

تحلیل جامع ترمودینامیکی سیستم کم کربن بر پایه ریفرمینگ بخار آب با سوخت بیوگاز و ادغام شده با چرخه SCO_2 به منظور تولید همزمان هیدروژن، توان و گرما

فرهاد فیروزی

مرتضی یاری*

وحید زارع

فرامرز رنجبار

علی اکبر درآبادی زارع

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، f.firouzy1363@gmail.com

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، myari@tabrizu.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، v.zare@uut.ac.ir

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، sfrgg.ranjbar@gmail.com

پژوهشگر فرا دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، darabadi.aliakbar@gmail.com

چکیده

با توجه به نیاز روزافزون به سیستم‌های پاک و پربازده، این پژوهش به بررسی یک چرخه نوین تولید همزمان هیدروژن، توان و گرما بر پایه ریفرمینگ بخار متان (SMR) می‌پردازد. در این سیستم، گرمای مورد نیاز فرایند ریفرمینگ از طریق احتراق بیوگاز تأمین شده و به‌منظور بازیابی انرژی، از چرخه برایتون دی‌اکسید کربن فوق بحرانی (SCO_2) استفاده شده است. مدل‌سازی جامع ترمودینامیکی با تکیه بر تحلیل انرژی و اگزرژی انجام شده و رفتار سیستم تحت شرایط مختلف عملیاتی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی و اگزرژی سیستم به‌ترتیب برابر 84.96% و 59.89% بوده و آهنگ تولید هیدروژن به 1.35 تن بر ساعت می‌رسد. همچنین، محفظه احتراق با سهم 64.5% بیشترین تخریب اگزرژی را دارد. تحلیل‌های پارامتری نشان می‌دهد که افزایش نسبت بخار به کربن (S/C) و دمای ریفرمینگ باعث افزایش تولید هیدروژن می‌شود، اما در عین حال، تولید خالص توان را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: هیدروژن، ریفرمینگ بخار آب، بیوگاز، گاز سنتز، اگزرژی، چرخه SCO_2 .

Comprehensive Thermodynamic Analysis of Low-Carbon System Based on Steam Methane Reforming Fueled by Biogas and Integrated with SCO_2 Cycle for the Cogeneration of Hydrogen, Power, and Heat

F. Frouzy

M. Yari

V. Zare

F. Ranjbar

A. A. Darabadi Zare

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Given the increasing demand for clean and high-efficiency systems, this study investigates a novel integrated cycle for the cogeneration of hydrogen, power, and heat based on steam methane reforming (SMR). In the proposed system, the thermal energy required for the reforming process is supplied through biogas combustion, and a supercritical carbon dioxide (SCO_2) Brayton cycle is employed to recover waste heat and enhance system performance. A comprehensive thermodynamic model is developed using energy and exergy analysis, and the system's behavior is examined under various operating conditions. The results indicate that the energy and exergy efficiencies of the system reach 84.96% and 59.89% , respectively, with a hydrogen production rate of 1.35 ton/hr. Furthermore, the combustion chamber accounts for the highest exergy destruction, contributing 64.5% of the total. Parametric analyses reveal that increasing the steam-to-carbon (S/C) ratio and reforming temperature leads to higher hydrogen production, while simultaneously reducing the net power output.

Keywords: Hydrogen, Steam methane reforming (SMR), Synthesis gas, Biogas, exergy, S- CO_2 cycle.

۱- مقدمه

که به دلیل بازدهی بالا و عدم تولید آلاینده‌های زیست محیطی، به عنوان یک حامل انرژی پاک و کارآمد شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی بر روی روش‌های تبدیل گاز طبیعی به گاز سنتزی که به طور عمده شامل هیدروژن، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن می‌باشد، صورت گرفته است [۱].

هیدروژن یکی از منابع انرژی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است و می‌تواند یکی از مطلوب‌ترین منابع پاک حامل انرژی با انتشار آلودگی صفر باشد زیرا هیدروژن علاوه بر تراکم انرژی بسیار زیاد، هنگام احتراق نیز هیچ‌گونه انتشارات آلودگی ندارد و محصول جانبی

گرمایش جهانی، آلودگی محیط‌زیست و بحران انرژی از چالش‌های اساسی جوامع بشری محسوب می‌شوند. در این راستا، توسعه سیستم‌های چند منظوره با بازدهی بالا و اثرات زیست محیطی کمتر، به ویژه در زمینه کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

متان به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی، به دلیل ارزش گرمایی بالا و آلودگی کمتر نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی، کاربرد گسترده‌ای دارد. از جمله مهم‌ترین کاربردهای آن، تولید هیدروژن است

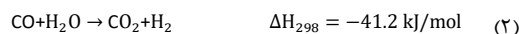
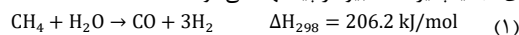
* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: myari@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۲/۰۳/۰۴

آن اگر با اکسیژن وارد واکنش شود فقط آب می باشد. همچنین یکی از ویژگی های مهم هیدروژن به عنوان سوخت، ارزش گرمایی و چگالی انرژی بالای آن در مقایسه با سوخت های دیگر می باشد و در نتیجه دارای بازده بالا و تولید انرژی زیاد در سیستم است. هیدروژن می تواند به عنوان سوخت ذخیره شود و در حمل و نقل، سیستم های تولید برق، موتورهای احتراق داخلی یا توربین ها مورد استفاده قرار گیرد. در ضمن هیدروژن می تواند به عنوان یک کالای مهم صنعتی در تولید آمونیاک و متانول، فرآوری مواد غذایی و ... مورد استفاده قرار گیرد. بازده انرژی هیدروژن ۱۲۲ کیلوژول بر کیلوگرم است که تقریباً ۲/۷۵ برابر بیشتر از سایر سوخت های هیدروکربن است. در ضمن، مطابق با هدف گذاری انرژی هیدروژن که توسط کمیسیون اروپا تدوین شده است، تولید مقادیر گسترده هیدروژن در جهان پس از سال ۲۰۳۰ آغاز خواهد شد [۲].

فرآیند ریفرمینگ بخار آب (SMR) به عنوان یک روش متداول برای تولید گاز سنتزی و هیدروژن در صنایع مختلف به کار گرفته می شود. این فرآیند گرماگیر در دماهای بین ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و تحت فشارهای ۳ تا ۲۵ بار انجام می شود [۳]. بیش از ۵۰ درصد از نیاز جهانی به هیدروژن از طریق این فناوری تولید هیدروژن تأمین می شود [۴]. ریفرمینگ بخار آب به عنوان یک فرآیند استاندارد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه شناخته می شود که در آن هیدروژن از طریق واکنش بخار آب و متان در حضور یک کاتالیزور و در دماهای بالا تولید می گردد [۵]. فرآیند تولید هیدروژن از طریق ریفرمینگ در معادلات (۱) تا (۳) نشان داده شده است. این معادلات نشان دهنده این است که برای تأمین انرژی گرمایی مورد نیاز واکنش، احتراق متان اضافی در محفظه احتراق ضروری است. با این حال، این فرآیند احتراق به دلیل اتلاف زیاد گرما و افزایش انتشار CO_2 با چالش های زیست محیطی همراه است. به منظور کاهش این اثرات منفی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند بیوگاز پیشنهاد می شود.



بیوگاز یک منبع انرژی تجدیدپذیر است که از هضم بی هوازی مواد آلی در محیط های فاقد اکسیژن و با کمک میکروارگانیسم ها تولید می شود. این گاز عمدتاً شامل متان و دی اکسید کربن است و ممکن است حاوی مقادیر کمی از گازهای اضافی مانند هیدروژن سولفید (H_2S) نیز باشد [۵]. در سال های اخیر، پژوهش های متعددی در زمینه تولید هیدروژن از روش های مختلف صورت گرفته است. در اینجا به برخی از جدیدترین یافته ها اشاره می شود.

وانگ و همکاران [۶] یک سیستم نوآورانه پیل سوختی را ارائه کردند که ریفرمینگ بخار متان را در فرآیند خود ادغام کرده و از دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد بررسی قرار داده است. این سیستم به طور همزمان برق، هیدروژن و گرما تولید می کند. نتایج نشان داد که بازده انرژی و اگزرژی سیستم به ترتیب ۴/۴۷٪ و ۷/۴۵٪ است. این مقادیر در شرایط عملیاتی شامل (S/C) برابر با ۳، دمای راکتور ۷۰۰ درجه سلسیوس و آهنگ مصرف هیدروژن در پیل سوختی ۰/۸ به دست آمده است. در مطالعه ای دیگر، قوامی و همکاران [۷] بازده انرژی و اگزرژی یک سیستم تولید همزمان برق و هیدروژن را مورد بررسی قرار دادند.

طراحی این سیستم شامل یک توربین گاز (GT)، یک سیستم بازیافت گرمای ترکیبی (MHR) و یک راکتور ریفرمینگ بخار بیوگاز بود. این سیستم توانست با ظرفیت ۲۶۰ مگاوات برق تولید کرده و هیدروژن را با نرخ ۰/۲۱۷ کیلوگرم بر ثانیه تولید کند و در نهایت، به بازده اگزرژی ۵۱٪ دست یابد. در تحقیق دیگری، هسون و همکاران [۸] از بازیابی گرمای گازهای خروجی موتور برای تولید هیدروژن از طریق ریفرمینگ بخار متانول استفاده کردند و نشان دادند که بازده تولید هیدروژن ۷۵٪ و میزان تولید هیدروژن به ازای هر واحد حرارت خروجی، ۱/۶ مول برمگاژول بوده است. همچنین، سیمپسون و همکاران [۹] ارزیابی های انرژی و اگزرژی فرآیند ریفرمینگ بخار متان برای تولید هیدروژن را با معرفی یک سیستم جدید ارائه کردند. آن ها اثرات پارامترهای مختلف را بر تولید هیدروژن، بازده انرژی و اگزرژی، و تخریب اگزرژی در اجزای مختلف سیستم بررسی نمودند. نتایج نشان داد که تولید هیدروژن با افزایش دما، به ویژه تا دمای ۹۰۴ K، افزایش می یابد که این امر با تخریب بیشتر اگزرژی در راکتور ریفرمینگ همراه است. علاوه بر این، آن ها دریافتند که ۴۲/۸٪ از اتلاف اگزرژی ناشی از فرآیند احتراق در راکتور بوده است با بهینه سازی پارامترهای کلیدی مانند دمای راکتور، فشار و (S/C)، بازده گرمایی سیستم را می توان به ۷۱/۱٪ افزایش داد. غایی و همکاران [۱۰] یک سیستم تولید همزمان برق و هیدروژن را از جنبه های انرژی و اگزرژی، بهینه سازی و تحلیل کردند. سیستم پیشنهادی آن ها ترکیبی از ریفرمینگ بخار بیوگاز و چرخه رانکین آلی (ORC) است که از گرمای هدررفته حاصل از فرآیند ریفرمینگ بخار برای به حرکت درآوردن چرخه رانکین استفاده می کند. در این تحقیق، چهار سیال کاری مختلف شامل R113، R600، R123 و R245fa مورد ارزیابی قرار گرفت. از میان اینها، سیال R600 به دلیل مزایای زیست محیطی و بازده بالا پیشنهاد شد. نتایج بهینه سازی نشان داد که بازده اگزرژی سیستم ۴۷/۸۹٪ است، و تولید هیدروژن به میزان ۹۱ کیلوگرم در ساعت و تولید توان ۱۵/۹ کیلووات می باشد. صالحی و همکاران [۱۱] یک تحلیل ترمودینامیکی از راکتورهای تولید هیدروژن را با استفاده از روش های اکسیداسیون جزئی و ریفرمینگ بخار با گاز طبیعی انجام دادند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان تولید هیدروژن و بازده کلی سیستم بررسی شد. نتایج نشان داد که بازده اگزرژی در فرآیند ریفرمینگ بخار نسبت به اکسیداسیون جزئی، بالاتر است، به طوری که این مقدار برای ریفرمینگ بخار ۷۳٪ و برای اکسیداسیون جزئی ۶۶٪ به دست آمد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل ها نشان داد که افزایش (S/C) در ورودی راکتور، همراه با افزایش دما، منجر به بهبود ۶۷/۲٪ در بازده اگزرژی فرآیند ریفرمینگ بخار می شود. در نهایت، زارع و همکاران [۳] یک سیستم یکپارچه را که به طور همزمان هیدروژن، گرما و برق را از طریق ریفرمینگ متان و حلقه شیمیایی احتراق^۱ تولید می کند، از نظر عملکرد انرژی، اگزرژی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که حلقه احتراق شیمیایی، گرمای لازم برای فرآیند ریفرمینگ متان را تأمین می کند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که بازده اگزرژی سیستم پیشنهادی ۵۲٪ است.

^۱ Chemical looping combustion

پژوهش حاضر با هدف طراحی، مدل سازی و تحلیل یک سیستم نوین تولید انرژی با رویکرد انتشار کربن پایین انجام شده است. در این سیستم، تولید هم زمان هیدروژن، برق و گرما از طریق ترکیب فرآیند ریفرمینگ بخار متان (SMR)، بازیافت گرمایی و استفاده از انرژی تجدیدپذیر بیوگاز امکان پذیر شده است. به جای بهره گیری از منابع فسیلی برای تأمین گرمای بالای مورد نیاز در واکنش ریفرمینگ، از بیوگاز به عنوان منبع گرمایی تجدیدپذیر استفاده شده است که به صورت اساسی سیستم را از فرآیندهای کربن محور دور می سازد.

نوآوری اصلی سیستم پیشنهادی در رویکرد یکپارچه و کم کربن آن برای تولید هیدروژن، برق و گرما با استفاده از منابع زیستی نهفته است. تلفیق یک چرخه بازیافت گرما با دی اکسید کربن فوق بحرانی (S-CO_2) جهت استفاده از گرمای تلف شده حاصل از احتراق بیوگاز، موجب افزایش بازده تولید برق شده و بهبود چشمگیری در کارایی کلی سیستم فراهم می آورد. ترکیب انرژی تجدیدپذیر، بازیافت گرمایی مؤثر و تمرکز بر عملکرد با حداقل انتشار کربن، این سیستم را از سایر روش های متداول متمایز می سازد. اجزای اصلی سیستم شامل راکتور ریفرمینگ، راکتور شیف ت گاز، چرخه دی اکسید کربن فوق بحرانی، محفظه احتراق، واحد PSA برای جداسازی هیدروژن تولیدی، و مبادله کن های گرمایی می باشد.

پس از شبیه سازی کامل سیستم از منظر انرژی و اگزرژی، اجزای اصلی مؤثر در تخریب اگزرژی شناسایی شده و نرخ جریان اگزرژی در کل سیستم ترسیم و تحلیل گردیده است. در نهایت، برای تعیین پارامترهای کلیدی مؤثر بر عملکرد ترمودینامیکی سیستم، یک مطالعه پارامتریک جامع انجام و تفسیر شده است. هدف نهایی از این پژوهش، ارائه یک رویکرد کاربردی و بهینه برای تولید هیدروژن پاک با بهره وری بالا و آلایندگی محدود در بستر صنعتی است.

۲- توصیف سیستم

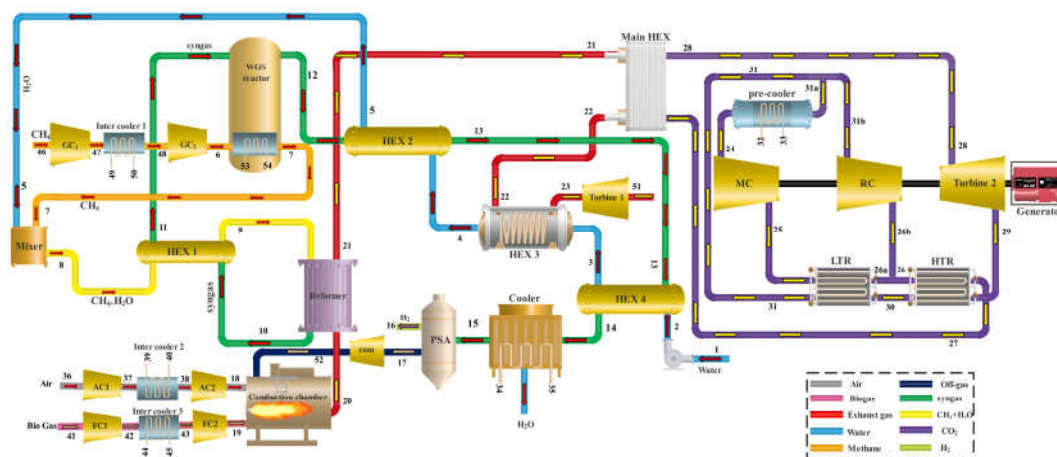
سیستم سه گانه تولید هم زمان هیدروژن، توان و گرما در شکل ۱ نمایش داده شده است. این سیستم شامل راکتور ریفرمینگ متان- بخار آب (SMR) بوده که با یک محفظه احتراق بیوگازسوز و چرخه تولید توان مبتنی بر دی اکسید کربن فوق بحرانی (SCO_2) ترکیب شده است. از آنجا که فرآیند ریفرمینگ بخار آب - متان یک واکنش گرماگیر است، در این طرح پیشنهادی، بیوگاز به عنوان یک منبع تجدیدپذیر جایگزین سوخت های فسیلی شده و انرژی گرمایی لازم برای واکنش را تأمین می کند. در محفظه احتراق، هوای ورودی و بیوگاز ترکیب شده و گازهای حاصل از احتراق (جریان شماره ۲۰) برای تأمین انرژی گرمایی مورد نیاز فرآیند ریفرمینگ بخار آب مورد استفاده قرار می گیرند. آب با فشار محیط ۱ بار و دمای ۲۵ درجه سلسیوس از نقطه ۱ وارد پمپ شده و فشار آن تا ۱۰ بار افزایش می یابد. این آب سپس وارد مبادله کن گرمایی (HEX4) می شود و با جریان گاز سنتزی تبادل گرما کرده و به حالت مایع اشباع درمی آید. پس از آن، مایع اشباع وارد مبادله کن گرمایی (HEX3) شده و به بخار اشباع تبدیل می شود. در ادامه، این بخار از مبادله کن گرمایی (HEX2) عبور کرده و به حالت بخار فوق گرم درمی آید. در مرحله بعد، بخار فوق گرم با گاز متان که فشار آن از

طریق یک کمپرسور دو مرحله ای به ۱۰ بار افزایش یافته است، مخلوط می شود. این مخلوط بخار و متان از مبادله کن گرمایی (HEX1) عبور کرده و سپس وارد ریفرمر می شود. در ریفرمر، واکنش در فشار ۱۰ بار و دمای عملیاتی ۸۰۰ درجه سلسیوس که به شدت گرماگیر است، انجام می گیرد. گازهای سنتزی خروجی از ریفرمینگ پس از تبادل گرما در مبادله کن گرمایی، به منظور افزایش بازده تولید هیدروژن وارد راکتور شیف ت گاز-آب (WGS) می شوند. این واکنش در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس انجام می شود که یک واکنش گرما زاده بوده و از گرمای آن برای گرم شدن متان (جریان ۷-۶) و سایر نیازهای گرمایی سیستم، استفاده شده است. سپس گازها جهت تبادل حرارت وارد مبادله کن های گرمایی شده و در نهایت با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس وارد خنک کننده (Cooler) می شوند. بخار آب از گازها جدا شده و گازهای باقی مانده با دمای ۴۰ درجه سلسیوس برای جداسازی هیدروژن وارد واحد PSA می شود. در این مرحله، هیدروژن با خلوص بیش از ۹۹ درصد در نقطه ۱۶ جدا و ذخیره می شود. گازهای برگشتی از PSA که فشار آن ها افت کرده است، وارد کمپرسور شده و فشار آن ها به ۵ بار افزایش می یابد. این گاز های باقیمانده ($\text{CO-CH}_4\text{-CO}_2$) همراه با سوخت بیوگاز و هوایی که فشار آن ها نیز توسط کمپرسور دو مرحله ای افزایش یافته است، وارد محفظه احتراق می شوند. واکنش احتراق کامل در محفظه در دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس و با در نظر گرفتن هوای اضافی انجام می گیرد. گرمای حاصل از این واکنش برای تأمین گرمای مورد نیاز ریفرمینگ استفاده می شود. محصولات احتراقی خروجی از محفظه احتراق، پس از عبور از ریفرمر، وارد مبادله کن گرمایی اصلی (Main HEX) چرخه برایتون با تراکم مجدد با سیال عامل کربن دی اکسید فوق بحرانی می شوند. در این مرحله، تبادل گرما انجام شده و محصولات احتراقی همچنان با دما و فشار مناسب وارد توربین ۱ (جریان ۲۳) برای تولید توان می شوند و در نهایت، این گازها با دمای تقریبی ۱۵۵/۸ درجه سلسیوس (نقطه ۵۱) به محیط دفع می شوند. همچنین در ادامه به منظور بازیافت و استفاده بیشتر از محصولات احتراق (جریان ۲۲-۲۱)، تولید توان توسط چرخه برایتون تراکم مجدد با سیال عامل کربن دی اکسید فوق بحرانی نیز انجام می گیرد.

۲-۱- فرضیات سیستم پیشنهادی

در این مطالعه، برای مدل سازی ترمودینامیکی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۲۳ و ۱۲]:

- فرآیندها در همه اجزاء حالت پایا در نظر گرفته می شود.
- گازها ایده آل در نظر گرفته می شود.
- تأثیر تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز است
- افت فشار در اتصالات نادیده گرفته می شود.
- کل اجزاء سیستم آدیاباتیک در نظر گرفته شده است.
- ترکیب هوا شامل ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن است.
- ترکیب بیوگاز شامل ۶۰٪ متان و ۴۰٪ دی اکسید کربن است.



شکل ۱- شماتیک چرخه‌ی پیشنهادی

سایر پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی سیستم، در جدول ۱ آورده شده‌اند:

جدول ۱- پارامترهای ورودی در چرخه پیشنهادی [۱۹-۲۳]

مقادیر	پارامترهای طراحی
۲۹۸/۱۵	دمای محیط (K)
۱۰۱/۳	فشار محیط (kPa)
۱	دبی جرمی متان (kg/s)
۳	نسبت مولی بخار به کربن (-)
۸۰۰	دمای عملیاتی رآکتور SMR (°C)
۱۰	فشار عملیاتی رآکتور SMR (bar)
۴۰۰	دمای عملیاتی رآکتور WGS (°C)
۹۰٪	بازده PSA
۱۲۰۰	دمای محفظه احتراق (°C)
۵	فشار محفظه احتراق (bar)
۷۴۰۰	فشار ورودی در کمپرسور اصلی چرخه SCO ₂ (kPa)
۳۲	دمای ورودی در کمپرسور اصلی چرخه SCO ₂ (°C)
۵۵۰	دمای سیال ورودی به توربین در چرخه SCO ₂ (°C)
۸۶٪	بازده مبادله کن‌های گرمایی در چرخه SCO ₂
۸۵٪	بازده ایزنتروپیک کمپرسور
۹۰٪	بازده ایزنتروپیک توربین

۳- مدلسازی و تحلیل ترمودینامیکی

۳-۱- تحلیل انرژی

به‌منظور تحلیل ترمودینامیکی و مدلسازی چرخه، هر یک از اجزای آن به‌عنوان حجم کنترل در نظر گرفته‌شده است و قوانین بقای جرم، بقای انرژی و قانون دوم ترمودینامیک بر آن اعمال‌شده است و معادلات تعادل شیمیایی مبتنی بر حداقل سازی انرژی آزاد گیبس برای تعیین ترکیب محصولات واکنش‌های ریفرمینگ بکار رفته است. از نرم افزار EES به عنوان ابزار اصلی در تمامی محاسبات استفاده شده است. بقای جرم و انرژی به‌صورت زیر بیان می‌شوند [۱۳، ۲۴]:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (۴)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (۵)$$

۳-۲- تحلیل اگزرژی

آنالیز قانون دوم بر اساس مفهوم اگزرژی استوار است. اگزرژی عبارت است از بیشترین کار در دسترس یک سیستم، وقتی آن سیستم به تعادل با محیط اطراف خود (حالت مرده) می‌رسد. بسته به نوع تعادلی که سیستم با محیط داشته باشد، می‌تواند دارای اگزرژی فیزیکی، اگزرژی جنبشی، اگزرژی پتانسیل و اگزرژی شیمیایی باشد. با توجه به اینکه در ادبیات فن مجموع اگزرژیهای فیزیکی، جنبشی و پتانسیل به‌عنوان اگزرژی ترمومکانیکی شناخته می‌شود که معمولاً از اگزرژی‌های جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر می‌شود، لذا اگزرژی یک سیستم ترمودینامیکی را می‌توان به دو بخش اگزرژی ترمومکانیکی و اگزرژی شیمیایی تقسیم‌بندی کرد [۲۵، ۱۳].

$$E_{tot} = E_{th} + E_{ch} \quad (۶)$$

$$E_{th} = E_{ph} + E_{pt} + E_{kn} \quad (۷)$$

$$\dot{E}_{th} = \dot{E}_{ph} = \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0)) \quad (۸)$$

$$\dot{E}^{CH} = \sum x_i \dot{E}_i^{CH} + \dot{R} T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (۹)$$

یکی از مزایای کلیدی تحلیل اگزرژی، توانایی آن در ارزیابی کمی میزان تخریب اگزرژی در یک سیستم است. این پارامتر ناشی از برگشت‌ناپذیری‌های موجود در حجم کنترل می‌باشد. منابع اصلی برگشت‌ناپذیری در سیستم‌های گرمایی شامل احتراق، واکنش‌های شیمیایی، انتقال گرما، اختلاط مواد، انبساط ناگهانی و واکنش‌های هسته‌ای هستند. میزان تخریب اگزرژی هر جزء در سیستم را می‌توان از موازنه اگزرژی برای آن جزء بدست آورد که معادله موازنه به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$\dot{E}_Q - \dot{E}_W = \sum \dot{m}_{out} e_{out} - \sum \dot{m}_{in} e_{in} + \dot{E}_D \quad (۱۰)$$

۳-۳- ریفرمینگ متان-بخار آب

در فرایند ریفرمینگ، مخلوطی از بخار و هیدروکربنها یا سوخت‌های تجدیدپذیر تا دمای ۷۰۰-۱۰۰۰ درجه سلسیوس در رآکتوری حاوی کاتالیزور گرم می‌شود تا گاز سنتز و برخی گازهای

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \sum_1^6 \dot{E}_Q + \dot{E}_{H_2}}{\dot{E}_{CH_4} + \dot{E}_{Biogas} + \dot{E}_1 + \dot{E}_{36}} \quad (22)$$

که در آن $\dot{W}_{net}$ ، $\sum_1^6 \dot{Q}_{Heating}$ و $\sum \dot{E}_Q$ بدین صورت تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{net-sco2} + \dot{W}_{t1} - \dot{W}_{AC1} - \dot{W}_{AC2} - \dot{W}_{FC1} - \dot{W}_{FC2} - \dot{W}_{GC1} - \dot{W}_{GC2} - \dot{W}_p \quad (23)$$

$$\dot{W}_{net-sco2} = \dot{W}_{t2} - \dot{W}_{mc} - \dot{W}_{rc} \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{net} = \sum_1^6 \dot{Q}_{Heating} = \dot{Q}_{pre-cooler} + \dot{Q}_{cooler} + \dot{Q}_{ic1} + \dot{Q}_{ic2} + \dot{Q}_{ic3} + \dot{Q}_{WGS} \quad (25)$$

$$\sum_1^6 \dot{E}_Q = (\dot{E}_{33} - \dot{E}_{32}) + (\dot{E}_{35} - \dot{E}_{34}) + (\dot{E}_{50} - \dot{E}_{49}) + (\dot{E}_{40} - \dot{E}_{39}) + (\dot{E}_{45} - \dot{E}_{44}) - (\dot{E}_{54} - \dot{E}_{53}) \quad (26)$$

علاوه بر بازده انرژی کلی که در بالا تعریف شد، می‌توان برای هر یک از سه محصول مفید، بازده انرژی جداگانه‌ای تعریف کرد. بر این اساس، بازده الکتریکی، بازده گرمایی، و بازده تولید هیدروژن سیستم به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta_e = \frac{\dot{W}_{net}}{(\dot{m}_{CH_4} LHV_{CH_4}) + (\dot{m}_{Biogas} * LHV_{Bio\ gas})} \quad (27)$$

$$\eta_{Heating} = \frac{\dot{Q}_{net}}{(\dot{m}_{CH_4} LHV_{CH_4}) + (\dot{m}_{Biogas} LHV_{Biogas})} \quad (28)$$

$$\eta_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{(\dot{m}_{CH_4} LHV_{CH_4}) + (\dot{m}_{Biogas} LHV_{Biogas})} \quad (29)$$

۴- نتایج و تحلیل

در این بخش ابتدا اعتبارسنجی برای اجزای مختلف سیستم‌های پیشنهادی انجام شده، سپس کلیه سیستم‌ها به صورت مستقل از دیدگاه‌های انرژی، انرژی شبیه‌سازی شده و در مرحله آخر تأثیر پارامترهای مختلف ترمودینامیکی بر روی معیارهای عملکردی سیستم مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها گزارش می‌شود.

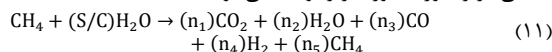
۴-۱- اعتبار سنجی راکتور ریفرمینگ

برای اعتبارسنجی نتایج داده‌های مربوط به ریفرمینگ متان، از مرجع [۲۳] استفاده شده است. در این مطالعه، اوه و همکاران [۲۳] امکان سنجی بهبود عملکرد یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد را از طریق به کارگیری یک موتور احتراق تراکمی به عنوان جایگزینی برای فرایند ریفرمینگ متان بررسی کرده‌اند. در شکل ۲، تأثیر نسبت مولی بخار به کربن بر میزان جریان مولی اجزای مختلف محصولات ریفرمینگ در خروجی راکتور در دمای عملیاتی ۸۰۰ °C نشان داده شده همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های گزارش شده مورد مقایسه قرار گرفته است.

۴-۲- اعتبار سنجی چرخه SCO_2

جدول ۲ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ترمودینامیکی چرخه S- CO_2 را با داده‌های گزارش شده در مرجع [۱۹] شامل توان مصرفی کمپرسور، توان خروجی توربین و آهنگ انتقال گرما در مبادله کن گرمایی دما بالا (HTR) و دما پایین (LTR) مقایسه می‌کند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، بیشترین میزان خطای نسبی در مدل‌سازی چرخه S- CO_2 مربوط به کمپرسور اصلی بوده و مقدار آن حدود ۰/۳۲٪ است

دیگر با درصد کمتری تولید شوند. عملکرد این واحد به شدت به پارامترهای عملیاتی اصلی مانند نسبت بخار ورودی به متان، دما و فشار بستگی دارد. علاوه بر این، ترکیب گاز سنتز خروجی از ریفرمر نیز تابعی از این پارامترهای عملیاتی است. معادله حاکم برای اصلاح گاز طبیعی در راکتور به صورت زیر نوشته می‌شود:



ضرایب (n_1, n_2, n_3, n_4) و (n_5) نشان‌دهنده‌ی اجزای مولی مخلوط هستند و عبارت "S/C" به نسبت دبی مولی بخار آب به متان اشاره دارد. برای تعیین این ضرایب، موازنه‌ی مولی اجزای واکنش همراه با انرژی آزاد گیبس واکنش‌های تعادلی به کار گرفته می‌شود. واکنش‌های شیمیایی کلی، عبارت انرژی آزاد گیبس و ثابت‌های تعادلی مربوطه به صورت زیر اعمال می‌شوند [۲۵]:

معادله کمکی واکنش شیف:



$$\Delta G_1 = G(H_2) + G(CO_2) - G(CO) - G(H_2O) \quad (13)$$

$$K_{p1} = e^{\frac{-\Delta G_1}{(RT)}} \quad (14)$$

$$K_{p1} = \frac{n_1 n_4}{n_2 n_3} \quad (15)$$

و معادله کمکی واکنش ریفرمینگ:



$$\Delta G_2 = 3 G(H_2) + G(CO) - G(H_2O) - G(CH_4) \quad (17)$$

$$K_{p2} = e^{\frac{-\Delta G_2}{(RT)}} \quad (18)$$

$$K_{p2} = \frac{n_3 n_4^3}{n_2 n_5} \left(\frac{P_{ref}}{P_{atm} n_{tot}} \right)^2 \quad (19)$$

که در آن ΔG_s ، R ، K_{ps} ، T ، P_{atm} و P_{ref} به ترتیب نشان‌دهنده

تغییرات انرژی آزاد گیبس، ثابت‌های تعادل، ثابت گاز جهانی، فشار

اتمیسفر، دما و فشار راکتور هستند.

۴-۳- راکتور شیف

واکنش جابجایی گاز آب (شیفت)^۱ یکی از واکنش‌های افزایش تولید هیدروژن است که با واکنش‌دهنده‌های مونوکسید کربن و بخار مطابق معادله‌ی (۲۰) صورت می‌گیرد. هدف به حداقل رساندن مونوکسید کربن در مخلوط گاز و افزایش هیدروژن است این واکنش‌ها علاوه بر دما به پارامتر مهم دیگری نیز بستگی دارد، که S/C است. این واکنش در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود که یک واکنش گرما زاده بوده و از گرمای آن برای گرم شدن متان و سایر نیازهای گرمایی سیستم، استفاده شده است [۲۰].

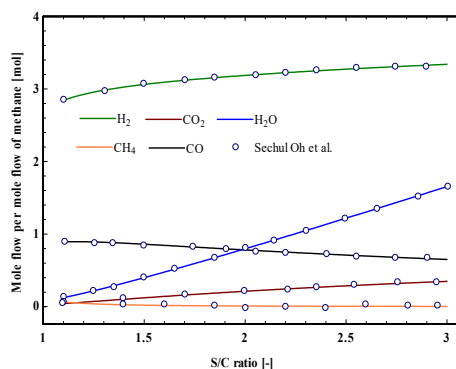


۵-۳- ارزیابی عملکرد

ارزیابی عملکرد فنی سیستم توسعه یافته بر اساس قوانین اول و دوم ترمودینامیک انجام می‌شود. بازده انرژی و انرژی برای کل سیستم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{W}_{net} + \sum_1^6 \dot{Q}_{Heating} + \dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{(\dot{m}_{CH_4} LHV_{CH_4}) + (\dot{m}_{Biogas} LHV_{Bio\ Gas})} \quad (21)$$

¹ Water-Gas shift Reaction



شکل ۲- نتایج به دست آمده از شبیه سازی ریفرمر و داده های ارائه شده در مرجع [۲۳]

جدول ۲ - نتایج چرخه S-CO₂ و داده های ارائه شده در مرجع [۱۹]

اجزاء	مرجع	مدل حاضر	خطا (%)
$\dot{Q}_{HTR}(MW)$	۵۷۱/۴	۵۷۱/۳۲	۰/۰۱
$\dot{Q}_{LTR}(MW)$	۴۶۳/۳۶	۴۶۳/۳۹	۰/۶۵
$\dot{W}_{Tur}(MW)$	۳۹۳/۲	۳۹۳/۲۸	۰/۰۳
$\dot{W}_{MC}(MW)$	۷۶/۰۹	۷۶/۳۴	۰/۳۲
$\dot{W}_{RC}(MW)$	۷۳/۵۳	۷۳/۳۱	۰/۲۹

۴-۳- نتایج مدل سازی ترمودینامیکی

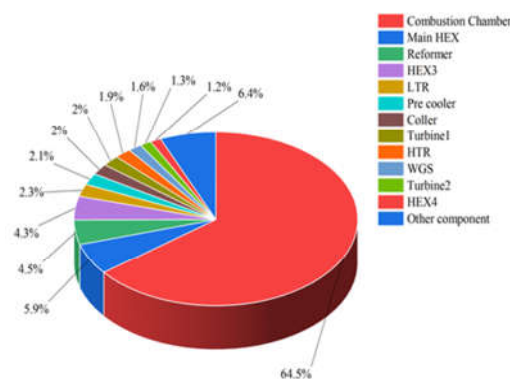
با استفاده از فرضیات و مقادیر ورودی ارائه شده در جدول ۱، سیستم ترکیبی پیشنهادی مطابق با شکل ۱ شبیه سازی شده است. نتایج مربوط به پارامترهای عملکردی این سیستم در جدول ۳ ارائه شده است. همان گونه که در این جدول مشاهده می شود، ظرفیت تولید هیدروژن در سیستم پیشنهادی برابر با ۱/۳۵ تن بر ساعت بوده و بازده تولید هیدروژن ۵۸/۸۶٪ محاسبه شده است. علاوه بر این، سیستم مذکور توان و گرمای خروجی به ترتیب معادل ۶/۵۶ مگاوات و ۱۹/۸۶ مگاوات تولید می کند که این مقادیر منجر به دستیابی به بازده های انرژی و اگزروی ۸۴/۹۶٪ و ۵۹/۸۹٪ می شوند.

جدول ۳- نتایج پارامترهای عملکردی در شبیه سازی سیستم

پارامتر	مقدار
دبی جرمی متان ورودی (kg/s)	۱
دبی جرمی بیوگاز مصرفی (kg/s)	۱/۹۲
بازده انرژی سیستم (%)	۸۴/۹۶
بازده اگزروی سیستم (%)	۵۹/۸۹
بازده الکتریکی سیستم (%)	۷/۸
بازده حرارت تولیدی (%)	۲۳/۶۳
بازده هیدروژن تولیدی (%)	۵۸/۸۶
آهنگ تولید هیدروژن (ton/hr)	۱/۳۵
توان خالص تولیدی (MW)	۶/۵۶
گرمای تولیدی (MW)	۱۹/۸۶

شکل ۳ سهم هر جزء در تخریب اگزروی را نشان می دهد. همان طور که مشخص است، بیشترین میزان تخریب اگزروی مربوط به محفظه ی احتراق است که تمام شرایط برگشت ناپذیری را داراست. علاوه بر این،

نمودار گراسمن^۱ در شکل ۴ ارائه شده است. این نمودار جریان های اگزروی را نمایش داده تا منابع برگشت ناپذیری در کل سیستم و توازن اگزروی هر جزء مشخص شود. همان گونه که مشاهده می شود بیشترین جریان اگزروی در خروجی از قسمت ریفرمینگ است که این بالا بودن جریان اگزروی به دلیل تغییر در اجزا و تولید گونه های جدید به واسطه واکنش شیمیایی است. همچنین با توجه به این نمودار، پس از محفظه احتراق که بیش از ۶۴/۵٪ از تخریب اگزروی کل سیستم را داراست، مبادله کن گرمایی اصلی (MHX) با ۶/۴٪ تخریب اگزروی در رتبه دوم قرار دارد که این میزان عمدتاً ناشی از برگشت ناپذیری های مرتبط با نرخ بالای انتقال حرارت است. همچنین، ریفرمر با ۵/۹٪ تخریب اگزروی در رتبه سوم قرار می گیرد که این مقدار به دلیل واکنش های شیمیایی انجام شده در این بخش می باشد.



شکل ۳- درصد تخریب اگزروی اجزا

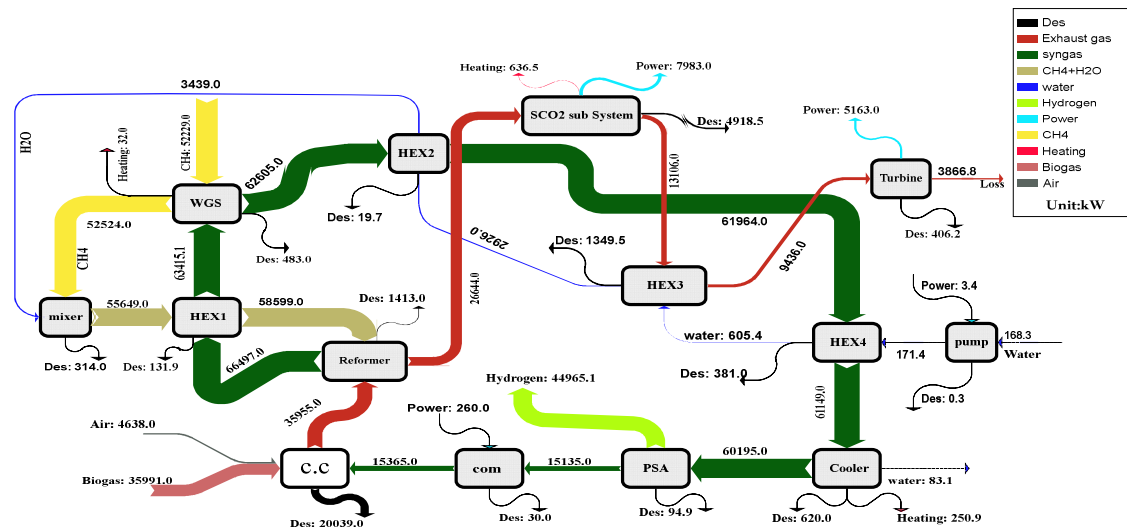
۴-۴- مطالعه پارامتری

در این بخش، تأثیر پارامترهای کلیدی طراحی و عملیاتی بر شاخص های عملکردی سیستم مورد بررسی قرار می گیرد. متغیرهای در نظر گرفته شده شامل (S/C) در فرآیند ریفرمینگ، دمای فرمینگ، دمای محفظه احتراق هستند. این پارامترها نقش تعیین کننده ای بر شاخص های عملکردی سیستم، از جمله بازده انرژی، بازده اگزروی، بازده الکتریکی، آهنگ تولید توان و گرما، آهنگ تولید هیدروژن و آهنگ مصرف سوخت دارند.

۴-۴-۱- تأثیر نسبت مولی بخار به کربن راکتور ریفرمینگ

شکل ۵ تأثیر نسبت بخار به کربن در فرآیند ریفرمینگ را بر عملکرد سیستم (بازده انرژی، بازده اگزروی، آهنگ تولید هیدروژن، توان و گرما) نشان می دهد. این نسبت به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در ریفرمینگ شناخته می شود. از دیدگاه ترمودینامیکی، نسبت بخار به کربن تأثیر مثبتی بر ترکیب گازهای خروجی از فرآیند ریفرمینگ دارد. با توجه به واکنش های تعادلی موجود در این فرآیند، افزایش نسبت بخار به کربن موجب بهبود بازده تولید هیدروژن شده

¹ Grossman



شکل ۴- نمودار گراسمن سیستم پیشنهادی

هیدروژن می‌تواند بازده فرآیند را از دیدگاه ترمودینامیکی بهبود بخشد. از سوی دیگر، افزایش دمای ریفرمینگ موجب افزایش مصرف سوخت در محفظه احتراق برای تأمین گرمای مورد نیاز واکنش‌های ریفرمینگ می‌شود. افزایش دمای ریفرمینگ منجر به کاهش دبی جرمی در چرخه $S-CO_2$ می‌شود. این کاهش به طور مستقیم عملکرد توربین $S-CO_2$ را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش توان خروجی آن می‌شود. علاوه بر این، به دلیل کاهش دما در ورودی توربین ۱ (نقطه ۲۳)، توان خروجی این توربین نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه، توان خالص خروجی کل سیستم کاهش می‌یابد، همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به تغییرات تولید گرما، باید توجه داشت که افزایش دمای ریفرمینگ منجر به کاهش تولید گرما در $\dot{Q}_{precooler}$ در چرخه SCO_2 می‌شود که ناشی از کاهش دبی جرمی سیال عامل است. این مسئله، عامل اصلی کاهش نرخ کلی تولید گرما است که بر تغییرات سایر اجزای تولیدکننده گرما غالب است. با افزایش دمای ریفرمینگ، مقدار بیشتری هیدروژن تولید می‌شود که در مراحل اولیه باعث بهبود بازده‌های انرژی و انرژی می‌شود. با این حال، اثرات کاهشی ناشی از کاهش نرخ تولید گرما، کاهش توان خالص خروجی و افزایش مصرف سوخت در محفظه احتراق، موجب می‌شود که بازده انرژی و انرژی در دماهای بالاتر تقریباً ثابت باقی بماند.

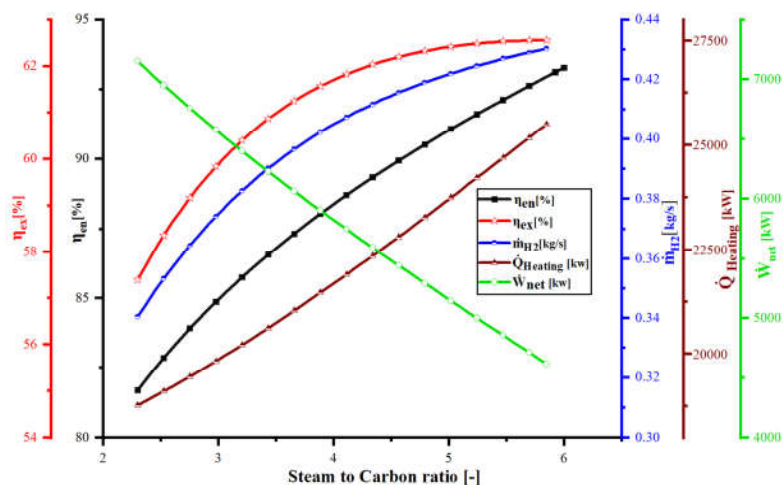
در شکل ۷، تأثیر همزمان افزایش دما و نسبت بخار به کربن در فرآیند ریفرمینگ بر بازده انرژی و انرژی کل سیستم بررسی شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، این دو کمیت از جمله پارامترهای کلیدی و مؤثر در عملکرد سیستم تولید هیدروژن محسوب می‌شوند. با افزایش این دو پارامتر، به دلیل افزایش تولید هیدروژن، بازده کلی سیستم نیز افزایش می‌یابد. با این حال، از دمای $T_{reforming} = 900^\circ C$ به بعد، بازده کل سیستم به یک مقدار ثابت می‌رسد و تغییری مشاهده نمی‌شود علاوه بر این، نمودار نشان می‌دهد که تأثیر پارامتر S/C در محدوده دماهای پایین‌تر ریفرمینگ چشمگیرتر است.

که این افزایش بر سایر پارامترها غالب بوده، در نتیجه بازده انرژی سیستم را افزایش می‌دهد. با افزایش نسبت S/C ، دبی جرمی سیال عامل کربن دی‌اکسید فوق بحرانی در چرخه کاهش می‌یابد. این کاهش دبی جرمی موجب کاهش توان تولیدی در توربین چرخه SCO_2 می‌شود. علاوه بر این، افزایش S/C منجر به کاهش دمای نقطه ۲۳ (ورودی به توربین ۱) شده که توان تولیدی این توربین را نیز کاهش می‌دهد. در نتیجه، کاهش توان تولیدی در توربین‌ها باعث کاهش توان خالص کل چرخه می‌شود. همچنین در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت بخار به کربن، آهنگ گرمای تولیدی کل سیستم افزایش می‌یابد. این امر عمدتاً به دلیل افزایش گرمای تولیدی در بخش خنک‌کننده سیستم هیدروژن ($\dot{Q}_{cooler}$) ناشی از افزایش دبی جرمی است که در مجموع باعث افزایش آهنگ گرمای تولیدی کل سیستم می‌شود. با افزایش نسبت S/C ، آهنگ دبی جرمی هیدروژن تولیدی و میزان کل گرمای تولیدی افزایش می‌یابد، که این امر بهبود بازده انرژی سیستم را تا نسبت بهینه $S/C = 5/5$ به همراه دارد. با این حال، افزایش بیشتر نسبت S/C منجر به کاهش توان خالص تولیدی سیستم و افزایش مصرف سوخت (بیوگاز) در محفظه احتراق می‌گردد، که تأثیری معکوس بر بازده سیستم دارد. تأثیر هم‌زمان این عوامل و انرژی‌های مرتبط با آن‌ها در نهایت باعث می‌شود که بازده انرژی سیستم پس از نسبت $S/C = 5/5$ تقریباً در یک سطح ثابت باقی بماند.

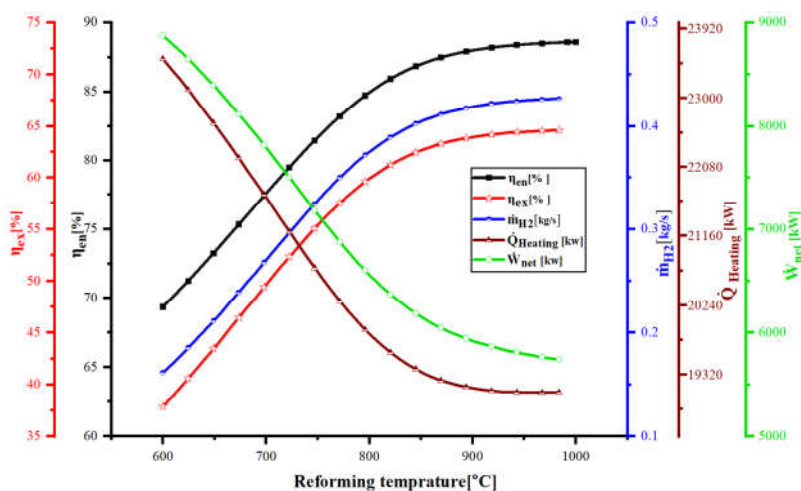
۴-۴-۲- تأثیر افزایش دمای عملیاتی راکتور ریفرمینگ

دمای ریفرمینگ یکی دیگر از متغیرهای عملیاتی کلیدی در فرآیند ریفرمینگ با بخار (SMR) محسوب می‌شود. شکل ۶ تأثیر دمای ریفرمینگ بر بازده انرژی، بازده انرژی، آهنگ تولید هیدروژن، توان خروجی و میزان تولید گرمای سیستم را نشان می‌دهد.

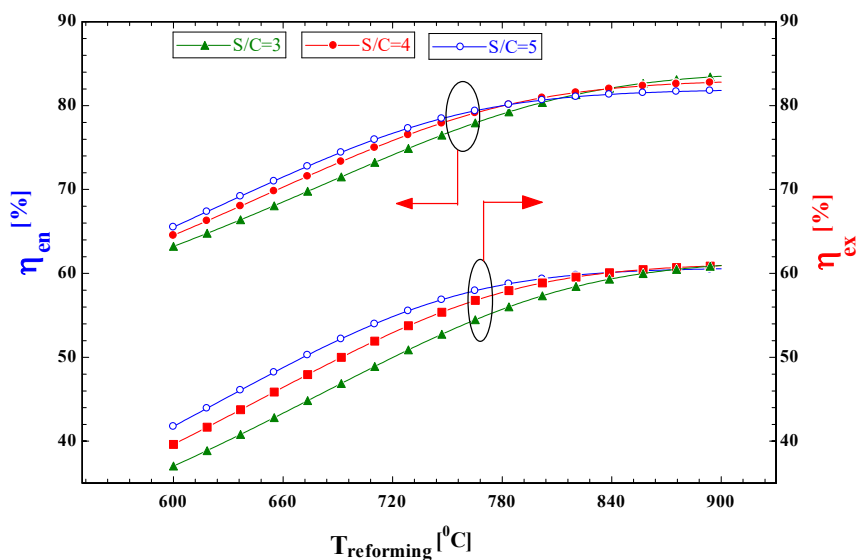
می‌توان استدلال کرد که با افزایش دمای ریفرمینگ و با در نظر گرفتن شرایط تعادلی واکنش‌های شیمیایی، هم کسر مولی و هم دبی جرمی هیدروژن در محصولات ریفرمینگ افزایش می‌یابد. این افزایش در تولید



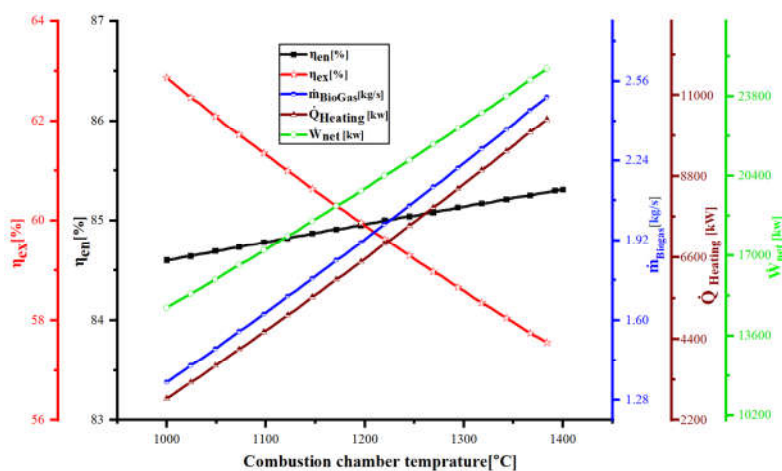
شکل ۵- تأثیر نسبت بخار به کربن راکتور ریفرمینگ بر پارامترهای ارزیابی سیستم



شکل ۶- تأثیر افزایش دمای راکتور ریفرمینگ بر پارامترهای ارزیابی سیستم



شکل ۷- تأثیر دمای ریفرمینگ بر بازده سیستم در نسبت‌های مختلف S/C



شکل ۸- تأثیر دمای محفظه احتراق بر پارامترهای ارزیابی سیستم

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک سیستم انرژی یکپارچه مبتنی بر فرآیند ریفرمینگ بخار متان (SMR) با استفاده از بیوگاز به عنوان سوخت تجدیدپذیر و چرخه بازیافت گرمای دی اکسیدکربن فوق بحرانی (S-CO₂) طراحی، مدل سازی و تحلیل شده است. این سیستم با هدف بهینه سازی عملکرد انرژی و انرژی و آلودگی های زیست محیطی، و امکان تولید هم زمان برق، گرما و هیدروژن توسعه یافته است. نتایج نشان می دهد که پیکربندی پیشنهادی می تواند با بهره وری بالا و انتشار نسبتاً پایین کربن، راهکاری پایدار و مقرون به صرفه در حوزه انرژی پاک ارائه دهد.

- در شرایط عملیاتی متداول، بازده انرژی سیستم برابر با ۸۴/۹۶٪ و بازده انرژی برابر با ۵۹/۸۹٪ به دست آمد.
- آهنگ تولید هیدروژن ۱/۳۵ تن در ساعت محاسبه شد و بازده تولید هیدروژن نیز ۵۸/۸۶٪ گزارش گردید.
- افزایش (S/C) موجب بهبود تولید هیدروژن اما کاهش توان خالص خروجی گردید، به طوریکه این افزایش تا محدوده بهینه (حدود ۳/۵ تا ۳/۶) مفید بوده و در مقادیر بیشتر، باعث افت عملکرد سیستم شد.
- افزایش دمای ریفرمینگ تا حدود ۹۰۰ درجه سلسیوس منجر به بهبود قابل توجه در بازده انرژی و انرژی شد. در حالی که افزایش دمای محفظه احتراق بازده انرژی را بهبود بخشید، اما منجر به کاهش جزئی در بازده انرژی گردید.
- محفظه احتراق، با سهمی بیش از ۶۴٪ از کل تلفات انرژی، به عنوان اصلی ترین منبع نابودی انرژی در سیستم شناخته شد و پس از آن، مبادله کن گرمایی اصلی و ریفرمر بیشترین سهم را داشتند.

این یافته ها نشان می دهد که سیستم کم کربن پیشنهادی از طریق ادغام SMR، بازیافت گرمای مؤثر و استفاده از بیوگاز تجدیدپذیر می تواند عملکرد بالایی در تولید هیدروژن، بازیابی انرژی و کنترل آلودگی داشته باشد.

۴-۳- تأثیر افزایش دمای محفظه احتراق

شکل ۸ تأثیر دمای محفظه احتراق را بر عملکرد کلی سیستم، شامل بازده انرژی و انرژی، نرخ مصرف سوخت زیستی (بیوگاز)، و میزان تولید گرما و توان، نشان می دهد. افزایش دمای محفظه احتراق باعث افزایش دبی مصرفی سوخت (بیوگاز) در محفظه احتراق می شود. این امر موجب افزایش دبی جرمی محصولات احتراق و دمای آنها در ورودی به توربین ۱ (نقطه ۲۳) می گردد که به افزایش توان تولیدی این توربین منجر می شود. همچنین، افزایش دمای محفظه احتراق باعث افزایش دبی جرمی سیال عامل کربن دی اکسید فوق بحرانی در چرخه می شود، که توان تولیدی توربین چرخه CO₂ را افزایش می دهد. در مجموع، این تغییرات به افزایش توان تولیدی کل سیستم منجر می شوند.

افزایش دبی جرمی سیال عامل چرخه CO₂ باعث افزایش آهنگ گرمای تولیدی در Q_{precooler} در چرخه CO₂ می شود. علاوه بر این، با افزایش دبی سوخت مصرفی در محفظه احتراق، نرخ گرمای تولیدی در اینترکولر بین کمپرسورهای سوخت بیوگاز Q_{ic3} نیز افزایش می یابد. این عوامل در نهایت آهنگ گرمای تولیدی کل سیستم را افزایش می دهند. با افزایش دبی جرمی بیوگاز و آهنگ توان و گرمای تولیدی کل سیستم، و ثابت ماندن دبی جرمی تولید هیدروژن، بازده انرژی سیستم کمی افزایش می یابد. این افزایش بازده ناشی از بهبود تولیدات گرمایی و توان است. با این حال افزایش دبی جرمی بیوگاز (که رابطه معکوس با بازده انرژی دارد) منجر به افزایش محدود این بازده انرژی می شود (افزایش بازده از ۸۴/۶٪ الی ۸۵/۳۱٪ می باشد).

افزایش دمای محفظه احتراق منجر به کاهش بازده انرژی سیستم می شود. دلیل این کاهش آن است که انرژی انتقال گرما، از خود آهنگ گرما کمتر می باشد و طبق معادله بازده انرژی، شیب افزایش انرژی سوخت مصرفی (که رابطه معکوس با بازده انرژی دارد) بر سایر تغییرات غلبه دارد و موجب کاهش بازده انرژی سیستم می شود، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است.

- [11] Salehi G, Farzin S. Analyzing and Comparing Energy and Exergy of POXR and SMR Reactors for Producing Hydrogen from Methane Gas. *Gas Processing Journal*. 2017;5(1):24-33.
- [12] Shen L, Liu S, Fu S, Wang Y, Zhou W, Bai B. Thermodynamic analysis and multi-criteria optimization of supercritical water gasification for polygeneration of hydrogen, heat, and electricity from plastic wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;100:284-95.
- [13] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran MJ. Thermal design and optimization: John Wiley & Sons; 1995.
- [14] Bayramoğlu K, Yılmaz S, Çoban MT. Numerical analysis of hydrogen production by methanol and methane steam reforming using compact reactors. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025;103238.
- [15] Liu Z, Ding J, Huang X, Liu Z, Yan X, Liu X, et al. Analysis of a hybrid heat and underwater compressed air energy storage system used at coastal areas. *Applied Energy*. 2024;354:122142.
- [16] Vandervort J, Kotsarini K, Strand C, Hanson RK, editors. Simultaneous Point Measurements of Temperature, Pressure, and Velocity Using Spectrally Resolved Laser-Induced Fluorescence of Atomic Potassium Vapor in Air. *AIAA SCITECH 2025 Forum*; 2025.
- [17] Liu Y, Shi Z, Li K, Wang Z, Tao J, Xu S, et al. Study on intrinsic reaction kinetics of coal char oxy-fuel combustion based on general surface activation function model. *Combustion and Flame*. 2025;273:113952.
- [18] Mithra SN, Ahankari SS. Phosphorylated Cellulose Nanocrystals/Polyvinyl Alcohol-L Arginine coating in Facilitated Transport Membranes for Biogas purification. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2025:100679.
- [19] Wu C, Wang S-s, Feng X-j, Li J. Energy, exergy and exergoeconomic analyses of a combined supercritical CO2 recompression Brayton/absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*. 2017;148:360-77.
- [20] Song H, Liu Y, Bian H, Shen M, Lin X. Energy, environment, and economic analyses on a novel hydrogen production method by electrified steam methane reforming with renewable energy accommodation. *Energy Conversion and Management*. 2022;258:115513.
- [21] Moon D-K, Park Y, Oh H-T, Kim S-H, Oh M, Lee C-H. Performance analysis of an eight-layered bed PSA process for H2 recovery from IGCC with pre-combustion carbon capture. *Energy Conversion and Management*. 2018;156:202-14.
- [22] Voldsund M, Jordal K, Anantharaman R. Hydrogen production with CO2 capture. *International Journal of Hydrogen energy*. 2016;41(9):4969-92.
- [23] Oh S, Song HH. Exergy analysis on non-catalyzed partial oxidation reforming using homogeneous charge compression ignition engine in a solid oxide fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(5):2943-60.
- [24] Zare AD, Saray RK, Mirmasoumi S, Bahloul K. Optimization strategies for mixing ratio of biogas and natural gas co-firing in a cogeneration of heat and power cycle. *Energy*. 2019;181:635-44.
- [25] Zare AAD, Yari M, Mahmoudi S. Exploring diverse pathways for low-carbon production of hydrogen, methanol, power and heat with enhanced solid carbon utilization efficiency. *Energy*. 2025;314:134071.

۶- فهرست علائم	
تخریب انرژی	$\dot{E}_D$ [kW]
دبی جریان	$\dot{m}$ [kg/s]
فشار	p [bar]
دما	T [°C]
تغییر تابع گیبس	ΔG
ثابت تعادلی	K
زیروندها	
کمپرسور هوا	AC
مبادله کن گرمایی	HEX
ریفرمینگ بخار متان	SMR
راکتور شیفت گاز-آب	WGS
محفظه احتراق	CC
واحد تصفیه گاز	PSA
علائم یونانی	
بازده الکتریکی	η_e
بازده انرژی	η_{ex}
بازده ایزنتروپیک	η_{is}
بازده انرژی	η_{en}
بازده تولید هیدروژن	η_{H_2}
بازده تولید گرما	$\eta_{Heating}$

۷- مراجع

- [1] Sharma S, Ghoshal SK. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015;43:1151-8.
- [2] Genovese M, Schlüter A, Scionti E, Piraino F, Corigliano O, Fragiaco P. Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(44):16545-68.
- [3] Zare AAD, Yari M, Nami H, Mohammadkhani F. Low-carbon hydrogen, power and heat production based on steam methane reforming and chemical looping combustion. *Energy Conversion and Management*. 2023;279:116752.
- [4] Alam S, Kumar JP, Rani KY, Sumana C. Comparative assessment of performances of different oxygen carriers in a chemical looping combustion coupled intensified reforming process through simulation study. *Journal of Cleaner Production*. 2020;262:121146.
- [5] Szablowski L, Wojcik M, Dybinski O. Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy*. 2025;134540.
- [6] Wang Z, Mao J, He Z, Liang F. Energy-exergy analysis of an integrated small-scale LT-PEMFC based on steam methane reforming process. *Energy Conversion and Management*. 2021;246:114685.
- [7] Gargari SG, Rahimi M, Ghaebi H. Thermodynamic analysis of a novel power-hydrogen cogeneration system. *Energy Conversion and Management*. 2018;171:1093-105.
- [8] Liao C-H, Horng R-F. Investigation on the hydrogen production by methanol steam reforming with engine exhaust heat recovery strategy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(9):4957-68.
- [9] Simpson AP, Lutz AE. Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming. *International journal of hydrogen energy*. 2007;32(18):4811-20.
- [10] Ghaebi H, Yari M, Gargari SG, Rostamzadeh H. Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen. *Renewable energy*. 2019;130:87-102.