



The University of Tehran Press

Economic and Environmental Comparison of Various Fluids in a Carbon Capture System Using the Brayton Cycle with Recompression and Recuperation Cycles

Alireza Ahmadi¹ | Amir Ali Saifoddin Asl^{2*}

1. Master's student in Energy Systems, Faculty of Energy and Sustainable Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: alireza.ahmadi77@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Associate Professor of Energy Systems Group, Faculty of Energy and Sustainable Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: saifoddin@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 28 January 2024

Revised 28 February 2024

Accepted 29 April 2024

Published Online 26 August 2024

Keywords:

Energy Economics,

Environmental Economics,

Environmental Sustainability,

Brayton Cycle,

Low-Carbon Economy,

Exergy.

ABSTRACT

Population growth, especially in developing and less developed countries, leads to increased energy demand, particularly for electricity. As the need for electricity rises, so does the consumption of primary energy sources, especially fossil fuels. However, this trend poses significant risks due to global warming and its impact on climate change. Additionally, considering the carbon footprint taxes projected for the coming years, addressing this issue becomes even more critical. In this research, the objective is to identify the optimal working fluid among four candidates: Methane, Methane Flue Gas, Syngas, and Syngas Flue Gas. The study evaluates their economic and environmental advantages. Furthermore, it investigates how the carbon mass fraction in each working fluid affects economic and environmental parameters. As part of this analysis, a combined cycle integrating a Brayton cycle with a solar-heliostat cycle is proposed. In this configuration, solar energy replaces the boiler to provide heat for the turbine's working fluid. The goal is to achieve cost reduction and environmental sustainability.

Cite this article: Ahmadi, A. Saifoddin Asl, A. A. (2024). Economic and Environmental Comparison of Various Fluids in a Carbon Capture System Using the Brayton Cycle with Recompression and Recuperation Cycles. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (3), 289-301. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.383314.1102>



© Alireza Ahmadi, Amir Ali Saifoddin Asl

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.383314.1102>

1. Introduction

Global conditions and the necessity to control CO₂ emissions from an environmental and carbon footprint perspective, along with the need for countries to adhere to international standards amid increasing electricity demand, have led the scientific community to pay more attention to S-CO₂ technology. This research aims to evaluate and determine the optimal working fluid by examining four working fluids and considering economic and environmental parameters, taking into account the mass of carbon dioxide in each working fluid and its impact on economic and environmental parameters. In this cycle, by integrating a Brayton cycle with a heliostat cycle, the provision of heat for the working fluid entering the turbine through solar energy as a substitute for the boiler is also examined. The ultimate goal of this research, through the analysis of the four considered fluids, is to focus on economic aspects and energy economics in terms of cost reduction and environmental sustainability achievable for the Brayton cycle.

2. Methodology

The cycle in question includes equipment such as the main compressor, recompression compressor, high-temperature recuperator, low-temperature recuperator, turbine, heat exchanger, heater, precooler, and solar tower along with heliostat mirrors and two storage tanks for cold and hot molten salt fluid and a pump. It is simulated using Aspen Plus software.

In the Brayton cycle range, the fluid exiting the main compressor is preheated in the low-temperature recuperator by the fluid exiting the turbine. It then mixes with the fluid exiting the second compressor and enters the high-temperature recuperator to increase the temperature and reduce the heating requirement in the heater. The fluid exiting the turbine, as the working fluid in the supercritical state, enters the high-temperature recuperator and then the low-temperature recuperator. After that, most of it enters the precooler and main compressor, while a smaller portion enters the second compressor. The turbine conditions are based on the SGT-800-Siemens.

In the solar energy range, the heliostat mirrors capture solar energy in the form of radiation, which is received by the solar tower and converted into thermal energy. This heat increases the temperature of the molten salt in the cold tank. The molten salt acts as an energy storage medium and helps store thermal energy so that the fluid can be heated to the required temperature for turbine entry at night or when there is insufficient heat. A pump is used to send the cold fluid to the solar tower. A heat exchanger is also used to prevent the molten salt from freezing.

3. Results

In the proposed cycle, the amount of carbon dioxide emitted is significantly less compared to classic cycles. The comparison of results shows that for each working fluid, syngas will emit 29.92 times more carbon dioxide than the syngas flue. Comparing the two other fluids, considering that the syngas flue has 1.41 times more carbon dioxide content, the pollution level is also 1.77 times that of the methane flue.

The simulation results comparison shows that in the syngas flue, due to higher carbon content, the efficiency also increases. Therefore, it can be inferred that with an increase in the mass of carbon dioxide, we can achieve higher efficiency in terms of production. For calculating the carbon cost, the carbon tax is considered the basis for economic calculations. In Europe, since each country considers different carbon tax rates based on its conditions, in this study, the carbon tax is averaged at \$20/ton. Methane gas and syngas, due to their content and the pollution they produce, will have the highest tax payments. However, methane gas will have 72.3% less carbon tax. Although the methane gas flue has a longer payback period compared to the syngas flue, it will pay 56.4% less carbon tax than the syngas flue.

4. Conclusion

The mass of carbon dioxide is a determining factor in the economic and environmental efficiency of this cycle. The carbon dioxide content of the syngas flue is 1.41 times higher than that of the methane flue, resulting in a 1.77 times increase in carbon dioxide emissions and approximately a 5% reduction in the payback period.



مقایسه اقتصادی و محیط زیستی چندین سیال یک سیستم جذب کربن سیکل برای تون با سیکل‌های فشرده‌سازی مجدد و بازیابی‌کننده

علیرضا احمدی^۱ | امیرعلی سیفال‌الدین اصل^{۲*}

۱. دانشجوی ارشد سیستم‌های انرژی، دانشکده انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: alireza.ahmadi77@ut.ac.ir
 ۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: Saifoddin@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

کلیدواژه:

اقتصاد انرژی،

اقتصاد محیط زیست،

پایداری محیط زیست،

سیکل برای تون،

اقتصاد کم‌کربن،

اگرزری.

انرژی مهم‌ترین عامل در توسعه اقتصادی است. همچنین، رشد جمعیت بر میزان مصرف انرژی اثر مثبت دارد. بنابراین، به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه و کمتر توسعه‌یافته که به‌طور همزمان شاهد رشد بالای جمعیت و توسعه اقتصادی هستیم، نیاز به انرژی و به‌خصوص با ماهیت برق نیز بیشتر می‌شود. افزایش نیاز به برق سبب افزایش مصرف انرژی‌های اولیه به‌خصوص از نوع فسیلی خواهد شد. با توجه به شرایط گرمایش جهانی و اثر آن بر تغییرات اقلیمی این موضوع اثرات اقلیمی قابل توجهی دارد. مالیات ردپای کربن که در بسیاری از کشورها به منظور مقابله با مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی تصویب و مورد استفاده قرار گرفته است، اهمیت توجه به تقاضا و مصرف سوخت‌های فسیلی را از نظر اقتصادی نیز بالا می‌برد. این پژوهش از منظر اقتصاد انرژی و اقتصاد محیط زیست میزان جرمی کربن دی‌اکسید را در چهار سیال کاری گاز سنتز، دودکش گاز سنتز، گاز متان، دودکش گاز متان و تأثیر آن بر پارامترهای اقتصادی محیط زیستی سیکل مد نظر بررسی می‌شود. همچنین، با یکپارچه‌سازی یک سیکل برای تون با سیکل هلیوستات، تأمین حرارت برای سیال کاری ورودی توربین از طریق انرژی خورشید به‌عنوان جایگزین برای دیگ بخار در نظر گرفته می‌شود، تا به این‌وسيله میزان پایداری محیط زیست و کاهش هزینه سیکل مورد برای تون محاسبه شود. نتایج نشان می‌دهد استفاده از سیال خروجی از توربین مانند گاز سنتز دودکش تا ۲۹/۹۲ برابر از سیال ورودی هم‌تپ خود یعنی گاز سنتز می‌تواند انتشار کربن دی‌اکسید را کاهش بدهد.

استناد: احمدی، علیرضا و سیفال‌الدین اصل، امیرعلی (۱۴۰۳). مقایسه اقتصادی و محیط زیستی چندین سیال یک سیستم جذب کربن سیکل برای تون با سیکل‌های فشرده‌سازی مجدد و بازیابی‌کننده. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۳ (۳) ۳۰۱-۲۸۹. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.383314.1102>

© علیرضا احمدی، امیرعلی سیفال‌الدین اصل ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.383314.1102>



۱. مقدمه

رشد سریع صنعتی شدن و اتکا به سوخت‌های فسیلی و افزایش تقاضا برای انرژی در دهه‌های اخیر، استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی افزایش داده است [۱]، که این امر به افزایش انتشار CO_2 - یکی از اجزای اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای - نیز منجر می‌شود. یادآور می‌شود که حدود ۶۵ درصد از CO_2 منتشر شده از صنعت برق و بخش‌های انرژی، به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی است [۲ و ۳]. به علاوه سؤال مهم‌تر نیز در این رابطه وجود دارد و آن اینکه، تغییرات آب‌وهوایی بر آینده تقاضای انرژی چه تأثیراتی خواهد داشت؟

برآوردها بیانگر این است که گرمایش زمین هم، علاوه بر توسعه اقتصادی - اجتماعی می‌تواند نیاز به انرژی را تا سال ۲۰۵۰ نسبت به امروز در دو سناریو حداکثر بین ۲۵ تا ۵۸ درصد و یا حداقل ۱۱ تا ۲۷ درصد بیشتر از مقدار امروزی افزایش دهد [۴]. بخش نفت و گاز برای ایفای نقش خود در کاهش تغییرات آب‌وهوایی ضروری است تا سال ۲۰۵۰ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را حداقل ۳/۴ گیگا تن کربن دی‌اکسید در سال کاهش دهد، برای تحقق این ضرورت، یک سناریو کاهش میزان استفاده از نفت و گاز است که این امر ملزوم به کاهش تقاضا است [۵]. سناریوی دیگر استفاده از فناوری SCO_2 می‌تواند باشد. این فناوری از نظر شیمیایی بی‌اثر، غیر سمی، غیر خورنده، غیر تحریک‌کننده و غیر قابل اشتعال بود و با محیط زیست نیز سازگاری دارد. همچنین، به دلیل اینکه در نزدیکی نقطه بحرانی خود، نیاز به فشرده‌سازی کمتری دارد از جنبه اقتصادی هم بهره‌وری حرارتی را بیشتر می‌کند [۶].

پژوهش‌های زیادی برای تحلیل عملکرد فناوری SCO_2 در شرایط کار خارج از طراحی سیستم صورت گرفته است. در پژوهشی که توسط Bo Li و همکاران صورت گرفت، عملکرد خارج از طراحی چرخه توان SCO_2 که توسط اتلاف حرارت توربین رانده می‌شود، مطالعه شد که براساس نتایج پژوهش، توان خالص خروجی و بهره‌وری انرژی در نقطه طراحی به ترتیب ۸/۶۷ مگاوات و ۵۴/۶۷ درصد بوده است، آنان همچنین نتیجه گرفتند که قدرت خالص خروجی ۰/۶۲ مگاوات به ازای متوسط افزایش ۵ کیلوگرم بر ثانیه جریان جرمی گاز دودکش و به ازای هر $10^\circ C$ افزایش دمای گاز دودکش ورودی، قدرت خالص خروجی ۰/۲۹ مگاوات افزایش می‌یابد [۷]. در پژوهش دیگری Yadong Du و همکاران، مجموعه‌ای از تحلیل‌ها و طراحی‌ها را انجام دادند تا به مدل‌سازی کمپرسورها در SCO_2 سیکل برایتون^۱ و پیش بینی عملکرد آن در شرایط خارج از طراحی (تغییر دمای محیط) کمک کنند، خارج از طراحی کمپرسور در دمای ۳۱۴/۱۵ کلوین بهره‌وری سیستم ۲۷/۳۵ درصد و در دمای ۳۱۰/۱۵ کلوین بهره‌وری سیستم ۱۸/۸۸ درصد بوده است. آنان پیشنهاد دادند زمان عملیات در زمستان بیشتر از تابستان باشد [۸].

در مورد فرایند فشرده‌سازی مجدد^۲ نیز استفاده از CO_2 جز اصلی در سیستم است. پژوهش‌های انجام شده در چند سال اخیر در این زمینه نظیر پژوهش‌های Francesco Crespi و همکاران، با آنالیز ترمودینامیکی ۱۲ سیکل SCO_2 در نهایت نشان دادند هنگامی که هیچ محدودیتی بر فشار و دما نباشد ترکیب تراکم‌سازی مجدد، حرارت دادن مجدد و خنک کردن گاز بعد از تراکم احتمالاً خواهد توانست بیشترین بهره‌وری را از جنبه انتقال حرارت داشته باشد (بدون در نظر گرفتن دمای ورودی توربین): ۴۸ درصد در $550^\circ C$ و ۵۹ درصد در $750^\circ C$ و ۶۱ درصد در $950^\circ C$ و ۶۵ درصد در $1150^\circ C$ است [۹]. یک روش طراحی یک بعدی توسط Lichao Yao و همکاران برای SCO_2 بر اساس طراحی مفهومی سیکل و طراحی اولیه اجزا پیشنهاد شد، در این پژوهش دو سیکل فشرده‌سازی مجدد با دو توان ۵۰۰ کیلو وات و ۵ مگاوات در نظر گرفته شد، سیکل ۵ مگاوات باعث بهره‌وری ۳۸ درصد و سیکل ۵۰۰ کیلو وات باعث بهره‌وری ۳۷ درصد شد و حداکثر بهره‌وری نیز برای سیکل تراکم مجدد ۳۸/۴ درصد به دست آمد [۱۰]. در تلاشی دیگر برای بهینه کردن استفاده از این فناوری، Hao Ding و همکاران از زبان برنامه‌نویسی Modelica برای شبیه‌سازی گذرای فرایند فشرده‌سازی مجدد SCO_2 در راهبردهای مختلف کنترل تحت شرایط افت توان حرارتی استفاده کردند، آن‌ها دریافتند که با راهبرد کنترل ترکیبی نسبت به کنترل تک‌تکی، احتمال بروز مشکلات در اجزای مانند سوپاپ گاز کمتر خواهد شد [۱۱].

1. Brayton Cycle
2. Recompression Cycle

پژوهش‌هایی نیز به بررسی اقتصادی و رسیدن به بازدهی بیشتر انجام شده است. در پژوهشی که Salim و همکاران روی سیکل فشرده‌سازی مجدد SCO_2 با تحلیل نتایج آگرژی اتلاف‌شده به منظور یافتن اثرات دمای محیط و آب بر عملکرد سیستم انجام دادند، مقدار بهینه کسر جرمی برای رسیدن به بهره‌وری ۴۹ درصد سیکل در دمای ورودی توربین $700^\circ C$ را مقدار 0.79 به دست آوردند، پژوهش آن‌ها نشان داد در ماه ژانویه آگرژی کمترین مقدار خود، 390 کیلو وات در دمای $35^\circ C$ و فشار 24 مگا پاسکال است [۱۲]. در پژوهشی Yunru Chen و همکاران، یک مدل سیکل برایتون SCO_2 هیبرید پیشنهاد دادند که توان افزایش آگرژی و به حداقل رساندن هزینه ترازشده را داشت. این پژوهش شامل یک پیل سوختی اکسید جامد، یک توربین گاز و یک سیکل SCO_2 بود و براساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین مقدار بهره‌وری انرژی این سیکل با اضافه کردن *Bottoming cycle* به سیستم و معادل $11/7$ درصد به دست می‌آید [۱۳]. در پژوهشی که Zhan Liu و همکاران با استفاده و بسط دادن روش *exergoeconomic* پیشرفته با هدف بررسی پتانسیل واقعی برای بهبود عملکرد هر یک از اجزا و همین‌طور فعل و انفعالات بین اجزا انجام دادند و چنین نتیجه‌گیری کردند که به طور کلی با شرایط بهینه‌سازی $38/86$ درصد مقدار اتلاف آگرژی قابل اجتناب را دارد که با مقدار $581/3$ دلار بر ساعت، حدود $52/8$ درصد از آگرژی اتلاف‌شده قابل اجتناب از هزینه سیکل را شامل می‌شود [۱۴].

با هدف بهبود این فناوری ابزارهایی برای هوشمندسازی و با خطای کمتر و افزایش قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گرفته است. به طور مثال Mengchao و همکاران در مطالعه‌ای که انجام دادند، تلاش کردند تا با استفاده از یک الگوریتم دو لایه، یک سیکل برایتون SCO_2 هوشمند بسازند که بتواند پارامتر و ساختار را بهینه کند، به طوری که خطاهای نسبی مدل ترمودینامیکی آن $2/15$ و $0/84$ درصد باشد. با در نظر گرفتن کار ویژه به عنوان تابع هدف سه حالت برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود، در نهایت کار ویژه $47/97$ kJ/kg و $46/50$ kJ/kg و $42/59$ kJ/kg رشد داشته است و سیال کاری نیز $116/57$ kg/s و $84/40$ kg/s کاهش داشته است [۱۵].

نتیجه اینکه، شرایط جهانی و لزوم کنترل میزان آلاینده‌ی CO_2 از جنبه محیط زیست و رد پای کربن و لزوم رعایت استانداردهای جهانی توسط کشورهای مختلف هم‌زمان با افزایش تقاضا برای برق باعث شده است جوامع علمی به فناوری SCO_2 بیش از پیش توجه کنند. این پژوهش سعی دارد با بررسی از میان چهار سیال کاری گاز سنتز^۱، دودکش گاز سنتز^۲، گاز متان^۳، دودکش گاز متان^۴ مد نظر قرار دادن پارامترهای اقتصادی و محیط زیستی، با توجه به میزان جرمی کربن دی‌اکسید در هر سیال کاری و تأثیرات آن بر پارامترهای اقتصادی محیط زیست، سیال کاری بهینه را بررسی و تعیین کند. در این سیکل با یکپارچه‌سازی یک سیکل برایتون با سیکل هلیوستات، تأمین حرارت برای سیال کاری ورودی توربین از طریق انرژی خورشید به عنوان جایگزین برای دیگ بخار نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف نهایی این پژوهش از تحلیل چهار سیال مورد نظر، توجه به جنبه‌های اقتصادی و اقتصاد انرژی از جنبه میزان کاهش هزینه و میزان پایداری محیط زیست است که برای سیکل برایتون قابل انجام است.

۲. روش‌ها

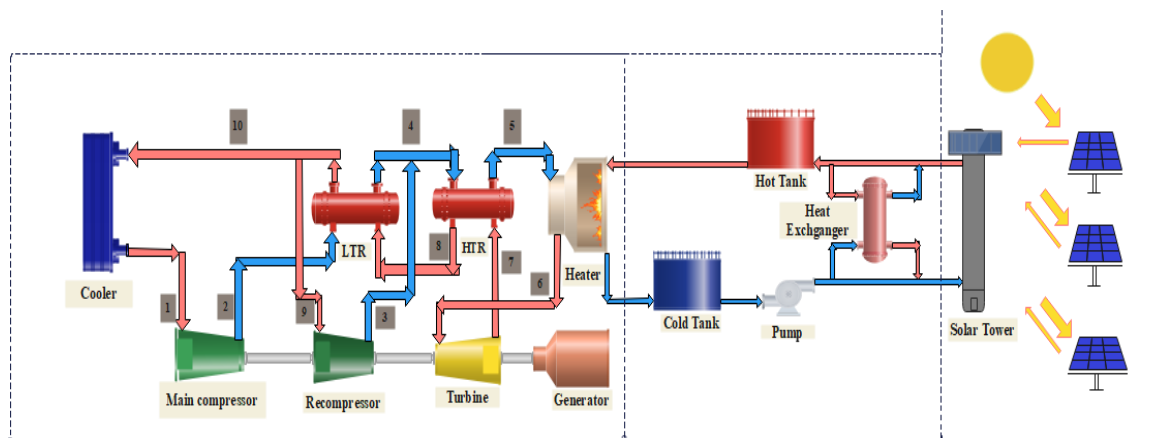
در این پژوهش یک سیستم انرژی شامل سیکل برایتون به عنوان سیکل اصلی و سیکل‌های فرعی شامل سیکل فشرده‌سازی مجدد و بازیابی‌کننده^۵ برای استحصال انرژی سیال کاری و سیکل خورشیدی برای گرمایش سیال پیش از ورود به توربین در نظر گرفته شده است. سیکل فشرده‌سازی مجدد به این دلیل مورد توجه قرار گرفت که پژوهش‌های کمتری در این زمینه صورت گرفته است، در حالی که کاربرد بیشتری نسبت به سایر فناوری‌ها دارد و همین‌طور سیکل بازیابی‌کننده به دلیل هزینه راه‌اندازی

1. Syngas
2. Flue Syngas
3. Methane Gas
4. Flue Methane Gas
5. recuperator

اولیه کمتر و عملکرد قابل قبول مد نظر قرار گرفت [۱۶]. به دلیل ارزان تر بودن بهره‌برداری انرژی و عملکرد بهتر برج خورشیدی^۱ نسبت به سایر فناوری‌های دریافت‌کننده انرژی از خورشید، ضمن تأکید بر دوست‌دار محیط زیست شدن سیستم، در ادامه استفاده می‌شود [۱۷].

سیکل مورد نظر شامل تجهیزاتی همچون کمپرسور اصلی، کمپرسور فشرده‌سازی مجدد، بازیابی‌کننده دمای بالا^۲، بازیابی‌کننده دمای پایین^۳، توربین، مبدل حرارت، گرم‌کننده^۴، پیش‌خنک‌کننده و برج خورشیدی به همراه صفحات هلیوستات و دو تانک ذخیره‌کننده سرد و گرم با سیال نمک مذاب و پمپ است و به کمک نرم‌افزار Aspen Plus شبیه‌سازی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در محدوده سیکل برای تون سیال خروجی از کمپرسور اصلی در بازیابی‌کننده دمای پایین به وسیله سیال خروجی از توربین پیش‌گرمایش می‌شود و در ادامه، با سیال خروجی از کمپرسور دوم مخلوط شده و پس از آن به منظور افزایش دما و کاهش نیاز به حرارت‌دهی در گرم‌کننده وارد بازیابی‌کننده دمای بالا می‌شود. سیال خروجی از توربین به عنوان سیال کاری و در حالت فوق بحرانی وارد بازیابی‌کننده دمای بالا و سپس، بازیابی‌کننده دمای پایین می‌شود پس از آن، بخش بیشتر آن وارد پیش‌گرمایش و کمپرسور اصلی و بخش کوچک‌تر آن وارد کمپرسور دوم می‌شود. شرایط توربین بر اساس SGT-800-Siemens در نظر گرفته شده است.

در محدوده انرژی خورشیدی به وسیله بخش هلیوستات انرژی خورشید را در قالب تشعشع گرفته و برج خورشیدی آن را دریافت و به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند. این حرارت سبب افزایش مای نمک مذاب در تانک سرد می‌شود. نمک مذاب نقش ذخیره‌کننده انرژی را دارد و در ادامه به ذخیره‌سازی انرژی حرارتی کمک می‌کند تا در شب و یا زمانی که حرارت کافی وجود ندارد بتوان سیال را در گرم‌کننده به دمای مورد نیاز برای ورودی توربین رساند. به منظور ارسال سیال سرد به برج خورشیدی از یک پمپ نیز استفاده می‌شود. به منظور جلوگیری از یخ‌زدگی نمک مذاب از یک مبدل حرارتی نیز استفاده خواهد شد.



محدوده سیکل ترمودینامیکی برای تون

محدوده ذخیره سازی انرژی حرارتی

محدوده انرژی خورشیدی

شکل ۱. شماتیک فرایند سیکل ترمودینامیکی برای تون و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به همراه سیکل هلیوستات

فرضیات:

۱. شرایط پایا در تمام تجهیزات برقرار است.
۲. تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در نظر گرفته نمی‌شود.
۳. افت فشار در لوله‌ها، بازیابی‌کننده و مبدل حرارتی در نظر گرفته نمی‌شود.
۴. توربین و کمپرسور دارای راندمان آیزنتروپیک ثابت است.

1. Solar Tower
2. High-temperature recuperator (HTR)
3. Low-temperature recuperator (LTR)
4. Heater

۵. فرض می‌شود بازیابی‌کننده به‌خوبی عمل کند.
 ۶. نشتی سیال در نظر گرفته نشده است.

• محاسبات برج خورشیدی

از معادله ۱ برای محاسبه نرخ انتقال گرمای مفید برای دریافت‌کننده انرژی استفاده شده است [۱۸]:

$$\dot{Q}_{use,rec} = \dot{m}_{air} (h_{rec,e} - h_{rec,i}) \quad (۱)$$

از اختلاف انرژی واردشده به دریافت‌کننده و مقدار ازدست‌رفته می‌توان در رابطه ۲ نرخ انتقال گرمای مفید را به دست آورد [۱۹]:

$$\dot{Q}_{use,rec} = \alpha_{rec} \dot{Q}_{i,rec} - \dot{Q}_{loss,rec} \quad (۲)$$

در رابطه ۲، α_{rec} ضریب جذب سطح جذب‌کننده را نشان می‌دهد، انرژی ورودی و ازدست‌رفته توسط دریافت‌کننده از طریق معادله‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:

$$\dot{Q}_{i,rec} = DNI \cdot A_{mirror} \cdot \eta_{field} \quad (۳)$$

$$\dot{Q}_{loss,rec} = \dot{Q}_{loss,rad} + \dot{Q}_{loss,conv} \quad (۴)$$

در رابطه ۳ تابش عادی مستقیم DNI، کارایی میدانی هلیوستات η_{field} و $A_{heliostat}$ نشان‌دهنده تمامی سطح آینه است. برای به دست آوردن سایر اتلاف‌ها، اتلاف انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی به ترتیب از معادله‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$\dot{Q}_{loss,rad} = A_{rec} \cdot \epsilon m_{rec} \cdot \sigma T_{rec}^4 \quad (۵)$$

$$\dot{Q}_{loss,conv} = A_{rec} \cdot \xi_{conv} \cdot (T_{sur,rec} - T_0) \quad (۶)$$

منظور از A مساحت است، η بازدهی است، \dot{Q} نرخ انتقال حرارت دما نیز T و \dot{m} نرخ جریان جرمی است. A_{rec} مساحت سطح و ϵm_{rec} ضریب انتشار دریافت‌کننده را نشان می‌دهد. ξ_{conv} و $T_{sur,rec}$ به کمک معادله‌های ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند [۲۲]:

$$T_{sur,rec} = T_{rec,e} + 20 \quad (۷)$$

$$\xi_{conv} = 0.577 \times 10^{-6} \left(\frac{T_{sur,rec} - T_0}{H_{tower}} \right)^{0.25} \quad (۸)$$

H_{tower} ارتفاع برج خورشیدی را نشان می‌دهد، دمای خروجی از برج خورشیدی، با طریق دمای ورودی، سطح مورد نیاز برای آینه A_{mirror} و سایر پارامترهای یادشده محاسبه می‌شود و ξ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. برای انرژی سوخت و تولید برج خورشیدی از معادله‌های ۹ و ۱۰ کمک گرفته شده است [۲۳]:

$$\dot{E}x_{f,SPT} = DNI \cdot A_{mirror} \left(1 - \frac{T_0}{T_{sun}} \right) \quad (۹)$$

$$\dot{E}x_{p,SPT} = \dot{E}x_{rec,e} - \dot{E}x_{rec,i} \quad (۱۰)$$

T_{sun} دمای سطح خورشید و \dot{E} نرخ جریان انرژی است. از معادله ۱۱ انرژی ازدست‌رفته برج خورشیدی محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\dot{E}x_{dest,SPT} = \dot{E}x_{f,SPT} - \dot{E}x_{p,SPT} \quad (۱۱)$$

• محاسبات چرخه ترمودینامیکی

راندمان و کار کمپرسور اصلی از معادله‌های ۱۲ و ۱۳، کار کمپرسور فشرده‌سازی مجدد از معادله ۱۴ و راندمان و کار توربین از معادله‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب محاسبه می‌شوند [۲۵]:

$$\eta_{comp} = 0.91 - \frac{r_p - 1}{300} \quad (۱۲)$$

$$W_{comp} = x \dot{m}_{co_2} \left(\frac{h_{out,s} - h_{in}}{\eta_{comp}} \right) \quad (۱۳)$$

$$W_{Recomp} = (1-x)\dot{m}_{CO_2} \left(\frac{h_{out,s} - h_{in}}{\eta_{comp}} \right) \quad (14)$$

$$\eta_{tur} = 0.9 - \frac{r_p - 1}{250} \quad (15)$$

$$W_{tur} = \dot{m}_{CO_2} \eta_{tur} (h_{in} - h_{out,s}) \quad (16)$$

r_p نسبت فشار است که برای کمپرسورها و توربین برابر است.

برای اثربخشی بازیابی کننده دمای پایین و بازیابی کننده دمای بالا به ترتیب از معادله‌های ۱۷ و ۱۸ استفاده شده است [۲۶]:

$$\varepsilon_{LTR} = \frac{q_{real}}{q_{max}} = \frac{h_3 - h_2}{h_8 - h_2} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{HTR} = \frac{q_{real}}{q_{max}} = \frac{h_5 - h_4}{h_7 - h_4} \quad (18)$$

قانون اول ترمودینامیک برای بازیابی کننده دمای پایین و بازیابی کننده دمای بالا به ترتیب ۱۹ و ۲۰ است [۲۷]:

$$x(h_3 - h_2)_2 = h_8 - h_9 \quad (19)$$

$$h_5 - h_4 = h_7 - h_8 \quad (20)$$

حرارت جذب شده توسط محفظه احتراق از طریق معادله ۲۱ محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$Q_{AuxB} = \dot{m}_{CO_2} (h_6 - h_{SR_6}) \quad (21)$$

رابطه ترمودینامیکی برای مبدل حرارتی از معادله ۲۲ به دست می‌آید [۲۹]:

$$\dot{m}_{CO_2} (h_9 - h_{11}) = \dot{m}_w (h_{14} - h_{13}) \quad (22)$$

از معادله ۲۳ برای به دست آوردن انرژی استفاده نشده در پیش‌خنک کننده استفاده شده است [۳۰]:

$$Q_{out} = x\dot{m}_{CO_2} (h_{11} - h_1) \quad (23)$$

و راندمان حرارتی سیکل، از معادله ۲۴ به دست می‌آید [۳۱]:

$$\eta_{th} = \frac{W_{tur} - W_{comp} - W_{Recomp}}{Q_u + Q_{AuxB}} \quad (24)$$

• محاسبات برای تحلیل اقتصادی

برای تحلیل اقتصادی با رویکرد تحلیل سرمایه‌گذاری از نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. دوره زمانی برگشت سرمایه از فرمول ۲۵ به دست می‌آید [۳۲]:

$$Payback\ period = \frac{Initial\ investment}{Net\ annual\ cash\ inflows} \quad (25)$$

جدول ۱ مقدار سرمایه اولیه مورد نیاز را نشان می‌دهد [۳۳]:

تجهیزات	قیمت تجهیزات
کمپرسور	$PEC_{comp} = \frac{71.10 \times \dot{m}_{CO_2}}{0.9 - \eta_{comp}} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \ln \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$
توربین	$PEC_{tur} = \frac{479.34 \times \dot{m}_{CO_2}}{0.92 - \eta_{tur}} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) [1 + \exp(0.036T_{in} - 54.4)]$
بازیابی کننده	$PEC_{rec} = 4122 \times \left(\frac{\dot{m}_{CO_2} (h_5 - h_6)}{18 \times \Delta TLM} \right)^{0.6}$
مبدل حرارتی	$PEC_{HE} = 190 + 310 \times A_{HE}$

جدول ۱. ارتباط قیمت تجهیزات خریداری شده

• محاسبات تحلیل محیط زیستی

برای تحلیل محیط زیستی با نگاه توسعه پایدار، مقادیر کمی اثرات محیط زیستی سیکل، نتایج تحلیل مستخرج از نرم‌افزار Aspen Plus استفاده می‌شود. نرخ هزینه محیط زیستی سیکل، از رابطه ۲۶ به دست می‌آید [۳۴]:

$$\dot{C}_{env} = 0.024\dot{m}_{CO_2} \quad (26)$$

• جزئیات سیال کاری

برای محاسبه سیال کاری، حداقل میزان آلاینده تولیدشده، برای به ملاحظات محیط زیستی توسعه پایدار مد نظر است، آلاینده کربن دی‌اکسید فوق بحرانی به عنوان شاخص محاسبه می‌شود. برای این منظور، سعی می‌شود به این سؤالات پاسخ داده شود. «سیال واردشده به سیکل ابتدا چه تأثیر اقتصادی محیط زیستی ایجاد خواهد کرد؟» و «در صورتی که از سیال خروجی از توربین با توجه به اینکه ترکیب جرمی متفاوتی خواهد داشت، به عنوان سیال کاری استفاده شود چه میزان تفاوت با حالت اولیه خود خواهد داشت؟»، سیال خروجی از توربین تحت عنوان گاز دودکش معرفی می‌شود. سیال‌های کاری مورد نظر شامل گاز سنتز، گاز سنتز دودکش، گاز متان، گاز متان دودکش هستند که ترکیبات آن‌ها در جدول ۲ شرح داده شده است.

جدول ۲. ترکیبات سیالات کاری مورد پژوهش

	دودکش گاز سنتز			
	متان	گاز سنتز	دودکش گاز متان	دودکش گاز سنتز
کربن دی‌اکسید	-	59/31	5/4456	7/7016
کربن مونواکسید	-	13/31	-	-
متان	100	11/46	-	-
پروپان	-	8/03	-	-
هیدروژن	-	5/1	-	-
آمونیاک	-	2/79	-	-
نسبت جرمی (%)				
نیتروژن	-	-	74/3274	71/6727
اکسیژن	-	-	14/7585	14/6017
آرگون	-	-	0.4314	0/4152
NO_x	-	-	0/0016	0/0016
آب	-	-	5/0355	5/6072
کل	100	100	100	100

پژوهش صورت گرفته در زمینه بررسی سیال کاری مناسب نیز در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با انتخاب سیال کاری مناسب برای سیکل‌های ترمودینامیکی

سیکل‌ها	سیال کاری	استناد
رنکاین آلی، رنکاین فوق بحرانی، برای تون فوق بحرانی	سیال آلی و سردساز	(۳۵)
سیکل هیبرید خورشیدی برای تون چندین مرحله‌ای	هوا، کربن دی‌اکسید و هلیوم	(۳۶)
سیکل برای تون فشرده به همراه فشرده‌سازی مجدد	$CO_2 - H_2S$	(۳۷)
RCC, RCMCI, PCRC, UA	$CO_2, CO_2 - SO_2, CO_2 - COS, CO_2 - NH_3, CO_2 - H_2S$	(۳۸)
سیکل برای تون	$CO_2 - H_2S - Kr$	(۳۹)

۳. نتایج شبیه‌سازی

• تحلیل محیط زیستی

همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، در سیکل پیشنهادی میزان کربن دی‌اکسید منتشرشده به نسبت سیکل‌های کلاسیک به شدت کمتر شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد برای هر سیال کاری، گاز سنتز ۲۹/۹۲ برابر دودکش گاز سنتز، کربن

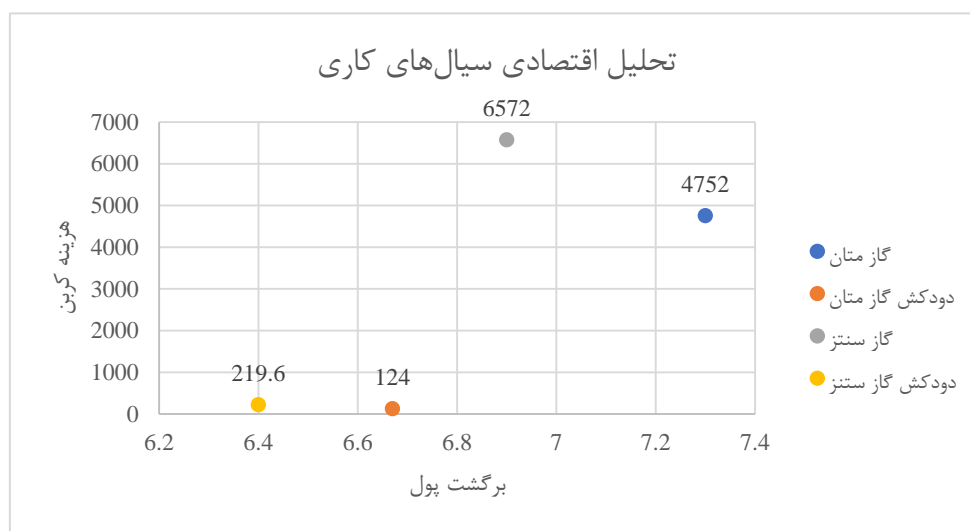
دی‌اکسید منتشر خواهد کرد. در مقایسه دو سیال دیگر با توجه به اینکه دودکش گاز سنتز میزان محتوای کربن دی‌اکسید بیشتری به اندازه ۱/۴۱ برابر دارد میزان آلاینده‌گی نیز به اندازه ۱/۷۷ برابر دودکش گاز متان داشته است.

جدول ۴. کربن دی‌اکسید منتشرشده بر حسب تن بر روز

دودکش گاز سنتز	گاز سنتز	دودکش گاز متان	گاز متان
۱۰/۹۸	۳۲۸/۶	۶/۲	۲۳۷/۶

• تحلیل اقتصادی

با بررسی و مقایسه تأثیر هر سیال بر عملکرد اقتصادی سیکل، همان‌طور که در نمودار ۱ آورده شده است، استفاده از سیال خروجی از توربین برای سیال کاری و در حالت فوق بحرانی، مدت زمان برگشت سرمایه را کاهش می‌دهد. مقایسه نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد در دودکش گاز سنتز به دلیل کربن بیشتر، میزان بهره‌وری نیز بیشتر می‌شود، از این رو می‌شود استنباط کرد که با افزایش میزان جرمی کربن دی‌اکسید، بهره‌وری بالاتری از نظر میزان تولید داشته باشیم. برای محاسبه هزینه کربن، مالیات بر کربن مبنای محاسبات اقتصادی در نظر گرفته می‌شود. در قاره اروپا با توجه به اینکه هر کشور بسته به شرایط خود میزان مالیات بر کربن متفاوتی را در نظر می‌گیرد، در این پژوهش، مالیات بر کربن به طور میانگین ۲۰ دلار بر تن در نظر گرفته شده است. گاز متان و گاز سنتز به دلیل محتوای خود و آلاینده‌گی که تولید می‌کنند بیشترین میزان پرداخت مالیات را خواهند داشت، با این‌وجود گاز متان به میزان ۷۲/۳ درصد مالیات بر کربن کمتری خواهد داشت. با اینکه دودکش گاز متان نسبت به دودکش گاز سنتز مدت برگشت سرمایه طولانی‌تر دارد، ۵۶/۴ درصد کمتر از دودکش گاز سنتز مالیات بر کربن خواهد پرداخت.



نمودار ۱. دوره بازگشت سرمایه و هزینه کربن دی‌اکسید به تفکیک سیال کاری

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور مقایسه اقتصادی و محیط زیستی به صورت یکپارچه یک سیکل برایتون و یک سیکل هلیوستات چهار نوع سیال کاری شامل گاز متان، گاز سنتز، دودکش گاز متان و دودکش گاز سنتز در نظر گرفته و تحلیل شد، نتایج ذیل از این تحلیل حاصل شد:

- استفاده از سیال خروجی از توربین مانند دودکش گاز سنتز می‌تواند تا ۲۹/۹۲ برابر از سیال ورودی هم تیپ خود گاز سنتز انتشار کربن دی‌اکسید را کاهش بدهد.
- با وجود بیشتر بودن محتوای کربن دی‌اکسید دودکش گاز سنتز به میزان ۱/۴۲ برابر دودکش گاز متان، انتشار کربن دی‌اکسید آن ۱/۷۷ برابر است.

- هر دو نوع سیال خروجی از توربین از نظر مدت زمان برگشت سرمایه و مالیات بر کربن و انتشار آن انتخاب بهتری هستند.
- با وجود بیشتر بودن انتشار کربن دی‌اکسید دودکش گاز سنتز و همین‌طور هزینه کربن آن از دودکش گاز متان به دلیل دوره کوتاه‌تر بازگشت سرمایه آن ۵۶/۴ درصد انتخاب بهتری خواهد بود.
- میزان جرمی کربن دی‌اکسید عامل تعیین‌کننده‌ای در بهره‌وری اقتصادی و محیط زیستی این سیکل خواهد بود، محتوای کربن دی‌اکسید دودکش گاز سنتز ۱/۴۱ برابر بیشتر از دودکش گاز متان است و باعث افزایش ۱/۷۷ برابری در میزان انتشار کربن دی‌اکسید و کاهش حدود ۵ درصد در مدت زمان بازگشت سرمایه می‌شود.

منابع

1. Yin JM, Zheng QY, Peng ZR, Zhang XR. Review of supercritical CO₂ power cycles integrated with CSP. *International Journal of Energy Research*. 2020;44(3):1337-69.
2. Sifat NS, Haseli Y. A critical review of CO₂ capture technologies and prospects for clean power generation. *Energies*. 2019;12(21):4143.
3. Peters GP, Andrew RM, Canadell JG, Friedlingstein P, Jackson RB, Korsbakken JI, et al. Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. *Nature Climate Change*. 2020;10(1):3-6.
4. Van Ruijven BJ, De Cian E, Sue Wing I. Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature communications*. 2019;10(1):2762.
5. Beck C, Rashidbeigi S, Roelofsen O, Speelman E. The future is now: How oil and gas companies can decarbonize. *McKinsey & Company*. 2020;7.
6. Liao G, Liu L, Jiaqiang E, Zhang F, Chen J, Deng Y, et al. Effects of technical progress on performance and application of supercritical carbon dioxide power cycle: A review. *Energy conversion and management*. 2019;199:111986.
7. Li B, Wang S-s, Xu Y, Song L. Study on the off-design performance of supercritical carbon dioxide power cycle for waste heat recovery of gas turbine. *Energy Conversion and Management*. 2021;233:113890.
8. Du Y, Yang C, Wang H, Hu C. One-dimensional optimisation design and off-design operation strategy of centrifugal compressor for supercritical carbon dioxide Brayton cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2021;196:117318.
9. Crespi F, Gavagnin G, Sánchez D, Martínez GS. Analysis of the thermodynamic potential of supercritical carbon dioxide cycles: a systematic approach. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018;140(5):051701.
10. Yao L, Zou Z. A one-dimensional design methodology for supercritical carbon dioxide Brayton cycles: Integration of cycle conceptual design and components preliminary design. *Applied Energy*. 2020;276:115354.
11. Ding H, Zhang Y, Hong G, Li J. Comparative study of the supercritical carbon-dioxide recompression Brayton cycle with different control strategies. *Progress in Nuclear Energy*. 2021;137:103770.
12. Salim MS, Saeed M, Kim M-H. Performance analysis of the supercritical carbon dioxide re-compression brayton cycle. *Applied Sciences*. 2020;10(3):1129.
13. Chen Y, Wang M, Liso V, Samsatli S, Samsatli NJ, Jing R, et al. Parametric analysis and optimization for exergoeconomic performance of a combined system based on solid oxide fuel cell-gas turbine and supercritical carbon dioxide Brayton cycle. *Energy Conversion and Management*. 2019;186:66-81.
14. Liu Z, Liu Z, Cao X, Luo T, Yang X. Advanced exergoeconomic evaluation on supercritical carbon dioxide recompression Brayton cycle. *Journal of Cleaner Production*. 2020;256:120537.
15. Chen M, Zhao R, Zhao L, Zhao D, Deng S, Wang W. Supercritical CO₂ Brayton cycle: Intelligent construction method and case study. *Energy Conversion and Management*. 2021;246:114662.
16. Yu A, Su W, Lin X, Zhou N. Recent trends of supercritical CO₂ Brayton cycle: Bibliometric analysis and research review. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021;53(3):699-714.
17. Merchán R, Santos M, Medina A, Hernández AC. High temperature central tower plants for concentrated solar power: 2021 overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;155:111828.
18. Cao Y, Habibi H, Zoghi M, Raise A. Waste heat recovery of a combined regenerative gas turbine-recompression supercritical CO₂ Brayton cycle driven by a hybrid solar-biomass heat source for multi-generation purpose: 4E analysis and parametric study. *Energy*. 2021;236:121432.
19. Ostermann M. *Model Predictive Control and Moving Horizon Estimation for Solar Tower Power Plants: Analysis and Adaptations to the Experimental Facility Solar Tower Jülich*: University of Stuttgart; 2024.
20. Li M-J, Li M-J, Jiang R, Du S, Li X-Y. Study on the dynamic characteristics of a concentrated solar power plant with the supercritical CO₂ Brayton cycle coupled with different thermal energy storage methods. *Energy*. 2024;288:129628.
21. Zhao Y, Chang Z, Zhao Y, Yang Q, Liu G, Li L. Performance comparison of three supercritical CO₂ solar thermal power systems with compressed fluid and molten salt energy storage. *Energy*. 2023;282:128807.
22. Hu F, Wang Z. Integration design and control strategy of sCO₂ Brayton cycle for concentrated solar power system. *Energy Reports*. 2023;9:2861-8.
23. Wang S, Asselineau C-A, Fontalvo A, Wang Y, Logie W, Pye J, et al. Co-optimisation of the heliostat field and receiver for concentrated solar power plants. *Applied Energy*. 2023;348:121513.
24. Xie Q, Guo Z, Liu D, Chen Z, Shen Z, Wang X. Optimization of heliostat field distribution based on improved Gray Wolf optimization algorithm. *Renewable Energy*. 2021;176:447-58.

25. Chen J, Liu L, Liao G, Zhang F, Jiaqiang E, Tan S. Design and off-design performance analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycles for gas turbine waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2023;235:121295.
26. Shokouhi Tabrizi AH, Niazmand H, Farzaneh-Gord M, Ebrahimi-Moghadam A. Energy, exergy and economic analysis of utilizing the supercritical CO₂ recompression Brayton cycle integrated with solar energy in natural gas city gate station. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021;145:973-91.
27. Chen L, Shen J, Ge Y, Wu Z, Wang W, Zhu F, et al. Power and efficiency optimization of open Maisotsenko-Brayton cycle and performance comparison with traditional open regenerated Brayton cycle. *Energy Conversion and Management*. 2020;217:113001.
28. Yang J, Yang Z, Duan Y. Part-load performance analysis and comparison of supercritical CO₂ Brayton cycles. *Energy Conversion and Management*. 2020;214:112832.
29. Liu H, Chi Z, Zang S. Optimization of a closed Brayton cycle for space power systems. *Applied Thermal Engineering*. 2020;179:115611.
30. Jin Q, Xia S, Chen L. A modified recompression S-CO₂ Brayton cycle and its thermodynamic optimization. *Energy*. 2023;263:126015.
31. Khatoon S, Kim M-H. Preliminary design and assessment of concentrated solar power plant using supercritical carbon dioxide Brayton cycles. *Energy Conversion and Management*. 2022;252:115066.
32. Ma Y-N, Hu P, Jia C-Q, Wu Z-R, Chen Q. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of supercritical Brayton cycles with CO₂-based mixtures. *Applied Thermal Engineering*. 2023;219:119492.
33. Zareh AD, Saray RK, Mirmasoumi S, Bahlouli K. Extensive thermodynamic and economic analysis of the cogeneration of heat and power system fueled by the blend of natural gas and biogas. *Energy conversion and management*. 2018;164:329-43.
34. Zoghi M, Habibi H, Choubari AY, Ehyaei M. Exergoeconomic and environmental analyses of a novel multi-generation system including five subsystems for efficient waste heat recovery of a regenerative gas turbine cycle with hybridization of solar power tower and biomass gasifier. *Energy Conversion and Management*. 2021;228:113702.