

طراحی و بهینه‌سازی سیستم انرژی هیبریدی MCFC-ORC مبتنی بر گازسازی زیست‌توده با هدف بازیابی مؤثر گرمای تلف‌شده و کاهش انتشار کربن

آرش نصیری

رقیه مطلب‌زاده*

عبدالسلام ابراهیم‌پور

نادر جوانی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران،
arashnaziri413@gmail.com

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران،
motallebzadeh@iau.ac.ir

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران،
salam_ebr@iaut.ac.ir

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی ییلدیز، استانبول، ترکیه،
njavani@yildiz.edu.tr

چکیده

در این پژوهش، یک سیستم انرژی هیبریدی مبتنی بر گازسازی زیست‌توده، پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) و چرخه رانکین آلی (ORC) برای تولید هم‌زمان توان و بازیابی گرمای تلف شده مورد بررسی قرار گرفته است. در پیکربندی پیشنهادی، زیست‌توده ابتدا در گازساز به گاز سنتز تبدیل می‌شود و گاز سنتز تولیدی پس از پیش‌گرمایش و ریفورمینگ به‌عنوان سوخت MCFC مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس گرمای گازهای خروجی MCFC و پس‌سوز برای راه‌اندازی ORC و تولید توان اضافی بازیافت می‌شود. مدل‌سازی ترمودینامیکی و تحلیل پارامتری برای ارزیابی عملکرد سیستم انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد راندمان کل سیستم به ۴۷/۴۶٪ و توان خالص تولیدی به ۶۷۰/۷ کیلووات در ضریب مصرف سوخت ۰/۸۸ می‌رسد. افزایش چگالی جریان از ۶۳۰ به ۹۰۰ آمپر بر مترمربع، توان خروجی را افزایش اما راندمان را به دلیل تلفات اهمی کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش ضریب مصرف سوخت تا ۰/۸۸ راندمان بهبود یافته و سپس کاهش می‌یابد. حداقل انتشار CO₂ برابر با ۰/۴۸ تن بر مگاوات‌ساعت و هزینه واحد محصول ۷/۴۵ دلار بر گیگاژول به‌دست آمد. بازده انرژی سیستم در شرایط بهینه ۵۹/۵۹٪ است.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)، چرخه رانکین آلی (ORC)، گازسازی زیست‌توده، بازیابی گرمای اتلافی، بهینه‌سازی چندهدفه، سامانه انرژی کم‌کربن.

Design and Optimization of a Biomass-Gasification-Driven MCFC-ORC Hybrid System for Efficient Waste Heat Recovery and Low-Carbon Operation

A. Naziri

R. Motallebzadeh

A. Ebrahimpour

N. Javani

Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey

Abstract

The present study introduces a novel hybrid energy system that integrates a heating unit, an Organic Rankine Cycle (ORC), and a Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) to reduce direct CO₂ emissions while efficiently utilizing waste heat. In this system, biomass gasification is employed to produce syngas, which serves as the fuel for the MCFC. Subsequently, the waste heat from the MCFC is recovered by the ORC to generate additional power and provide heating. Thermodynamic modeling and parametric analysis were conducted to evaluate the system's performance. The key results indicate that the system achieves a maximum overall efficiency of 47.46%, and at a fuel utilization factor (U_f) of 0.88, it delivers a net power output of 670.7 kW. The MCFC contributes significantly to power generation, with its efficiency being highly sensitive to current density and flue gas temperature. Parametric analysis shows that increasing the current density from 630 to 900 A/m² enhances power output at the expense of reduced efficiency, primarily due to increased ohmic losses. An increase in U_f initially improves efficiency but begins to decline after $U_f = 0.88$. At $U_f = 0.9$, CO₂ emissions are minimized, corresponding to a unit product cost of 7.534 \$/GJ. Furthermore, multi-objective optimization results revealed that under optimal conditions, the system achieves an exergy efficiency of 59.59%, a unit product cost of 7.45 \$/GJ, and CO₂ emissions equivalent to 0.48 tons per MWh.

Keywords: Molten carbonate fuel cell (MCFC), Organic rankine cycle (ORC), Biomass gasification, waste heat recovery, multi-objective optimization, Low-carbon energy system.

۱- مقدمه

از اجزای کلیدی درگیر است. گازسازی، چرخه‌های رانکین آلی، پیل‌های سوختی کربنات مذاب و سیستم‌های گرمایشی، همگی موضوع تحقیق در مورد کارایی، اثربخشی و پتانسیل بهبود آنها بوده‌اند. ارزیابی کاملی از کارهای قبلی ارائه شده است که بر سه جنبه کلیدی تمرکز دارد: پیشرفت‌های فناورانه در این زمینه، چالش‌های مداوم و چگونگی

با توجه به رشد تقاضا برای انرژی‌های پاک و نگرانی از تغییرات اقلیمی، توسعه سامانه‌های چندمنظوره و ترکیبی به‌عنوان رویکردی مؤثر برای افزایش بازده، پایداری و کاهش آلاینده‌گی مطرح است. توسعه سیستم‌های انرژی تولید چندانگانه کارآمد و پایدار نیازمند درک کاملی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: motallebzadeh@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۵/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۴/۰۵

بهینه‌سازی کارایی کل سیستم توسط این فناوری‌ها. پیل‌های سوختی کربنات مذاب ($MCFC^1$) به دلیل بازده بالا، دمای کاری زیاد و قابلیت مشارکت CO_2 در واکنش کاتدی، گزینه‌ای مناسب برای ادغام در سامانه‌های هیبریدی انرژی است.

ساماننا و روی [۱] یک نیروگاه هیبریدی متشکل از گازساز زیست‌توده، توربین بادی، $MCFC$ ، بازیابی گرما (ORC و SRC)، را مورد ارزیابی زیست‌محیطی قرار دادند. بهینه‌سازی چند هدفه شرایط عملیاتی بهینه‌ای را تعیین کرد که منجر به بازده انرژی $47/46\%$ و هزینه برق برابر با $0/0993$ دلار بر کیلو وات ساعت شد. این سیستم سالانه $50/52/58$ تن CO_2 جذب کرده و با بازده $54/5\%$ ، توان الکتریکی معادل $1/3$ مگاوات تولید می‌کند.

روی [۱] با استفاده از پوسته برنج به عنوان سوخت، سامانه‌ای شامل گازساز زیست‌توده، $MCFC$ ، توربین گازی و سامانه گرمایش آب طراحی کرد. بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) همراه با ارزیابی‌های ترمودینامیکی و اقتصادی انجام شد. چگالی جریان بهینه برابر با $1015/25$ آمپر بر متر مربع، دمای سلول 700 درجه سلسیوس و نسبت فشار $1/69$ تعیین شد. بازده انرژی سیستم به حداکثر $41/15\%$ و هزینه سطحی انرژی به حداقل $0/044$ دلار بر کیلووات‌ساعت رسید. در عین حال که مطالعه، راهکاری کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای بهره‌گیری از زیست‌توده ارائه می‌دهد، چالش‌هایی در توسعه‌پذیری و پایداری بلند مدت باقی مانده‌اند. لی و همکاران [۲] با استفاده از سلول سوختی چند جزئی، جذب کربن، تولید توان و تبدیل زغال‌سنگ به متانول، رویکردی برای تولید چندگانه توسعه دادند. در این سیستم، گاز سنتز برای سنتز متانول، تولید توان و جذب CO_2 توسط $MCFC$ استفاده می‌شود. گرمای تلف‌شده با استفاده از چرخه بخار سه‌مرحله‌ای که با مدل توسعه‌یافته دوران-گروسمن بهینه‌سازی شده، بازیافت می‌شود. نتایج حاکی از بهبود $8/53\%$ در بازده انرژی و کاهش $1/68\%$ در هزینه‌های تولید ($12/47$ دلار بر گیگاژول) و کاهش قابل توجه در انتشار کربن نسبت به نیروگاه مرجع است. بال افکنده و همکاران [۳] سامانه‌ای با انتشار کربن نزدیک به صفر طراحی کردند که از $MCFC$ به همراه تولید هیدروژن از برق حاصل از چرخه جذبی در بخش انتهایی استفاده می‌کند. این سامانه با استفاده حداکثری از گرمای تلف‌شده، مصرف سوخت‌های هیدروکربنی را به حداقل می‌رساند. بهینه‌سازی چندمعیاره‌ای برای دستیابی به تعادل میان هزینه، بازده و انتشار CO_2 انجام شد. سیستم به بازده انرژی $66/21\%$ و بازده انرژی $59/5\%$ دست یافت و بیشترین تخریب انرژی مربوط به $MCFC$ و محفظه پس‌سوز بود.

در بین سامانه‌های انرژی، چرخه رانکین آلی (ORC) به عنوان روشی مؤثر برای بازیابی گرمای تلف شده در دماهای پایین تا متوسط، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. سیستم‌های ORC با بهره‌گیری از سیالات کاری آلی که دمای جوش پایین‌تری نسبت به آب دارند، قادرند گرمای تلف‌شده را به شکل مؤثری به توان قابل استفاده تبدیل کنند. این ویژگی باعث افزایش پایداری و بهبود بازده کلی سامانه می‌شود. این بخش به مرور مطالعات اخیر در زمینه‌ی ادغام ORC در

کاربردهای مختلف بازیابی گرما پرداخته و عملکرد، راهبردهای بهینه‌سازی و ظرفیت این سامانه‌ها برای بهبود بازده انرژی را تحلیل می‌کند. ناندی و گوگوی [۴] چهار پیکربندی ORC شامل چرخه پایه، بازیاب ($Recuperative$)، احیاکننده ($Regenerative$) و ترکیبی احیاکننده-بازیاب ($RR-ORC$)، را از دیدگاه انرژی-اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه مشخص شد که پیکربندی $RR-ORC$ نسبت به ORC پایه، نرخ هزینه‌ی سامانه را $1/68\%$ کاهش داده، توان خالص را $16/19\%$ افزایش داده و بازده انرژی را نیز $15/33\%$ بهبود می‌بخشد. در تمامی پیکربندی‌ها، تلفات انرژی حدود 60% از کل هزینه‌ها را به خود اختصاص داده بود. با وجود مزایای فنی $RR-ORC$ ، چالش‌هایی در زمینه‌ی اقتصادی بودن و پیاده‌سازی عملی آن باقی مانده است. وانگ و همکاران [۵] راهبردی برای تولید هیدروژن پیشنهاد کردند که از گرمای تلف‌شده موتور دیزل برای راه‌اندازی هم‌زمان سلول الکترولیز اکسید جامد ($SOEC$) و چرخه ORC استفاده می‌کند. سامانه با بازده کلی $53/56\%$ و بازده ORC معادل $12/12\%$ ، قادر به تولید $32/4$ مگاوات برق و 431 کیلوگرم بر ثانیه هیدروژن بود. تحلیل حساسیت نشان داد بهینه‌سازی چگالی جریان، دبی جریان آب، و سطح $SOEC$ باعث بهبود عملکرد سامانه می‌شود. تنگ و همکاران [۶] سه پیکربندی CHP مبتنی بر ORC را از دیدگاه انرژی، انرژی و اقتصادی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پیکربندی ترکیبی SS/CS از نظر بازگشت سرمایه عملکرد بهتری دارد، هرچند بازده الکتریکی پایین و هزینه بالای مبادله‌کن‌های گرمایی همچنان از چالش‌های اصلی سیستم است. مارکیونی و همکاران [۷] عملکرد دینامیکی یک سیستم ORC را برای بازیابی گرمای اتلافی موتور دیزل بررسی کردند. نتایج نشان داد که کنترل سرعت اکسپندر و دبی جرمی سیال عامل می‌تواند بازیابی گرما و توان خروجی سیستم را بهبود دهد.

در راستای توسعه سیستم‌های تولید چندگانه، پژوهش‌های اخیر به اهمیت ترکیب پیل‌های سوختی با فناوری بازیابی گرمای زیست‌توده و چرخه‌های بازیابی حرارت نظیر رانکین آلی (ORC) پرداخته‌اند. به عنوان مثال، ارزیابی عملکرد یک سیستم تولید سه‌گانه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد یکپارچه‌شده با فرآیند بازیابی گرمای زیست‌توده از منظر انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی نشان می‌دهد که این ترکیب، بازده سیستم را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده و منجر به کاهش چشمگیر انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود [۸]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل قانون اول و دوم ترمودینامیک برای یک سیستم ترکیبی شامل پیل سوختی پلیمری و چرخه ORC جهت تولید هم‌زمان توان، گرما و هیدروژن ثابت کرد که بهره‌گیری از گرمای هدررفت پیل سوختی در چرخه پایین‌دستی، راندمان کلی حرارتی و انرژی سیستم را به شدت بهبود می‌بخشد [۹].

با وجود تحقیقات گسترده در حوزه سامانه‌های هیبریدی انرژی، مطالعات اندکی به ترکیب پیل سوختی کربنات مذاب ($MCFC$) با ORC مبتنی بر گاز سنتز حاصل از زیست‌توده به منظور کاهش انتشار CO_2 پرداخته‌اند.

نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه و بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم هیبریدی مبتنی بر گازسازی زیست‌توده، پیل سوختی کربنات مذاب و چرخه رانکین آلی است که در آن عملکرد ترمودینامیکی،

¹ Molten Carbonate Fuel Cell

هر مول هیدروژن، یک مول بخار آب تولید می‌شود، جریان بازیافتی آند حاوی مقادیر بسیار بالایی از رطوبت و انرژی گرمایی است. این جریان با ورود به واحد اختلاط سوخت (Fuel Mixer) در بالادست پیش‌ریفرمر، با گاز سنتز تازه ترکیب شده و بخار آب لازم برای فرآیند را بر اساس نسبت بخار به کربن فراهم می‌کند. حضور بخار در این ناحیه امکان انجام واکنش‌های ریفرمینگ بخار متان و واکنش جابجایی آب-گاز را فراهم می‌کند که منجر به تولید گاز غنی از هیدروژن می‌شود.

در MCFC، واکنش‌های الکتروشیمیایی با ورود گاز غنی از هیدروژن به سمت آند و هوای پیش‌گرم شده به سمت کاتد انجام می‌گیرد. این پیل در دمای بالا (حدود ۶۵۰ درجه سلسیوس) عمل می‌کند که شرایط را برای ریفرمینگ داخلی و بازیافت مؤثر گرما فراهم می‌آورد. گازهای خروجی آند و کاتد به همراه سوخت و واکنش نداده، وارد محفظه پس‌سوز (afterburner) می‌شوند تا احتراق کامل صورت گیرد. گاز داغ حاصل از پس‌سوز در تبخیرکن ORC برای تبخیر سیال عامل آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیال عامل ORC در این مطالعه R123 در نظر گرفته شده است. بخار تولیدی از طریق توربین ORC منبسط شده و توان الکتریکی اضافی تولید می‌کند، سپس در کندانسور تقطیر شده و توسط پمپ ORC مجدداً به چرخه بازمی‌گردد. بازده سیستم با بازیافت بخشی از گرمای اتلافی پس‌سوز برای واحد گرمایش بیش‌تر افزایش می‌یابد. این گرما می‌تواند در شبکه‌های گرمایش ناحیه‌ای (District Heating) یا فرآیندهای صنعتی به‌کار گرفته شود. مجموع توان الکتریکی تولیدی MCFC و ORC یا به شبکه برق تزریق می‌شود یا به‌صورت محلی مصرف می‌گردد که این امر موجب تولید توان و حرارت با انتشار مستقیم CO_2 کمتر نسبت به سامانه‌های متداول می‌شود.

برای مدلسازی سیستم، چندین فرض در نظر گرفته شده است:

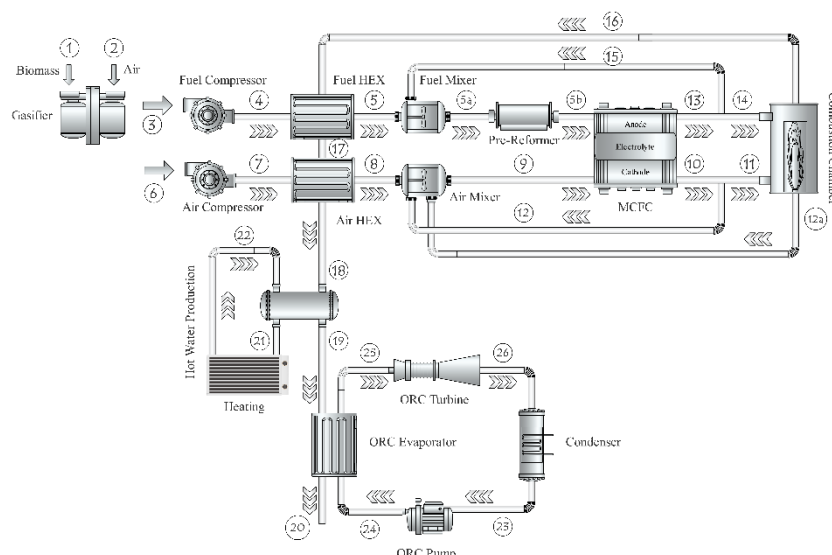
- شرایط عملکرد پایا (steady-state operation).
- احتراق کامل در پس‌سوز.
- دمای عملیاتی ثابت MCFC

فرضیات مدل‌سازی برای تحلیل ترمودینامیکی سیستمی و مقایسه پارامتری مناسب هستند، اما نشان‌دهنده تمام جزئیات عملکرد واقعی نیستند. در شرایط واقعی، افت فشار، تغییرات دمایی موضعی، محدودیت‌های سینتیکی گازسازی، افت عملکرد بلندمدت MCFC و رفتار دینامیکی تجهیزات می‌توانند بر عملکرد سیستم اثرگذار باشند. بنابراین نتایج حاضر باید به‌عنوان ارزیابی مفهومی و پایه‌ای برای مطالعات تفصیلی‌تر تفسیر شوند.

اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شده است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر تحلیل ترمودینامیکی یا بررسی مجزای زیرسیستم‌ها تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش اثر هم‌زمان پارامترهای کلیدی عملیاتی بر بازده انرژی، هزینه واحد محصول و انتشار ویژه CO_2 بررسی و شرایط عملکرد بهینه با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه تعیین شده است. لازم به ذکر است که بخشی از چارچوب اولیه سیستم هیبریدی پیشنهادی پیش‌تر توسط نویسندگان معرفی شده است [۱۰]. با این حال، پژوهش حاضر فراتر از مطالعه قبلی توسعه یافته و تمرکز اصلی آن بر بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد سیستم است. در مطالعه حاضر، بازده انرژی، هزینه واحد محصول و انتشار CO_2 به‌صورت هم‌زمان با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه بهینه‌سازی شده‌اند و جبهه پارتو برای تعیین شرایط عملکرد بهینه استخراج شده است.

پیکربندی و مکانیسم کار سیستم یکپارچه MCFC-ORC سیستم انرژی هیبریدی پیشنهادی از یک واحد گرمایش، یک چرخه رانکین آلی (ORC) و یک پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) تشکیل شده است. طرحواره سیستم در شکل ۱ نشان داده شده و که بر جریان‌های اصلی انرژی و برهم‌کنش میان MCFC، ORC و اجزای گرمایش تمرکز دارد. هدف از طراحی این سیستم، حداکثرسازی بهره‌برداری از انرژی از طریق بازیافت گرمای اتلافی MCFC است که منجر به افزایش بازده کل و کاهش انتشار کربن می‌شود.

منبع اصلی انرژی سیستم، زیست‌توده است که از طریق فرآیند گازی‌سازی به گاز سنتز (syngas) تبدیل می‌شود. گاز سنتز تولیدی که عمدتاً از هیدروژن (H_2)، مونوکسید کربن (CO) و متان (CH_4) تشکیل شده، به‌عنوان سوخت اصلی در MCFC مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور موازی هوا در کمپرسور هوا فشرده شده و در مبادله‌کن گرمایی هوا گرم می‌شود. در مسیر تأمین سوخت نیز، گاز سنتز خروجی از گازساز ابتدا در کمپرسور سوخت متراکم شده و سپس در مبادله‌کن گرمایی سوخت پیش‌گرمایش می‌گردد. در ادامه، جریان سوخت پیش‌گرم شده ابتدا وارد واحد اختلاط سوخت می‌شود تا با جریان بازیافتی آند که حاوی بخار آب حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی است، به خوبی ترکیب گردد. پس از اختلاط و تأمین رطوبت و گرمای لازم، این مخلوط به پیش‌ریفرمر (Pre-reformer) هدایت می‌شود تا از طریق واکنش‌های گرماگیر ریفرمینگ و در حضور بخار، گاز غنی از هیدروژن تولید شده و در نهایت برای تولید توان به بخش آند پیل سوختی وارد شود. به‌طور هم‌زمان، جریان هوای پیش‌گرم شده نیز به واحد اختلاط هوا (Air Mixer) وارد می‌گردد تا ترکیب نهایی سیالات پیش از ورود به پیل سوختی تنظیم شود. از آنجا که در واکنش الکتروشیمیایی سمت آند پیل سوختی کربنات مذاب، به ازای مصرف



شکل ۱- نمایش ساختاری سیستم مورد مطالعه.

۲- روش مدل سازی

۲-۱- ارزیابی انرژی

مدل ترمودینامیکی سیستم بر پایه موازنه جرم، انرژی و اگزرژی در شرایط پایا توسعه یافت. هر جزء به صورت حجم کنترل در نظر گرفته شد و تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز فرض گردید. معادلات حاکم در نرم افزار EES پیاده سازی شدند.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (2)$$

$$\dot{E}_Q - \dot{E}_W = \sum \dot{m}_{out} e_{out} - \sum \dot{m}_{in} e_{in} + \dot{E}_D \quad (3)$$

۲-۲- گاز ساز

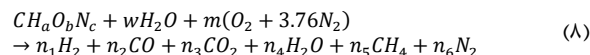
در مطالعه حاضر از یک گاز ساز جریان روبه پایین (down-draft) با چهار ناحیه مجزا شامل خشک سازی، تجزیه گرمایی، کاهش و احتراق استفاده شده است. زیست توده ورودی به سیستم در این مطالعه از نوع ضایعات چوبی (Wood residues) در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی این خوراک در فرمول کلی گاز سازی به صورت تقریبی معادل $CH_{1.44}O_{0.66}$ با در نظر گرفتن رطوبت اولیه لحاظ می گردد. مطابق مدل تعادلی، در یک مرحله مشخص، تمامی فرآیندهای گاز سازی به تعادل ترمودینامیکی دست خواهند یافت. واکنش های صورت گرفته در ناحیه کاهش عبارت اند از:



واکنش جابجایی از ترکیب واکنش های (۴) و (۵)، ایجاد می شود:



عبارت زیر می تواند به عنوان توصیفی کلی برای فرآیند گاز سازی استفاده شود [۱۱]:



غلظت نسبی آب و اکسیژن در واکنش سازی به ترتیب با w و m نشان داده شده اند. مقادیر n_1 تا n_6 به تعداد کیلومول های محصولات مختلف تولید شده در فرآیند گاز سازی اشاره دارند. همچنین، مقدار رطوبت به صورت نسبت جرم رطوبت به جرم زیست توده تر بیان می شود:

$$MC = \left(\frac{\text{mass of water}}{\text{mass of wet biomass}} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$w = \frac{M_{biomass} MC}{18(1 - MC)} \quad (10)$$

مقادیر n_1 تا n_6 را می توان با استفاده از معادلات موازنه جرم و انرژی، معادله کلی گاز سازی، ثابت های تعادل تشکیل متان، واکنش جابجایی آب-گاز و سایر محاسبات مرتبط تعیین کرد. علاوه بر این، مقدار m می تواند با در نظر گرفتن دمای گاز سازی Tg تعیین شود، یا دمای گاز سازی Tg با استفاده از مقدار m به عنوان ورودی محاسبه گردد. ثابت های تعادل واکنش جابجایی آب-گاز و فرآیندهای تولید متان به صورت زیر است [۱۲، ۱۳]:

$$K_1 = \frac{n_5}{n_1^2} \left(\frac{P/P_{ref}}{n_{tot}} \right)^{-1} \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{n_1 n_3}{n_2 n_4} \left(\frac{P/P_{ref}}{n_{tot}} \right)^0 \quad (12)$$

تعاریف متغیرهای تعادلی به شرح زیر است:

$$\frac{-\Delta G_1^0}{RT_g} = \ln K_1 \quad (13)$$

$$\frac{-\Delta G_2^0}{RT_g} = \ln K_2 \quad (14)$$

$$-\Delta G_1^0 = (\bar{h}_{CH_4} - T_g \bar{s}_{CH_4}^0) - 2(\bar{h}_{H_2} - T_g \bar{s}_{H_2}^0) \quad (15)$$

$$-\Delta G_2^0 = (\bar{h}_{CO_2} - T_g \bar{s}_{CO_2}^0) + (\bar{h}_{H_2} - T_g \bar{s}_{H_2}^0) - (\bar{h}_{CO} - T_g \bar{s}_{CO}^0) - (\bar{h}_{H_2O} - T_g \bar{s}_{H_2O}^0) \quad (16)$$

با اعمال قانون اول ترمودینامیک بر یک گاز ساز آدیاباتیک، معادله

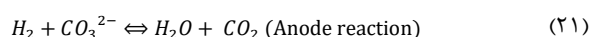
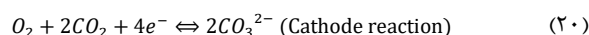
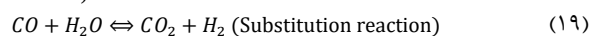
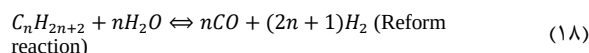
زیر فرآیند پایه گاز سازی را نشان می دهد:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{f-paper}^0 + w \times \bar{h}_{f-H_2O}^0 + n_{air,6} \times \bar{h}_{air,6} = \\ n_1(\bar{h}_{f-H_2}^0 + \Delta \bar{h}_{H_2}) + n_2(\bar{h}_{f-CO}^0 + \Delta \bar{h}_{CO}) \\ + n_3(\bar{h}_{f-CO_2}^0 + \Delta \bar{h}_{CO_2}) + n_4(\bar{h}_{f-H_2O}^0 + \Delta \bar{h}_{H_2O}) + \\ n_5(\bar{h}_{f-CH_4}^0 + \Delta \bar{h}_{CH_4}) + n_6(\bar{h}_{f-N_2}^0 + \Delta \bar{h}_{N_2}) \end{aligned} \quad (17)$$

۳-۲- پیل سوختی کربنات مذاب

واکنش‌های شیمیایی زیر در پیل سوختی کربنات مذاب رخ می‌دهد

[۱۴]:



برای هر واکنش الکتروشیمیایی داده شده، می‌توان از معادلات زیر برای تعیین جریان و چگالی جریان استفاده کرد. (z) جریان الکترونی، (n) تعداد الکترون‌های منتقل شده، (s) مساحت سطح فعال، (F) ثابت فارادی و (N) تعداد سلول‌ها را نشان می‌دهد [۱۵]:

$$I = \frac{z n F}{N} \quad (22)$$

$$i_c = \frac{I}{s} \quad (23)$$

فرمول زیر می‌تواند برای بدست آوردن ولتاژ واقعی با در نظر گرفتن تلفات سلول استفاده شود [۱۶]:

$$V_{cell} = E_{Nernst} - (R_{an} + R_{ca} + R_{ohm}) \times i_c \quad (24)$$

در این حالت، E_{Nernst} نشان‌دهنده ولتاژ ایده‌آل برگشت‌پذیر MCFC، R_{ca} و R_{an} مقاومت‌های آند و کاتد و R_{ohm} مقاومت داخلی سلول است.

برای محاسبه توان MCFC، از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$W_{MCFC} = \alpha \times I \times V_{cell} \quad (25)$$

که در آن W_{MCFC} خروجی MCFC بر حسب کیلووات و α ضریب تبدیل DC/AC سیستم است. راندمان MCFC به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{MCFC} = \frac{W_{MCFC}}{G_f \times LHV_f} \quad (26)$$

که در آن LHV_f نشان‌دهنده ارزش گرمایی پایین سوخت بر حسب مگاژول بر کیلوگرم و G_f نشان‌دهنده دبی جرمی سوخت (کیلوگرم بر ثانیه) است.

مول‌های دبی هیدروژن مصرفی در واکنش آند ($n_{H_2, consumed}$) تقسیم بر مول‌های دبی هیدروژن معادل سوخت ($n_{H_2, equivalent}$) نسبت مصرف سوخت (U_f) است.

$$U_f = \frac{n_{H_2, consumed}}{n_{H_2, equivalent}} \times 100\% \quad (27)$$

$$n_{H_2, equivalent} = n_{CO} + 4 \times n_{CH_4} + 7 \times n_{C_2H_6} + 10 \times n_{C_3H_8} + 13 \times n_{C_4H_{10}} \quad (28)$$

U_{CO_2} نشان دهنده کسری از CO_2 ورودی است که به طور فعال در واکنش‌های الکتروشیمیایی کاتد شرکت می‌کند و به صورت نسبت CO_2 مصرفی به CO_2 تغذیه شده محاسبه می‌شود.

$$U_{CO_2} = \frac{n_{CO_2, consumed}}{n_{CO_2, feed}} \times 100\% \quad (29)$$

در این مطالعه، چگالی جریان به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی عملکرد MCFC در نظر گرفته شده و در تحلیل پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است. بازه چگالی جریان انتخاب شده بر اساس داده‌های اعتبارسنجی و با هدف تحلیل رفتار ترمودینامیکی سیستم در شرایط افت اهمی کمتر تعیین شده است. با این حال، چگالی جریان پایین‌تر

موجب کاهش چگالی توان و افزایش سطح فعال مورد نیاز است که می‌شود و از این رو به عنوان یک محدودیت طراحی در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- ارزیابی انرژی

تحلیل ترمودینامیکی بر پایه انرژی، بینش‌های مهمی ارائه می‌دهد و در توسعه روش‌های کارآمد برای سامانه‌های تبدیل انرژی نقش مؤثری دارد. انرژی کل از چهار بخش تشکیل شده است: انرژی فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل. در عملکرد سیستم مورد بررسی، انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به دلیل نوسانات جزئی در سرعت و ارتفاع نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین، از معادله (۳۰) می‌توان برای تعیین انرژی منفرد هر جریان استفاده کرد [۱۷، ۱۸]:

$$e = e_{ph} + e_{ch} \quad (30)$$

انرژی فیزیکی هر جریان از طریق معادله (۳۱) بدست می‌آید:

$$e_{ph,i} = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0) \quad (31)$$

اندیس i نشان‌دهنده جریان مورد بررسی در ورودی یا خروجی هر حجم کنترل است. فرمول زیر نیز برای تعیین انرژی شیمیایی زیست‌توده به کار می‌رود [۱۳]:

$$e_{biomass}^{ch} = \beta LHV_{biomass} \quad (32)$$

معادله β (معادله ۳۳) نسبت انرژی شیمیایی زیست‌توده به ارزش گرمایی پایین (LHV) آن را نشان می‌دهد. این رابطه برای β توسط Szargut و Styrylska [۱۳] ارائه شده است:

$$(33)$$

که در آن، نسبت‌های جرمی هیدروژن، کربن و اکسیژن به ترتیب با Z_H ، Z_C و Z_O نمایش داده می‌شوند. انرژی شیمیایی یک مخلوط از گازهای ایده‌آل نیز در معادله زیر گنجانده شده است [۱۷]:

$$e_i^{ch} = \sum_i x_i e_{0,i}^{ch} + \bar{R} T_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (34)$$

انرژی شیمیایی استاندارد جزء i با نماد $e_{0,i}^{ch}$ نمایش داده می‌شود، در حالی که x_i نسبت مولی آن جزء است. معادله‌ای که موازنه انرژی سیستم را توصیف می‌کند در ادامه ارائه شده است [۱۲]:

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} + \dot{E}_D \quad (35)$$

به طور مشابه، در این معادله $\sum \dot{E}_{in}$ نشان‌دهنده مجموع انرژی ورودی به حجم کنترل و $\sum \dot{E}_{out}$ بیانگر انرژی خروجی از حجم کنترل است. عبارت پایانی در سمت راست این معادله، بیانگر مقدار نابودی انرژی برای هر جزء سیستم می‌باشد.

۵-۲- ارزیابی عملکرد کلی سیستم تولید سه‌گانه

برای محاسبه بازده قانون اول ترمودینامیک چرخه، از ارزش حرارتی پایین (LHV) زیست‌توده و کار ویژه استفاده می‌شود.

$$\eta_I = \frac{W_{net} - W_{pump} + \dot{Q}_{heating}}{\dot{m}_{biomass} LHV_{biomass}} \quad (36)$$

انرژی ورودی به چرخه ترکیبی سیستم مورد مطالعه، $\dot{E}_{in}$ ، به ازای هر کیلومول از زیست‌توده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{E}_{in} = e_{biomass}^{ch} + w \times e_{water}^{ch} \quad (37)$$

بازده انرژی چرخه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{W_{net} + \dot{E}_{heating}}{\dot{E}_{in}} \quad (38)$$

¹ Lower Heating Value

۲-۶- ارزیابی محیط‌زیستی

مقدار دی‌اکسیدکربن تولیدشده توسط هر یک از اجزای چرخه به‌طور مستقل اندازه‌گیری می‌شود، به‌طوری‌که تولید گرمای هدررفته از هر جزء نیز در نظر گرفته می‌شود، تا تأثیر زیست‌محیطی سامانه پیشنهادی ارزیابی گردد. در سناریوی نخست، انتشار دی‌اکسید کربن تنها برای پیل سوختی محاسبه می‌شود؛ در سناریوی بعدی، برای سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما؛ و در نهایت، برای کل سامانه ترکیبی پیشنهادی. تولید دی‌اکسید کربن برای هر حالت توسط معادلات زیر نمایش داده می‌شود:

$$\varepsilon_{em,SOFC} = \frac{\dot{m}_{CO_2,emitted}}{\dot{w}_{net}} \quad (39)$$

$$\varepsilon_{em,CHP} = \frac{\dot{m}_{CO_2,emitted}}{\dot{w}_{net} + \dot{Q}_{heating}} \quad (40)$$

$$\varepsilon_{em,CCHP} = \frac{\dot{m}_{CO_2,emitted}}{\dot{w}_{net} + \dot{Q}_{heating}} \quad (41)$$

۲-۷- مدل بهینه‌سازی

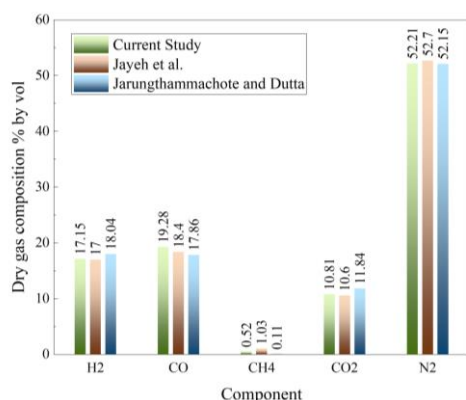
بهینه‌سازی به دنبال شناسایی شرایط کار بهینه با توجه به تعداد محدودی از معیارها یا محدودیت‌های مهم است. علاوه بر کاهش عوامل منفی مانند انتشار دی اکسید کربن و هزینه‌های انرژی، این اهداف همچنین شامل افزایش موارد مثبت مانند تولید انرژی خالص و راندمان عملکرد نیز می‌شود. بهینه‌سازی چند هدفه (MOO^1) تئوری بهینه‌سازی را فراتر از محدوده بهینه‌سازی تک هدفه (SOO^2) گسترش می‌دهد، که به دنبال شناسایی شرایط بهینه است که به تنهایی یک نشانه را برآورده می‌کند. نرم افزار EES با استفاده از یک کتابخانه جامع از ویژگی‌های ترمودینامیکی سیالات مختلف، مدل ریاضی معادلات فنی-اقتصادی-محیطی را انجام می‌دهد. با این حال، EES قادر به حل مشکلات MOO نیست و روش بهینه‌سازی فقط در محیط MATLAB تکمیل می‌شود. با توجه به زمان طولانی مورد نیاز برای تکمیل بهینه سازی پس از ادغام EES با MATLAB، یک استراتژی ANN³ برای سرعت بخشیدن به فرآیند استفاده می‌شود.

۳- نتایج

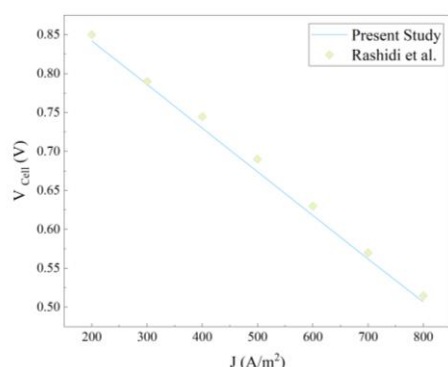
۳-۱- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از دقت شبیه‌سازی‌ها، اعتبارسنجی جامعی بر روی مدل‌های زیرسیستم‌های اصلی انجام شد. در شکل ۲، ترکیب گاز خشک (درصد حجمی) حاصل از گازساز ارائه شده و نتایج مطالعه حاضر با داده‌های Jayeh و همکاران [۱۹] و Jarunghammachote و Dutta [۲۰] مقایسه شده است. این مقایسه نشان‌دهنده همخوانی مناسب بوده و تنها انحرافات جزئی مشاهده گردید که صحت و قابلیت اطمینان مدل گازی‌ساز را تأیید می‌کند. اعتبارسنجی پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) با استفاده از نتایج Rashidi و همکاران [۲۱] صورت گرفت. در شکل ۳ تغییرات ولتاژ سلول نسبت به چگالی جریان نشان داده شده و نتایج مطالعه حاضر با داده‌های Rashidi و همکاران

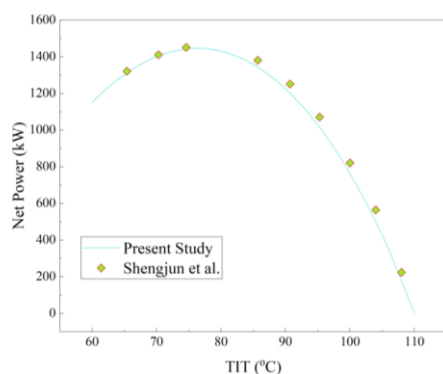
[۲۱] برای مدل MCFC مقایسه گردیده است. مدل چرخه رانکین آلی (ORC) با استفاده از نتایج مطالعات Shengjun و همکاران [۲۲] اعتبارسنجی شد. در شکل ۴ تغییرات توان خالص نسبت به دمای ورودی توربین نمایش داده شده و نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های Shengjun و همکاران [۲۲] مقایسه شده است.



شکل ۲- اعتبارسنجی مدل گازساز با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی [۱۹،۲۰].



شکل ۳- اعتبارسنجی مدل MCFC در برابر رشیدی و همکاران [۲۱].



شکل ۴- اعتبارسنجی مقایسه‌ای مدل ORC با یافته‌های شنگجون و همکاران [۲۲].

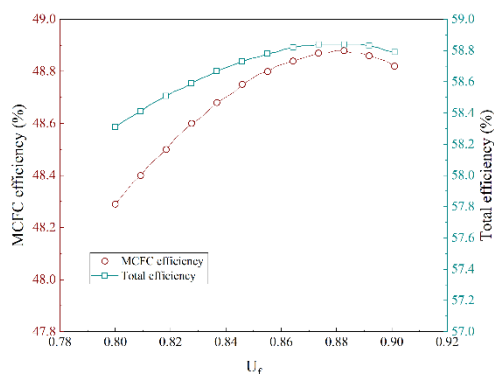
۲-۲- نتایج مطالعه پارامتری

تأثیر متغیرهای عملیاتی بحرانی بر عملکرد سیستم در یک مطالعه

¹ Multi-Objective Optimization

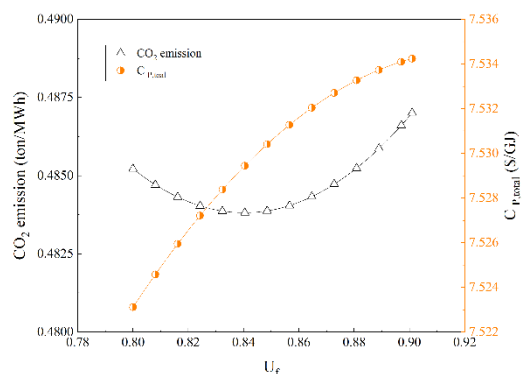
² Single-Objective Optimization

³ Artificial Neural Network



شکل ۶- تأثیر ضریب مصرف سوخت بر راندمان کل و راندمان MCFC.

شکل ۷ رابطه بین U_f ، انتشار CO_2 و هزینه واحد محصول را نشان می‌دهد. در این مطالعه، انتشار CO_2 به صورت انتشار ویژه (ton/MWh) تعریف شده است؛ بنابراین مقدار آن علاوه بر نرخ تولید CO_2 ، به توان خالص تولیدی سیستم نیز وابسته است. با افزایش ضریب مصرف سوخت، سهم بیشتری از سوخت ورودی در واکنش‌های الکتروشیمیایی مصرف می‌شود و مقدار سوخت واکنش‌ن داده کاهش می‌یابد. این موضوع در ابتدا باعث بهبود عملکرد سیستم و افزایش نسبت توان تولیدی به CO_2 تولیدشده شده و در نتیجه انتشار ویژه CO_2 کاهش می‌یابد. با این حال، در مقادیر بالاتر U_f ، افت ولتاژ سلول ناشی از کاهش فشار جزئی هیدروژن و افزایش افت‌های غلظتی موجب کاهش عملکرد الکتروشیمیایی و افت توان خالص سیستم می‌شود. در نتیجه، انتشار ویژه CO_2 مجدداً روند افزایشی پیدا می‌کند. هزینه واحد محصول روند افزایشی را نشان می‌دهد که اثبات می‌کند اعمال ضرایب مصرف سوخت بالاتر در حد مرزهای مجاز، لزوماً منجر به مزایای اقتصادی نمی‌شود.

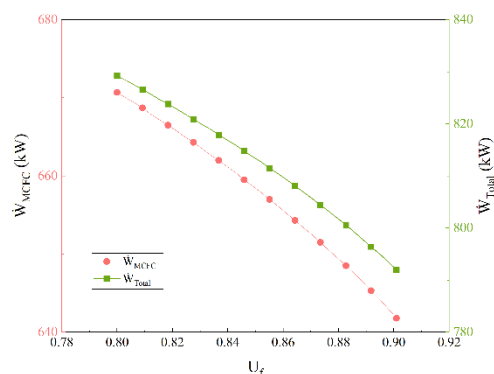


شکل ۷- تأثیر ضریب مصرف سوخت بر انتشار CO_2 و هزینه واحد محصول.

شکل ۸ نتایج تحلیل تأثیر چگالی جریان MCFC بر راندمان کلی و تولید توان خالص را نشان می‌دهد. با افزایش چگالی جریان، ولتاژ سلول به دلیل افزایش افت‌های اهمی و غلظتی کاهش می‌یابد. با این حال، توان الکتریکی برابر حاصل ضرب جریان و ولتاژ است؛ بنابراین در بازه بررسی شده، افزایش جریان بر کاهش ولتاژ غالب بوده و توان خروجی افزایش یافته است. در مقابل، کاهش ولتاژ متوسط سلول و افزایش برگشت‌ناپذیری‌ها باعث کاهش بازده انرژی و آگزروی می‌شود.

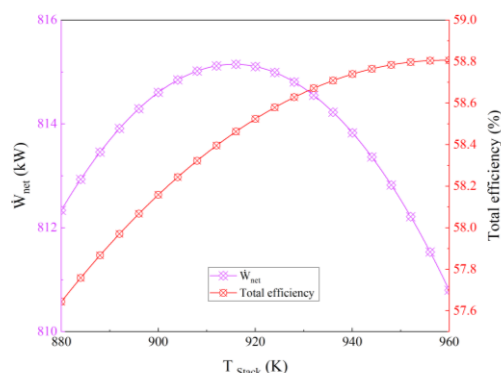
کامل پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای مورد تجزیه و تحلیل شامل چگالی جریان MCFC، ضریب مصرف سوخت، دمای استک و نسبت بخار به کربن است.

شکل ۵ نشان می‌دهد که چگونه ضریب مصرف سوخت (U_f) بر توان خالص خروجی و توان تولید شده توسط MCFC تأثیر می‌گذارد. در بازه عملیاتی مجاز (افزایش U_f از ۰/۸ تا ۰/۹)، کاهش در توان خالص خروجی مشاهده می‌شود. با افزایش ضریب مصرف سوخت، مقدار سوخت واکنش‌ن داده خروجی از آند کاهش می‌یابد و در نتیجه انرژی شیمیایی موجود برای احتراق در پس‌سوز و بازیابی حرارت در ORC کمتر می‌شود. این موضوع موجب کاهش توان تولیدی بخش پایین‌دست سیستم می‌گردد. علاوه بر این، در مقادیر بالای ضریب مصرف سوخت، کاهش فشار جزئی هیدروژن در مسیر آند و افزایش افت‌های غلظتی می‌تواند باعث کاهش ولتاژ متوسط سلول شود. در نتیجه، توان خروجی MCFC نیز در ضرایب مصرف سوخت بالا کاهش می‌یابد.



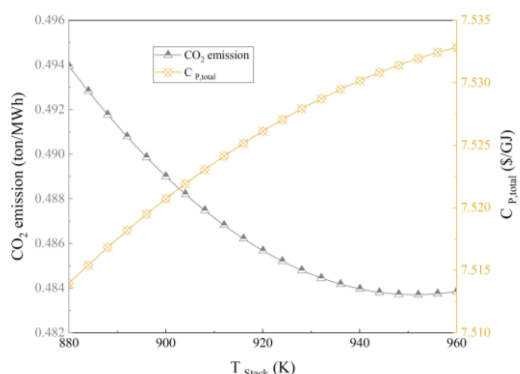
شکل ۵- تأثیر ضریب مصرف سوخت بر توان خالص خروجی و توان MCFC.

شکل ۶ تأثیر U_f بر راندمان کل سیستم و راندمان MCFC را نشان می‌دهد. هم راندمان کل و هم راندمان MCFC در ابتدا با افزایش U_f افزایش می‌یابند، اما پس از $U_f = 0.88$ شروع به کاهش می‌کنند. افزایش U_f در ابتدا باعث استفاده بهتر از انرژی شیمیایی سوخت و کاهش سوخت واکنش‌ن داده می‌شود؛ بنابراین بازده سیستم افزایش می‌یابد. با این حال، پس از یک مقدار بهینه، کاهش فشار جزئی هیدروژن در آند و افزایش افت غلظتی موجب افت ولتاژ سلول می‌شود. در نتیجه، نرخ افزایش توان مفید کمتر از نرخ افت عملکرد الکتروشیمیایی شده و بازده کل کاهش می‌یابد. بالاترین راندمان کل و MCFC در $U_f \approx 0.88$ حاصل می‌شود که نشان‌دهنده یک نقطه عملیاتی بهینه برای به حداکثر رساندن عملکرد سیستم است.



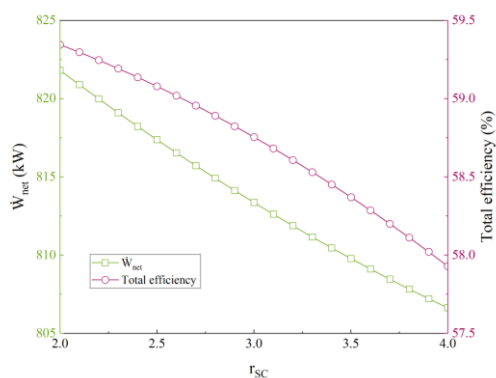
شکل ۱۰- تأثیر دمای دودکش بر توان خروجی خالص و راندمان کل.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که تغییر دمای گاز خروجی علاوه بر اثرگذاری بر توان ORC، بر انتشار ویژه CO_2 و هزینه واحد محصول نیز اثر دارد. کاهش بازده بازیافت گرما در دماهای نامناسب موجب افزایش هزینه و انتشار ویژه می‌شود.



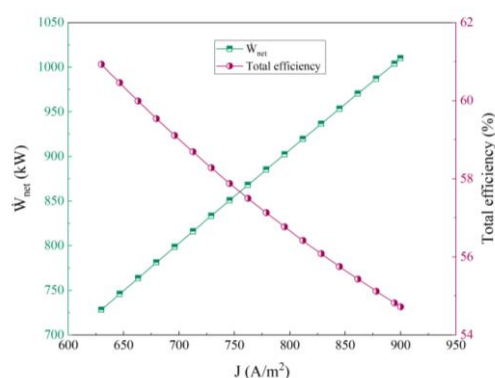
شکل ۱۱- تأثیر دمای دودکش بر انتشار CO_2 و هزینه واحد محصول.

شکل ۱۲ اثر نسبت بخار به کربن را نشان می‌دهد. افزایش این نسبت در ابتدا باعث بهبود ریفرمینگ و افزایش تولید هیدروژن می‌شود، اما مقدار بیش از حد بخار موجب افزایش بار گرمایی و کاهش بازده کلی می‌گردد.



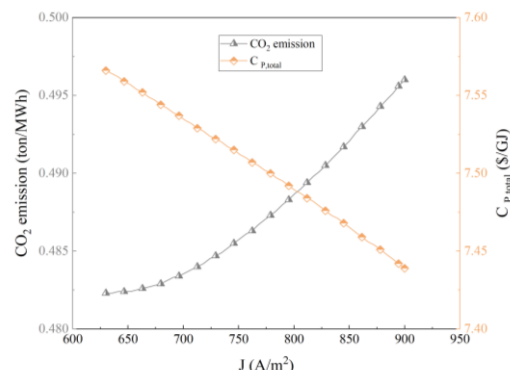
شکل ۱۲- تأثیر نسبت بخار به کربن بر توان خالص خروجی و راندمان کل.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که نسبت بخار به کربن بهینه می‌تواند هم



شکل ۸- تأثیر چگالی جریان MCFC بر توان خروجی خالص و راندمان کل.

شکل ۹ نشان می‌دهد که افزایش چگالی جریان منجر به افزایش انتشار CO_2 می‌شود و در $J = 900 \text{ A/m}^2$ به اوج خود می‌رسد. هزینه واحد محصول نیز روند مشابهی را دنبال می‌کند. افزایش چگالی جریان باعث افزایش نرخ واکنش الکتروشیمیایی و توان خروجی می‌شود، اما هم‌زمان افت ولتاژ، برگشت‌ناپذیری و نیاز به دفع گرما افزایش می‌یابد. افزایش انتشار ویژه CO_2 در چگالی جریان‌های بالا ناشی از کاهش بازده تبدیل انرژی و افزایش نسبت انتشار به توان مفید تولیدی است. همچنین افزایش هزینه واحد محصول در چگالی جریان بالا به کاهش بازده و افزایش بار گرمایی و الکتروشیمیایی سیستم نسبت داده می‌شود.



شکل ۹- تأثیر چگالی جریان MCFC بر انتشار CO_2 و هزینه واحد محصول.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش دمای گاز خروجی تا یک محدوده مشخص باعث بهبود بازیافت گرما در ORC و افزایش توان خالص می‌شود. با این حال، در دماهای بالاتر، افزایش تلفات گرمایی و برگشت‌ناپذیری در مبدل‌ها می‌تواند رشد بازده را محدود کند.

جدول ۱- نتایج بهینه‌سازی چندهدفه برای سیستم مورد مطالعه.

Exergy Efficiency (%)	$C_{p, total}$ (\$/GJ)	CO ₂ Emission (ton/MWh)
59.89	7.45	0.48

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه نشان می‌دهد که افزایش بازده انرژی الزاماً با کمینه‌شدن هزینه و انتشار همراه نیست، زیرا عملکرد سیستم تحت تأثیر مصالحه میان تبدیل الکتروشیمیایی، بازیافت گرما و هزینه تجهیزات قرار دارد. نقطه انتخابی از جبهه پارتو نشان‌دهنده حالتی است که در آن بازده انرژی بالا حفظ شده و هم‌زمان هزینه واحد محصول و انتشار CO₂ در سطح قابل قبول باقی می‌ماند.

۴- نتیجه‌گیری

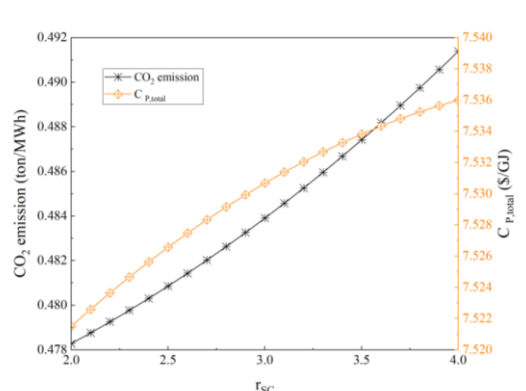
سیستم انرژی هیبریدی پیشنهادی که ترکیبی از پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)، چرخه آلی رانکین (ORC) و گازساز زیست‌توده است، پتانسیل قابل توجهی برای تولید انرژی پایدار و کارآمد از خود نشان می‌دهد. نتایج کلیدی نشان می‌دهند که بیشینه بازده کل سیستم برابر با ۴۷/۴۶٪ و توان خالص خروجی برابر با ۶۷۰/۷ کیلووات در ضریب استفاده از سوخت ۰/۸۸ حاصل می‌شود. عملکرد MCFC نقش اساسی در سیستم دارد و به‌شدت تحت تأثیر چگالی جریان و دمای استک قرار دارد. افزایش چگالی جریان (تا ۹۰۰ آمپر بر متر مربع) موجب افزایش توان تولیدی، اما کاهش بازدهی به دلیل بروز برگشت‌ناپذیری‌ها می‌شود.

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه نشان داد که در شرایط بهینه، بازده انرژی، هزینه واحد محصول و انتشار ویژه CO₂ به‌ترتیب برابر با ۵۹/۵۹٪، ۷/۴۵ دلار بر گیگاژول و ۰/۴۸ تن بر مگاوات‌ساعت است.

۵- نمادها

e	آنتروپی ویژه (kJ/kg)
$\dot{E}_D$	نرخ تخریب انرژی (kW)
$\dot{E}_Q$	نرخ انتقال انرژی ناشی از گرما (kW)
$\dot{E}_W$	نرخ انتقال انرژی ناشی از کار (kW)
E_{Nernst}	ولتاژ برگشت‌پذیر (ولتاژ نرنست) (V)
h	آنتالپی ویژه (kJ/kg)
I	جریان (A)
i_c	چگالی جریان (A/m ²)
K_1, K_2	ثابت‌های تعادل
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
P	فشار (kPa)
$\dot{Q}$	نرخ انتقال گرما (kW)
$\bar{R}$	ثابت جهانی گازها (kJ/(kmol·K))
R_{an}, R_{ca}, R_{ohm}	مقاومت آند، کاتد و اهمی (Ω)
s	آنتروپی ویژه (kJ/(kg·K))
T	دما (K)
U_f	ضریب مصرف سوخت
V_{cell}	ولتاژ سلول (V)
$\dot{W}$	توان (kW)
MCFC	پیل سوختی کربنات مذاب (Molten Carbonate Fuel Cell)
ORC	چرخه رانکین آلی (Organic Rankine Cycle)
α	ضریب تبدیل DC/AC

انتشار ویژه و هم هزینه واحد محصول را کاهش دهد، زیرا ترکیب مناسب گاز ورودی به آند و میزان تولید هیدروژن را بهبود می‌دهد.

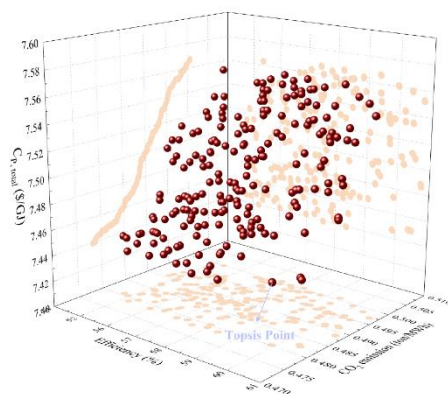


شکل ۱۳- تأثیر نسبت بخار به کربن بر انتشار CO₂ و هزینه واحد محصول.

۳-۳- نتایج بهینه‌سازی چند هدفه

هدف بهینه‌سازی شناسایی بهترین شرایط عملیاتی است که کارایی سیستم را به حداکثر می‌رساند و هزینه‌ها را به حداقل می‌رساند و در عین حال محدودیت‌های طراحی را برآورده می‌کند. در این مطالعه، یک رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه (MOO) با در نظر گرفتن بازده انرژی، میزان آلاینده‌گی و هزینه واحد محصول به عنوان اهداف اصلی استفاده شده است. یک الگوریتم ژنتیک (GA) برای بهینه‌سازی چند هدفه استفاده می‌شود. در این مطالعه، بهینه‌سازی چندهدفه با هدف یافتن تعادل بهینه بین بازده انرژی، هزینه واحد محصول، و انتشار CO₂ انجام شد.

برای کاهش زمان محاسبات، از ANN به‌عنوان مدل جانشین استفاده شد. داده‌های آموزش از مدل EES تولید شدند؛ ورودی‌های ANN شامل ضریب مصرف سوخت، چگالی جریان، دمای گاز خروجی و نسبت بخار به کربن، و خروجی‌ها شامل بازده انرژی، هزینه واحد محصول و انتشار CO₂ بودند. سپس ANN به الگوریتم ژنتیک در MATLAB متصل شد.



شکل ۱۴- توزیع جبهه پارتو.

۶- مراجع

- gasification plant. *Energy Convers Manag* 2013;70:107–15.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.002>.
- [14] Wu F, Cao Y, Raise A, Zhao L. Multi-objective optimization of thermoeconomic performance for an innovative combined energy system in the supply chain based on externally reformed-Molten carbonate fuel cell. *Appl Therm Eng* 2021;199:117537. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117537>.
- [15] Brouwer J, Jabbari F, Leal EM, Orr T. Analysis of a molten carbonate fuel cell: Numerical modeling and experimental validation. *J Power Sources* 2006;158:213–24. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.07.093>.
- [16] Duan L, Yue L, Qu W, Yang Y. Study on CO₂ capture from molten carbonate fuel cell hybrid system integrated with oxygen ion transfer membrane. *Energy* 2015;93:20–30. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.07.137>.
- [17] Bejan A, Moran MJ. Thermal design and optimization. John Wiley & Sons; 1996.
- [18] Ahmadi P, Dincer I, Rosen M a. Development and assessment of an integrated biomass-based multi-generation energy system. *Energy* 2013;56:155–66. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.024>.
- [19] Jayah TH, Aye L, Fuller RJ, Stewart DF. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass Bioenergy* 2003;25:459–69. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00037-0).
- [20] Jarunthammachote S, Dutta a. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy* 2007;32:1660–9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.010>.
- [21] Rashidi R. Thermodynamic Analysis of Hybrid Molten Carbonate Fuel Cell Systems. Undefined 2008.
- [22] Shengjun Z, Huaixin W, Tao G. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation. *Appl Energy* 2011;88:2740–54. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.02.034>.
- [1] Roy D. Multi-objective optimization of biomass gasification based combined heat and power system employing molten carbonate fuel cell and externally fired gas turbine. *Appl Energy* 2023;348:121486. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.121486>.
- [2] Li M, Zhuang Y, Song M, Li W, Du J. Techno-economic and carbon footprint feasibility assessment for polygeneration process of carbon-capture coal-to-methanol/power and molten carbonate fuel cell. *Energy Convers Manag* 2021;235:114015. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2021.114015>.
- [3] Balafkandeh S, Mahmoudi SMS, Gholamian E. Design and tri-criteria optimization of an MCFC based energy system with hydrogen production and injection: An effort to minimize the carbon emission. *Process Safety and Environmental Protection* 2022;166:299–309. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.08.020>.
- [4] Nondy J, Gogoi TK. Exergoeconomic investigation and multi-objective optimization of different ORC configurations for waste heat recovery: A comparative study. *Energy Convers Manag* 2021;245:114593. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2021.114593>.
- [5] Wang F, Wang L, Zhang H, Xia L, Miao H, Yuan J. Design and optimization of hydrogen production by solid oxide electrolyzer with marine engine waste heat recovery and ORC cycle. *Energy Convers Manag* 2021;229:113775. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113775>.
- [6] Teng S, Wang M, Xi H, Wen S. Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different ORC based CHP systems for waste heat recovery. *Case Studies in Thermal Engineering* 2021;28:101444. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101444>.
- [7] Marchionni M, Fatigati F, Di Bartolomeo M, Di Battista D, Petrollese M. Experimental and Numerical Dynamic Investigation of an ORC System for Waste Heat Recovery Applications in Transportation Sector. *Energies* 2022, Vol 15, Page 9339 2022;15:9339. <https://doi.org/10.3390/EN15249339>.
- [۸] مرتضایی م و رحیمی م، تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم تولید سه گانه بر پایه پیل سوختی اکسید جامد به همراه گاز سازی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۲۰۱۸؛ ۳۱۷:۴۸–۲۸.
- <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.11.039>.
- [۹] عبدالعلی پورعدل م، بررسی قانون اول و دوم یک سیستم جدید جهت تولید توان، گرمایش، هیدروژن با استفاده از سیستم پیل سوختی پلیمری. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۲۰۲۴؛ ۵۴:۹۹:۱۰۸.
- <https://doi.org/10.22034/JMEUT.2024.61594.3409>.
- [10] Naziri A, Motallebzadeh R, Ebrahimpour A, Javani N. Innovative Hybrid Energy System Integrating MCFC and ORC for Efficient Waste Heat Utilization and Near-Zero Carbon Emissions. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering* 2025;44:2388–401. <https://doi.org/10.30492/IJCCE.2025.2058708.7085>.
- [11] Zainal ZA, Ali R, Lean CH, Seetharamu KN. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Convers Manag* 2001;42:1499–515. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00078-9).
- [12] Landau L, Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey M. Fundamentals of engineering thermodynamics. John Wiley & Sons; 2010.
- [13] Soltani S, Mahmoudi SMS, Yari M, Rosen M a. Thermodynamic analyses of an externally fired gas turbine combined cycle integrated with a biomass