سیستم تولید هم‌زمان ترکیب شده با ذخیره‌سازی انرژی هوا بررسی شده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. هوای محیط توسط کمپرسور کم‌فشار متراکم می‌شود و سپس قبل از مرحله تراکم با فشار بالا در داخل خنک‌کن توسط روغن حرارتی خنک می‌شود. پس از آن، هوا وارد یک پس‌خنک‌کن می‌شود که در آنجا تا دمای نزدیک به محیط خنک می‌شود. در مرحله تخلیه، روغن حرارتی برای گرم کردن هوا قبل از ورود به محفظه احتراق استفاده می‌شود. متان برای افزایش دمای ورودی توربین گاز استفاده می‌شود. گاز خروجی وارد توربین گاز می‌شود و تا فشار محیط منبسط می‌شود. سپس با عبور از یک فوق‌گرم‌کن گرمای مورد نیاز سیستم تولید هم‌زمان را تأمین کند. گوگرد دی‌اکسید قبل از ورود به مبدل حرارتی یک به فشارهای بالاتر پمپ می‌شود. سپس گوگرد دی‌اکسید گرم شده وارد سمت دیگر فوق‌گرم‌کن می‌شود تا عملکرد سیستم بهبود یابد.



شکل ۱: شماتیک سیستم پیشنهادی

ارزیابی می‌کند. این رویکرد هزینه‌ها را به‌گونه‌ای بررسی می‌کند که صرفه اقتصادی در اجزای سیستم را مشخص می‌کند. این امر به شناسایی مناطق برای بهبود، بهینه‌سازی و تخصیص مقرون‌به‌صرفه منابع کمک می‌کند [۲۱].

جدول ۲: روابط مدل‌سازی اجکتور

روابط	پارامترهای اجکتور
$\mu = \frac{m_{sf}}{m_{pf}}$	نسبت جابجایی جرم اجکتور
$\pi_{eje} = \frac{p_{ex}}{p_{sf}}$	نسبت افزایش فشار اجکتور
$\eta_{sf} = \frac{h_{pf} - h_{noz}}{h_{pf} - h_{noz, is}}$	راندمان ایزنتروپیک نازل متحرک
$h_{pf} - h_{noz} = \frac{1}{2} v_{noz}^2$	تبادل انرژی بین بخش نازل و سیال اولیه
$V_{mf} = \frac{v_{noz}}{1 + \mu}$	حفظ تکانه در بخش اختلاط
$h_{out} = \frac{h_{pf} + h_{sf} \mu}{1 + \mu}$	تبادل انرژی برای اجکتور
$\eta_{mix} = \frac{v_{mf, s}^2}{v_{mf}^2}$	راندمان اختلاط
$h_{out} - h_{mf} = \frac{1}{2} v_{mf, is}^2$	معادله تبادل انرژی بین بخش اختلاط و خروجی
$\eta_{dif} = \frac{h_{out, is} - h_{mf}}{h_{out} - h_{mf}}$	کارایی دیفیوزر

جدول ۱: داده‌های اولیه

مقدار	پارامتر
۸۰	بازده ایزنتروپیک کمپرسور (/)
۷۵	بازده ایزنتروپیک توربین (/)
۷۰	بازده ایزنتروپیک پمپ (/)
۰/۰۹	دبی جرمی ورودی کمپرسور هوای شماره یک (kg/s)
۱۵	دما ورودی کمپرسور هوای شماره یک (c)
۱۰۱	فشار ورودی کمپرسور هوای شماره یک (kPa)
۰/۰۹	دبی جرمی ورودی کمپرسور هوای شماره دو (kg/s)
۴۰	دما ورودی کمپرسور هوای شماره دو (c)
۳۱۹	فشار ورودی کمپرسور هوای شماره دو (kPa)

با تحلیل ترمودینامیکی کامل صورت گرفته روی سیستم برای محاسبه بازده انرژی و آگزرژی سیستم از روابط زیر استفاده می‌شود

$$\eta_{energy} = \frac{W_T + W_{ST} + Q_{evap} + Q_{IC} + Q_{AC} - W_{SC} - W_{SC}}{W_{air\ Comp1} + W_{air\ Comp2} + m_{36} LHV} \quad (۴)$$

$$\eta_{exergy} = 1 - \frac{E_{dist, total}}{W_{air\ Comp1} + W_{air\ Comp2} + m_{36} e_{36}} \quad (۵)$$

در این روابط $E_{dist, total}$ نابودی آگزرژی کل سیستم و LHV ارزش حرارتی پایین سوخت است.

۴- تحلیل اقتصادی

تحلیل ترمواکونومیک که به‌طور گسترده در سیستم‌های انرژی استفاده می‌شود، عملکرد اقتصادی و ترمودینامیکی را به‌طور هم‌زمان

جدول ۳: توابع هزینه اجزای سیستم.

اجزای سیستم	نرخ هزینه
کمپرسور هوا	$z = \left(\frac{39.5 \times m_2}{0.9 - \eta_{comp}} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$
محفظه احتراق	$z = \left(\frac{46.08 \times m_{11}}{0.995 - \frac{P_{10}}{P_{11}}} \right) (1 + \exp(0.018 \times T_{11} - 26.4))$
توربین گازی	$z = \left(\frac{479.34 \times m_{12}}{0.92 - \eta_{turb}} \right) \ln \left(\frac{P_{11}}{P_{12}} \right) (1 + \exp(0.036 \times T_{12} - 54.4))$
مبدل حرارتی	$z = 2143 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.5}$
توربین گوگرد دی‌اکسید	$z = 4750 \times (W_{Turb})^{0.75}$
پمپ	$z = 200 \times (W_{pump})^{0.65}$
ژنراتور حرارتی بخار	$z = 4122 \times (A_{vapor, gen})^{0.6}$
اجکتور	$Z = (16/14 \times 989 \times m_{20}) \left(\frac{T_{24}}{P_{24}} \right)^{0/05} p_{21}^{0.75}$

جدول ۴: اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی با کار فانی و همکاران [۲۸].

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

۶- نتایج

در این مطالعه با معرفی سیستم نوین تولید چندگانه به همراه ذخیره‌ساز انرژی هوا که با سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری مبتنی بر گوگرد دی‌اکسید ترکیب شده است شاهد عملکرد مطلوب سیستم پیشنهادی هستیم. سیستم پیشنهادی با استفاده از رویکردهای انرژی، انرژی و اقتصادی بررسی شده و همچنین انتشار دی‌اکسید کربن چرخه در

درحالی‌که سرمایه‌گذاری بیشتر می‌تواند عملکرد ترمودینامیکی را در سیستم‌های تبدیل انرژی افزایش دهد، متعادل کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری با افزایش بهره‌وری نقش مهمی دارد [۲۲]. در بررسی قبلی، پارامترهای انرژی و انرژی برای هر نقطه حالت تعیین شد. علاوه بر این، ایجاد معادلات هزینه برای حفظ تعادل هزینه در بین اجزای مختلف سیستم مهم است. رابطه زیر برای محاسبه نرخ سرمایه‌گذاری و نگهداری سرمایه استفاده می‌شود [۲۳].

$$Z_k = CRF \times \frac{\phi_r}{(N \times 3600)} \times PEC_k \quad (6)$$

جایی که فاکتورهای ϕ ، N و PEC به ترتیب ضریب تعمیر و نگهداری، زمان کارکرد در یک سال و هزینه سرمایه‌گذاری قطعه هستند. همچنین پارامتر CRF ضریب بازیابی سرمایه را نشان می‌دهد که با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

به‌صورتی که i نرخ بهره و n دوره عملکرد را بیان می‌کند. در نهایت، هزینه کل سیستم از تقسیم هزینه سالانه بر کل ساعات کار در طول یک سال به دست می‌آید که ۷۴۴۶ ساعت در سال در نظر گرفته می‌شود [۲۴]:

$$Z_{Total} = (TOC \times \phi \times CRF) / t \quad (8)$$

که در این رابطه TOC نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های عملیاتی است. در مطالعه حاضر با استفاده از توابع هزینه به‌روز که در جدول ۳ نشان داده شده است، تحلیل اقتصادی کارآمدی برای بهبود توجیه اقتصادی به‌کارگیری سیستم پیشنهادی صورت می‌گیرد [۲۵]، [۲۶]، [۲۷].

۵- اعتبار سنجی

در مطالعه حاضر آرایش جدیدی از سیستم تولید چندگانه با زیرسیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری با سیال عامل جدید گوگرد دی‌اکسید بررسی شده است. برای اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی، نتایج حاصل با نتایج کار فانی و همکاران [۲۸] مقایسه شده است و همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است اختلاف ناچیزی بین نتایج به‌دست‌آمده با مرجع معرفی شده وجود دارد که دقت بالای اعتبارسنجی صورت گرفته را نشان می‌دهد.

به عضو با بیشترین نابودی انرژی، مقدار نابودی انرژی بیشینه را کاهش می‌دهیم که تأثیر بیشتری جهت افزایش بازده سیستم در مقایسه با روش‌های قبلی دارد. همان‌طور که نتایج حاصل از محاسبه نابودی انرژی اجزای سیستم در جدول ۶ نشان داده شده است، نابودی انرژی کل سیستم ۴۹۱۸۹ کیلووات محاسبه شده و بیشترین نابودی انرژی در توربین گوگرد دی‌اکسید رخ می‌دهد و کمپرسور هوا یک کمترین نابودی انرژی را میان اجزای سیستم پیشنهادی دارد.

جدول ۶: نابودی انرژی اجزای سیستم

پارامتر	مقدار (kw)
نابودی انرژی افتر کولر	۹/۶
نابودی انرژی ذخیره‌ساز هوا فشرده	۴۱/۴۱
نابودی انرژی محفظه احتراق	۲۵/۶۹
نابودی انرژی کمپرسور هوا یک	۱/۹
نابودی انرژی کمپرسور هوا دو	۲/۰۶
نابودی انرژی اواپراتور	۱۹۵۷
نابودی انرژی اجکتور	۹۰
نابودی انرژی محفظه اختلاط	۳/۱۲
نابودی انرژی کمپرسور گوگرد دی‌اکسید	۹۶۱/۸
نابودی انرژی توربین گوگرد دی‌اکسید	۳۰۲۵۵
نابودی انرژی توربین گازی	۲/۳۹
نابودی انرژی مبدل حرارتی یک	۷۷۰۲
نابودی انرژی مبدل حرارتی دو	۹۶۹۶
نابودی انرژی مبدل حرارتی سه	۴۰/۳۵
نابودی انرژی مبدل حرارتی چهار	۳۴۹/۵

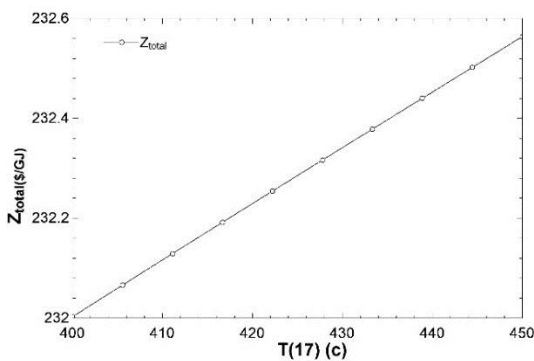
برای گسترش کاربرد سیستم پیشنهادی در صنایع مختلف تجاری، صنعتی و مسکونی برای فراهم کردن الکتریسیته، گرمایش و سرما به صورت هم‌زمان در محل مصرف انرژی و حذف هزینه ناشی از انتقال الکتریسیته از نیروگاه تا محل مصرف و امکان ذخیره‌سازی انرژی و فروش انرژی مازاد به شبکه که دستاورد مهم مطالعه حاضر در زمینه تولید الکتریسیته و جلوگیری از قطع برق در زمان اوج مصرف و برق‌رسانی پایدار محسوب می‌شود، از سیال عامل جدید گوگرد دی‌اکسید در سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری استفاده می‌شود و به کارگیری اجزای ترمودینامیکی با توابع هزینه کارآمد و به‌روز توجیه اقتصادی سیستم را بهبود می‌دهد و طبق نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی روی سیستم هزینه کل سیستم پیشنهادی مقدار ۲۳۲ دلار بر گیگا ژول محاسبه می‌شود و بازگشت سرمایه در کار حاضر ۱۸ سال حاصل می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت مناسب تجاری‌سازی و توجیه اقتصادی بالای کار حاضر است. طبق نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی سیستم

مرحله بهره‌برداری تعیین می‌شود. بررسی دقیق در مورد هر جزء سیستم برای یافتن نقاط مهم و نقص سیستم انجام می‌شود. با تغییر پارامترهای طراحی، تأثیر تغییر آن‌ها بر عملکرد سیستم در ادامه بررسی می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل سیستم در این بخش نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خواص ترمودینامیکی سیالات عامل با استفاده از نرم‌افزار EES محاسبه می‌شوند. با داشتن خواص ترمودینامیکی هر جریان می‌توان شاخص‌های عملکرد سیستم را محاسبه کرد. مطالعه حاضر امکان تولید هم‌زمان الکتریسیته، گرمایش و سرما را فراهم می‌کند و با استفاده از ذخیره‌ساز هوای فشرده قابلیت تأمین انرژی در زمان پیک مصرف را فراهم می‌کند و کاربرد گسترده‌ای در اماکن مسکونی، تجاری و صنعتی دارد. با تحلیل ترمودینامیکی صورت گرفته روی سیستم پیشنهادی بازده انرژی ۲۱ درصد و بازده انرژی ۵۵ درصد گزارش می‌شود و نشان‌دهنده کارکرد مناسب سیستم و آرایش بهینه اجزای ترمودینامیکی سیستم است. استفاده از سیال عامل گوگرد دی‌اکسید باعث می‌شود که بیشترین توان خروجی سیستم پیشنهادی توسط توربین گوگرد دی‌اکسید تولید شود و بازده سیستم رشد چشمگیری پیدا کند. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی سیستم در جدول ۵ نشان داده شده است.

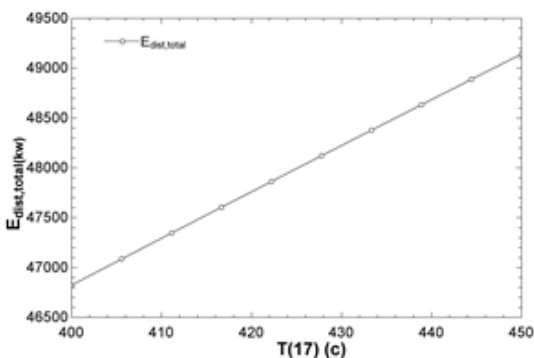
جدول ۵: نتایج تحلیل ترمودینامیکی سیستم

پارامتر	مقدار
راندمان انرژی (%)	۲۱
راندمان انرژی (%)	۵۵
کار توربین گازی (kw)	۲۲/۸
کار کمپرسور گوگرد دی‌اکسید (kw)	۹۹۵/۴
کار توربین گوگرد دی‌اکسید (kw)	۴۶۹۵۹
کار پمپ گوگرد دی‌اکسید (kw)	۶۴۳/۸
کار کمپرسور هوا ۱ (kw)	۱۲/۸۵
کار کمپرسور هوا ۲ (kw)	۱۵/۴۵

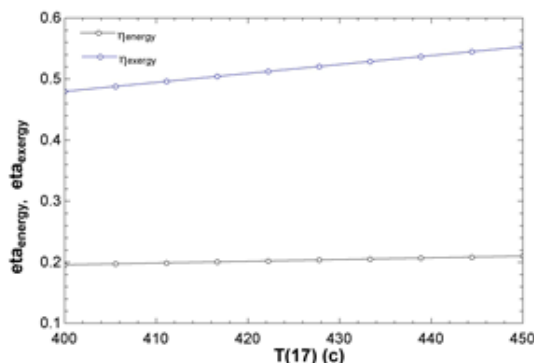
برای بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی بیشترین نابودی انرژی در بین اجزای ترمودینامیکی سیستم را محاسبه نموده و با ارائه روش‌هایی برای کاهش نابودی انرژی بیشینه در سیستم بازده سیستم افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه افزایش دادن دمای بیشینه و کاهش دمای کمینه می‌باشد. در کار حاضر برای بهبود کارایی سیستم پس از شناسایی بیشترین نابودی انرژی صورت گرفته در میان اجزای سیستم، با افزایش دمای ورودی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید روی عملکرد سیستم (الف) هزینه (ب) نابودی انرژی (ج) بازده انرژی و انرژی.

۶-۱-۲- تأثیر تغییرات راندمان ایزنتروپیک کمپرسور

روی عملکرد سیستم

افزایش راندمان ایزنتروپیک کمپرسور مطابق نمودار ۳ باعث بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی می‌شود. بازده انرژی و انرژی سیستم تحت تأثیر افزایش راندمان ایزنتروپیک کمپرسور، افزایش می‌یابد. وقتی که از کمپرسور باراندمان ایزنتروپیک بالا استفاده می‌کنیم نابودی انرژی در سیستم کاهش می‌یابد و قابلیت انجام کار بهبود می‌یابد.

مورد مطالعه که در جدول ۷ نشان داده شده است، اجکتور بیشترین سهم از نرخ هزینه بین اجزای سیستم را دارد و کمترین نرخ هزینه در سیستم متعلق به کمپرسور هوا یک می‌باشد.

جدول ۷: نرخ هزینه اجزای سیستم

پارامتر	مقدار (\$/GJ)
هزینه محفظه احتراق	۵۵۳
هزینه کمپرسور هوا یک	۱۲۵
هزینه کمپرسور هوا دو	۱۴۹/۴
هزینه کمپرسور گوگرد دی‌اکسید	۸۴۱۷۴۸
هزینه اجکتور	۳۱۰۶۴۷۳۶۵
هزینه توربین گازی	۳۲۹/۲
هزینه مبدل حرارتی یک	۵۱۵۱۵
هزینه مبدل حرارتی دو	۵۹۲۹۴
هزینه مبدل حرارتی سه	۱۸۳۷۷
هزینه مبدل حرارتی چهار	۳۲۴۳
هزینه مبدل حرارتی بخار	۱۰۲۸۷
هزینه پمپ	۱۳۳۸۹
هزینه توربین گوگرد دی‌اکسید	۱۵۱۵۷۳۸۴

۶-۱-۱- تحلیل پارامتریک سیستم پیشنهادی

تحلیل پارامتریک روشی قابل اعتماد برای تعیین کیفیت عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف برای به دست آوردن درک جامع از سیستم است. در سیستم مورد مطالعه، تأثیر پارامترهای اصلی طراحی مانند راندمان ایزنتروپیک کمپرسور و دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید بر عملکرد سیستم پیشنهادی ارزیابی شده است.

۶-۱-۱- تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین گوگرد

دی‌اکسید روی عملکرد سیستم

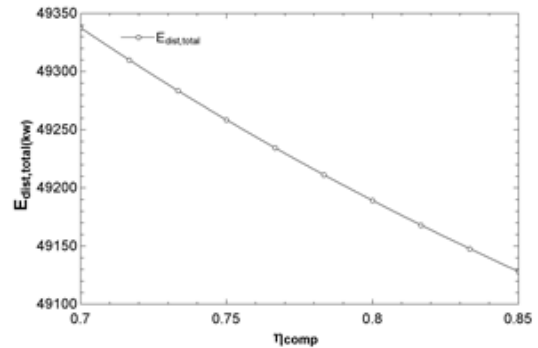
طبق نمودار ۲ وقتی که دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، بازده انرژی و انرژی سیستم بهبود می‌یابد. هزینه کل سیستم تحت تأثیر افزایش دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید افزایش می‌یابد. هنگامی که دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید افزایش می‌یابد، تخریب انرژی در سیستم رشد یافته و قابلیت انجام کار کاهش می‌یابد.

اقتصادی بررسی شده است. بررسی دقیق در مورد هر جزء سیستم برای یافتن نقاط مهم و نقص سیستم انجام شده است. با تغییر پارامترهای طراحی، تأثیر تغییر آن‌ها بر عملکرد سیستم در ادامه بررسی شد. در مطالعه حاضر با به‌کارگیری گوگرد دی‌اکسید در سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری شاهد بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی در مقایسه با تحقیقات صورت گرفته قبلی هستیم و آرایشی نوین از سیستم تولید چندگانه ارائه شده است که با زیرسیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا ترکیب شده است. نتایج پایه مدل‌سازی ترمودینامیکی نشان داد که بازده انرژی و اکسرژی سیستم به ترتیب ۲۱ و ۵۵ درصد است. با به‌کارگیری توابع هزینه به‌روز و کارآمد برای اجزای سیستم و با تحلیل اقتصادی با داده‌های اقتصادی اولیه فرض شده، نتایج پایه تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان داد که نرخ کلی هزینه سیستم ۲۳۲ دلار بر گیگا ژول محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی صورت گرفته نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی کارکرد مناسبی داشته و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است و می‌تواند گام شایان توجهی در توسعه صنعتی و ذخیره‌سازی انرژی اتلافی سیستم‌های انرژی بردارد.

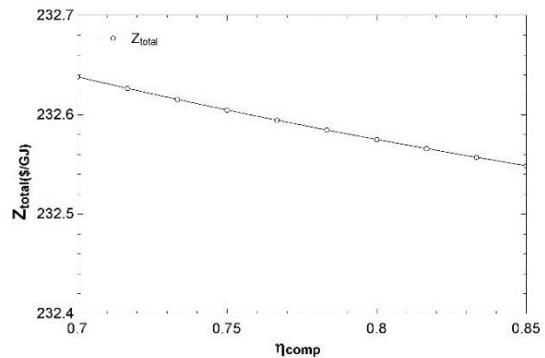
۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، m^2
C	هزینه، (\$))
D	قطر، (m)
Ex	اکسرژی، (W)
h	آنتالپی، (kJ/kg)
\dot{m}	دبی جرمی، (kg/s)
S	آنتروپی، (kJ/kg.K)
T	دما، (c)
p	فشار، (kPa)
n	زمان
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
\emptyset	نسبت اکیووالانس
LHV	اکسرژی سوخت

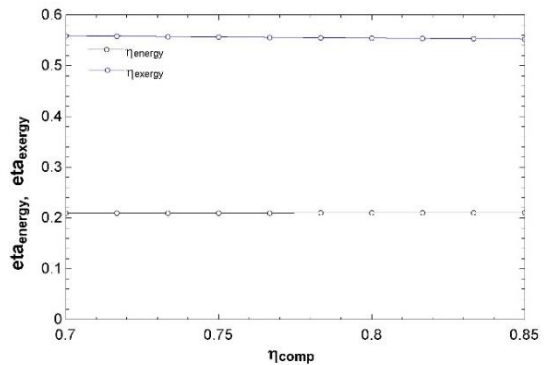
کار مصرفی توسط کمپرسور با افزایش راندمان ایزنتروپیک آن کاهش می‌یابد و در نتیجه به تجهیزات کوچک‌تر در سیستم نیاز داریم و هزینه کل سیستم کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک کمپرسور روی عملکرد سیستم (الف) نابودی اکسرژی (ب) هزینه (ج) بازده انرژی و اکسرژی.

۷- نتیجه‌گیری

یک زیرسیستم یکپارچه جدید ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده همراه با یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری گوگرد دی‌اکسید در این مطالعه پیشنهاد و بررسی شده است. سیستم پیشنهادی با استفاده از رویکردهای انرژی، اکسرژی و

۹- منابع

- [9] Qing H, Lijian W, Qian Z, Chang L, Dongmei D, Wenyi L. Thermodynamic analysis and optimization of liquefied air energy storage system. *Energy*. 2019 Apr 15;173:162-73.
- [10] He Q, Liu H, Hao Y, Liu Y, Liu W. Thermodynamic analysis of a novel supercritical compressed carbon dioxide energy storage system through advanced exergy analysis. *Renewable energy*. 2018 Nov 1;127:835-49.
- [11] Mozayeni H, Wang X, Negnevitsky M. Exergy analysis of a one-stage adiabatic compressed air energy storage system. *Energy Procedia*. 2019 Feb 1;160:260-7.
- [12] Guo H, Xu Y, Zhang Y, Liang Q, Tang H, Zhang X, Zuo Z, Chen H. Off-design performance and an optimal operation strategy for the multistage compression process in adiabatic compressed air energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*. 2019 Feb 25;149:262-74.
- [13] He Y, Chen H, Xu Y, Deng J. Compression performance optimization considering variable charge pressure in an adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*. 2018 Dec 15;165:349-59.
- [14] Chen LX, Xie MN, Zhao PP, Wang FX, Hu P, Wang DX. A novel isobaric adiabatic compressed air energy storage (IA-CAES) system on the base of volatile fluid. *Applied Energy*. 2018 Jan 15;210:198-210.
- [15] Li R, Wang H, Zhang H. Dynamic simulation of a cooling, heating and power system based on adiabatic compressed air energy storage. *Renewable energy*. 2019 Aug 1;138:326-39.
- [16] Yao E, Wang H, Wang L, Xi G, Maréchal F. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power based compressed air energy storage system. *Energy conversion and management*. 2017 Apr 15;138:199-209.
- [17] Chen S, Arabkoohsar A, Yang Y, Zhu T, Nielsen MP. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating, and power system with subcooled compressed air energy storage considering off-design characteristics. *Applied Energy*. 2023.
- [1] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Jan;136:1-9.
- [2] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis. *The European Physical Journal Plus*. 2020 Jul;135(7):1-21.
- [3] Yadegari M, Khoshnevis AB. Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems. *The European Physical Journal Plus*. 2020 Jun 1;135(6):534.
- [4] Yadegari M, Ghassemi M. Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*. 2022 Mar 1;23(1):122-46.
- [5] Yadegari M. An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Oct 11;136(10):1019.
- [6] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020 Aug;42:1-5.
- [7] Haghghatjoo H, Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel. *The European Physical Journal Plus*. 2022 Sep 13;137(9):1042.
- [8] Mamorian, Akbari, Seydamirhossein, Javanshir. Energy and exergy analysis of organic Rankine cycle used to recover waste heat from cement industry. *Science and technology in mechanical engineering*. 2023.

- working fluid. *Desalination*. 2017 Nov 15;422:113-23.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Cavalcanti EJ. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Jan 1;67:507-19.
- [28] 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.
- Thermal Engineering*. 2021 Mar 25;187:116562.
- [18] Roushenas R, Razmi AR, Soltani M, Torabi M, Dusseault MB, Nathwani J. Thermo-environmental analysis of a novel cogeneration system based on solid oxide fuel cell (SOFC) and compressed air energy storage (CAES) coupled with turbocharger. *Applied Thermal Engineering*. 2020 Nov 25;181:115978.
- [19] Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey MB. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons; 2010 Dec 7.
- [20] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *International journal of hydrogen energy*. 2015 Oct 26;40(40):14021-30.
- [21] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *International journal of hydrogen energy*. 2015 Oct 26;40(40):14021-30.
- [22] Noaman M, Saade G, Morosuk T, Tsatsaronis G. Exergoeconomic analysis applied to supercritical CO₂ power systems. *Energy*. 2019 Sep 15;183:756-65.
- [23] Nemati A, Sadeghi M, Yari M. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a marine engine waste heat driven RO desalination system integrated with an organic Rankine cycle using zeotropic