

Multi-Criteria Analysis and Optimization of a Combined Solid Oxide Fuel Cell–Supercritical CO₂ Brayton and Organic Rankine Cycle System Based on Energy, Exergy, Economic, and Environmental Assessments, Grey Wolf Optimizer Algorithm, and SWOT: A Parametric Study

Behrad Alizadeh Kharkeshi*

Mechanical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: October 27, 2025

Revised: December 17, 2025

Accepted: December 23, 2025

ePublished: January 30, 2026

ABSTRACT

In this current study, the energy, exergy, economic, and environmental efficiency of an integrated solid oxide fuel cell (SOFC) with two proposed waste heat recovery cycles - an organic Rankine cycle (ORC) and a supercritical carbon dioxide Brayton cycle (sCO₂) was investigated. The SOFC model used in the analysis was detailed and included electrochemical equations along with expressions for activation, ohmic, and concentration losses derived from it and was validated against reference experimental data. Then a systematic energy and exergy analysis of the complete system was performed to identify the optimum cycle in terms of efficiency and SWOT evaluation. The supercritical carbon dioxide Brayton cycle was then optimized multi-objectively with the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm for maximum power and minimum destruction of exergy. The results indicated that an increase in the current density from 0.4 to 1 A/cm² reduced the cell voltage from 0.88 to 0.63 V, while the recovered heat increased from 12 to 25 kW. At the optimal position from the GWO, the energy efficiency, net system power, current density, and total rate of exergy destruction were 0.875 A/cm², 501 kW, 53.74%, and approximately 377.23 kW, respectively. The comparison between the two configurations showed that the energy efficiency of the SOFC–sCO₂ system was greater than that of the stand-alone SOFC by more than 24%. In addition, incorporation of the waste heat recovery system into the SOFC–sCO₂ system reduced the same CO₂ emissions by 39.21% relative to the independent SOFC system.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cell, Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle, Organic Rankine Cycle, Energy and Exergy Analysis, Multi-Objective Optimization

How to cite this article

Alizadeh Kharkeshi B, Multi-criteria analysis and optimization of a combined solid oxide fuel cell–supercritical CO₂ Brayton and organic Rankine cycle system based on energy, exergy, economic, and environmental assessments, Grey Wolf Optimizer algorithm, and SWOT: A parametric study. *Modares Mechanical Engineering*; 2026;26(02):91-105.

*Corresponding author's email: b.alizadeh@nit.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-6522-6914



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



آنالیز چندمعیاره و بهینه‌سازی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-سیکل برایتون فوق‌بحرانی CO₂ و رانکین آلی بر پایه تحلیل انرژی، انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی، الگوریتم گرگ خاکستری و SWOT: مطالعه پارامتریک

بهراد علی‌زاده خاکی *^{ib}

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

در این پژوهش، عملکرد انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی یک پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) متصل به دو سیکل پیشنهادی بازیابی حرارت شامل سیکل برایتون فوق‌بحرانی دی‌اکسیدکربن (sCO₂) و سیکل ارگانیک رانکین (ORC) بررسی شد. مدل جامع پیل سوختی شامل معادلات الکتروشیمیایی، افت‌های فعال، اهمی و غلظتی توسعه‌یافته و با داده‌های تجربی مرجع اعتبارسنجی گردید. سپس تحلیل انرژی و انرژی کل سیستم انجام گردید تا سیکل بهتر با در نظر گرفتن عملکرد و تحلیل SWOT انتخاب گردد. سپس سیکل برایتون فوق‌بحرانی دی‌اکسیدکربن مورد بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) برای بهینه‌سازی توان و کمینه‌سازی تلفات انرژی صورت گرفت. نتایج نشان داد با افزایش چگالی جریان از ۰/۴ تا ۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع، ولتاژ سلول از ۰/۸۸ به ۰/۶۳ ولت کاهش و نرخ گرمای بازیافتی از ۱۲ به ۲۵ کیلووات افزایش می‌یابد. در نقطه بهینه به دست آمده از GWO، چگالی جریان ۰/۸۷۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع، توان خالص سیستم ۵۰۱ کیلووات، بازده انرژی ۵۳/۷۴٪ و نرخ تخریب انرژی کل حدود ۳۷۷/۲۳ کیلووات محاسبه شد. مقایسه دو ترکیب نشان داد که سیستم SOFC-sCO₂ حدود ۲۴٪ بازده انرژی بالاتری نسبت به پیل سوختی اکسید جامد دارد. همچنین، ترکیب بازیابی حرارت با سیستم SOFC-sCO₂ موجب کاهش ۳۹/۲۱٪ در انتشار CO₂ معادل نسبت به SOFC مستقل شدند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

کلیدواژه‌ها: پیل سوختی اکسید جامد، سیکل برایتون فوق‌بحرانی دی‌اکسیدکربن، سیکل ارگانیک رانکین، تحلیل انرژی و انرژی، انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی، الگوریتم گرگ خاکستری و SWOT: مطالعه پارامتریک، مهندسی مکانیک مدرس.

نحوه ارجاع به این مقاله

علی‌زاده خاکی بهراد، آنالیز چندمعیاره و بهینه‌سازی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-سیکل برایتون فوق‌بحرانی CO₂ و رانکین آلی بر پایه تحلیل انرژی، انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی، الگوریتم گرگ خاکستری و SWOT: مطالعه پارامتریک، مهندسی مکانیک مدرس.

۱۰۵-۹۱:۲۶(۰۲):۱۴۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b.alizadeh@nit.ac.ir

*شناسه اراکیده نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۶۹۱۴-۶۵۲۲-۰۰۰۰-۰۰۰۰



۱- مقدمه

باتوجه به افزایش جمعیت کره زمین و پیشرفت صنایع در زمینه‌های مختلف، راهکارهای متنوعی برای حل معضلات ناشی از کمبود انرژی تابه‌حال ارائه شده است. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، هیدروالکتریک، باد، زمین گرمایی و امواج دریا، یکی از راهکارهای مرسوم به‌منظور حل مشکلات ناترازی انرژی در جهان است. اما از طرف دیگر، تعداد بسیار زیادی از صنایع در حال حاضر دارای محرک‌های اولیه مشخصی هستند و باید راندمان همین نوع از محرک‌های اولیه افزایش یابد. به‌نوعی می‌توان گفت بهترین راهکار برای افزایش راندمان این نوع از مبدل‌ها، استفاده از حرارت اتلافی محرک‌های اولیه به‌منظور تولید توان و یا گرمایش و یا حتی سرمایش است. یکی از محرک‌های اولیه بسیار مناسب برای تولید توان، پیل‌های سوختی هستند. باتوجه به اینکه سوخت مصرفی پیل‌های سوختی می‌تواند هیدروژن باشد و راهکارهای سبز برای تولید هیدروژن وجود دارد، این نوع از محرک‌های اولیه می‌توانند مشکلات ناشی از آلودگی هوا را هم برطرف نمایند. مطالعات زیادی در زمینه ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با سیکل‌های سیال فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید و یا ORC تابه‌حال صورت پذیرفته است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

کانبوی و همکاران در پژوهشی، چرخه برایتون با کربن دی اکسید فوق‌بحرانی را ساختند. در این مطالعه عملکرد اجزای اصلی چرخه در شرایط واقعی ارزیابی و مرزهای عملیاتی بررسی شد [۱]. برایان و همکاران، عملکرد چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی برای نیروگاه‌های خورشیدی بررسی کردند، تا تأثیر نوسانات منبع حرارتی خورشید بر بازده سیستم مشخص شود [۲]. گرگ و همکاران عملکرد چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی برای کاربردهای نیروگاه خورشیدی متمرکز بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که چرخه فوق‌بحرانی در فشار حدود ۸۵ بار به بیشترین بازده حرارتی می‌رسد و حتی در دمای منبع پایین‌تر (۸۲۰ کلوین) بازدهی بالای ۳۰٪ دارد [۳]. وانگ و همکاران، چندین طرح چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی برای ادغام با نیروگاه خورشیدی برج نمک مذاب بررسی نمودند. نتایج نشان داد افزایش دمای نمک مذاب همیشه باعث بهبود بازده نمی‌شود و بازگرمایش در دماهای بالا می‌تواند کارایی را کاهش دهد [۴]. بیفان و همکاران، چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی به‌عنوان جایگزینی برای چرخه رانکین بخار در نیروگاه‌های زغال‌سنگی بررسی کردند. سه طرح بهبودیافته برای استفاده بهتر از گرمای گازهای خروجی بویلر ارائه و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد طرح دارای جریان دوم به بویلر، بیشترین بازده خالص را با افزایش از ۴۵/۹۶٪ به ۵۰/۷۱٪ ایجاد می‌کند [۵]. جینگزه و همکاران، عملکرد چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی در سامانه ترکیبی شامل برج خورشیدی، ذخیره حرارتی نمک مذاب و چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن

فوق‌بحرانی بررسی کردند. نتایج نشان داد چرخه بازگرمایش در کاهش بار بازده پایدارتری دارد، در حالی که چرخه بازفشارده در بار کمتر از ۶۲/۵٪ و چرخه میان‌خنک‌کننده در بار بالاتر از ۶۸/۳٪ عملکرد بهتری دارند [۶]. جین و همکاران، طرح‌های جدید چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی شامل کمپرسور ایزوترمال به‌صورت ترمودینامیکی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از کمپرسور ایزوترمال باعث کاهش قابل‌توجه توان تراکم و بهبود بازده خالص چرخه می‌شود [۷]. بیان و همکاران، عملکرد جزئی چهار طرح متداول چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی شامل چرخه ساده، بازفشارده، بازگرمایش و میان‌خنک‌کننده با مدل‌سازی دینامیکی و راهبردهای کنترلی مختلف بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد بازده حرارتی به طور هم‌زمان تحت تأثیر نوع چرخه و روش کنترل قرار دارد، در حالی که ایمنی بیشتر به استراتژی کنترل وابسته است [۸]. سان و همکاران، رابطه‌ی تعادلی میان بازده حرارتی چرخه و بازده استفاده از منبع حرارتی در سامانه‌های بازیافت حرارت را مطالعه کردند. برای این منظور، چندین طرح از چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی شبیه‌سازی شدند و ساختار بهینه ارائه گردید [۹]. در پژوهشی دیگر توسط سلیمان و همکاران، سیستم ترکیبی SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) و ORC (Organic Rankine Cycle) برای تولید برق، گرما و سرما از نظر اگزرژی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از این سیستم ۲۵٪ بازده اگزرژی را نسبت به چرخه برق تنها افزایش می‌دهد [۱۰].

ازکان و دینسر، عملکرد ترمودینامیکی یک سامانه تولید هم‌زمان برای تولید برق، گرما و سرما با استفاده از تحلیل‌های انرژی و اگزرژی را ارزیابی نمودند. بیشترین برگشت‌ناپذیری در واحد SOFC به دلیل دمای بالا مشاهده گردید. بازده انرژی و اگزرژی سیستم نسبت به سیستم‌های معمولی SOFC به ترتیب ۵۶/۲۵٪ و ۱۵/۴۴٪ بهبودیافته است [۱۱]. ازکان و دینسر سیستم SOFC با اصلاح‌کننده داخلی را با استفاده از گازهای تولیدی از گاز سازهای BFB (bubbling fluidized bed) و CFB (circulating fluidized bed) و DFB (dual fluidized bed) بررسی کردند. سیستم پیشنهادی شامل SOFC، ORC، چیلر جذبی و واحد گرمایش آب بود. نتایج نشان می‌دهند که سیستم SOFC با سوخت TRI (ThermoChem bubling fluidized bed gasifier) بهترین بازده انرژی (۴۲/۲٪) و اگزرژی (۳۶/۵٪) را دارد [۱۲]. ژانگ و همکاران به‌منظور ایجاد چارچوب مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی شامل پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و ORC انجام دادند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم یکپارچه می‌تواند بازده الکتریکی ۶۶/۲۷٪ و بازده CHP معادل ۸۸/۴۳٪ را به دست آورد [۱۳]. سینگ و اونکار سیستم ترکیبی SOFC، توربین گاز و چرخه ORC را برای بازیابی حرارت اتلافی بررسی کرده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که استفاده از حرارت اتلافی (Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine)

با مدل‌های ترمودینامیکی دو چرخه بازیابی حرارت پیشنهادی، یعنی چرخه برایتون دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی (CO_2) و چرخه رانکین آلی شده است. در گام سوم، یک تحلیل چندمعیاره جامع و هم‌زمان بر روی این سامانه ترکیبی انجام‌گرفته که شاخص‌های کلیدی از جمله راندمان انرژی و انرژی، هزینه برق تولیدی (LCOE) و انتشار گازهای گلخانه‌ای را محاسبه می‌کند. در گام چهارم از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، به منظور حل مسأله چندهدفه و یافتن نقطه تعادل بهینه بین حداکثر توان و حداقل تخریب انرژی استفاده شده است. این الگوریتم به دلیل سادگی، کارایی و نیاز کم به تنظیم پارامتر، توانسته است با دقت بالا، نقطه بهینه عملیاتی را شناسایی کند. در گام نهایی و برای تکمیل چرخه پژوهش، یافته‌های کمی حاصل از بهینه‌سازی و تحلیل چندمعیاره، در قالب یک تحلیل راهبردی کیفی تلفیق شده‌اند تا نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای هر پیکربندی به‌صورت نظام‌مند استخراج و ارائه گردد.

۲- فیزیک مسئله

پیل‌های سوختی اکسید جامد می‌توانند به‌عنوان یک منبع اولیه برای تولید انرژی در مصارف مختلف مورد استفاده قرار گیرند. این نوع پیل‌ها، بر خلاف دیگر منابع تولید انرژی، مزیت‌های زیادی در کاهش آلاینده‌گی دارند. یکی از جنبه‌های مهم در استفاده از پیل‌های سوختی اکسید جامد، بهینه‌سازی فرآیند بازیافت حرارت تولیدی این پیل‌ها است. تا کنون، راهکارهای مختلفی برای بازیافت حرارت ناشی از این پیل‌ها پیشنهاد شده‌اند، اما بررسی جامع و مقایسه این روش‌ها می‌تواند عملکرد سیستم‌های بازیافت حرارت مختلف را روشن کند. در این مقاله، از سیکل‌های ORC و برایتون فوق‌بحرانی دی اکسید کربن به‌عنوان راهکارهای بازیافت حرارت استفاده شده است. همچنین، این دو سیکل از دیدگاه‌های انرژی، انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند تا عملکرد هر سیستم بر اساس این جنبه‌ها ارزیابی شود.

برای تشریح عملکرد سیستم، مراحل زیر قابل‌ذکر است: در مرحله اول، هوا و سوخت وارد پیل سوختی اکسید جامد می‌شوند و پیل سوختی می‌تواند برق و حرارت تولید کند. پس از تولید حرارت، این انرژی به یک مبدل حرارتی منتقل می‌شود که در سیکل فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیکل، کربن‌دی‌اکسید گرم شده در مبدل حرارتی و پس از عبور از توربین، کاهش انتالپی می‌یابد و به کندانسور وارد می‌شود تا خنک‌سازی شود. سپس کربن‌دی‌اکسید به کمپرسور بازمی‌گردد و پس از افزایش فشار و دما، مجدداً به مبدل حرارتی ارسال شده و به توربین وارد می‌شود تا سیکل ادامه یابد.

در سیکل ORC، مراحل مشابهی در مورد پیل سوختی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که در اینجا، سیال ارگانیک به‌جای

SOFC-GT از طریق ORC باعث افزایش ۸٪ تا ۱۲٪ بازده سیستم می‌شود [۱۴]. آمیکابیل و همکاران یک سیستم تولید ترکیبی برای بازیابی حرارت اتلافی از فرایند تبدیل هیدروژن معرفی کردند. بخش زیادی از انرژی حرارتی اتلافی حاصل از فرایندهای تبدیل برق و آب به هیدروژن را بازیابی نمودند [۱۵]. خلیلی و همکاران یک چرخه خورشیدی با ORC برای تأمین برق تجدیدپذیر نیز طراحی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی و انرژی واحد SOFC به ترتیب ۵۱/۷۱٪ و ۴۹/۶۳٪ است، در حالی که بازده کل سیستم ۲۰/۱۴٪ و ۳۰/۲۸٪ است [۱۶]. کومار و همکاران به استفاده از حرارت سرمایش میانی برای افزایش توان اضافی تولیدی از طریق ORC و کاهش کار موردنیاز کمپرسور هوا پرداخته‌اند. تحلیل پارامتریک بر سیستم ترکیبی شامل پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و ORC انجام شد تا تأثیر پارامترهایی مانند فاکتور استفاده از سوخت، چگالی جریان، دمای ورودی توربین و نسبت تراکم بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از حرارت در ORC، بازده انرژی و انرژی سیستم SOFC-GT-ORC از ۴۱/۸۵٪ به ۴۷/۳۴٪ و از ۵۱/۳۶٪ به ۵۶/۸۵٪ افزایش می‌یابد [۱۷]. وانگ و همکاران یک سیستم بازیابی انرژی ترکیبی برای کشتی‌های سبز با استفاده از پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و ORC پیشنهاد کردند. نتایج نشان می‌دهد که ۹۲/۹۵٪ از تخریب انرژی قابل‌اجتناب در توربین گاز رخ می‌دهد [۱۸].

در بررسی نظام‌مند پیشینه تحقیقاتی مرتبط با سامانه‌های ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و چرخه‌های بازیابی حرارت، سه شکاف پژوهشی عمده و اساسی قابل‌شناسایی است. نخست، فقدان یک چارچوب تحلیلی یکپارچه است که بتواند به‌صورت هم‌زمان و متعادل، چهار بُعد کلیدی عملکردی یعنی جنبه‌های انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی را در تعامل با یکدیگر مورد سنجش قرار دهد. مطالعات پیشین عموماً بر یک یا دو بُعد متمرکز بوده و نگاهی جزئی‌نگر داشته‌اند.

دوم، نبود یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه کارآمد و دقیق است که بتواند در فضای پیچیده پارامترهای عملیاتی، نقطه تعادل بهینه را بین اهداف متعارضی همچون حداکثرسازی توان خالص و حداقل‌سازی نرخ تخریب انرژی شناسایی و تعیین نماید. سوم، کمبود ارزیابی‌های راهبردی و کیفی است که بتواند قابلیت اجرا، پایداری بلندمدت و پتانسیل توسعه این سامانه‌های پیچیده را در سناریوهای واقعی و با در نظر گرفتن الزامات فنی-اقتصادی تحلیل کند.

این پژوهش با درک این شکاف‌ها، مسیر پژوهشی نظام‌مندی را طی کرده است. در گام اول، یک مدل ترمودینامیکی -الکتروشیمیایی برای پیل سوختی اکسید جامد توسعه داده و با داده‌های تجربی معتبر، اعتبارسنجی شده است. این مدل پایه، تمامی پیچیدگی‌های الکتروشیمیایی شامل تلفات فعال، اهمی و غلظتی را در نظر می‌گیرد. در گام بعد، این مدل پایه به‌صورت پویا

حرارتی اولیه (Pre-heating) و تأثیرات زمانی آن در این تحلیل لحاظ نشده است.

دمای محیط برابر با ۲۹۸ کلوین (۲۵ درجه سلسیوس) فرض شده است.

فشار محیطی برابر با ۱ بار (۱۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال) در نظر گرفته شده است.

ویسکوزیته سیالات مورد استفاده در سیکل‌ها (کربن‌دی‌اکسید برای سیکل برایتون و سیالات ارگانیک برای سیکل ORC) در دما و فشار مشخص به صورت ثابت و مطابق با ویژگی‌های آنها در نظر گرفته شده است.

در مبدل حرارتی، دمای سیالات به طور یکنواخت توزیع شده و هیچ نوسانات شدیدی در آن وجود ندارد.

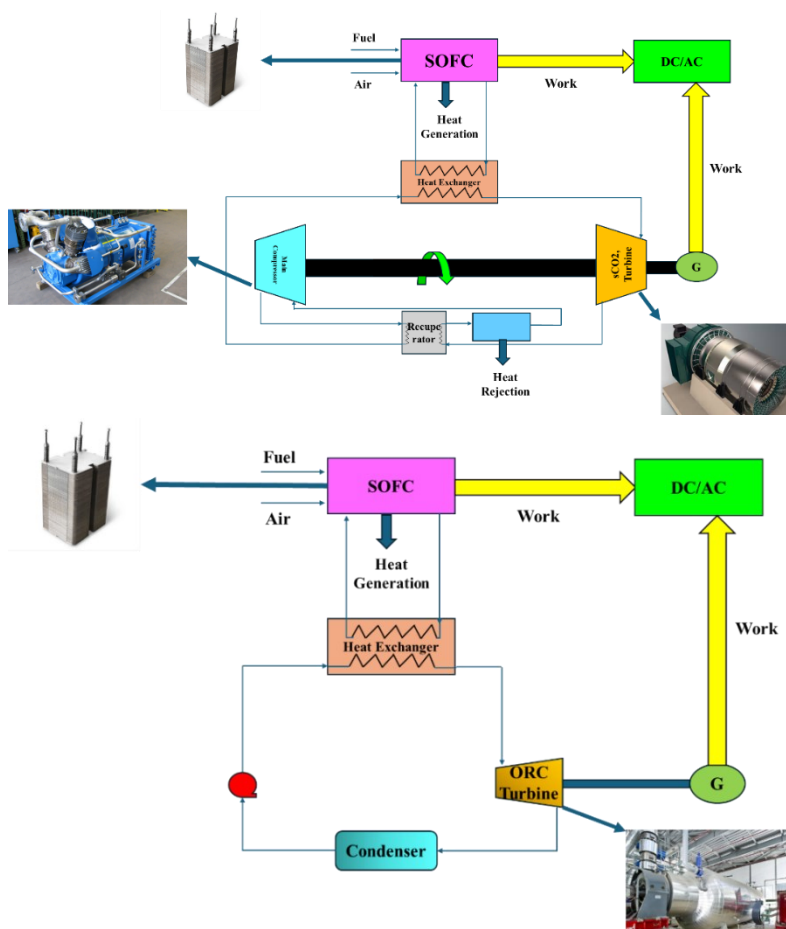
توان محاسبه شده در این بخش، توان ناخالص (Gross Power) تولیدی استک می‌باشد. کار مصرفی تجهیزات جانبی نظیر دمنده‌ها و پمپ‌ها به عنوان درصدی از توان کل (Parasitic Load) در تحلیل‌های اقتصادی و زیست‌محیطی منظور شده است

کربن‌دی‌اکسید وارد مبدل حرارتی شده و حرارت تولیدی پیل سوختی را جذب می‌کند. پس از افزایش انتالپی در توربین، سیال ارگانیک از توربین عبور کرده و وارد کندانسور می‌شود. پس از خنک‌سازی، سیال دوباره به مبدل حرارتی ارسال می‌شود و حرارت تولیدی پیل سوختی را دریافت می‌کند. این سیکل در نهایت تکرار می‌شود.

این مقاله به بررسی و مقایسه عملکرد دو سیستم مختلف بازیافت حرارت از پیل‌های سوختی اکسید جامد پرداخته است تا به طور دقیق‌تر مزایا و معایب هر یک از آنها را از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دهد.

فرضیات پژوهش به شرح زیر است:

- سیستم در شرایط پایداری کامل عمل می‌کند و تغییرات زمانی در نظر گرفته نمی‌شود.
- تحلیل حاضر بر عملکرد سیستم در شرایط بهره‌برداری پایا (Steady-State) متمرکز است و ملاحظات مربوط به فاز راه‌اندازی (Startup) پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) و تأمین گرمای اولیه مورد نیاز برای رسیدن به دمای عملیاتی (که مستلزم مدل‌سازی دینامیکی است)، هزینه‌های



شکل ۱ دوسناریوی سیکل برایتون سیال فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید و ORC پیشنهادی برای استفاده از حرارت تولیدی پیل سوختی اکسید جامد

Fig. 1 Two proposed scenarios of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle and the organic Rankine cycle for utilizing the waste heat of a solid oxide fuel cell (SOFC).

۳- معادلات حاکم

۳-۱- مدل الکتروشیمیایی

در پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC)، واکنش‌های الکتروشیمیایی در آند و کاتد رخ می‌دهد. شدت جریان (I) که معیاری برای جریان کل عبوری از پیل است، به طور مستقیم به چگالی جریان (i) و مساحت سطح الکتروود (A_{cell}) وابسته است. این جریان باعث مصرف هیدروژن در آند می‌شود. نرخ مصرف هیدروژن ($\dot{n}_{H_2-cons}$) به عنوان تعداد مول‌های هیدروژن مصرفی در واحد زمان محاسبه می‌شود. ولتاژ نرنست (E_{Nernst}) نیز به عنوان ولتاژ ایده‌آل پیل بدون در نظر گرفتن تلفات محاسبه می‌شود و به عنوان معیار عملکرد پیل در شرایط ایده‌آل عمل می‌کند [۱۹].

$$I = i \times A_{cell} \quad (۱)$$

$$\dot{n}_{H_2-cons} = \frac{I}{2F} \quad (۲)$$

تلفات ولتاژ در پیل‌های سوختی به دلیل عواملی مانند مقاومت داخلی و فرآیندهای الکتروشیمیایی در سطح الکتروودها به وجود می‌آید. این تلفات شامل تلفات فعال (در آند و کاتد)، تلفات اهمی (ببه خاطر مقاومت داخلی) و تلفات غلظتی (تفاوت غلظت یون‌ها در سطح الکتروود) هستند. تلفات فعال در آند و کاتد با استفاده از معادله آرک سینوس محاسبه می‌شود که وابسته به چگالی جریان و ویژگی‌های سطح الکتروودها است. تلفات ولتاژ اهمی به دلیل مقاومت داخلی مواد پیل محاسبه می‌شود و به طور مستقیم با شدت جریان وابسته است. تلفات ولتاژ غلظتی نیز به علت تفاوت غلظت یون‌ها در الکتروولیت‌ها رخ می‌دهد [۲۰].

• تلفات ولتاژ فعال در آند و کاتد:

$$V_{act} = \frac{RT_{cell}}{2F} \left(\operatorname{arcsinh} \left(\frac{i}{2i_{anode}} \right) + \operatorname{arcsinh} \left(\frac{i}{2i_{cathode}} \right) \right) \quad (۳)$$

$$V_{ohm} = i \times ASR_{ohm} \quad (۴)$$

$$V_{conc} = \frac{RT_{cell}}{4F} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{i}{i_{lim}}} \right) \quad (۵)$$

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (۶)$$

میزان هیدروژن ورودی به پیل به طور مستقیم به نرخ مصرف هیدروژن و ضریب استفاده از سوخت (U_f) وابسته است. جریان هیدروژن خروجی از پیل نیز به نرخ مصرف هیدروژن و میزان هیدروژن ورودی بستگی دارد. همچنین، برای محاسبه جریان اکسیژن مصرفی، باید توجه کرد که برای هر مول هیدروژن مصرفی، ۰/۵ مول اکسیژن نیاز است. جریان نیتروژن در هوا نیز به صورت نسبی و به تناسب مقدار نیتروژن در جو به دست می‌آید [۲۱].

$$\dot{n}_{H_2-in} = \frac{\dot{n}_{H_2-cons}}{U_f} \quad (۷)$$

$$\dot{n}_{H_2-out} = \dot{n}_{H_2-in} - \dot{n}_{H_2-cons} \quad (۸)$$

$$\dot{n}_{H_2O-out} = \dot{n}_{H_2-cons} \quad (۹)$$

$$\dot{n}_{O_2-cons} = \frac{\dot{n}_{H_2-cons}}{2} \quad (۱۰)$$

$$\dot{n}_{O_2-in} = \frac{\dot{n}_{O_2-cons}}{U_a} \quad (۱۱)$$

$$\dot{n}_{N_2-air-in} = \dot{n}_{air-in} \times 0.79 \quad (۱۲)$$

توان DC خروجی از پیل سوختی با استفاده از ولتاژ پیل و شدت جریان محاسبه می‌شود. این توان معیاری از انرژی مفید تولیدی توسط پیل است که به شبکه الکتریکی منتقل می‌شود. توان ورودی سوخت که انرژی موجود در هیدروژن ورودی به پیل را نشان می‌دهد، از طریق نرخ مصرف هیدروژن و ارزش حرارتی بالای هیدروژن محاسبه می‌شود. راندمان الکتریکی که به عنوان نسبت توان خروجی به توان ورودی سوخت محاسبه می‌شود، معیاری از کارایی تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی است. راندمان بازیابی حرارتی نیز میزان انرژی حرارتی بازیابی شده از پیل را نسبت به توان ورودی سوخت نشان می‌دهد [۲۰].

$$P_{dc} = V_{cell} \times I \quad (۱۳)$$

$$\Phi_{H_2-in} = \dot{n}_{H_2-in} \times M_{H_2} \times HHV_{H_2} \quad (۱۴)$$

$$\eta_{electric} = \frac{P_{dc}}{\Phi_{H_2-in}} \quad (۱۵)$$

$$\eta_{SOFC} = \frac{P_{dc}}{\Phi_{H_2-in}} \quad (۱۶)$$

۳-۲- چرخه ارگانیک رانکین

ORC به طور گسترده‌ای برای بازیافت انرژی در سیستم‌های مختلف مانند نیروگاه‌های کوچک، بازیافت حرارت از فرآیندهای صنعتی، و سیستم‌های هیبریدی مانند SOFC+ORC استفاده می‌شود. این سیستم‌ها می‌توانند انرژی حرارتی ضایعاتی را به انرژی الکتریکی مفید تبدیل کنند که یکی از روش‌های موثر در بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش آلاینده‌ها است.

در سیکل رانکین آبی، معادله بقای جرم در همه نقاط جریان سیال برقرار است. این معادله به این صورت است [۲۲، ۲۳]:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m} \quad (۱۷)$$

$$W_{turbine} = \dot{m} \times (h_1 - h_o) \quad (۱۸)$$

$$W_{pump} = \dot{m} \times (h_o - h_1) \quad (۱۹)$$

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net\ ORC}}{Q_{in\ ORC}} \quad (۲۰)$$

۳-۳- سیکل برایتون فوق بحرانی

سیکل برایتون فوق بحرانی (sCO₂ Brayton) از CO₂ در ناحیه فوق بحرانی ($P > P_{crit} = ۷.۳۷۷\ MPa$ و $T > T_{crit} = ۳۰۴.۱۳\ K$) بهره می‌برد تا بازده ترمودینامیکی بالا، چگالی جرمی زیاد، و ابعاد تجهیزات کوچک حاصل شود. CO₂ پس از تراکم در کمپرسور، در گرم‌کن حرارت دریافت می‌کند تا دمای بالای توربین گرم می‌شود، در توربین انبساط کرده کار تولید می‌کند، و سپس در خنک‌کن به شرایط ورودی بازگردانده می‌شود. در سامانه هیبریدی SOFC+sCO₂، منبع حرارت ورودی سیکل، نرخ گرمای بازیافتی از پیل سوختی اکسید جامد است (جدول ۱).

LCOE (Levelized Cost of Energy) با تقسیم هزینه سالانه کل بر انرژی سالانه تولیدی به دست می‌آید [۲۶]

$$LCOE = \frac{\text{Total Annual Cost}}{\text{Annual Energy Output}} \quad (۳۲)$$

این معادله نشان می‌دهد که چقدر هزینه به ازای هر کیلووات ساعت انرژی تولیدی در سیستم ترکیبی GT و یا ORC است.

۳-۶- زیست محیطی

در این پژوهش، یک مدل ارزیابی زیست‌محیطی الهام‌گرفته از روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) توسعه داده شده است، مدل توسعه‌یافته سه منبع اصلی انتشار را در نظر می‌گیرد؛ (۱) انتشارهای پیشین حاصل از مسیر تولید هیدروژن خوراک، (۲) انتشارهای مستقیم ناشی از احتراق سوخت کمکی در صورت ناکافی بودن حرارت اتلافی پیل و (۳) انتشارهای غیرمستقیم ناشی از مصرف برق شبکه برای بارهای جانبی و کنترلی. برتری این مدل نسبت به LCAهای کلاسیک در آن است که به‌صورت پویا با پارامترهای ترمودینامیکی سیستم کوپل می‌شود و قادر است تغییرات لحظه‌ای در نرخ انتشار CO₂-eq را متناسب با شرایط عملکردی سیستم نشان دهد. هدف نهایی از توسعه این چارچوب، ارائه‌ی مدلی کارآمد برای ارزیابی هم‌زمان کارایی انرژی-اگزرژی و اثرات زیست‌محیطی و در نهایت پشتیبانی از تصمیم‌گیری در طراحی سامانه‌های پایدار نسل جدید مانند SOFC-GT-ORC است [۲۷]:

$$GHG_{H_2} = \dot{m}_{H_2} EF_{H_2,prod} \quad (۳۳)$$

$$\dot{m}_{aux} = \frac{\dot{Q}_{aux}}{LHV_{aux}} \quad (۳۴)$$

$$GHG_{aux} = \dot{m}_{aux} (EF_{CO_2} + EF_{CH_4} GWP_{CH_4} + EF_{N_2O} GWP_{N_2O}) \quad (۳۵)$$

$$GHG_{grid} = \left(\frac{W_{parasitic}}{1000} \right) \frac{EF_{grid}}{3600} \quad (۳۶)$$

$$GHG_{total} = GHG_{H_2} + GHG_{aux} + GHG_{grid} \quad (۳۷)$$

$$GHG_{per kWh} = \frac{GHG_{total}}{E_{net}/3600} \quad (۳۸)$$

$$GHG_{per MJex} = \frac{GHG_{total}}{\dot{E}_{dest}/10^6} \quad (۳۹)$$

سیستم معادلات غیرخطی حاکم، شامل معادلات بقای جرم، انرژی و روابط الکتروشیمیایی و ترمودینامیکی، با استفاده از نرم‌افزار Engineering Equation Solver (EES) کدنویسی و حل شده‌اند. این نرم‌افزار از روش تکراری نیوتن-رافسون برای حل هم‌زمان معادلات استفاده می‌کند. خواص ترمودینامیکی سیالات (شامل هیدروژن، هوا و دی‌اکسید کربن فوق بحرانی) مستقیماً از کتابخانه داخلی نرم‌افزار فراخوانی شده‌اند. معیار همگرایی برای توقف تکرارها، رسیدن به خطای باقیمانده نسبی کمتر از ۱۰^{-۶} برای تمامی متغیرها در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ ورودی‌های مدل‌سازی سیال فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید

Table 1 Input parameters for the supercritical carbon dioxide modeling.

Parameter	Value	Unit
Compressor Pressure Ratio	2.5	-
Compressor Inlet Temperature	310	K
Compressor Inlet Pressure	8000	kPa
Turbine Inlet Temperature	800	K
CO ₂ Mass Flow Rate	0.2	kg/s
Compressor Isentropic Efficiency	0.8	-
Turbine Isentropic Efficiency	0.8	-
Ambient Reference Conditions	298.15, 101.325	K, kPa

معادلات برای خروج واقعی از کمپرسور با استفاده از بازده ایزنتروپیک آورده می‌شود [۲۴].

$$W_{comp} = \dot{m} \times (h_o - h_i) \quad (۲۱)$$

$$W_{turb} = \dot{m} \times (h_i - h_o) \quad (۲۲)$$

$$Q_{in} = \dot{m} \times (h_i - h_o) \quad (۲۳)$$

۳-۴- تحلیل اگزرژی

تحلیل اگزرژی به مقایسه توان تولیدی در سیستم‌های واقعی مانند SOFC، ORC و sCO₂ با توان سیکل کارنو می‌پردازد. در این تحلیل، توان تولیدی هر سیستم محاسبه شده و سپس با توان ایده‌آل سیکل کارنو که بین دمای T_H و T_L کار می‌کند، مقایسه می‌شود. تفاوت بین توان واقعی و توان کارنو نشان‌دهنده تخریب اگزرژی است، که به‌واسطه ناکارآمدی‌های درونی سیستم‌ها ایجاد می‌شود. در نهایت، این تخریب اگزرژی به‌عنوان نمایانگر بازگشت‌ناپذیری انرژی در نظر گرفته می‌شود. این تحلیل به ما کمک می‌کند تا راندمان سیستم‌ها را با در نظر گرفتن تلفات انرژی و میزان استفاده مفید از انرژی ورودی ارزیابی کنیم [۲۵].

$$W_{Carnot} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \times Q_h \quad (۲۴)$$

$$\text{Exergy Destruction} = W_{Carnot} - W_{actual} \quad (۲۵)$$

$$\eta_{2ndLaw} = \frac{\eta_{actual}}{\eta_{Carnot}} \quad (۲۶)$$

۳-۵- تحلیل هزینه انرژی تولید شده

هزینه سرمایه‌گذاری شامل هزینه اولیه برای خرید و نصب سیستم است که به‌صورت سالانه با در نظر گرفتن فاکتور بازگشت سرمایه (capital recovery factor) محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$\text{Capital Cost Annual} = C_{capital} \times W_{total} \times CRF \quad (۲۷)$$

$$\text{OM Cost Annual} = OM_{cost} \times W_{total} \times 3600 \times 3000 / 1000 \quad (۲۸)$$

$$\text{Fuel Cost per Year} = C_{fuel} \times \Phi_{H_2in} \times \text{Hours per year} \quad (۲۹)$$

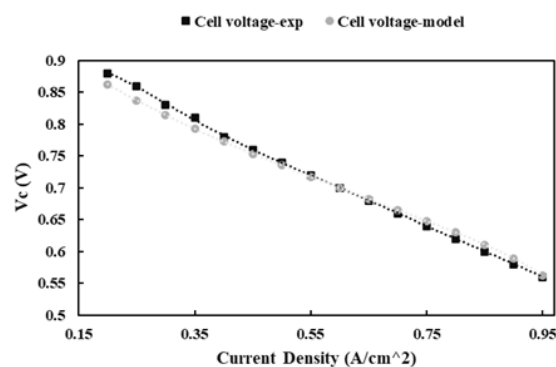
$$\text{Total Annual Cost} = \text{Annualized Capital Cost} + \text{Annual OM Cost} + \text{Fuel Cost per Year} \quad (۳۰)$$

$$\text{Annual Energy Output} = W_{total} \times \text{Hours per year} \quad (۳۱)$$

۳-۷- اعتبارسنجی

مدل ترمودینامیکی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) توسعه یافته در این مطالعه، تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی گزارش شده در مرجع [۲۸] نشان می‌دهد که این امر اعتبار مدل را در پیش‌بینی عملکرد الکتروشیمیایی تأیید می‌کند. همان‌گونه که از نتایج اعتبارسنجی مشاهده می‌شود، ولتاژهای سلولی پیش‌بینی شده توسط مدل در گستره‌ای از چگالی‌های جریان (۰/۲ تا ۰/۹۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع) با مقادیر تجربی مطابقت نزدیکی دارند. اختلاف نسبی بین داده‌های شبیه‌سازی و نتایج تجربی ناچیز است و عمدتاً کمتر از ۲/۰٪ گزارش شده است، به طوری که بیشترین انحراف برابر با ۲/۶۳٪ در چگالی جریان ۰/۲۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع مشاهده می‌شود. دقت بالای مدل در چگالی‌های جریان متوسط و بالا بیانگر قابلیت اعتماد مدل در شرایط عملیاتی مختلف است (شکل ۲).

مدل ترمودینامیکی توسعه یافته برای سیکل رانکین آلی با استفاده از نتایج مطالعه هانگ [۲۹] مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور اطمینان از صحت عملکرد معادلات و مقایسه دقیق، پارامترهای ورودی مدل (شامل دماهای اواپراتور و کندانسور) به صورت موقت دقیقاً منطبق بر شرایط مرجع [۲۹] برای سیال کاری تولوئن تنظیم گردیدند. همان‌طور که در جدول زیر مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شرایط مرجع، تطابق بسیار خوبی با داده‌های [۲۹] دارد و خطای نسبی در محاسبه راندمان حرارتی کمتر از ۱ درصد است. لازم به ذکر است که پس از تأیید صحت مدل‌سازی، شرایط عملیاتی به مقادیر طراحی سیستم پیشنهادی بازگردانده شد. به منظور اطمینان از صحت محاسبات خواص ترمودینامیکی و معادلات انرژی در ناحیه فوق بحرانی، مدل توسعه یافته با نتایج مطالعه مرجع [۳۰] مقایسه گردید. بدین منظور، شرایط ورودی مدل موقتاً بر روی مقادیر مرجع [۳۰] تنظیم شد. نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان‌دهنده تطابق خوب میان نتایج حاصل از کد EES حاضر و داده‌های مرجع است. پس از تأیید صحت مدل، شرایط به مقادیر عملیاتی طرح پیشنهادی بازگردانده شد.



شکل ۲ اعتبارسنجی مدل ترمودینامیکی پیل سوختی اکسید جامد با داده‌های تجربی مرجع [۲۸]

Fig. 2 Validation of the thermodynamic model of the solid oxide fuel cell (SOFC) with experimental data from reference [28].

جدول ۲ نتایج اعتبارسنجی سیکل برایتون فوق بحرانی دی اکسید کربن و ORC

Table 2 Validation results for sCO₂ Brayton cycle and ORC

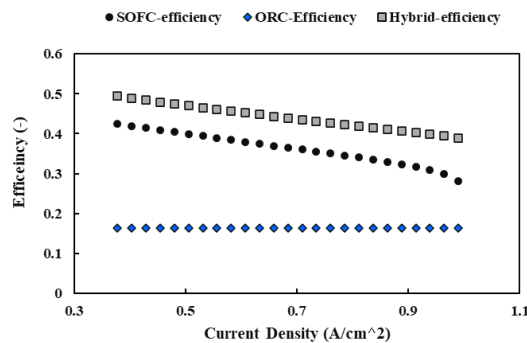
Description	Units	Present study	Reference	Relative Error (%)
ORC efficiency	%	23.45	23.6	0.63
sCO ₂ Brayton Cycle	%	39.82	39.6	0.55

۴- بحث و نتایج

۴-۱- انرژی و آگزوری

به منظور بررسی عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی، در ابتدا باید عملکرد پیل سوختی اکسید جامد به عنوان محرک اولیه اصلی این سیستم مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، تأثیر چگالی جریان بر عملکرد ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد در نمودار شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که از نمودار قابل مشاهده است، با افزایش چگالی جریان، افت ولتاژها شامل افت ولتاژ فعال‌سازی، افت ولتاژ غلظتی و افت ولتاژ اهمی افزایش می‌یابد. این افزایش افت ولتاژها در نهایت منجر به کاهش ولتاژ خروجی از پیل سوختی اکسید جامد می‌شود و در نتیجه سیستم دارای ولتاژ پایین‌تری خواهد بود. یکی از نکات مهم و مد نظر در این نمودار می‌تواند عملکرد افت ولتاژها در چگالی‌های جریان بالا باشد. همانطور که از شکل مشخص است، افت ولتاژ فعال‌سازی و اهمی در چگالی جریان‌های بالا عملکرد نسبتاً خطی از خود نشان می‌دهند. اما افت ولتاژ غلظتی در چگالی جریان بالا به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. و این افزایش ناگهانی به علت افزایش غلظت واکنش‌دهنده‌ها به طور شدید می‌باشد. لذا همانطور که از این نمودار مشخص است، ولتاژ تولیدی توسط پیل سوختی اکسید جامد با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد. اما این کاهش در چگالی جریان‌های بالاتر دارای شیب بیشتری خواهد بود.

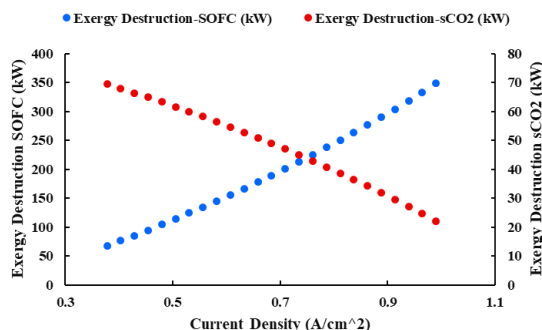
به منظور ارزیابی بهتر عملکرد استفاده از بازیافت حرارتی پیل سوختی اکسید جامد، تأثیر این موضوع بر راندمان پیل سوختی اکسید جامد و راندمان سیکل سیال فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید و در نتیجه راندمان سیستم هیبریدی در شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۴ قابل مشاهده است، افزایش چگالی جریان منجر به کاهش راندمان پیل سوختی اکسید جامد می‌شود. اما از طرف دیگر، اگر از حرارت تولیدی توسط پیل سوختی اکسید جامد استفاده شود، می‌توان یک سیستم هیبریدی ارائه نمود که علی‌رغم آنکه راندمان پیل سوختی اکسید جامد کاهش می‌یابد، راندمان سیکل هیبریدی با افزایش چگالی جریان افزایش یابد. همچنین از یک دیدگاه دیگر، هر چقدر چگالی جریان افزایش پیدا کند، حرارت تولیدی توسط پیل سوختی اکسید جامد نیز بالاتر خواهد بود. لذا سیکل سیال فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید نیز با دریافت حرارت بیشتر می‌تواند عملکرد بهتری از خود نشان دهد. نکته دومی که باید در نظر گرفته شود، میزان بهبود عملکرد سیستم



شکل ۵ تاثیر چگالی جریان بر راندمان پیل سوختی اکسید جامد، سیکل ORC و سیکل هیبریدی

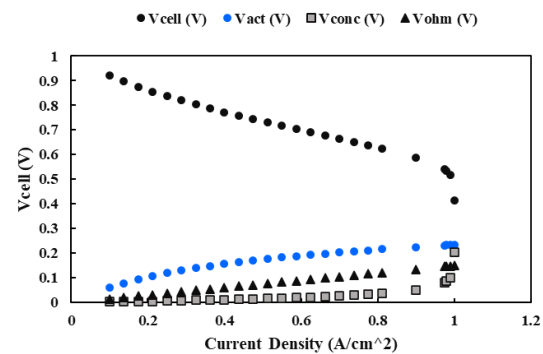
Fig. 5 Effect of current density on the efficiency of the solid oxide fuel cell, the ORC, and the hybrid cycle.

افزایش راندمان در چگالی جریان‌های بالا به علت افت شدید راندمان پیل سوختی بالاتر خواهد بود. یکی دیگر از راه‌های ارزیابی عملکرد سیکل‌های ترمودینامیکی، بررسی آنها از دیدگاه اگزرژی است. بررسی عملکرد سیکل‌ها از دیدگاه اگزرژی می‌تواند نشان دهد که اگر به‌جای سیستم، یک سیستم کارنو قرار داشت که می‌تواند یک سیستم ایده‌آل از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک باشد، عملکرد به چه صورت بود و در حال حاضر که سیکل مورد استفاده سیکل کارنو نیست، عملکرد چگونه است، لذا یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترها در بررسی عملکرد سیستم، بررسی نرخ تخریب اگزرژی در پیل سوختی اکسید جامد و سیکل سیال فوق‌بحرانی کربن دی‌اکسید با افزایش چگالی جریان می‌باشد. همانطور که از نمودارهای شکل ۶ و ۷ قابل مشاهده است، افزایش چگالی جریان منجر به افزایش نرخ تخریب اگزرژی در پیل سوختی اکسید جامد می‌شود. اما از طرف دیگر، عملکرد سیال فوق‌بحرانی کربن دی‌اکسید با افزایش نرخ چگالی جریان به گونه‌ای است که نرخ تخریب اگزرژی در آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، اگر سیکل بازیابی حرارتی از نوع سیال عامل ORC باشد، افزایش چگالی جریان می‌تواند منجر به افزایش نرخ تخریب اگزرژی گردد.



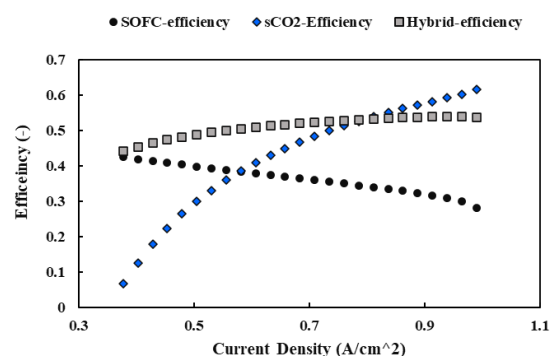
شکل ۶ تاثیر چگالی جریان بر نرخ تخریب اگزرژی پیل سوختی اکسید جامد و سیکل برایتون سیال فوق‌بحرانی کربن دی‌اکسید

Fig. 6 Effect of current density on the exergy destruction rate of the solid oxide fuel cell and the supercritical carbon dioxide Brayton cycle



شکل ۳ تاثیر چگالی جریان بر ولتاژ خروجی و افت ولتاژ فعال‌سازی، غلظتی و اهمی در پیل سوختی

Fig. 3 Effect of current density on output voltage and activation, concentration, and ohmic voltage losses in the solid oxide fuel cell (SOFC).

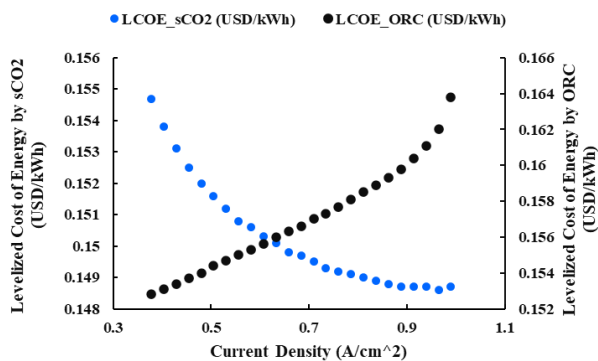


شکل ۴ تاثیر چگالی جریان بر راندمان پیل سوختی اکسید جامد، سیکل برایتون سیال فوق‌بحرانی کربن دی‌اکسید و سیکل هیبریدی

Fig. 4 Effect of current density on the efficiency of the solid oxide fuel cell, the supercritical carbon dioxide Brayton cycle, and the hybrid cycle.

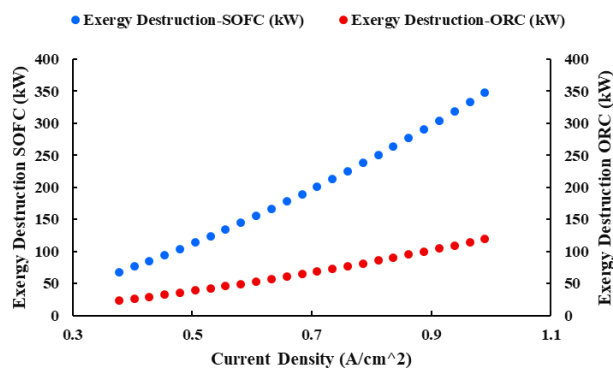
وقتی در مود هیبریدی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، عملکرد سیستم هیبریدی نرخ بهبود افزایشی از خود نشان می‌دهد. و هر چقدر در چگالی جریان‌های بالاتری کار بکند، افزایش عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد.

سناریوی دوم برای بهره‌وری از حرارت اتلافی پیل سوختی اکسید جامد، بحث استفاده از حرارت تولیدی در ORC می‌باشد. ORC که متشکل از یک مبدل حرارتی، توربین، کندانسور و پمپ است، در مبدل حرارتی حرارت تولیدی توسط پیل سوختی را دریافت می‌کند و کار تولید می‌نماید. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، عملکرد راندمان پیل سوختی اکسید جامد با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد. اما از طرف دیگر، افزایش چگالی جریان منجر به تقریباً ثابت ماندن راندمان ORC است. لذا عملکرد سیستم هیبریدی در ORC با افزایش چگالی جریان کاهش خواهد یافت و افزایش چگالی جریان برای آن در اینجا برخلاف سیستم هیبریدی سیال فوق‌بحرانی کربن دی‌اکسید، مطلوب نخواهد بود. نکته دومی که باید مورد بررسی قرار گیرد، میزان افزایش راندمان سیستم با استفاده از سیکل ORC در این مطالعه خواهد بود. همانطور که قابل مشاهده است، افزایش راندمان در این حالت به وقوع می‌پیوندد و



شکل ۸ بررسی تاثیر چگالی جریان بر LCOE سیکل سیال فوق بحرانی کربن دی اکسید و ORC

Fig. 8 Investigation of the effect of current density on the LCOE of the supercritical carbon dioxide cycle and the organic Rankine cycle



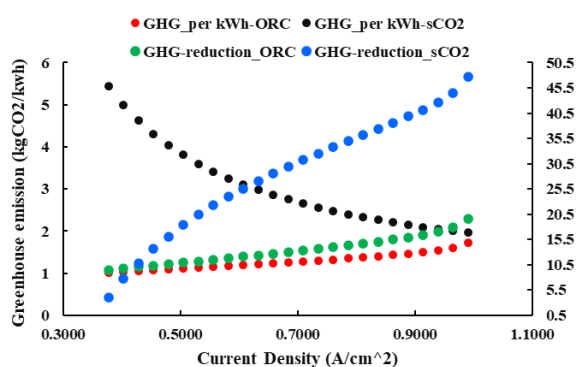
شکل ۷ تاثیر چگالی جریان بر نرخ تخریب انرژی پیل سوختی اکسید جامد و ORC

Fig. 7 Effect of current density on the exergy destruction rate of the solid oxide fuel cell and the organic Rankine cycle

۲-۴- اقتصادی و زیست محیطی

در تحلیل اقتصادی پژوهش حاضر، چارچوب کلی محاسبات بر مبنای متدولوژی استاندارد طراحی حرارتی و ترمودینامیک ارائه شده در مراجع [۲۶] استوار شده است؛ با این حال، به منظور دستیابی به نتایجی واقع بینانه و کاربردی برای ارزیابی امکان سنجی طرح در ایران، پارامترهای ورودی مدل نظیر نرخ سوخت و تعرفه فروش برق بر اساس [۳۱-۳۳] تنظیم شده است. در این راستا، قیمت گاز طبیعی معادل ۰/۰۱۵ دلار بر کیلووات ساعت و قیمت برق ۰/۸ دلار بر کیلووات ساعت لحاظ شده است که بازتاب دهنده تعرفه های صنعتی و هزینه فرصت صادراتی حامل های انرژی در ایران است و همچنین نرخ تنزیل ۲۲ درصد به منظور پوشش نرخ بهره اسمی و شرایط تورمی اقتصاد داخلی در محاسبات اعمال گردیده است.

در این بخش به منظور ارزیابی عملکرد سیستم از دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی، LCOE هر کدام از سیکل ها و میزان تولید گازهای گلخانه ای و کاهش میزان گازهای گلخانه ای بر حسب کیلووات ساعت و مواردی از این دست مورد ارزیابی و بررسی در قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، LCOE سیکل سیال فوق بحرانی دی اکسید کربن با افزایش چگالی جریان کاهش می یابد. چرا که افزایش چگالی جریان منجر به افزایش حرارت ورودی به سیکل و بهبود عملکرد سیستم به صورت هیبریدی خواهد شد. همچنین سیکل سیال فوق بحرانی کربن دی اکسید می تواند با نرخ بالاتری افزایش حرارت ورودی به خود را تبدیل به کار کند. از طرف دیگر، چون افزایش حرارت ورودی به سیکل ORC که نشان دهنده افزایش چگالی جریان و افزایش چگالی جریان ناشی از مصرف بیشتر سوخت خواهد بود، افزایش چگالی جریان یک رابطه صعودی با LCOE از خود نشان می دهد. به گونه ای که در چگالی های جریان بالا، هزینه تمام شده انرژی برای سیکل هیبریدی که با سیال فوق بحرانی کربن دی اکسید کار می کند، به مراتب پایین تر از سیکلی است که با ORC کار می کند.



شکل ۹ بررسی تاثیر چگالی جریان بر عملکرد زیست محیطی هر کدام از سناریوهای پیشنهادی

Fig. 9 Investigation of the effect of current density on the environmental performance of each proposed scenario

در شکل ۹، میزان تولید گازهای گلخانه ای در هر کدام از سیکل ها بر حسب کیلووات ساعت تولید توان نشان داده شده است. همانطور که از شکل زیر مشخص است، میزان تولید گازهای گلخانه ای در ORC از سیکل برایتون سیال فوق بحرانی کربن دی اکسید کمتر می باشد. از طرف دیگر، افزایش چگالی جریان در سیکل ORC منجر به افزایش تولید گازهای گلخانه ای می شود. از طرف دیگر، افزایش چگالی جریان در سیکل سیال فوق بحرانی کربن دی اکسید منجر به افزایش و بالاتر رفتن نرخ کاهش گازهای گلخانه ای در سیکل برایتون سیال فوق بحرانی می شود.

۳-۴- تحلیل SWOT

از طریق تحلیل SWOT می توان مشخص کرد که چگونه نقاط قوتی مانند بازده بالا و آلودگی کم می توانند در جهت جذب سرمایه گذاری یا تجاری سازی سیستم به کار گرفته شوند، در حالی که نقاط ضعف احتمالی نظیر هزینه های اولیه بالا یا پیچیدگی کنترلی نیازمند اصلاح یا بهینه سازی هستند. همچنین فرصت های بیرونی از جمله رشد بازار انرژی پاک و تهدیدهایی مانند نوسانات قیمتی یا محدودیت های فنی نیز در این چارچوب مورد شناسایی قرار

که انتخاب بهینه برای کاربردهای صنعتی و مقیاس متوسط تا بزرگ، استفاده از سیکل برایتون با سیال فوق‌بحرانی دی‌اکسیدکربن است. این ترکیب به دلیل راندمان انرژی و اگزرژی بالاتر، بازیافت مؤثر حرارت در دماهای بالا و کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به سیستم‌های مبتنی بر سیالات آلی، از برتری محسوسی برخوردار است (جدول ۲).

می‌گیرند. در مجموع، این تحلیل ابزاری جامع برای ارزیابی چندبعدی و تصمیم‌سازی هوشمندانه در توسعه سیستم‌های ترکیبی انرژی مانند SOFC-sCO₂ فراهم می‌کند و به‌عنوان حلقه‌ای کلیدی میان تحلیل فنی و راهبردی در مسیر توسعه فناوری مطرح است.

با توجه به مقایسه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی میان دو سیستم ترکیبی SOFC-sCO₂ و SOFC-ORC، می‌توان نتیجه گرفت

جدول ۲ تحلیل SWOT استفاده از سیکل برایتون سیال فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید و ORC

Table 2 SWOT analysis of using the supercritical carbon dioxide Brayton cycle and the organic Rankine cycle.

SOFC-ORC	SOFC-sCO ₂	Axis	
- Simpler design without high-speed rotating components. - Suitable for smaller scales and safer environments. - Possibility of using bio-based organic fluids at lower temperatures.	- High energy efficiency due to utilization of SOFC exhaust hot gases for additional power generation in the gas turbine (GT). - Higher exergy efficiency owing to better temperature matching between SOFC and GT. - Higher reduction of greenhouse gas emissions compared to the ORC system under similar operating conditions. - Suitable for industrial CHP systems with high-temperature demand	Strengths	
- Lower efficiency compared to SOFC-GT systems. - Heat recovery limited to lower temperature ranges. - Low thermal stability of organic fluids at higher temperatures.	- More complex design due to the presence of gas compressor and turbine. - Higher maintenance and temperature control costs. - Requirement for materials resistant to high temperatures.	Weaknesses	
- Suitable for microgrids and residential applications. - Can be integrated with low-temperature solar thermalenergy systems. - Potential for development in modular systems.	- Development potential for industrial units with multi-stage heat recovery. - Applicable in power plants with continuous and steady load demand	Opportunities	
- Lower efficiency may indirectly increase CO₂ emissions on a large scale. - Limitations in stable organic fluids and environmental risks associated with leakage.	- High complexity and initial costs may limit commercialization. - Requires precise control to prevent thermal shocks in sCO₂, which is sensitive to rapid load changes.	Threats	
Comparative Result	SOFC-ORC	SOFC-sCO2	Index
Advantage: sCO2 	Lower	Higher	Overall Energy Efficiency
Advantage: sCO2 	Lower, due to larger temperature difference	Higher, due to better thermal matching	Exergy Efficiency
Advantage: sCO2 	Higher per kWh	Lower per kWh	Greenhouse Gas Emissions
Balanced	Approximately equal	Approximately equal	LCOE
Weakness: sCO2 	Lower	Higher	Mechanical Complexity
Advantage: sCO2 	Dependent on organic fluid properties	High (hot air)	Working Fluid Stability and Safety
Depends on scale	Residential or small-scale	Industrial, MW-scale	Most Suitable Application

این الگوریتم به دلیل مزایای خاص خود در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده، به‌عنوان روشی مناسب برای مسائل غیرخطی و چندمتغیره در این تحقیق انتخاب گردید. الگوریتم گرگ خاکستری بر اساس رفتار اجتماعی گرگ‌ها در طبیعت طراحی شده است. در این الگوریتم، جستجوی بهینه به وسیله گروهی از گرگ‌ها (حلول‌های ممکن) انجام می‌شود که در میان فضای پارامترها حرکت می‌کنند. از جمله مزایای این الگوریتم می‌توان به سادگی در پیاده‌سازی، نیاز به تنظیمات کم و توانایی

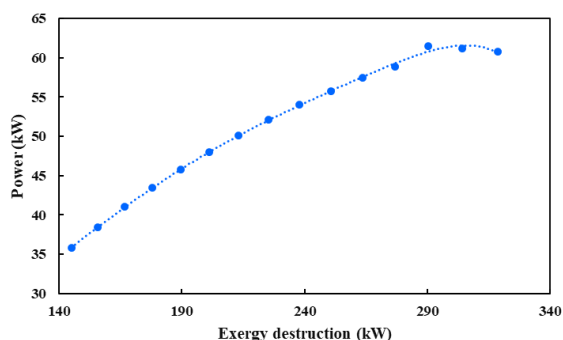
۴-۴- بهینه‌سازی

در این مطالعه، یک سیستم پیل سوختی نوع SOFC مدل‌سازی شده است. در مسائلی از این دست که امکان بهینه‌سازی به روش مشتق‌گیری وجود ندارد، بهینه‌سازی به روش‌های مختلف الگوریتم‌های فراابتکاری انجام می‌شود [۳۴]. هدف از این مدل‌سازی بهینه‌سازی چگالی جریان است به گونه‌ای که تخریب اگزرژی به حداقل برسد و توان تولیدی به حداکثر برسد. برای انجام این بهینه‌سازی، از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است.

جدول ۳ نتایج بهینه سازی به کمک الگوریتم گرگ خاکستری

Table 3 Optimization results obtained using the Grey Wolf Optimizer algorithm.

Description	Units	Optimized Value	Parameter
Optimal Trade-off Point between Conflicting Objectives	A/cm ²	0.875	Optimized current density
Close to the maximum achievable power	kW	61.28	Power Generation
Within an acceptable range relative to the generated power	kW	288.6	Exergy destruction



شکل ۱۰ جبهه پارتو بدست آمده ناشی از بهینه سازی سیکل هیبرید.

Fig. 10 Pareto front obtained from the optimization of the hybrid cycle.

جدول ۴ بررسی نقاط خاص جبهه پارتو ناشی از بهینه سازی سیکل فوق بحرانی کربن دی اکسید

Table 4 Investigation of specific points on the Pareto front resulting from the optimization of the supercritical carbon dioxide cycle

Point	Current Density (A/cm ²)	Exergy Destruction (kW)	Power (kW)	Characteristic
Lower Trade-off	0.5817	145.0	35.86	Start of the Pareto Front
GWO Optimal Point	0.8750	288.6	61.28	Optimal Trade-off Point
Maximum Power Output	0.8879	290.4	61.53	Maximum Power Output
End of the Pareto Front	0.9390	318.6	60.76	End of the Pareto Front

بهینه نسبت به نواحی کم بازده و اشباع، هم از نظر پایداری ترمودینامیکی و هم از منظر بهره‌وری انرژی برتر است. بنابراین، الگوریتم گرگ خاکستری به عنوان روشی کارآمد برای بهینه‌سازی چندهدفه در سیستم‌های پیچیده انرژی مانند SOFC-sCO₂ اثبات شده و می‌تواند در طراحی و کنترل هوشمند چنین سامانه‌هایی نقشی کلیدی ایفا کند.

به منظور بررسی نهایی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد در یک چگالی جریان مشخص، با توجه به تابع اهداف بهینه سازی که در بخش‌های قبل معرفی شد، چگالی جریان روی مقدار بهینه تنظیم

در یافتن جواب‌های بهینه در فضای جستجو اشاره کرد. با این حال، معایب آن نیز شامل احتمال گیر افتادن در نقاط بهینه محلی و عدم تضمین برای یافتن جواب‌های جهانی بهینه در مسائل پیچیده می‌باشد.

الگوریتم گرگ خاکستری به عنوان یک الگوریتم تکاملی از رفتار اجتماعی گرگ‌ها الهام گرفته است که شامل سه مرحله اصلی است: تعقیب طعمه، حمله به طعمه، و تصاحب قلمرو. این مراحل به جستجوی بهینه در فضای پارامترها کمک می‌کند.

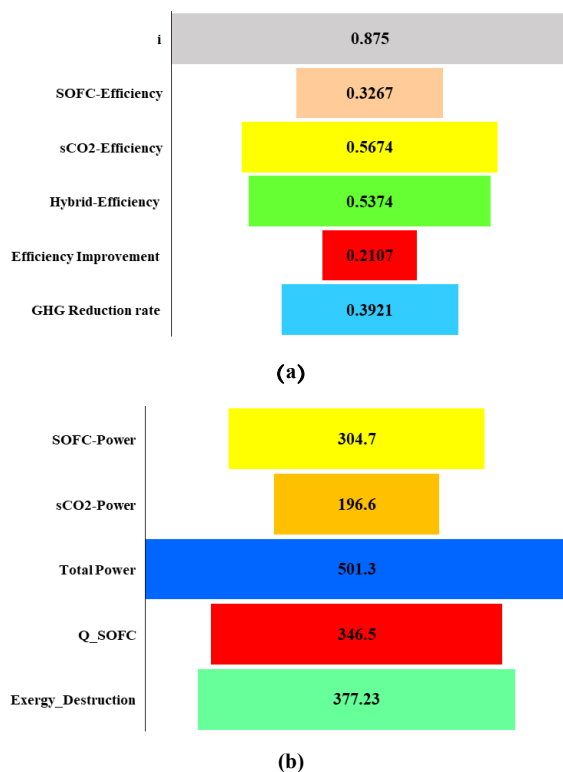
الگوریتم گرگ خاکستری دارای مزایای زیادی است، از جمله سادگی در پیاده‌سازی، نیاز به تنظیمات کم و توانایی در پیدا کردن جواب‌های بهینه در فضای جستجوهای پیچیده و غیرخطی. این الگوریتم قادر است با استفاده از رفتار اجتماعی گرگ‌ها در طبیعت، جستجو را به شکل مؤثری انجام دهد و در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی موفق عمل کند. اما معایب آن نیز شامل احتمال گیر افتادن در نقاط بهینه محلی است، به ویژه در مسائل پیچیده با فضای جستجوی بزرگ و غیرمحدود. همچنین، این الگوریتم ممکن است در برخی موارد نتواند به طور کامل به جواب‌های بهینه جهانی دست یابد، خصوصاً در مسائل با تابع هدف پیچیده که به دقت بالایی نیاز دارند.

تابع هدف:

$$f(x) = w_1 \cdot (\text{Exergy Destruction}) + w_2 \cdot (1 - \text{Power}) \quad (40)$$

که در آن تخریب انرژی و توان از داده‌های تجربی استخراج شده و نرمال‌سازی می‌شوند.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری نشان می‌دهد که این روش با وجود ساختار ساده و نیاز اندک به تنظیم پارامترها، توانسته است نقطه تعادلی مناسبی میان دو هدف متضاد یعنی بیشینه‌سازی توان و کمینه‌سازی تخریب انرژی در سیستم پیل سوختی اکسید جامد ترکیب شده با سیکل برایتون فوق بحرانی CO₂ ایجاد کند. تابع هدف تعریف شده بر پایه وزن‌دهی مساوی بین توان و تلفات انرژی، سبب شد تا الگوریتم به جای تمرکز بر یک هدف، به دنبال دستیابی به شرایط پایدار و متعادل باشد. نتایج عددی نشان دادند که در چگالی جریان بهینه ۰/۸۷۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع، توان خروجی سیستم برابر با ۶۱/۲۸ کیلووات و تلفات انرژی ۲۸۸/۶ کیلووات است که در مقایسه با نقطه حداکثر توان تنها ۳/۹٪ افت توان و در عوض ۰/۶٪ کاهش در تلفات انرژی دارد. این نشان می‌دهد که الگوریتم موفق شده است نقطه‌ای نزدیک به جبهه پارتو را شناسایی کند که تعادل حرارتی و الکتریکی مطلوبی را ارائه می‌دهد. تحلیل جبهه پارتو نیز تأیید می‌کند که محدوده ۰/۷۵ تا ۰/۸۹ آمپر بر سانتی‌متر مربع بهترین ناحیه عملکردی است، زیرا در این بازه، سیستم ضمن حفظ راندمان مناسب از افزایش شدید تلفات حرارتی جلوگیری می‌کند (جدول ۳ و ۴). مقایسه نواحی مختلف نشان می‌دهد که عملکرد در ناحیه



شکل ۱۱ بررسی عملکرد (الف) راندمان و (ب) توان و حرارت در شرایط بهینه
Fig. 11 Evaluation of performance: (a) efficiency and (b) power and heat under optimal conditions

• تحلیل‌های عددی مرز پارتو و جبهه بهینه نشان دادند که ناحیه عملیاتی مطلوب در محدوده‌ای قرار دارد که سیستم هم پایداری ترمودینامیکی حفظ کند و هم بازده مناسبی ارائه دهد؛ GWO خروجی‌ای نزدیک به این جبهه پارتو بدست آورد. نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم GWO چگالی جریان بهینه ≈ 0.1825 A/cm²؛ توان تولیدی خالص تقریباً ۶۱/۲۸ kW؛ تلفات انرژی $\approx 288/6$ kW (محدوده قابل قبول) و مقدار تابع هدف نرمال شده ≈ 0.1825 . نقطه بهینه نشان‌دهنده تعادل عملی بین تولید توان و تلفات انرژی است.

اگرچه هزینه‌های ساخت و سرمایه‌گذاری اولیه SOFC بالاست، اما تحلیل اقتصادی (LCOE) نشان داد که ادغام آن با سیکل برایتون فوق بحرانی sCO₂ و دستیابی به راندمان‌های بالا، منجر به کاهش هزینه‌های جاری شده و طرح را در بلندمدت از نظر اقتصادی می‌تواند توجیه‌پذیر نماید.

لازم به ذکر است که تحلیل حاضر در چارچوب شرایط پایدار صورت گرفته است و تحلیل دینامیکی سیستم و تأثیرات فاز راه‌اندازی (Startup) بر عملکرد و بهینه‌سازی کلی، به عنوان یک گام آتی در پژوهش پیشنهاد می‌گردد.

گردید. و مقادیر مربوط به راندمان پیل سوختی اکسید جامد به تنهایی و راندمان سیکل برایتون سیال فوق‌بحرانی و همچنین راندمان سیستم وقتی به صورت هیبریدی کار می‌کند، بهبود راندمان و کاهش گازهای گلخانه‌ای در نمودار ۱۱ نشان داده شده است. همچنین به منظور تحلیل نتایج مربوط به توان، مقدار توان تولیدی در پیل سوختی، سیکل برایتون سیال فوق‌بحرانی و توان کلی نیز به همراه تولید حرارت و تلفات انرژی نیز در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که از این شکل مشخص است، استفاده از سیکل برایتون سیال فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید می‌تواند راندمان را به طور چشمگیری برای پیل سوختی اکسید جامد افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور بازیابی و بهره‌برداری از حرارت اتلافی یک پیل سوختی اکسید جامد دو سناریوی بازیابی را بررسی می‌کند: (۱) اتصال به چرخه برایتون با سیال فوق‌بحرانی (sCO₂ Brayton) و (۲) اتصال به ORC با تولوئن به عنوان سیال کاری. مدل الکتروشیمیایی و ترمودینامیکی SOFC برای محاسبه تولید توان، نرخ مصرف هیدروژن، و نرخ گرمای قابل بازیافت توسعه یافته و با داده‌های تجربی مرجع اعتبارسنجی شده است. معادلات جریان جرم، معادلات انرژی در اجزای سیکل‌ها و محاسبات کار پمپ/توربین و بازده‌های سیکلی و معادلات مشابه برای (sCO₂) برای هر سناریو پیاده‌سازی شده‌اند. همچنین تحلیل انرژی برای محاسبه نرخ تخریب انرژی و مقایسه با کارنو و تحلیل محیطی (GHG) و اقتصادی (LCOE) در چارچوب کلی مطالعه لحاظ شده است. برای یافتن نقطه عملیاتی متعادل بین اهداف متضاد (حداکثر توان و حداقل تلفات انرژی) از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای سیکل بهتر استفاده شده است.

- افزایش چگالی جریان باعث کاهش ولتاژ سلول (به واسطه افت‌های فعال، اهمی و غلظتی) و در نتیجه تغییر غیرخطی در توان تولیدی می‌گردد؛ در عین حال نرخ گرمای بازیافتی از پیل با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد که به نفع عملکرد سیکل‌های بازیابی است.
- مقایسه دو سناریو نشان می‌دهد که در مقیاس و شرایط مورد بررسی، ترکیب SOFC-sCO₂ از منظر بازده انرژی و انرژی نسبت به SOFC-ORC برتری دارد (به ویژه در دماهای بالاتر و برای کاربردهای صنعتی/میان‌تا بزرگ‌تر)، در حالی که ORC برای کاربردهای با منابع گرمایی دمای پایین و مقیاس کوچک مناسب‌تر است.
- افزایش چگالی جریان نرخ تخریب انرژی در خود SOFC را بالا می‌برد، اما ترکیب با سیکل‌های بازیابی به خصوص (sCO₂) می‌تواند بخشی از این اثر منفی را جبران کند چون بازیابی حرارت در دماهای بالا در sCO₂ مؤثرتر است.

- [4] K. Wang, Y.-L. He, and H.-H. Zhu, "Integration between supercritical CO₂ Brayton cycles and molten salt solar power towers: A review and a comprehensive comparison of different cycle layouts," *Applied Energy*, vol. 195, pp. 819-836, 2017/06/01/ 2017. doi:10.1016/j.apenergy.2017.03.099
- [5] Y. Zhang *et al.*, "Improved design of supercritical CO₂ Brayton cycle for coal-fired power plant," *Energy*, vol. 155, pp. 1-14, 2018/07/15/ 2018. doi:10.1016/j.energy.2018.05.003
- [6] J. Yang, Z. Yang, and Y. Duan, "Part-load performance analysis and comparison of supercritical CO₂ Brayton cycles," *Energy Conversion and Management*, vol. 214, p. 112832, 2020/06/15/ 2020. doi:10.1016/j.enconman.2020.112832
- [7] J. Y. Heo, M. S. Kim, S. Baik, S. J. Bae, and J. I. Lee, "Thermodynamic study of supercritical CO₂ Brayton cycle using an isothermal compressor," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 1118-1130, 2017/11/15/ 2017. doi:10.1016/j.apenergy.2017.08.081
- [8] B. Xingyan, X. Wang, R. Wang, J. Cai, H. Tian, and G. Shu, "Optimal selection of supercritical CO₂ Brayton cycle layouts based on part-load performance," *Energy*, vol. 256, p. 124691, 2022/10/01/ 2022. doi:10.1016/j.energy.2022.124691
- [9] E. Sun, G. Zhu, L. Chen, B. Li, Z. Leng, and J. Xu, "Construction of a supercritical CO₂ Brayton cycle waste heat utilization system using the dichotomy," *Energy*, vol. 338, p. 138873, 2025/11/30/ 2025. doi:10.1016/j.energy.2025.138873
- [10] F. A. Al-Sulaiman, I. Dincer, and F. Hamdullahpur, "Exergy analysis of an integrated solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle for cooling, heating and power production," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2346-2354, 2010/04/15/ 2010. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.10.075
- [11] H. Ozcan and I. Dincer, "Thermodynamic analysis of an integrated sofc, solar orc and absorption chiller for tri-generation applications," *Fuel Cells*, vol. 13, no. 5, pp. 781-793, 2013.
- [12] H. Ozcan and I. Dincer, "Performance evaluation of an SOFC based trigeneration system using various gaseous fuels from biomass gasification," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 24, pp. 7798-7807, 2015/06/29/ 2015. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.11.109
- [13] S. Zhang, H. Liu, M. Liu, E. Sakaue, N. Li, and Y. Zhao, "An efficient integration strategy for a SOFC-GT-SORC combined system with performance simulation and parametric optimization," *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 314-324, 2017/07/05/ 2017. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.04.066
- [14] R. Singh and O. Singh, "Comparative study of combined solid oxide fuel cell-gas turbine-Organic Rankine cycle for different working fluid in bottoming cycle," *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 659-670, 2018/09/01/ 2018. doi:10.1016/j.enconman.2018.06.009
- [15] S. Amicabile, M. Testi, and L. Crema, "Design and modeling of a hybrid reversible solid oxide fuel cell – organic Rankine cycle," *Energy Procedia*, vol. 129, pp.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسنده است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافع برای اظهار وجود ندارد.

نقش نویسندگان: تنها نویسنده مقاله تمامی نقش‌ها را بر عهده دارد.

فهرست علائم

A	مساحت (m ²)
A _{cell}	مساحت سطح سلول (m ²)
ASR _{ohm}	مقاومت اهمی سطحی (m ² .Ω)
E _{Nernst}	ولتاژ نرنست (V)
F	ثابت فارادی (C/mol)
h	آنتالپی (kJ/kg)
HHV	ارزش حرارتی بالا (kJ/kg)
I	جریان الکتریکی (A)
i	چگالی جریان (A.m ⁻²)
i _{an}	چگالی جریان تبادل آند (A.m ⁻²)
i _{ca}	چگالی جریان تبادل کاتد (A.m ⁻²)
i _L	چگالی جریان محدودکننده (A.m ⁻²)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
$\dot{n}$	دبی مولی (mol/s)
P	فشار (kPa)
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت (kW)
R	ثابت گازهای جهانی (J/(mol.K))
T	دما (K)
T _{cell}	دمای سلول (K)
U _a	ضریب استفاده از هوا (-)
U _f	ضریب استفاده از سوخت (-)
V	ولتاژ (V)
V _{act}	افت ولتاژ فعالسازی (V)
V _{conc}	افت ولتاژ غلظتی (V)
V _{ohm}	افت ولتاژ اهمی (V)
$\dot{W}$	توان (kW)
W _{comp}	کار کمپرسور (kW)
W _{pump}	کار پمپ (kW)
W _{turb}	کار توربین (kW)

منابع

- [1] T. Conboy, S. Wright, J. Pasch, D. Fleming, G. Rochau, and R. Fuller, "Performance characteristics of an operating supercritical CO₂ Brayton cycle," 2012.
- [2] B. D. Iverson, T. M. Conboy, J. J. Pasch, and A. M. Kruizenga, "Supercritical CO₂ Brayton cycles for solar-thermal energy," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 957-970, 2013/11/01/ 2013. doi:10.1016/j.apenergy.2013.06.020
- [3] P. Garg, P. Kumar, and K. Srinivasan, "Supercritical carbon dioxide Brayton cycle for concentrated solar power," *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 76, pp. 54-60, 2013/04/01/ 2013. doi:10.1016/j.supflu.2013.01.010

- environmental models for a combined cooling, heating, and power system at different operating conditions of proton exchange membrane fuel cell," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 42, no. 5, p. e14129, 2023. doi:10.1002/ep.14129
- [26] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. J. Moran, *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, 1995.
- [27] P. Ahmadi and I. Dincer, "Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 5161-5172, 2010.
- [28] A. Perna, M. Minutillo, E. Jannelli, V. Cigolotti, S. Nam, and J. Han, "Design and performance assessment of a combined heat, hydrogen and power (CHHP) system based on ammonia-fueled SOFC," *Applied Energy*, vol. 231, pp. 1216-1229, 2018.
- [29] T.-C. Hung, "Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 5, pp. 539-553, 2001/03/01/ 2001. doi:10.1016/S0196-8904(00)00081-9
- [30] V. Dostál, M. Driscoll, and P. Hejzlar, "A Super Critical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors," 12/14 2011.
- [31] S. Moslem Mousavi, M. Bagheri Ghanbarabadi, and N. Bagheri Moghadam, "The competitiveness of wind power compared to existing methods of electricity generation in Iran," *Energy Policy*, vol. 42, pp. 651-656, 2012/03/01/ 2012. doi:10.1016/j.enpol.2011.12.038
- [32] L. Hatton *et al.*, "The global and national energy systems techno-economic (GNESTE) database: Cost and performance data for electricity generation and storage technologies," *Data in Brief*, vol. 55, p. 110669, 2024/08/01/ 2024. doi:10.1016/j.dib.2024.110669
- [33] M. A. Mahmood, P. Pérez de la Calle, J. M. Meneses Zuluaga, N. Massarotti, and C. Sanchez-Diaz, "Techno-economic evaluation of hydrogen refuelling station with on-site electrolysis production powered by photovoltaic solar energy for the railway sector," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 138, pp. 802-822, 2025/06/16/ 2025. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.05.094
- [34] M. Zamani, R. Shafaghat, and B. Alizadeh Kharkeshi, "Numerical study of the hydrodynamic behavior of an archimedes screw turbine by experimental data in order to optimize turbine performance: The genetic algorithm," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 9, no. 4, pp. 1060-1075, 2023.
- 331-338, 2017/09/01/ 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.202
- [16] M. Khalili, F. Karimian Bahnamiri, and M. Mehrpooya, "An integrated process configuration of solid oxide fuel/electrolyzer cells (SOFC-SOEC) and solar organic Rankine cycle (ORC) for cogeneration applications," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 7, pp. 11018-11040, 2021.
- [17] P. Kumar, T. Choudhary, and M. Z. Ansari, "Thermodynamic assessment of a novel SOFC and intercooled GT integration with ORC: Energy and exergy analysis," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 34, p. 101411, 2022/09/01/ 2022. doi:10.1016/j.tsep.2022.101411
- [18] Z. Wang, H. Chen, R. Xia, F. Han, Y. Ji, and W. Cai, "Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for green power ships," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 32, p. 101342, 2022/07/01/ 2022. doi:10.1016/j.tsep.2022.101342
- [19] N. aghazadeh, S. Khalilarya, s. Jafarmadar, and A. Chitsaz Khoyi, "Thermoeconomic analysis of a novel trigeneration system based on solid oxide fuel cell and gas turbine with hydrogen fuel," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 7, pp. 119-130, 2018. [Online]. Available:mme.modares.ac.ir/article_10480_4d771504ddcd28037b4199740df767e6.pdf
- [20] S. z. sajadi, J. Pirkandi, and M. Jahromi, "Electrochemical performance investigation of solid oxide fuel cell in micro-gas turbine hybrid systems to determine optimum fuel utilization factor," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 12, pp. 300-310, 2017. [Online]. Available:mme.modares.ac.ir/article_9571_4f649b16c76753a6ebd0c8f442020945.pdf
- [21] M. Chahartaghi and B. Alizadeh-Kharkeshi, "Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by PEM fuel cell at different conditions," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 383-394, 2016.
- [22] J. M. De Escalona, D. Sánchez, R. Chacartegui, and T. Sánchez, "Part-load analysis of gas turbine & ORC combined cycles," *Applied thermal engineering*, vol. 36, pp. 63-72, 2012.
- [23] S. Yousefizadeh Dibazar, g. Salehi, S. M. H. Sharifi, and M. Eshagh Nimvari, "Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for Low grade Waste Heat Recovery using Genetic algorithm," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 8, pp. 193-201, 2018. [Online]. Available:mme.modares.ac.ir/article_10514_206bb45f944accb7a4cd1f135786c415.pdf
- [24] A. Farsi, M. Ameri, and S. M. H. Mohammadi, "Combined production of distilled water and cooling by application of Supercritical carbon dioxide refrigeration in multi-effect-desalination systems," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 12, pp. 525-533, 2017. [Online]. Available:mme.modares.ac.ir/article_9593_fd11043c50c15f9e700a52b3f00136f8.pdf
- [25] B. Alizadeh Kharkeshi, M. Mehregan, and M. Sheykhi, "Sensitivity analysis of energy, exergy, and