Cost analysis of a zero-carbon hydrogen, power, and heat system using advanced nuclear and sorption-enhanced methane reforming

Reza Khaffafpour[1], Mortaza Yari*, Ali Akbar Darabadi Zare*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
*myari@tabrizu.ac.ir and darabadi.aliakbar@gmail.com

ABSTRACT

Fourth-generation very-high-temperature reactors, particularly when integrated with steam methane reforming and carbon dioxide capture processes, offer significant potential for large-scale hydrogen production with an environmentally conscious approach. However, limited research has been conducted on the design and economic evaluation of integrated Generation IV and steam methane reforming systems for nuclear hydrogen production, especially when considering a combined cycle as part of the overall power generation system. In this study, a combined hydrogen and power generation system, utilizing a very-high-temperature reactor, has been developed and analyzed. This system employs steam methane reforming with enhanced CO2 absorption and a combined cycle approach. System modeling was performed from thermodynamic and economic perspectives using Aspen Plus software, and its thermodynamic performance was evaluated under various operating conditions. Furthermore, several parametric studies were conducted to determine the factors that affect hydrogen and power generation. Simulation results indicate an energy efficiency of 73% for the proposed system, with hydrogen and power production efficiencies of 16% and 23%, respectively. The results show that the proposed system performs better than multi-generation systems in previous research. In addition, the exergy efficiency of the proposed system was calculated to be 69.9%.

KEYWORDS

SE-SMR, hydrogen production, poly-generation.

ACCEPTED MANUSCRIPT

1. Introduction

The detrimental and increasing consequences of climate change, stemming from significant greenhouse gas emissions, have become a global challenge. The collective determination demonstrated through the Paris Agreement reflects a unified global commitment to limit the increase in global temperatures to within 1.5 degrees Celsius [1]. Among a range of greenhouse gases, carbon dioxide stands out as the dominant catalyst of climate change, accounting for 80% of total greenhouse gas emissions. Notably, the concentration of carbon dioxide has increased by approximately 100 parts per million over the past five decades, surpassing the critical threshold of 400 parts per million [2, 3]. Carbon dioxide capture technologies can be classified into three key categories based on their characteristics: oxy-fuel combustion, pre-combustion carbon dioxide capture, and post-combustion carbon dioxide capture (such as amine absorption techniques) [4]. The direct application of carbon capture and storage (CCS) in the transportation sector presents significant challenges. This sector ranks as the second-largest source of carbon dioxide emissions, accounting for 23% of global emissions [5]. Therefore, there is an urgent need for alternative fuels such as hydrogen. This study proposes a system for the combined production of power, hydrogen, and heating, featuring zero carbon dioxide emissions into the environment. The integration of methane reforming with enhanced absorption powered by nuclear energy has not been addressed in the literature, and in the authors' view, a gap exists in the technical literature regarding this concept.

2. Methodology

The proposed system is designed for the combined production of power, hydrogen, and heat, with minimal environmental pollution. A schematic representation of the system is shown in Figure 1.

To evaluate the performance of the proposed system from energy and exergy perspectives, the efficiencies derived from the first and second laws of thermodynamics will be utilized. The relationships between these thermodynamic efficiencies are as follows:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H2} * LHV_{H2} + \dot{W}_{net} + \dot{Q}_{net}}{\dot{Q}_{VHTR} + \dot{m}_{CH4} * LHV_{CH4}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{H2} * \dot{E}x_{H2} + \dot{W}_{net} + \dot{E}_{Q,net}}{\dot{E}x_{Q,VHTR} + \dot{m}_{CH4} * \dot{E}x_{H2}} \quad (2)$$

3. Results and discussion

This study proposes a system for the simultaneous production of power, hydrogen, and heat, operating on nuclear energy with helium as the working fluid. The proposed system utilizes calcium looping technology and produces zero harmful emissions to the environment. Table 6 presents the technical parameters obtained from the thermodynamic modeling of the system. As previously mentioned, the thermal capacity of the nuclear power plant is 500 MW. According to Table 1, this capacity enables the conversion of 6.032 tons of methane, along with carbon dioxide absorption, into 2.988 tons of hydrogen. Furthermore, the proposed system generates 136 MW of power and 189 MW of thermal capacity, respectively. Existing literature on combined power and hydrogen production indicates that achieving high hydrogen production efficiency and high power generation efficiency simultaneously is generally not feasible. However, the proposed system demonstrates remarkably high efficiencies for both hydrogen and power production, recorded at 16.77% and 23.41%, respectively.

Table1. Technical and engineering parameters of simulation

Hydrogen Production (tons/hour)	2.988
Methane Consumption (tons/hour)	6.032
Electricity Consumption (MW)	150.625
Electricity Supply from Grid (kW)	0
Power Output (MW)	287.337
Net Power Output (MW)	136.713
Net Heat Output (MW)	189.246
Fuel-to-Power Conversion Efficiency (%)	23.41
Heat-to-Power Conversion Efficiency (%)	32.4
Fuel-to-Hydrogen Conversion Efficiency (%)	16.77
Carbon Dioxide Sequestered (tons/hour)	18.063
Input Energy (MW)	583.78
Input Exergy of Fuel (MW)	83.8
Overall Exergy Efficiency (%)	69.9
Overall Thermal Efficiency (%)	72.9

ACCEPTED MANUSCRIPT

Sensitivity analysis is performed by varying one or more parameters while holding others constant. This method facilitates the evaluation of the impact of individual or combined parameters on design goals. Additionally, this analysis allows for the independent isolation and examination of parameters. Critical parameter significantly affecting system performance includes methane reformer temperature. Figures 2 and 3 respectively show the impact of temperature changes on the molar fraction and molar flow rate of products. Since methane reforming is an endothermic reaction, increasing temperature leads to greater methane participation in the reaction.

4. Conclusion

The key simulation results are presented below:

*The most irreversible components within the evaporator section of the Rankine cycle are the pre-cooler and the reforming reactor.

* The proposed system demonstrates an energy efficiency of 72.9% and an exergy efficiency of 62.95%.

* The estimated hydrogen production cost, considering nuclear fuel prices, ranges from $1.8 to $4.1 per kilogram.

References

[1] H.A. Hassan, The Evolving Geopolitics of Climate Change: From Rio to Dubai COP28, From Rio to Dubai, 13.

[٢] S. Alam, J.P. Kumar, K.Y. Rani, C. Sumana, Comparative assessment of performances of different oxygen carriers in a chemical looping combustion coupled intensified reforming process through simulation study, Journal of Cleaner Production, 262 (2020) 121146.

[٣] S. Alam, C. Sumana, Thermodynamic analysis of plant-wide CLC-SESMR scheme for H2 production: Studying the effect of oxygen carrier supports, International Journal of Hydrogen Energy, 44(5) (2019) 3250-3263.

[٤] F. Raganati, P. Ammendola, CO2 post-combustion capture: a critical review of Current technologies and future directions, Energy & Fuels, 38(15) (2024) 13858-13905.

[٥] G. Santos, Road transport and CO2 emissions: What are the challenges?, Transport Policy, 59 (2017) 71-74.

ACCEPTED MANUSCRIPT

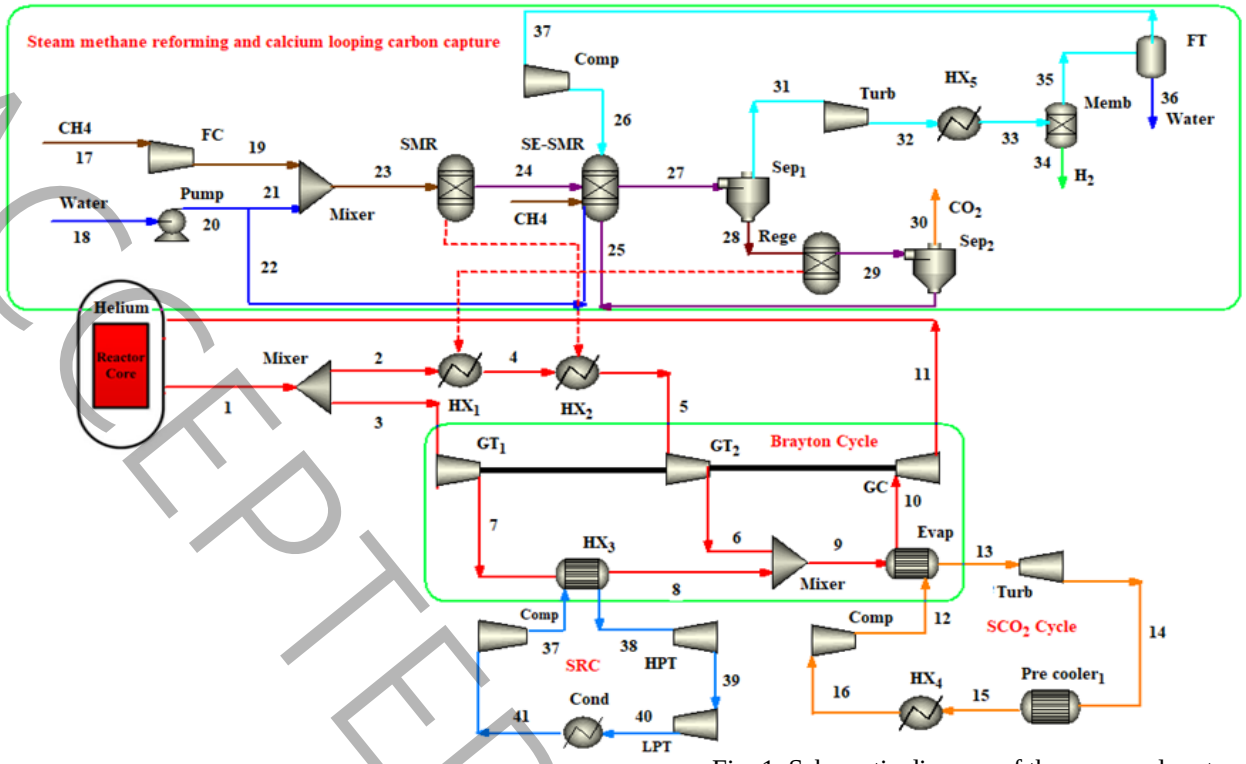


Fig. 1. Schematic diagram of the proposed system

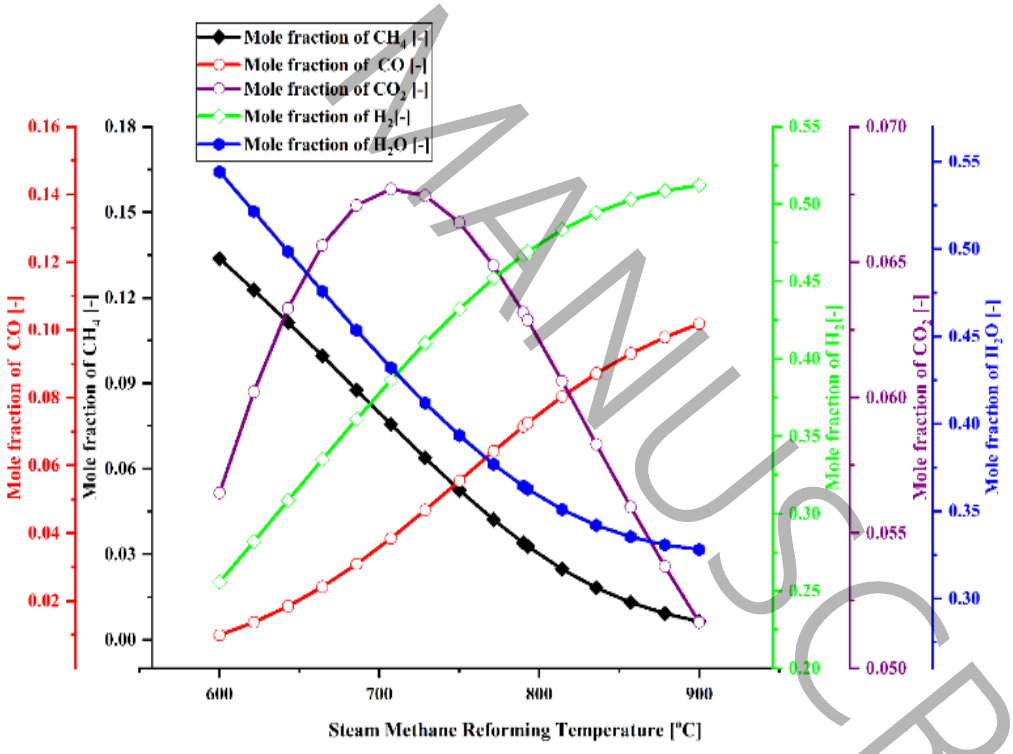


Fig. 2. Effect of reforming temperature on the mole fraction of products

ACCEPTED MANUSCRIPT

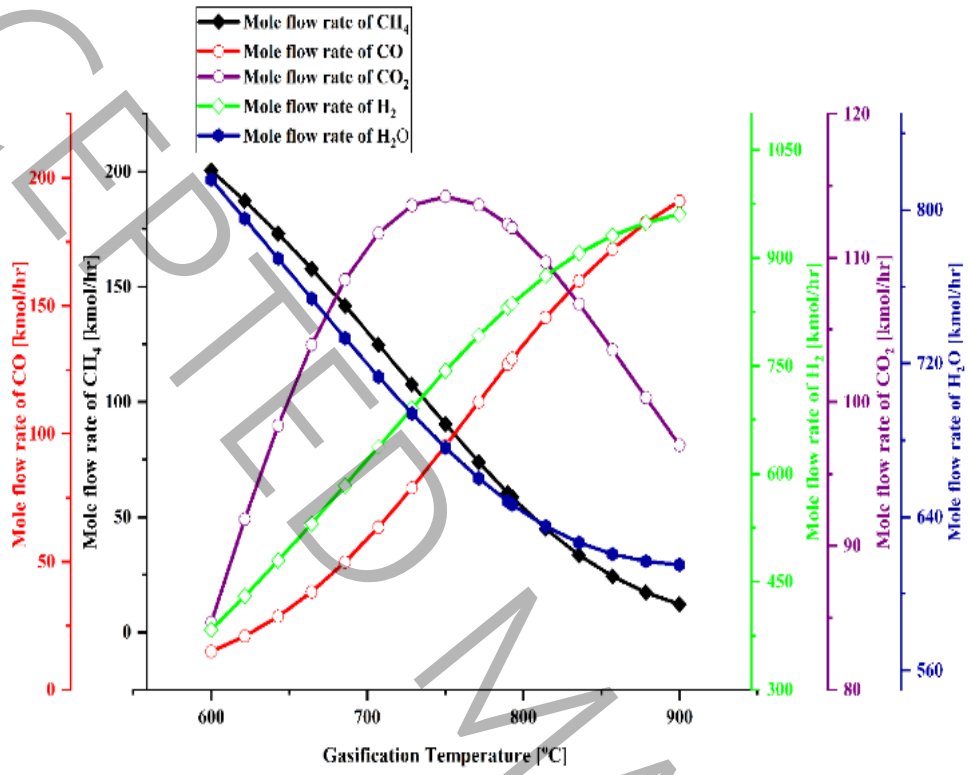


Fig. 3. Effect of reforming temperature on the molar flow rate of products

ACCEPTED MANUSCRIPT

ارزیابی ترمودینامیکی و اقتصادی و تحلیل جامع مکانیزم‌های مؤثر بر هزینه یک سیستم چندگانه تولید هیدروژن صفر کربن، توان و گرمایش برپایه انرژی هسته‌ای

رضا خفاف پور، مرتضی یاری*، علی‌اکبر درآبادی زارع*

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

نویسندگان مسئول: مرتضی یاری دریامان myari@tabrizu.ac.ir، علی‌اکبر درآبادی زارع darabadi.aliakbar@gmail.com

چکیده

رآکتورهای نسل چهارم با دمای بسیار بالا، به‌ویژه هنگامی که با فرایندهای رفرمینگ بخار متان و جذب دی‌اکسیدکربن ترکیب شوند، ظرفیت چشمگیری در تولید هیدروژن در مقیاس وسیع و با رویکردی سازگار با محیط‌زیست ارائه می‌دهند. بااین‌وجود، پژوهش‌های اندکی در زمینه طراحی و ارزیابی اقتصادی سیستم‌های یکپارچه نسل چهارم و ریفرمینگ بخار متان برای تولید هیدروژن هسته‌ای، به‌ویژه با درنظرگرفتن یک سیکل ترکیبی به‌عنوان بخشی از سیستم تولید توان کلی، صورت‌گرفته است. در این مطالعه، یک سیستم تولید هم‌زمان هیدروژن و توان الکتریکی، با بهره‌گیری از یک راکتور دمای بسیار بالا، توسعه و تحلیل شده است. این سیستم از فرایند ریفرمینگ بخار متان با جذب تقویت‌شده و رویکرد سیکل ترکیبی استفاده می‌کند. مدل‌سازی سیستم از دیدگاه‌های ترمودینامیکی و اقتصادی، با استفاده از نرم‌افزار اسپن پلاس انجام شده و عملکرد ترمودینامیکی آن در شرایط عملیاتی مختلف ارزیابی گردیده است. علاوه بر این، چندین مطالعه پارامتری جهت تعیین عواملی که بر روی تولید هیدروژن و توان الکتریکی اثر می‌گذارند، انجام‌گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، راندمان انرژی سیستم پیشنهادی را ۷۳ درصد و بازده تولید هیدروژن و توان الکتریکی به ترتیب ۱۶ و ۲۳ درصد نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم‌های چند نسلی تحقیقات گذشته بهتر عمل می‌کند. علاوه بر این، راندمان اگسرژی سیستم پیشنهادی ۶۹/۹ درصد محاسبه شده است.

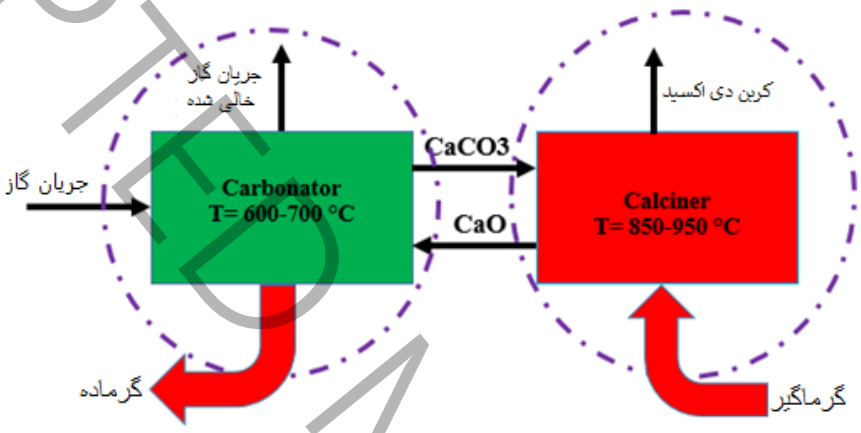
کلمات کلیدی

انرژی هسته‌ای، تولید هیدروژن، رفرمینگ بخار متان، سیکل فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید، جذب کربن‌دی‌اکسید، جذب افزایش‌یافته، اگسرژی، اقتصادی

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

پیامدهای مضر و فزاینده تغییرات آب و هوایی، ناشی از انتشار قابل توجه گازهای گلخانه‌ای، به یک چالش جهانی تبدیل شده است. عزم جمعی که از طریق توافقنامه پاریس به نمایش گذاشته شد، بیانگر عزم جهانی یکپارچه برای مهار افزایش دمای جهانی در بازه ی ۱/۵ درجه سلسیوس بود [۱]. در میان مجموعه‌ای از گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسید کربن به‌عنوان کاتالیزور غالب تغییرات اقلیمی، مورد توجه است که در ۸۰ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش دارد. به طور مشهود، غلظت کربن دی اکسید حدود ۱۰۰ قسمت در میلیون[1] در طول پنج دهه گذشته افزایش‌یافته است و از آستانه بحرانی ۴۰۰ قسمت در میلیون عبور کرده است [۲, ۳]. فن آوری‌های جذب دی‌اکسیدکربن را می توان بر اساس ویژگی‌های آن‌ها در سه دسته کلیدی طبقه بندی کرد که شامل احتراق سوخت اکسی، جذب کربن دی اکسید قبل از احتراق و جذب کربن دی اکسید پس از احتراق (مانند تکنیک جذب آمین) می‌شود [۴, ۵].



شکل ۱.نمودار شماتیک جذب کربن دی اکسید با استفاده از فناوری CAL[2]

Fig. 1. Schematic diagram of carbon dioxide absorption using CAL technology

روندها و روش‌های فنی برای این فناوری ها ماهیت متفاوتی دارند. در حال حاضر، جذب کربن دی اکسید پس از احتراق به عنوان پیشرفته‌ترین و قابل اعتمادترین روش مورد قبول می‌باشد. علاوه بر این، با عدم نیاز به تغییرات گسترده در تجهیزات فعلی نیروگاه، ازنظر اقتصادی قابل توجیه است. در حال حاضر، در این زمینه جذب آمین و حلقه کلسیم به عنوان ریشه دارترین روش‌های جذب کربن دی اکسید مطرح هستند. رویکرد جذب آمین از نظر صنعتی مورد پذیرش گسترده قرار گرفته است، اما این در حالی است که با مسائلی مانند خوردگی شدید، ناپایداری حلال و سمیت ذاتی مواجه است. در طرف دیگر جذب کلسیم یک جایگزین غیر سمی و مقرون به صرفه برای جذب کربن دی اکسید می‌باشد که با طیف وسیعی از کاربردها همراه است. در نتیجه، روش‌های جذب کربن دی اکسید مرتبط با جذب کلسیم توجه رو به افزایشی را به خود جلب می‌کنند. استفاده از واکنش‌های کربناته/کلسیناسیون برگشت‌پذیر در فرآیند حلقه کلسیم یک راه امیدوارکننده برای جذب کربن دی اکسید ارائه می‌کند. به طور معمول، فرآیند جذب کلسیم دو راکتور مجزا را شامل می‌شود: راکتور کربناته و راکتور کلسینه. در حین فرایند، گاز دودکش غنی از کربن دی اکسید، وارد راکتور کربناته می‌شود، که معمولاً دارای غلظت کربن دی اکسید در محدوده ۱۰ درصد تا ۱۵ درصد است. در این راکتور، کلسیم اکسید در یک واکنش با کربن دی اکسید در محدوده ی دمایی ۶۰۰-۷۰۰ درجه سلسیوس، منجر به تشکیل کلسیم کربنات و استخراج گاز دودکش تصفیه شده از کربن دی اکسید در خروجی می‌شود، که بازده جذب کربن دی اکسید بیش از ۸۰ درصد را دارا می‌باشد [۶]. متعاقباً، کلسیم کربنات تشکیل شده در دماهای ۸۵۰-۹۵۰ درجه سلسیوس به کلسیم اکسید در راکتور کلسیناسیون تجزیه می‌شود [۷]. شایان ذکر است که فرآیند حلقه

[1] Parts per million
[2] Calcium Looping

ACCEPTED MANUSCRIPT

کلسیم مزایای زیادی از جمله دسترسی به منابع فراوان، هزینه‌های عملیاتی کم و ظرفیت بالای جذب کربن دی اکسید را ارائه می‌دهد. در ادامه تعدادی از جدیدترین مقالات منتشر شده در این زمینه به طور جامع ارزیابی می شوند. شکل شماره ۱ نمایشی شماتیک از جذب دی‌اکسیدکربن گاز دودکش از طریق فرآیند حلقه کلسیم را نشان می‌دهد. به کارگیری مستقیم فرایند جذب و ذخیره کربن[1] در بخش حمل و نقل چالش‌های مهمی را به همراه دارد. این بخش به عنوان دومین منبع بزرگ انتشار دی‌اکسید کربن رتبه‌بندی می‌شود و ۲۳ درصد از انتشار جهانی را به خود اختصاص می‌دهد [۸]. بنابراین نیاز فوری به سوخت‌های جایگزین مانند هیدروژن وجود دارد. از جمله مزیت های هیدروژن به عنوان سوخت میتوان به پتانسیل تولید انرژی بالا و انعطاف پذیری نزدیک به سوخت‌های فسیلی و در عین حال دستیابی به انتشار کربن دی اکسید صفر اشاره کرد. هیدروژن به طور فزاینده ای به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای ذخیره و تبدیل انرژی پاک در نظر گرفته می‌شود که نه تنها برای بخش حمل و نقل، بلکه برای تولید الکتریسته و کاربرد در صنایع شیمیایی مناسب است. فراتر از نقش هیدروژن درتامین انرژی، هیدروژن یک ماده خام حیاتی برای محصولات صنعتی متعددی مانند آمونیاک، متانول و در فرآوری مواد غذایی است. تولید هیدروژن در مقیاس تجاری عمدتاً از طریق فرایند رفرمینگ بخار متان[2] انجام می‌شود که در حال حاضر حدود ۵۰ درصد از تولید جهانی هیدروژن را شامل می‌شود[۲]. برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید انرژی و جلوگیری از افزایش دی‌اکسید کربن، باید به طور جدی به این موضوع پرداخته شود. این امر مستلزم توسعه فناوری‌های پیشرفته برای تولید هیدروژن پاک از منابع انرژی بدون کربن مانند انرژی هسته‌ای و همچنین به‌کارگیری روش‌های اقتصادی برای جذب دی‌اکسید کربن است. مطالعات متعددی در منابع و مقالات فنی در مورد تولید هیدروژن و جذب دی‌اکسید کربن انجام شده است.به چند مورد از این موارد به شرح زیر اشاره می‌شود. آرشید و همکاران [۹]. تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی تولید گاز مصنوعی و متانول از طریق گازی سازی زباله های شهری همراه با جذب دی‌اکسیدکربن با استفاده از جاذب کلسیم اکسید انجام دادند. نتایج نشان داد که کلسیم اکسید به طور قابل توجهی بر ترکیب گاز مصنوعی و در نهایت متانول تأثیر می‌گذارد. در مطالعه دیگری، ژانگ و همکارانش بررسی جامعی از جذب دی‌اکسیدکربن انجام دادند. یافته‌ها نشان داد که حلقه کلسیم یک فناوری امیدوارکننده برای خنثی‌سازی کربن دی اکسید است [۱۰] در تحقیق دیگری توسط کورموس، یک بررسی کامل برای ارزیابی جنبه‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های احتراق و گازی‌سازی با سوخت زغال‌سنگ انجام شد که جذب کربن دی اکسید پس از احتراق ، از طریق استفاده از یک چرخه حلقه کلسیم صورت می‌پذیرد. بر طبق نتایج این بررسی ، حلقه کلسیم یک راه امیدوارکننده برای استقرار در نیروگاه‌های مبتنی بر احتراق است که با نرخ جذب کربن ۹۰ درصدی مشخص می‌شود [۱۱]. علاوه بر این، سیتونگ و همکاران [۱۲]. مفهوم جدیدی را مطرح کردند که شامل استفاده ترکیبی از جذب افزایش‌یافته برای تولید هیدروژن است. هدف این رویکرد نوآورانه افزایش کارایی فرآیند ترمودینامیکی، ارائه مزایای اقتصادی و دستیابی به انتشار کربن منفی هنگام استفاده از فناوری حلقه کلسیم برای تبدیل زیست توده به هیدروژن و تولید انرژی الکتریکی با جذب کربن دی اکسید یکپارچه است. در مطالعه دیگر، درآبادی و همکاران[۱۳]. یک تجزیه و تحلیل اگزری-اقتصادی از یک سیستم با هدف تولید هم‌زمان توان، گرما و هیدروژن، همراه با جذب دی‌اکسیدکربن انجام دادند.تحقیقات آن‌ها احتراق حلقه‌ای شیمیایی با رفرمینگ بخار متان را به گونه‌ای ترکیب کرد که گرمای موردنیاز برای رفرمینگ متان در این فرآیند جذب شود. نتایج نشان داد که بیش از ۷۵ درصد از دی‌اکسیدکربن تولید شده با استفاده از این روش جذب می‌شود. دیوا و همکاران در سال ۲۰۲۵به بررسی جامعی در زمینه گاز سنتز با کربن کم و غنی از هیدروژن ناشی از گازسازی با جذب افزایش‌یافته پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که گازسازی با جذب افزایش‌یافته با استفاده از جاذب کلسین اکسید، به عنوان یک فناوری کارآمد و پایدار در تبدیل انرژی، دارای پتانسیل بالایی است. درآبادی زارع و همکاران[۱۴]. یک تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی جامع از یک سیستم چند خروجی طراحی شده برای تولید هیدروژن، توان و گرما انجام دادند. این سیستم نوآورانه بر احتراق حلقه ای شیمیایی با استفاده از بیوگاز به عنوان سوخت و گازسازی زباله‌های پلاستیکی متکی است. فرآیند احتراق حلقه ای شیمیایی گرمای موردنیاز برای تولید گاز سنتز را تأمین می کند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد استثنایی را نشان می‌دهد، که شامل بیش از ۹۰ درصد راندمان جذب دی‌اکسیدکربن و بازده انرژی و اگسرژی به ترتیب ۷۷ درصد و ۶۷ درصد می‌شود. دیویس و همکاران [۱۵]. تجزیه و تحلیلی از انرژی و اگسرژی یک سیستم تولید هیدروژن انجام داد که از رفرمینگ بخار متان با افزایش جذب استفاده می کند. در این روش پیشنهادی، هیدروژن تولید می‌شود در حالی که به طور

[1] Carbon Capture System
[2] Steam Methane Reforming

ACCEPTED MANUSCRIPT

موثر دی‌اکسیدکربن را جذب می‌کند و بازده جذبی نزدیک به ۱۰۰ درصد را به دست می‌آورد. این فرآیند از یک تکنیک جذب مبتنی بر کلسیم برای جذب دی‌اکسیدکربن استفاده می‌کند. تحقیقات گسترده ای در مورد مکانیسم حلقه کلسیم در حال انجام است.

انرژی هسته‌ای، به عنوان یک منبع انرژی با پتانسیل بالا برای تولید حرارت و الکتریسیته، همواره مورد توجه بوده است. در سیستم‌های تولید هم‌زمان مبتنی بر انرژی هسته‌ای، حرارت تولید شده در راکتور هسته‌ای می‌تواند از طریق سیکل‌های ترمودینامیکی مختلف (مانند سیکل رانکین) به توان مکانیکی تبدیل شود. در این راستا، توربین‌ها (به‌ویژه توربین‌های بخار، گاز، و سیکل ترکیبی) نقش محوری در تبدیل این توان مکانیکی به الکتریسیته ایفا می‌کنند. توربین‌های بخار، به دلیل سابقه طولانی و قابلیت اطمینان بالا، از رایج‌ترین گزینه‌ها در نیروگاه‌های هسته‌ای هستند. توربین‌های گاز نیز می‌توانند در سیکل‌های ترکیبی با راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرند تا راندمان کلی سیستم افزایش یابد. علاوه بر توربین‌ها، موتورهای احتراق داخلی نیز می‌توانند به عنوان یک گزینه جایگزین برای تولید توان مکانیکی در سیستم‌های تولید هم‌زمان مبتنی بر انرژی هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرند، به‌ویژه در مقیاس‌های کوچک‌تر. اگرچه راندمان موتورهای احتراق داخلی معمولاً از توربین‌ها پایین‌تر است، اما مزایایی مانند هزینه اولیه کمتر، انعطاف‌پذیری بیشتر در سوخت مصرفی، و قابلیت راه‌اندازی سریع را ارائه می‌دهند. انرژی هسته‌ای به دلیل پایداری و مقرون به صرفه بودن، به منظورتولید هیدروژن پاک در مقیاس بزرگ مناسب تر از منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر، فناوری تولید هیدروژن هسته‌ای مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته است. این رویکرد نه تنها تولید هیدروژن پاک در مقیاس بزرگ را تسهیل می‌کند، بلکه کارایی اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای را نیز بهبود می‌بخشد. از زمان آغاز عصر انرژی هسته‌ای، ادغام یک مرکز تولید هیدروژن با یک یا چند راکتور هسته‌ای برای تسهیل تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ به عنوان یک منبع انرژی پایدار و پاک در نظر گرفته شده است. در میان پنج روش اصلی برای تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ از انرژی هسته‌ای، رفرمینگ سوخت نقش مهمی ایفا می کند. از آنجایی که دمای کارکرد راکتور فرایند رفرمینگ بخار متان در بازه‌ی ۷۰۰ الی ۹۵۰ درجه سانتی گراد می باشد، نسل چهارم راکتور های دمای بسیار بالا قابلیت خوبی برای ترکیب شدن با این فرایند و واکنش‌های پیشرفته به منظور تولید هیدروژن با درنظر گرفتن دمای خروجی آن دارد. تحقیقات در مورد تولید انرژی الکتریکی و تولید هیدروژن با استفاده از منابع حرارتی هسته‌ای انجام شده است. چندین مطالعه قابل توجه در این زمینه در زیر بیان شده است. وانگ و همکاران [۱۶]. یک تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی از یک سیستم تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و هیدروژن با انتشار کربن صفر، با استفاده از یک منبع حرارتی هسته‌ای با دمای بالا انجام داد. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی ظرفیت تولید هیدروژن با دبی ۲۹۰ مول بر ثانیه و دستیابی به توان خروجی ۱۰۳ مگاوات را دارد. علاوه بر این، هزینه تخمینی تولید هیدروژن از سیستم پیشنهادی بین ۱/۵ تا ۷ دلار بر کیلوگرم پیش بینی می‌شود. نی و همکاران [۱۷]. دو سیستم جدید را برای تولید هم‌زمان هیدروژن و انرژی الکتریکی، با استفاده از یک راکتور دمای بسیار بالا توسعه دادند. این سیستم‌ها از فرآیند گوگرد-ید برای تولید هیدروژن و چرخه برایتون برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کردند. تجزیه و تحلیل این سیستم ها نشان داد که با افزایش نرخ تولید هیدروژن، بازده انرژی و بازده اگسرژی سیستم‌ها کاهش یافته است. در مطالعه دیگری، گوو و همکاران [۱۸]. تجزیه و تحلیل اگسرژی یک سیستم تولید هیدروژن را انجام دادند که گازی‌سازی زیست توده و انرژی هسته‌ای را شامل می‌شود. اسحاق و همکاران [۱۹]. تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی سیستمی را انجام دادند که برای تولید هم‌زمان هیدروژن و توان طراحی شده بود. در این سیستم چرخه ترموشیمیایی کلرید وانادیم با انرژی هسته‌ای ادغام شده است. سیستم پیشنهادی برای دستیابی به راندمان انرژی و اگسرژی به ترتیب ۱۶/۹۴ درصد و ۲۱/۴۲ درصد پیشنهاد شده بود. شرودرز و همکاران [۲۰]. تجزیه و تحلیلی با تمرکز بر اگسرژی اقتصادی تولید هیدروژن از طریق رفرمینگ بخار متان ، با استفاده از منابع انرژی حرارتی حاصل از انرژی هسته‌ای و خورشیدی انجام دادند. نتایج نشان داد که هزینه هیدروژن تولید شده با استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی بیشتر از انرژی هسته‌ای است. نامی و همکاران [۲۱]. تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم ترکیبی تولید حرارت و توان را انجام دادند که از یک منبع حرارتی انرژی هسته‌ای در ارتباط با زیرسیستم‌هایی از جمله توربین گاز، چرخه رانکین آلی و الکترولیز استفاده می‌کند. در مطالعه‌ای جداگانه، نوروزی و همکاران [۲۲]. ویژگی‌های ترمودینامیکی و ترمو-اقتصادی یک سیستم ترکیبی حرارت و انرژی الکتریکی برای تولید هیدروژن را با

ACCEPTED MANUSCRIPT

استفاده از رفرمینگ بخار متان و بهره‌برداری از انرژی حرارتی هسته‌ای مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که سیستم پیشنهادی ظرفیت تولید ۱۴۴/۵ تن هیدروژن در ساعت را دارد که بازده کلی ۷۸/۵ درصد برای فرآیند تولید ترکیبی است.

فرایند رفرمینگ متان به‌عنوان یک فناوری مؤثر در نظر گرفته می‌شود؛ اما انتشار کربن و عدم توسعه فن آوری‌های جذب کربن چالش‌هایی را برای پیشرفت این روش ایجاد می‌کند. با ارزیابی کارایی انرژی، پایداری و پیامدهای زیست‌محیطی، رفرمینگ بخار متان همراه با جذب دی‌اکسیدکربن به‌عنوان یک جایگزین پایدارتر و امیدوارکننده در نظر گرفته می‌شود. این مطالعه سیستمی را برای تولید هم‌زمان توان، هیدروژن و گرمایش پیشنهاد می‌کند که انتشار دی‌اکسیدکربن صفر در محیط را دارا می‌باشد. ادغام ریفرمینگ متان با جذب افزایش یافته باانرژی هسته‌ای در هیچ ادبیاتی اشاره نشده است و به نظر نویسندگان، در ادبیات فنی، خلأ وجود دارد. در این مطالعه موارد زیر اشاره و تحلیل می‌شود:

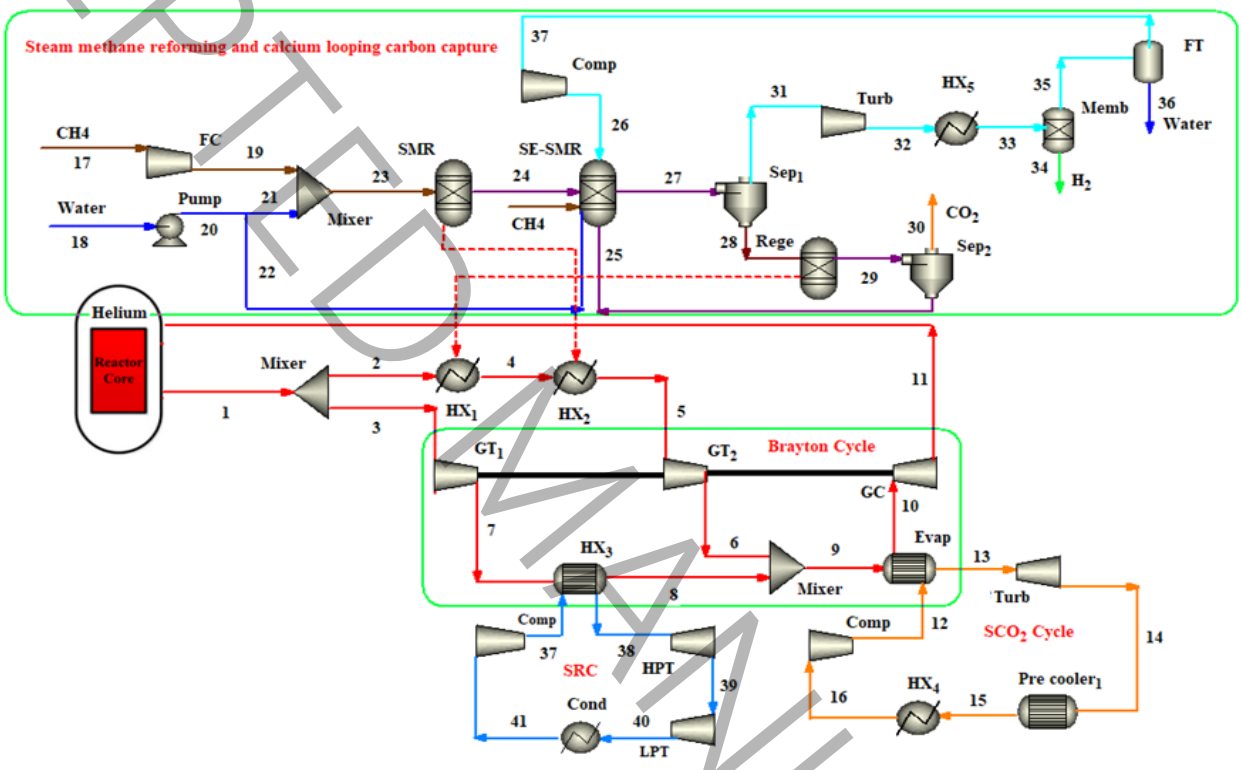
- ارائه سیستم تولید چندگانه جدید هیدروژن، توان و گرمایش صفر کربن
- آنالیز گسترده انرژی، اگزرژی و اقتصادی سیستم پیشنهادی
- برآورد قیمت هیدروژن تولیدی
- رسم نمودار جریان‌های اگزرژی و تحلیل تخریب‌های اگزرژی
- تحلیل پارامتریک پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم پیشنهادی

۲-تشریح سیستم

سیستم پیشنهادی برای تولید هم‌زمان توان، هیدروژن و گرما طراحی شده است و آلودگی محیطی حداقلی را دارد. این سیستم از سه قسمت اصلی تشکیل شده است: یک راکتور با دمای بسیار بالا که گرمایش سیال عامل، هلیوم را تسهیل می‌کند و رفرمینگ متان با بخار همراه با جذب دی‌اکسیدکربن و چرخه‌های تولید توان که شامل چرخه برایتون، چرخه رانکین و چرخه دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی می‌شود. شکل شماتیک چرخه پیشنهادی در شکل ۲ نشان‌داده‌شده است. ظرفیت تولید حرارتی نیروگاه هسته‌ای ۵۰۰ مگاوات است که هلیوم خروجی از راکتور به دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد (نقطه ۱). هلیوم خروجی از راکتور وارد یک تقسیم‌کننده می‌شود، جایی که به دو جریان مساوی تقسیم می‌شود (جریان‌های ۲ و ۳). جریان ۲ برای تأمین گرما برای زیر سیستم تولید هیدروژن و جذب دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود، درحالی‌که جریان ۳ برای تولید توان الکتریکی به چرخه برایتون هدایت می‌شود. در مدار تولید هیدروژن، متان در شرایط اتمسفر وارد کمپرسور می‌شود (نقطه ۱۷) و تا شرایط موردنیاز راکتور رفرمینگ تحت‌فشار قرار می‌گیرد (نقطه ۱۹). به طور هم‌زمان، آب در شرایط اتمسفر (نقطه ۱۸) به پمپ وارد می‌شود، در آنجا تحت‌فشار قرار می‌گیرد و با متان خروجی از کمپرسور مخلوط می‌شود (نقطه ۲۳). توجه به این نکته مهم است که بخشی از آب پمپ شده جدا شده و به راکتور رفرمینگ با جذب افزایش‌یافته هدایت می‌شود (نقطه ۲۲). جریان مخلوط (جریان ۲۳) سپس وارد راکتور رفرمینگ می‌شود و در آنجا گازهای سنتز را در شرایط دما و فشار موردنیاز تولید می‌کند (جریان ۲۴). گرمای لازم برای راکتور رفرمینگ توسط مبدل حرارتی ۲ تأمین می‌شود. این راکتور تحت شرایط گرماگیر و در دماهای نسبتاً بالا کار می‌کند. از سوی دیگر متان و آب همچنین برای بهبود بازده هیدروژن وارد راکتور کربناته می‌شوند. این استراتژی نه‌تنها تولید کربنات کلسیم را در راکتور افزایش می‌دهد، بلکه خروجی هیدروژن در گازهای سنتز را نیز افزایش می‌دهد. محصولات خروجی از راکتور رفرمینگ با جذب افزایش‌یافته به یک جداکننده (نقطه ۲۷) برای جداسازی فازهای جامد و گاز هدایت می‌شوند. فاز جامد پس از جداشدن به راکتور کلسینه فرستاده می‌شود و در آنجا از طریق جذب گرما به کربن‌دی‌اکسید (نقطه ۳۰) و اکسید کلسیم (نقطه ۲۵) تجزیه می‌شود که گرمای موردنیاز این راکتور توسط مبدل حرارتی شماره یک تأمین می‌شود. کلسیم اکسید حاصل، متعاقباً به راکتور کربناته بازگردانده می‌شود و این چرخه را قادر می‌سازد تا به طور نامحدود ادامه یابد. در همین حال، گازهای خروجی تخلیه شده از دی‌اکسیدکربن از جداکننده (نقطه ۳۱) که سرشار از هیدروژن هستند، به داخل یک توربین و سپس به مبدل حرارتی (نقطه ۵) هدایت می‌شوند تا به دما و فشار عملیاتی مناسب برای غشای هیدروژنی برسند. در نقطه ۳۴، هیدروژن جدا شده است. علاوه بر این، گازهای خروجی از غشا که هیدروژن و دی‌اکسیدکربن از آن جدا شده است (نقطه ۳۵)، به داخل یک فلاش‌تانک هدایت می‌شوند و بخار موجود در محصولات متراکم می‌شود. سپس گازهای باقیمانده از مخزن فلاش به راکتور کلسیناسیون بازگردانده

ACCEPTED MANUSCRIPT

می‌شود (نقطه ۳۷). جریان ۵ که حاوی هلیوم می‌باشد پس از تأمین گرمای لازم برای راکتور ریفرمینگ، مشابه جریان ۳ که آن‌هم حاوی هلیوم می‌باشد وارد توربین گاز سیکل برایتون می‌شود و تا رسیدن به فشار برابر منبسط می‌شود. جریان خروجی ۷ از توربین شماره ۱ وارد مبدل حرارتی شماره ۳ می‌شود، جایی که تا دمایی نزدیک به دمای جریان ۸ خنک می‌شود. مبدل حرارتی شماره ۳ گرمای موردنیاز برای شروع چرخه بخار رانکین را فراهم می‌کند. جریان‌های ۶ و ۸ با هم مخلوط می‌شوند و قبل از ورود به کمپرسور سیکل برایتون، از اواپراتور چرخه دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی عبور می‌کنند. این فرایند باعث می‌شود دمای مخلوط کاهش‌یافته و از سوی دیگر گرمای لازم برای چرخهٔ دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی تأمین شود.



شکل

۲. دیاگرام شماتیک سیستم چند منظوره پیشنهادی با انتشار صفر کربن دی اکسید

Fig. 2. Schematic diagram of the proposed multi-purpose system with zero carbon dioxide emissions

۳-مدل‌سازی

تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی سیستم شامل روابط و قوانین انرژی و اکزرژی می‌شود. معادلات پایستگی جرم، انرژی و اگسرژی برای اجزای مختلف سیستم اعمال می‌شود که امکان ارزیابی کلی انرژی و بازده اگسرژی را فراهم می‌کند. برای شرایط مرجع، دمای محیط ۲۹۷ کلوین و فشار ۱ بار در نظر گرفته شده است. تمامی شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار اسپن پلاس انجام شده است. پایستگی جرم، انرژی و اگسرژی برای هر جزء یا حجم کنترل از طریق معادلات ۱ تا ۳ بیان می‌شود [۲۳-۲۵]

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (۱)$$

$$\sum \dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e \quad (۲)$$

$$\dot{E}x_Q + \sum \dot{m}_i ex_i = \dot{E}x_w + \sum \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_D \quad (۳)$$

در این زمینه، نمادهای 'i' و 'e' به ترتیب نشان‌دهنده جریان ورودی و خروجی اجزا هستند. به‌علاوه، «e»، «h»، «q»، «w» و «$\dot{E}x_Q$» نشانگر جریان‌های مختلف اگسرژی و آنتالپی، گرما و توان مبادله شده در حجم کنترل و همچنین $\dot{E}x_D$ نرخ تخریب اگسرژی را نشان می‌دهد.

علاوه بر این، بازده انرژی و اگسرژی به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta_{en} = \text{Energy in products / Total energy input} \quad (۴)$$

$$\eta_{ex} = \text{Energy in products / Total energy input} \quad (۵)$$

علاوه بر این، در ادامه به زیرسیستم‌های مربوط به رفرمینگ متان، حلقه کلسیم برای جذب دی‌اکسیدکربن و غشاهای هیدروژن پرداخته می‌شود.

۳-۱-حلقه کلسیم

فرایند حلقه کلسیم[1] به‌عنوان یک روش پایدار برای جذب دی‌اکسیدکربن در تأسیسات صنعتی، فرایند حلقهٔ کلسیم بر تعامل دینامیکی بین کلسیم اکسید و دی‌اکسیدکربن استوار است و به تولید کلسیم کربنات در یک واکنش شیمیایی برگشت‌پذیر منجر می شود. در این فرایند، کلسیم اکسید که معمولاً از سنگ‌های آهک طبیعی به دست می‌آید، در چرخه‌های تکلیس و کربناته شدن تثبیت شده و دی‌اکسیدکربن را از گازهای خروجی جدا می‌کند. فرایند حلقهٔ کلسیم، به‌عنوان یک روش پایدار و نویدبخش در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنایع مختلف، باقابلیت استفادهٔ مجدد آسان از مواد مصرفی بر پایهٔ کلسیم اکسید و امکان ادغام یکپارچهٔ آن‌ها در فرایندهای تولید کلینکر[2]، از سایر روش‌ها متمایز می‌گردد. واکنش‌های جداگانه‌ای که در رآکتورهای کلسیناسیون و کربناته شدن انجام می‌شوند، به ترتیب با معادلات ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند [۲]:

$$CO_2 + CaO \leftrightarrow CaCo_3 \quad (۶)$$

$$CaCo_3 \leftrightarrow CaO + CO_2 \quad (۷)$$

۳-۲-رفرمینگ بخار متان [3]

[1] calcium looping technology
[2] clinker

ACCEPTED MANUSCRIPT

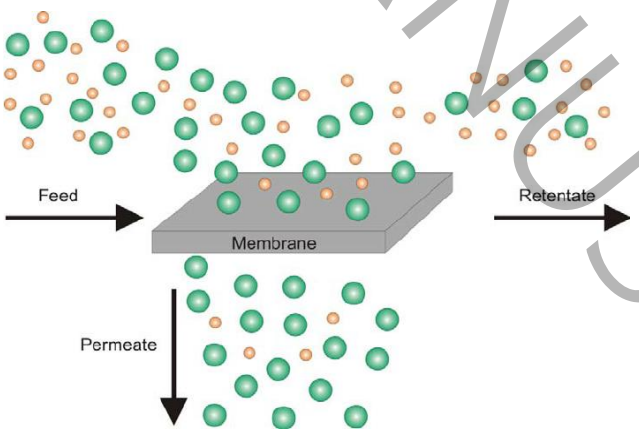
رفرمینگ بخار متان که با عنوان رفرمینگ بخار گاز طبیعی هم شناخته می‌شود، امروزه به‌عنوان روش غالب برای تولید هیدروژن می‌باشد و تقریباً نیمی از عرضه جهانی هیدروژن را به خود اختصاص می‌دهد. این فرایند معمولاً از فلزات گران‌بها یا کاتالیزورهای مبتنی بر نیکل استفاده می‌کند و در دماهای بالا، حدود ۸۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌پذیرد [۲۶]. رفرمینگ از طریق سه مرحله اولیه انجام می‌شود. در ابتدا، واکنشی بین متان و بخار، گاز سنتز تولید می‌کند که عمدتاً از هیدروژن و مونوکسید کربن تشکیل شده است. این واکنش با فرایند شیفت گاز آب همراه می‌شود که کربن مونو اکسید را به کربن دی اکسید تبدیل می‌کند. در نهایت، یک واحد جذب دی‌اکسیدکربن برای استخراج کربن دی اکسید از مخلوط گاز استفاده می‌شود و در نتیجه خلوص گاز هیدروژن حاصل را افزایش می دهد. معادلات واکنش مربوط به دو مرحله اول به ترتیب در معادلات (۸) و (۹) به تفصیل آمده است.

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 \quad (۸)$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \quad (۹)$$

۳-۳-غشا هیدروژن

تکنیک غشایی یکی از روش های مختلف موجود برای جداسازی هیدروژن را نشان می‌دهد و به عنوان یک جایگزین مناسب برای PSA[1] عمل می‌کند. غشاها را می توان بر اساس مواد مورد استفاده به انواع مختلفی طبقه بندی کرد، از جمله سرامیک، پلیمر، سرامیک، فلزات و کربن. در میان گزینه های غیر پلیمری، غشاهای فلزی متراکم، به‌ویژه آن‌هایی که از پالادیوم ساخته شده اند، که هیدروژن با خلوص بالا تولید می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. هیدروژنی که از طریق این غشاها نفوذ می‌کند می تواند به سطح خلوص ۹۹/۹۹ درصد برسد [۲۷]. غشاهای پالادیوم را می توان در راکتورهای مختلف، به‌ویژه در راکتورهای رفرمر که به تولید هیدروژن اختصاص داده شده اند، استفاده کرد. این غشاها به منظور جداسازی هیدروژن از سایر محصولات جانبی واکنش به کار گرفته می‌شوند [۲۸]. هیدروژن با خلوص بالا از طریق غشاء به مجرای راکتور نفوذ می‌کند، جایی که می‌تواند متعاقباً جمع آوری شود. شکل ۳ شکل شماتیک عملکرد غشاء را نشان می‌دهد.



شکل ۳.دیاگرام شماتیک فرایند غشا

Fig. 3. Schematic diagram of the membrane process

[1] pressure swing adsorption

ACCEPTED MANUSCRIPT

غشاهای فلزی از قانون سیورت[1] پیروی می‌کنند که بیان می‌کند که شار هیدروژنی که از آن‌ها می‌گذرد باریشه دوم فشار نسبت مستقیم دارد. به‌منظور کسب اطلاعات بیشتر در این مورد می‌توانید به منابع زیر مراجعه کنید. مقدار هیدروژن خالص به‌دست‌آمده از این غشا بر اساس قانون سیورت با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود [۲۹, ۳۰].

$$J_{H2} = \pi_{mem} * (P_{H_2Feed}{}^{0.5} - P_{H_2Perm}{}^{0.5}) \quad (۱۰)$$

P_{H2} فشار جزئی هیدروژن و π_{mem} نفوذ پذیری و نشت می باشد.

۳-۴- شبیه سازی عملیات و مفروضات

در این مطالعه، سیستمی برای تولید هم‌زمان هیدروژن، توان و گرما پیشنهاد شده است که با حداقل انتشار آلودگی محیطی مشخص می‌شود. این سیستم از هر دو منظر ترمودینامیکی و فنی - اقتصادی تحلیل می‌شود. سیستم پیشنهادی با یک منبع حرارتی انرژی هسته‌ای ۵۰۰ مگاواتی کار می‌کند و از هلیوم به عنوان سیال عامل استفاده می‌کند. این سیال عامل گرمای لازم برای اجزای مختلف سیستم از جمله فرآیند رفرمینگ بخار متان و حلقه کلسیم را فراهم می‌کند. برای شبیه سازی سیستم از نرم افزار اسپن پلاس استفاده شده است. مفروضات در نظر گرفته شده برای شبیه سازی سیستم پیشنهادی به تفصیل در زیر آمده است:

- سیستم‌های طراحی شده و اجزای مربوطه آن‌ها در شرایط پایا کار می‌کنند.
- واکنش‌های شیمیایی در فرایندهای ترک‌خوردگی بخار متان، رفرم متان بخار با جذب افزایش‌یافته و کربناتور در حالت تعادل هستند.
- راندمان غشای پالادیوم ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است.
- دمای خروجی هلیوم از راکتور با دمای بسیار بالا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد است.
- فشار هلیوم در خروجی توربین در سیکل برایتون ۳/۵ مگاپاسکال است.
- فشار خروجی هلیوم از راکتور با دمای بسیار بالا ۶/۹۴ مگاپاسکال است.
- فشار بالا در سیکل بخار رانکین ۱۵/۴ مگاپاسکال است.
- فشار بالا در چرخه فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید ۲۷/۶ مگاپاسکال است [۳۱].
- در اسپلیتر، هلیوم به دو قسمت با دبی مولی مساوی تقسیم می‌شود.
- علاوه بر این، پارامترهای عملکرد اجزا و رآکتورها در جدول ۱ ارائه شده است.

[1] sievert low

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱: پارامترهای عملکردی اجزای مهم سیستم [2, 27, 31]

Table 1. Functional parameters of key system components

واحدهای عملیاتی	مقادیر
واحد ریفرمینگ	
فشار (بار)	۱۰
دما (سانتی‌گراد)	۸۰۰
نسبت گوگرد بر کربن	۳/۶
واحد ریفرمینگ با جذب افزایش‌یافته	
فشار (بار)	۱۰
دما (سانتی‌گراد)	۶۵۰
دما (سانتی‌گراد)	۹۰۰
فشار (بار):	۱۰
واحد جداساز هیدروژن:	
درصد بازیابی هیدروژن	۹۰
درصد خلوص هیدروژن	۱۰۰
توان حرارتی راکتور با دمای زیاد (مگاوات)	۵۰۰
بازده ایزنتروپیک پمپ	۰/۸۶
ایزنتروپیک توربین	۰/۸۶و۰/۹
فشار کندانسور (کیلوپاسکال)	۱۰
فشار پایین سیکل فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید (مگاپاسکال)	۸/۷۲

۵-۳-پارامترهای شاخص عملکرد

برای ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی از نظر انرژی و اگسرژی، بازده به‌دست‌آمده از قانون اول و دوم ترمودینامیک استفاده خواهد شد. روابط بین این بازده ترمودینامیکی به شرح زیر است:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H2} * LHV_{H2} + \dot{W}_{net} + \dot{Q}_{net}}{\dot{Q}_{VHTR} + \dot{m}_{CH4} * LHV_{CH4}} \quad (۱۱)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{H2} * \dot{E}x_{H2} + \dot{W}_{net} + \dot{E}_{Q,net}}{\dot{E}x_{Q,VHTR} + \dot{m}_{CH4} * \dot{E}x_{H2}} \quad (۱۲)$$

در معادلات داده شده، η نشان‌دهنده راندمان قانون اول، ϵ نشان‌دهنده بازده قانون دوم، LHV نشان‌دهنده مقدار گرمایش پایین‌تر، $\dot{m}$ نشان‌دهنده نرخ جریان جرمی، $\dot{E}x$ نشان‌دهنده اگسرژی، $\dot{W}$ نشان دهنده توان خروجی کل، و $\dot{Q}$نشان‌دهنده توان خروجی کل است.

علاوه بر این، راندمان سوخت به توان، سوخت به هیدروژن و سوخت به گرما به شرح زیر تعریف می‌شود:

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\eta_{H2} = \frac{\dot{m}_{H2} * LHV_{H2}}{\dot{Q}_{VHTR} + \dot{m}_{CH4} * LHV_{CH4}} \quad (۱۳)$$

$$\eta_{Power} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{VHTR} + \dot{m}_{CH4} * LHV_{CH4}} \quad (۱۴)$$

$$\eta_{Heat} = \frac{\dot{Q}_{net}}{\dot{Q}_{VHTR} + \dot{m}_{CH4} * LHV_{CH4}} \quad (۱۵)$$

در اینجا η_{Power}، η_{H2} و η_{Heat} به ترتیب نشان دهنده بازده تولید توان، تولید هیدروژن و تولید گرما هستند.

۴- ارزیابی اقتصادی

ارزیابی جنبه‌های اقتصادی سیستم‌های ترکیبی چندمنظوره ضروری است، زیرا به سرمایه‌گذاران اجازه می‌دهد تا عملی‌بودن و پایداری مالی اتخاذ این روش‌ها را ارزیابی کنند. این تجزیه‌وتحلیل پس‌اندازهای بالقوه، بازگشت سرمایه و مزایای اقتصادی گسترده‌تر را روشن می‌کند، بنابراین به تصمیم‌گیری آگاهانه و هدایت رویکردهای سرمایه‌گذاری کمک می‌کند. تجزیه‌وتحلیل اقتصادی کامل سیستم‌های ترکیبی چندمنظوره به داده‌های گسترده‌ای در مورد پویایی بازار انرژی منطقه‌ای، نرخ بهره و سایر متغیرهای مربوطه نیاز دارد. بااین‌وجود، ارزیابی فنی - اقتصادی هنوز می‌تواند با تمرکز بر مخارج سرمایه‌ای و هزینه‌های عملیاتی مرتبط با سیستم انجام شود. اگرچه این روش ساده ممکن است تمام پیچیدگی‌های اقتصادی را در بر نگیرد، اما بینشی اولیه از مقرون‌به‌صرفه بودن سیستم ارائه می دهد و می‌تواند به‌عنوان یک مرجع مفید برای تصمیم‌گیری آگاهانه عمل کند.

جداول ۲ و ۳ یک نمای کلی از توابع هزینه مرتبط با اجزای اولیه مورد استفاده برای ارزیابی مخارج سرمایه ای سیستم های پیشنهادی را ارائه می دهد. مخارج سرمایه ای مستهلک شده برحسب دلار آمریکا در سال را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$Amortized\ CAPEX = CAPEX \times CRF$$

CRF به عامل بازگشت سرمایه اشاره دارد که به شرح زیر تعریف می‌شود [۳۲, ۳۳]:

$$CRF = \frac{i*(1+i)^{BL}}{(1+i)^{BL} - 1} \quad (۱۶)$$

در این تحلیل، (i) و (BL) نشان‌دهنده نرخ بهره سالانه و طول عمر اقتصادی سیستم هستند که به ترتیب ۱۲ درصد و ۲۰ سال در نظر گرفته می شوند [۳۳].

پیش‌بینی می‌شود که هزینه‌های عملیاتی شامل دو جزء کلیدی باشد: هزینه‌های نگهداری سالانه که ۶ درصد از کل مخارج سرمایه‌ای برآورد می‌شود، و همچنین هزینه‌های مرتبط با مصرف سوخت.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۲: هزینه ارزیابی شده اجزا [۳۴-۳۶]

Table 2. The estimated cost of components

اجزا	هزینهٔ پایه	ضریب مقیاس	مبنای اندازه	مقیاس پایه	سال مبنا
کندانسور	۶/۹۸۸	۰/۸	مبدل حرارتی (مگاوات)	۲۹۰ مگا وات	۲۰۱۸
رفرمر بخار متان	۴۵/۷	۰/۷۵	ورودی نیروگاه حرارتی	۱۲۴۶ مگا وات	۲۰۰۷
کمپرسورهای سوخت	۰/۰۹۱۵۶۲	۰/۶۷	کیلووات	۴۴۵ کیلووات	۱۹۹۶
کلسینه	۰/۵۹	۰/۶۷	جرم کربن‌دی‌اکسید (کیلوگرم بر ثانیه)	۵۹۸۷۵	-
رفرمر با جذب افزایش‌یافته	۲۸/۰۳۰	۰/۶۵	نرخ جریان هیدروژن (نرمال مترمکعب بر ساعت)	۱۰۰۰۰۰	۲۰۱۴
غشا هیدروژن	۲/۲۴	۰/۶	مساحت غشا	۲۷۵/۳متر مربع	۲۰۱۸

جدول ۳: توابع هزینه اجزای مهم سیستم [2, 27, 31]

Table 3. Cost functions of critical system components

محل استفاده	رابطه هزینه	سال مرجع
کمپرسورها	$pec_{Comp} = (\frac{71.10 * \dot{m}_{air}}{09 - \eta_{is,c}})(\frac{P_{out}}{P_{in}}) Ln(\frac{P_{out}}{P_{in}})$	۱۹۹۵
توربین‌های گاز	$pec_{GT} = (\frac{479.34 * \dot{m}}{092 - \eta_{is}}) Ln(pr) * (1 + e^{(0.036*T - 54.4)})$	۱۹۹۵
پمپ‌ها	$pec_{Pump} = 3540 * \dot{W}_P^{0.71}$	۲۰۱۱
پیش خنک‌کن	$pec_{\Pr e-cooler} = 2143 * A^{0.514}$	۱۹۸۶
توربین	$pec_{Turb} = 4405 * \dot{W}_{Turb}^{0.7}$	۱۹۹۴
راکتور دما بسیار بالا	$pec_{VHTR} = C_Q \dot{Q}_R$	۲۰۰۳
مبدل حرارتی	$pec_{HX4} = 1773 * \dot{m}_{CO2}$	۲۰۰۶

۵-نتایج و بحث ها

۵-۱-صحت سنجی شبیه سازی

برای صحت سنجی سیستم فرایند رفرمینگ بخار متان با جذب افزایش‌یافته و فناوری جذب دی‌اکسیدکربن با استفاده از فرایند حلقه کلسیم، نتایج شبیه‌سازی با یافته‌های ارائه شده در مرجع [۲] مقایسه شد. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، تمام ورودی‌های ضروری، از جمله نرخ جریان سوخت و پارامترهای بخار، دقیقاً با پارامترهای ورودی از مرجع [30] تطبیق داده شدند. همان‌طور که در

ACCEPTED MANUSCRIPT

جداول ۴ و ۵ نشان‌داده‌شده است، نتایج کاملاً همسو هستند و درصد خطای کمتر از ۲ درصد را نشان می‌دهند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که نتایج شبیه سازی هم دقیق و هم قابل قبول است.

جدول ۴: مقایسه و صحت سنجی جریان ها با با منابع [2, 27, 31]

Table 4. Comparing and validating flows against sources

متغیرها	واحدها	شماره جریان‌ها در منبع شماره ۴۵							
		۱۵		۱۶		۱۷		۲۴	
		منبع	مطالعه حاضر	منبع	مطالعه حاضر	منبع	مطالعه حاضر	منبع	مطالعه حاضر
جریان مولی	کیلو مول بر ساعت	۱۲/۰۷	۱۲/۰۷۴	۱/۸۶	۱/۸۶	۱۰/۲۱	۱۰/۲۱۴	۱/۸۲	۱/۸۱۸
متان	کیلو مول بر ساعت	۰/۰۳	۰/۰۲۸۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲۸۱	۰/۰۰	۰/۰۰
منوکسید کربن	کیلو مول بر ساعت	۰/۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰
کربن‌دی‌اکسید	کیلو مول بر ساعت	۰/۰۱	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰۹۹	۱/۸۲	۱/۸۱۸
هیدروژن	کیلو مول بر ساعت	۴/۰۸	۴/۰۸۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۴/۰۸	۴/۰۸۶	۰/۰۰	۰/۰۰
آب	کیلو مول بر ساعت	۶/۰۸	۶/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۶/۰۸	۶/۰۸۶	۰/۰۰	۰/۰۰
کلسیم کربنات	کیلو مول بر ساعت	۱/۸۲	۱/۸۱۸	۱/۸۲	۱/۸۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
کلسیم اکسید	کیلو مول بر ساعت	۰/۰۴	۰/۰۴۱	۰/۰۴	۰/۰۴۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

جدول ۵: مقایسه نتایج شبیه سازی با منابع [2, 27, 31]

Table 5. Comparing simulation results with source data

متغیرها	منابع	مطالعه حاضر
T_{Reg}^{Ex} (درجه سانتی‌گراد)	۶۷۰	۶۶۹/۷۳
$\dot{Q}_{Reg}^{ex}$ (کیلووات)	۷۴/۴	۷۵/۹۸

۲-۵-نتایج پارامترهای فنی

در این مطالعه، سیستمی برای تولید هم‌زمان توان، هیدروژن و گرما پیشنهاد شده است که بر مبنای انرژی هسته‌ای با استفاده از هلیوم به‌عنوان سیال عامل عمل می‌کند. سیستم پیشنهادی از فناوری کلسیم استفاده می‌کند و هیچ انتشار مضری برای محیط‌زیست ایجاد نمی‌کند. ازآنجایی‌که راکتور کربناتور[1] درون حلقه کلسیم گرمازاست است، متان اضافی به این راکتور تزریق می‌شود تا هم‌زمان

[1] calciner

ACCEPTED MANUSCRIPT

دی‌اکسیدکربن را جذب کرده و سنگ‌آهک تولید کند و درعین‌حال مقدار و کارایی تبدیل هیدروژن را در محصولات حاصل افزایش دهد. در نتیجه، این راکتور به یک راکتور رفرمر بخار متان با جذب افزایش‌یافته تبدیل می‌شود. دمای عملیاتی این راکتور ۶۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد، درحالی‌که کلسینر[1] در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس کار می‌کند. فناوری کلسیم، جذب و جداسازی نزدیک به ۱۰۰ درصد از دی‌اکسیدکربن تولید شده در طول فرایند تولید هیدروژن را امکان‌پذیر می‌کند. جدول ۶ پارامترهای فنی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سیستم ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ظرفیت حرارتی نیروگاه هسته‌ای ۵۰۰ مگاوات است. طبق جدول ۶، این ظرفیت، تبدیل ۶/۰۳۲ تن متان، همراه با جذب دی‌اکسیدکربن، به ۲/۹۸۸ تن هیدروژن را امکان‌پذیر می‌کند. علاوه بر این، این سیستم پیشنهادی به ترتیب ۱۳۶ مگاوات و ۱۸۹ مگاوات توان و ظرفیت حرارتی را تولید می‌کند. منابع علمی موجود در مورد تولید ترکیبی توان و هیدروژن نشان می‌دهد که دستیابی به راندمان تولید هیدروژن بالا و راندمان تولید توان بالا به طور هم‌زمان به‌طورکلی امکان‌پذیر نیست. بااین‌حال، سیستم پیشنهادی راندمان بسیار بالایی را برای تولید هیدروژن و توان نشان می‌دهد که به ترتیب ۱۶/۷۷درصد و ۲۳/۴۱ درصد ثبت شده است. دستیابی هم‌زمان به چنین راندمان بالایی، این سیستم را در مقایسه با سایر سیستم‌های درگیر در تولید هم‌زمان توان و هیدروژن، در موقعیت مطلوبی قرار می‌دهد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی و اگسرژی سیستم پیشنهادی به ترتیب ۷۲/۹ و ۶۹/۹ درصد است.

۳-۵-تخریب اگسرژی

تخریب اگسرژی به معنای کاهش انرژی قابل حصول در یک سیستم در نتیجه فرایندهای برگشت‌ناپذیر است. در منابع ترمودینامیک، اگسرژی نشان‌دهنده حداکثر کار بالقوه‌ای است که می‌توان از یک سیستم در حین رسیدن به تعادل با محیط خود استخراج کرد. در طول تبدیل یا انتقال انرژی، ممکن است بخشی از انرژی تولیدی به دلیل ایجاد آنتروپی غیرقابل‌دسترس شود. این پدیده را تخریب اگسرژی می‌نامند. ارزیابی تخریب اگسرژی در هر جزء امکان می‌دهد تا نقاط ضعف اولیه، در سیستم پیشنهادی شناسایی شود. شکل ۴ تجزیه‌وتحلیل جامعی از تخریب اگسرژی در اجزای جداگانه سیستم ارائه می‌دهد که هم سهم هریک از آن‌ها و هم اثر جمعی بر تخریب کل اگسرژی را نشان می‌دهد.

جدول ۶: پارامترهای تکنیکی و فنی شبیه سازی

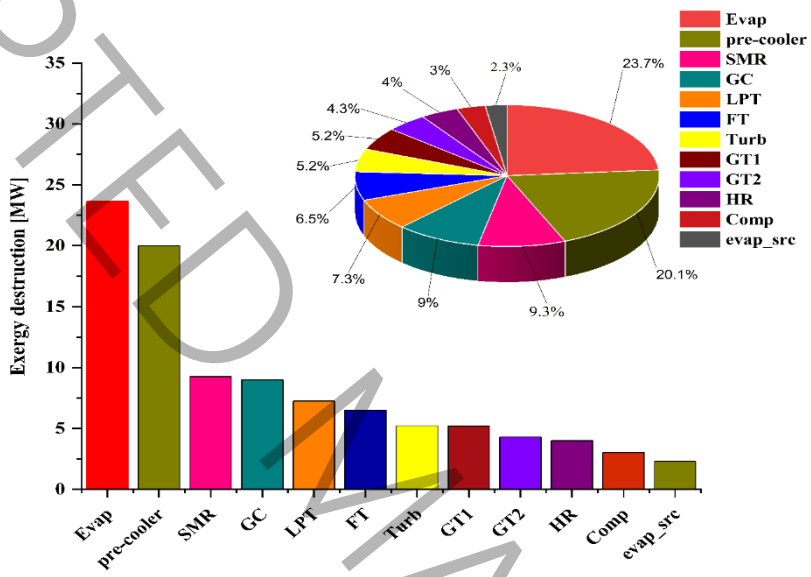
Table 6. Technical and engineering parameters of simulation

پارامترها	اندازه
هیدروژن تولیدی (تن بر ساعت)	۲/۹۸۸
متان مصرفی (تن بر ساعت)	۶/۰۳۲
توان مصرفی (مگاوات)	۱۵۰/۶۲۵
تأمین الکتریسیته از شبکه (کیلووات)	۰
توان تولیدی (مگاوات)	۲۸۷/۳۳۷
توان تولیدی خالص (مگاوات)	۱۳۶/۷۱۳
گرمای تولیدی خالص (مگاوات)	۱۸۹/۲۴۶
بازده تبدیل سوخت به توان (درصد)	۲۳/۴۱
بازده تبدیل گرما به توان (درصد)	۳۲/۴
بازده تبدیل سوخت به هیدروژن (درصد)	۱۶/۷۷

[1] carbonator

ACCEPTED MANUSCRIPT

پارامترها	اندازه
کربن‌دی‌اکسید جداسازی شده (تن بر ساعت)	۱۸/۰۶۳
مقدار انرژی ورودی (مگاوات)	۵۸۳/۷۸
مقدار اگسرژی ورودی سوخت (مگاوات)	۸۳/۸
بازده اگسرژی کلی (درصد)	۶۹/۹
بازده حرارتی کلی (درصد)	۷۲/۹



شکل ۴. تخریب اگسرژی اجزای سیستم پیشنهادی

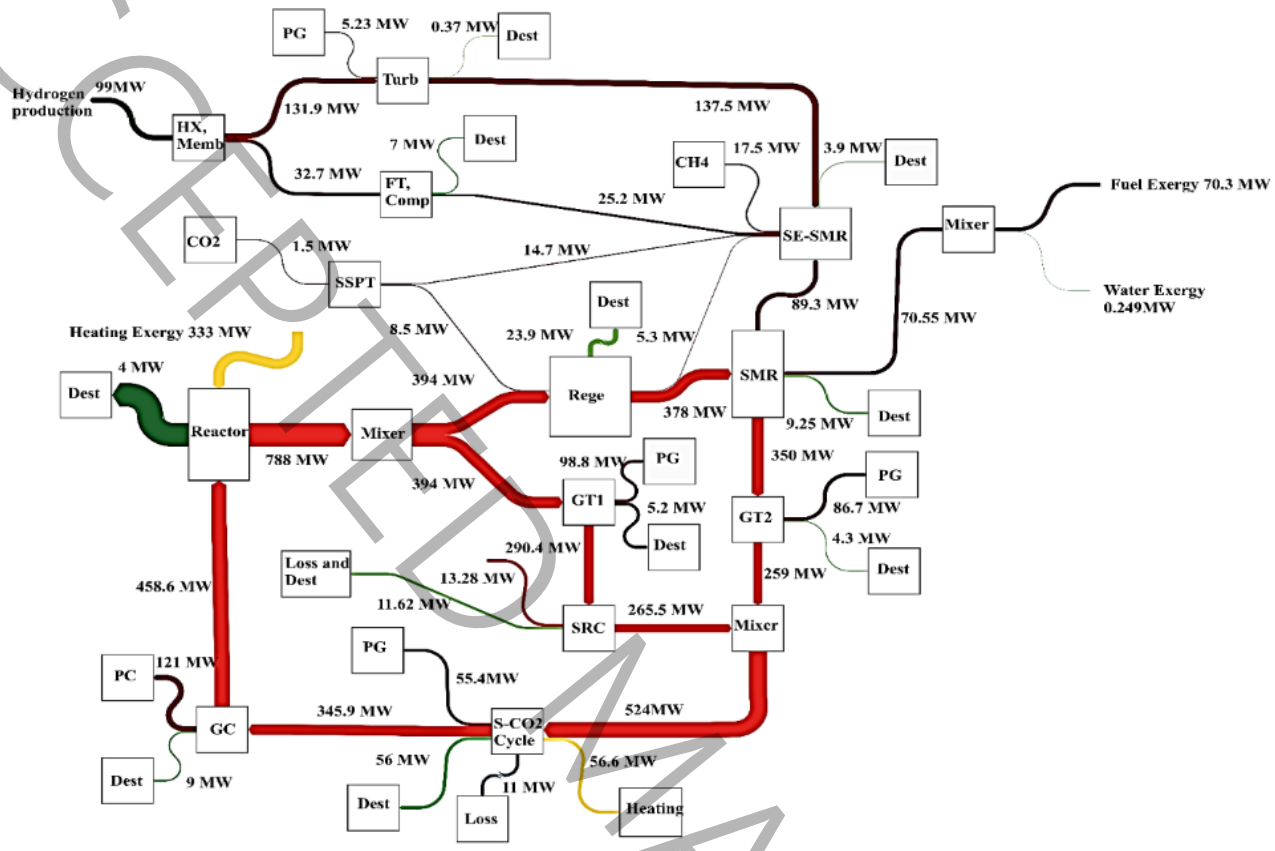
Fig. 4. Exergy destruction of the proposed system components

اواپراتور و پیش خنک‌کننده[1] چرخه فوق‌بحرانی، همراه با راکتور رفرمر، بالاترین سطوح تخریب اگسرژی را به ترتیب نشان می‌دهند. عوامل اصلی مؤثر در این تخریب اگسرژی شامل اختلاف دما و وقوع واکنش‌های شیمیایی و هسته‌ای است. یکی از دلایل اصلی که اواپراتور سیکل فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید عامل اصلی تخریب اگسرژی است، تفاوت دمایی بین سیالات سردوگرم است. اواپراتور سیکل فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید ۲۳ مگاوات تخریب اگسرژی را به همراه دارد که معادل ۲۳/۷ درصد از کل تخریب اگسرژی است . به‌حداقل‌رساندن برگشت‌ناپذیری برای افزایش کارایی و کاهش تلفات انرژی بسیار مهم است. این را می‌توان از طریق رویکردهای مختلف، مانند بهبود عایق، ساده‌سازی فرایندها، اتخاذ فناوری‌های پیشرفته، و اصلاح پروتکل‌های تعمیر و نگهداری انجام داد. علاوه بر این، ادغام سیستم‌های بازیافت انرژی و به‌کارگیری اصول طراحی برتر، نقش مهمی در این تلاش ایفا می‌کند. یک استراتژی کلیدی برای کاهش برگشت‌ناپذیری در مبدل‌های حرارتی کاهش گرادیان دما است. با ترازکردن پروفیل‌های دما به طور مؤثر، می‌توان انتقال حرارت را بهینه کرد. علاوه بر این، استفاده از سطوح تبادل حرارت بسیار کارآمد، کاهش تلفات فشار و استفاده از سیالات پیشرفته انتقال حرارت می‌تواند برگشت‌ناپذیری در سیستم‌های مبدل حرارتی را تا حد زیادی کاهش دهد. نمودارهای سانکی[2] برای نشان‌دادن مقادیر اگسرژی مرتبط با جریان‌های مختلف، مبادلات حرارتی و خروجی‌های توان و همچنین برای تعیین کمیت تلفات اگسرژی یا تخریب‌های رخداده در سیستم‌ها استفاده می‌شوند. بدیهی است که هرگونه افزایش در تخریب یا تلفات اگسرژی منجر به کاهش بازده انرژی و کاهش اگسرژی کلی سیستم

[1] Pre-cooler
[2] Sankey diagram

ACCEPTED MANUSCRIPT

می‌شود. شکل ۵ نمودار جریان اگسرژی (نمودار سانکی) سیستم پیشنهادی که شامل بالانس اگسرژی و برگشت‌ناپذیری می‌شود، را نشان می‌دهد. قابل‌ذکر است، مهم‌ترین سهم در تخریب اگسرژی، چرخه فوق‌بحرانی کربن‌دی‌اکسید است که مقدار برگشت‌ناپذیری ۵۵ مگاوات را نشان می‌دهد.



شکل ۵.نمودار اگسرژی جریان سیستم پیشنهادی

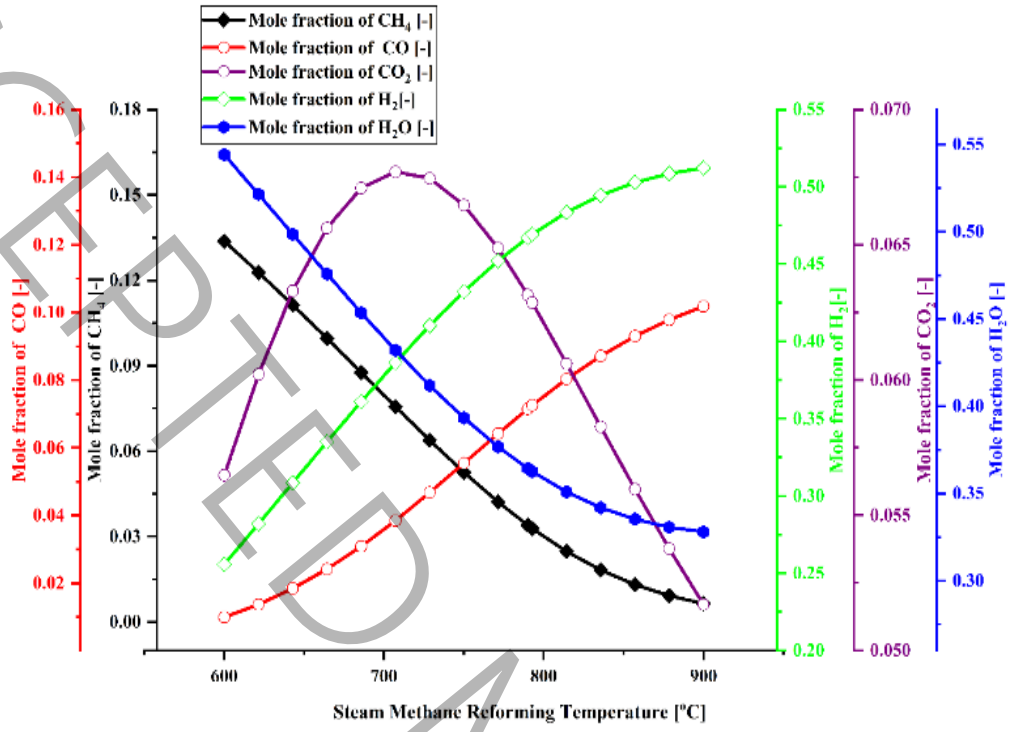
Fig. 5. Exergy flow diagram of the proposed system

۴-مطالعات پارامتریک

در تجزیه‌وتحلیل حساسیت، با تغییر یک یا چند پارامتر و درعین‌حال ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها به دست می‌آیند. این روش ارزیابی تأثیر پارامترهای فردی یا ترکیب آن‌ها را بر اهداف طراحی تسهیل می‌کند. علاوه بر این، این تجزیه‌وتحلیل اجازه می‌دهد تا پارامترها به طور مستقل، تفکیک و بررسی شود. دمای رفرمر متان، نسبت جریان جرمی اکسید کلسیم به سوخت و نسبت جریان جرمی بخار در چرخه رانکین بخار، پارامترهای حیاتی هستند که به طور قابل‌توجهی بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند .شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تأثیر تغییر دما را بر کسر مولی و دبی مولی محصولات نشان می‌دهند. باتوجه‌به این‌که رفرمینگ متان یک واکنش گرماگیر است، افزایش دما منجر به مشارکت بیشتر متان در واکنش می‌شود. با افزایش دما از ۶۰۰ درجه به ۹۰۰ درجه سلسیوس، دبی جریان مولی متان واکنش نداده به طور قابل‌توجهی از ۲۰۰ کیلو مول در ساعت به ۱۰ کیلو مول در ساعت کاهش می‌یابد. این کاهش در دبی جریان مولی متان به طور طبیعی با کاهش دبی جریان مولی بخار همراه است. برعکس، با افزایش دما، افزایش قابل‌توجهی در نرخ جریان مولی و کسر مولی مونوکسید کربن و هیدروژن به وجود می‌آید. به طور خاص، نرخ تولید هیدروژن از ۳۷۵ کیلو مول در ساعت به ۹۴۰ کیلو مول در

ACCEPTED MANUSCRIPT

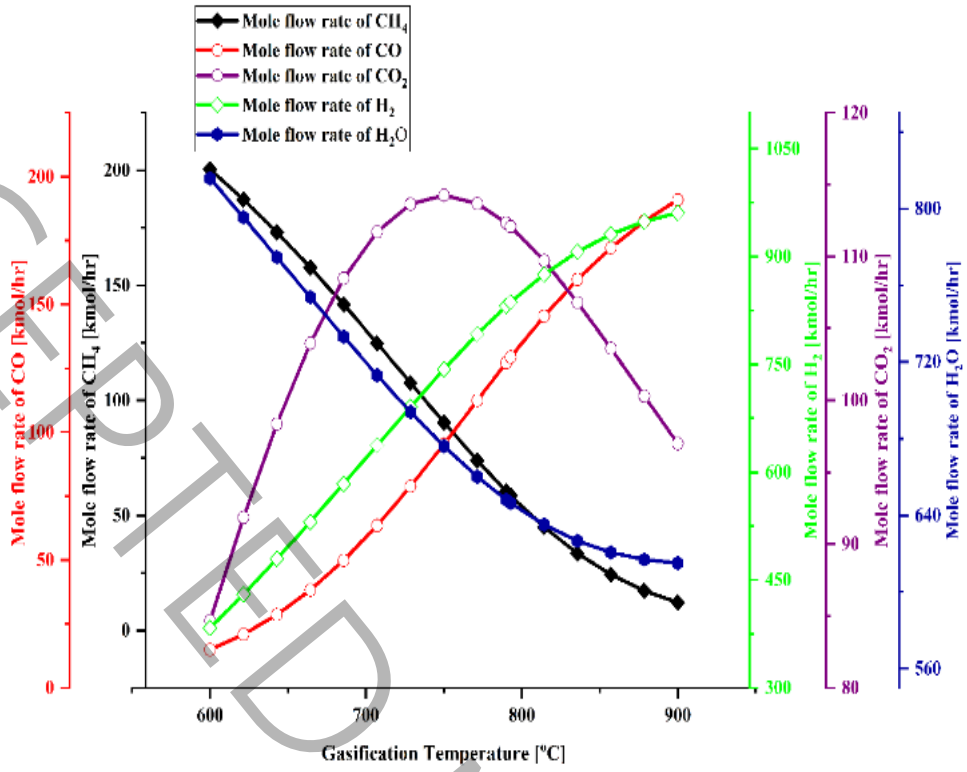
ساعت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تولید دی‌اکسیدکربن ابتدا با دما افزایش می‌یابد و به دنبال آن کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به‌شدت زیاد واکنش رفرمینگ خشک در دمای بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس نسبت داد.



شکل ۶. تاثیر درجه حرارت رفرمینگ بر کسر مولی محصولات

Fig. 6. Effect of reforming temperature on the mole fraction of products

ACCEPTED MANUSCRIPT

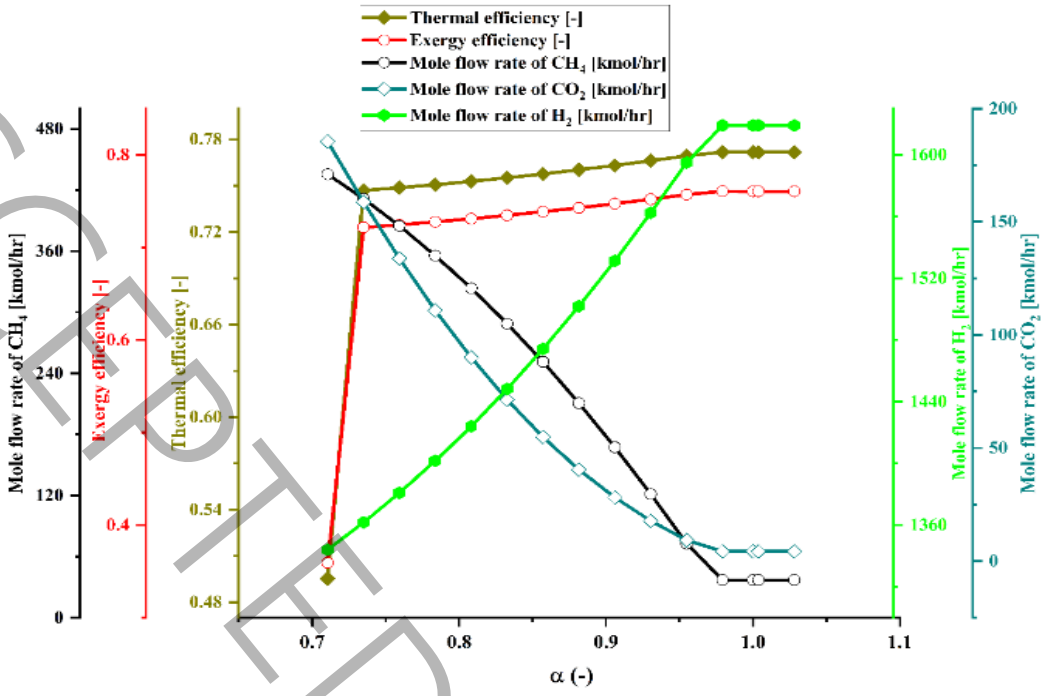


شکل ۷. تأثیر دما رفرمینگ بر نرخ جریان مول محصولات

Fig. 7. Effect of reforming temperature on the molar flow rate of products

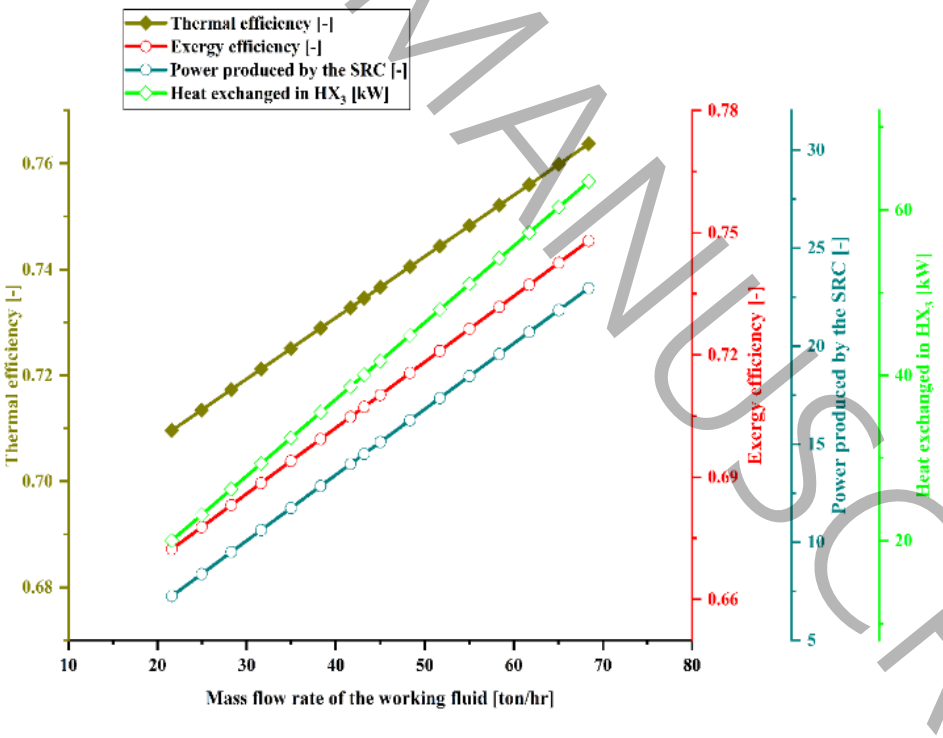
شکل ۸ اثر نسبت مولی کلسیم اکسید بر متان ورودی به راکتور رفرمینگ و همین‌طور راکتور رفرمینگ با جذب افزایش‌یافته را نشان می‌دهد. از آنجایی که تشکیل کربنات کلسیم یک واکنش گرمازا است، افزایش مقدار کلیسم اکسید منجر به تبدیل بیشتر متان در راکتور رفرمینگ با جذب افزایش‌یافته می‌شود. در نتیجه، خروجی از راکتور حاوی مقدار ناچیزی از متان واکنش نداده است. علاوه بر این، با افزایش این نسبت، دی‌اکسیدکربن تولید شده توسط راکتور به صفر نزدیک می‌شود. علاوه بر این، این نسبت افزایش‌یافته، فرایند رفرمینگ متان را افزایش می‌دهد و در نتیجه سرعت جریان مولی هیدروژن تولید شده را از ۱۳۶۰ به ۱۶۳۰ کیلومتر در ساعت افزایش می‌دهد. این افزایش به بهبود قابل توجهی در بازده کلی انرژی و اگسرژی سیستم کمک می‌کند.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۸. تأثیر نسبت مولی کلسیم اکسید به سوخت ورودی

Fig. 8. The effect of the molar ratio of calcium oxide to incoming fuel



شکل ۹. تاثیر نرخ جریان جرمی بخار را در چرخه رانکین

Fig. 9. The effect of steam mass flow rate on the Rankine cycle

ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل ۹ تاثیر نرخ جریان جرمی بخار را در چرخه رانکین نشان می دهد. با افزایش این پارامتر، تطابق حرارتی بین سیالات سرد و گرم بهبود می‌یابد و منجر به کاهش تخریب اگسرژی در اواپراتور و افزایش راندمان اگسرژی می‌شود. علاوه بر این، افزایش این پارامتر منجر به توان خروجی بالاتر و افزایش کلی بهره وری انرژی سیستم می‌شود.

۵-۵-نتایج اقتصادی

جدول ۷ نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی انجام شده بر روی سیستم پیشنهادی را نشان می دهد. قیمت واحد گاز طبیعی ۹/۱ دلار بر گیگاژول تعیین شده است، در حالی که قیمت انرژی هسته ای ۴/۰۳ دلار بر گیگاژول است. این ارزیابی اقتصادی بر اهمیت انجام یک تحلیل کامل که با شرایط اقتصادی منحصربه‌فرد، از جمله قیمت‌های متفاوت گاز طبیعی مشخص می‌شوند، تاکید می‌کند. این متغیرها می توانند به طور قابل توجهی بر نتایج اقتصادی مورد بحث تأثیر بگذارند و بر اهمیت تلقی این ارزیابی ها به عنوان دستورالعملهای اساسی تأکید کنند. علاوه بر این، الگوریتم شرح داده شده در جدول ۷، همراه با داده‌های جدول ۶، امکان تکرار نتایج را با استفاده از گاز طبیعی محلی فراهم می کند. علاوه بر این، با توجه به این‌که سیستم‌های ترکیبی چند منظوره پیشنهادی برای تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی، گرما و هیدروژن طراحی شده‌اند، تخصیص مناسب هزینه‌ها بین این سه خروجی بسیار مهم است. برای تعیین حداقل قیمت قابل قبول برای هیدروژن، این تحلیل نرخ بازار را ۴۴ دلار در مگاوات ساعت برای انرژی الکتریکی و ۲۵ دلار در مگاوات ساعت برای گرمای تولید شده در نظر می‌گیرد [۳۷].

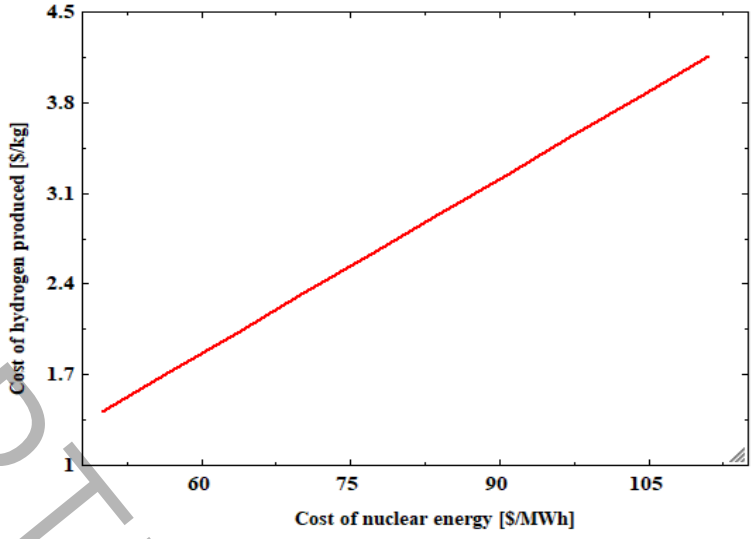
جدول ۷: داده های اقتصادی در ارتباط با سیستم پیشنهادی

Table 7. Economic data related to the proposed system

محل استفاده	مقدار
کل مخارج سرمایه‌ای (میلیون دلار)	۲۷۳/۳
مخارج سرمایه‌ای مستهلک شده (میلیون دلار بر سال)	۳۶/۵۹
هزینه عملیاتی (میلیون دلار بر سال)	۸۴/۳۲
الکتریسیته تولیدی سالانه (مگاوات ساعت بر سال)	۱۰۱۷/۹
گرمای تولیدی سالانه (مگاوات ساعت بر سال)	۱۴۰۹
هیدروژن تولیدی سالیانه (تن بر سال)	۲۲۲۵۰
انرژی تولیدی سالانه (مگاوات ساعت بر سال)	۳۱۶۸
هزینه یکسان شده انرژی (دلار بر مگاوات ساعت)	۳۸/۱۶
حداقل هزینه برآورد شده هیدروژن (دلار بر کیلوگرم هیدروژن)	۴/۱-۱/۸

با درنظرگرفتن هزینه متغیر سوخت هسته‌ای که در مقالات ذکر شده است، شکل ۱۰ تأثیر این پارامتر را بر هزینه هیدروژن تولید شده نشان می‌دهد، بدیهی است که با افزایش این پارامتر، هزینه هیدروژن تولیدی به صورت خطی افزایش می‌یابد. به طور خاص، هنگامی که هزینه سوخت هسته‌ای از ۵۹ به ۱۱۱ دلار در مگاوات ساعت افزایش می‌یابد، هزینه هیدروژن تولید شده از ۱/۸۰ به ۴/۱۰ دلار در کیلوگرم افزایش می‌یابد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۰. تاثیر قیمت سوخت هسته ای بر هزینه تولید هیدروژن

Fig. 10. The price of nuclear fuel directly affects the cost of hydrogen production

۶- جمع بندی

در این مطالعه، سیستمی برای تولید هم‌زمان توان، هیدروژن و گرما با استفاده از انرژی هسته‌ای و از طریق رفرمینگ به همراه جذب دی‌اکسیدکربن پیشنهاد شده است. عملکرد سیستم از نظر انرژی، اگسرژی و اقتصادی با استفاده از نرم‌افزار اسپن پلاس تحلیل شده است. همان‌طور که ذکر گردید گرمای موردنیاز برای هر دو فرایند رفرمینگ و جذب دی‌اکسیدکربن توسط انرژی هسته‌ای تأمین می‌شود و هلیوم به‌عنوان سیال عامل عمل می‌کند. برای افزایش تولید انرژی الکتریکی، از گرمای مبدل‌ها به‌منظور راه‌اندازی چرخه رانکین دی‌اکسیدکربن و بخار فوق‌بحرانی استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در زیر ارائه شده است:

- غیرقابل‌بازیابی‌ترین اجزای مرتبط با اواپراتور در چرخه رانکین شامل پیش خنک‌کننده و راکتور رفرمینگ است.
- در سیستم پیشنهادی بازده انرژی و راندمان اگسرژی به ترتیب ۷۲/۹ درصد و ۶۲/۹۵ درصد می‌باشد.
- هزینه تولید هیدروژن با درنظرگرفتن قیمت سوخت هسته‌ای از ۱/۸ تا ۴/۱ دلار به ازای هر کیلوگرم متغیر است.
- این سیستم دارای پتانسیل تولید هیدروژن با نرخ ۲/۹۸۸ تن در ساعت با توان خروجی ۱۳۶ مگاوات می‌باشد.
- راندمان الکتریکی و راندمان تولید هیدروژن به ترتیب ۲۳/۴۱ درصد و ۱۶/۷۷ درصد است که نشان می دهد این بازده در سیستم پیشنهادی نسبتاً بالا و قابل قبول است.

این سیستم پیشنهادی، باتوجه‌به قابلیت تولید هم‌زمان توان، هیدروژن و گرما، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار جامع برای تأمین نیازهای انرژی و سوختی در صنایع مختلف (مانند صنایع پتروشیمی، تولید فولاد و غیره) مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، باتوجه‌به پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، این سیستم می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات تغییرات آب‌وهوایی ایفا کند. طراحی این سیستم می‌تواند با تغییرات جزئی در پارامترهای طراحی (مانند نوع راکتور هسته‌ای، شرایط عملیاتی، و ظرفیت تولید) برای کاربردهای مختلف با مقیاس‌های متفاوت مورداستفاده قرار گیرد. بااین‌حال، بهینه‌سازی سیستم برای شرایط خاص جغرافیایی و دسترسی به منابع نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد. همچنین، توسعه و به‌کارگیری این سیستم نیازمند بررسی‌های اقتصادی و

ACCEPTED MANUSCRIPT

زیست‌محیطی جامع‌تر و ارزیابی ریسک‌های مرتبط با فناوری هسته‌ای است. علاوه بر این، مطالعات آتی می‌توانند به بهینه‌سازی اجزای غیرقابل‌بازیابی سیستم و افزایش راندمان کلی بپردازند.

Reference

[۱] H.A. Hassan, The Evolving Geopolitics of Climate Change: From Rio to Dubai COP28, From Rio to Dubai, 13.

[۲] S. Alam, J.P. Kumar, K.Y. Rani, C. Sumana, Comparative assessment of performances of different oxygen carriers in a chemical looping combustion coupled intensified reforming process through simulation study, Journal of Cleaner Production, 262 (2020) 121146.

[۳] S. Alam, C. Sumana, Thermodynamic analysis of plant-wide CLC-SESMR scheme for H2 production: Studying the effect of oxygen carrier supports, International Journal of Hydrogen Energy, 44(5) (2019) 3250-3263.

[٤] F. Raganati, P. Ammendola, CO2 post-combustion capture: a critical review of Current technologies and future directions, Energy & Fuels, 38(15) (2024) 13858-13905.

[٥] C. Wu, Q .Huang, Z. Xu, A.T. Sipra, N. Gao, L.P. de Souza Vandenberghe, S. Vieira, C.R. Soccol, R. Zhao, S. Deng, A comprehensive review of carbon capture science and technologies, Carbon Capture Science & Technology, 11 (2024) 100178.

[٦] M. Heidari, M. Tahmasebpoor, S.B. Mousavi, C. Pevida, CO2 capture activity of a novel CaO adsorbent stabilized with (ZrO2+ Al2O3+ CeO2)-based additive under mild and realistic calcium looping conditions, Journal of CO2 Utilization, 53 (2021) 101747.

[۷] J. Yin, X. Kang, C. Qin ,B. Feng, A. Veeraragavan, D. Saulov, Modeling of CaCO3 decomposition under CO2/H2O atmosphere in calcium looping processes, Fuel Processing Technology, 125 (2014) 125-138.

[۸] G. Santos, Road transport and CO2 emissions: What are the challenges?, Transport Policy, 59 (2017) 71-74.

[۹] A.M. Ali, M. Shahbaz, M. Inayat, K. Shahzad, A.A. Al-Zahrani, A.B. Mahpudz, Conversion of municipals waste into syngas and methanol via steam gasification using CaO as sorbent: An Aspen Plus modelling, Fuel, 349 (2023) 12864.٠

[۱۰] Y. Zhang, Y. Wang, K. Han, J. Zhao, J.J. Wu, Y. Li, Calcium looping for CO2 capture and thermochemical heat storage, a potential technology for carbon neutrality: a review, Green Energy and Resources, 2 (2024) 100078.

[۱۱] A.-M. Cormos, C.-C. Cormos, Techno-economic assessment of combined hydrogen & power co-generation with carbon capture: The case of coal gasification, Applied Thermal Engineering, 147 (2019) 29-39.

[۱۲] N. Saithong, S. Authayanun, Y. Patcharavorachot, A. Arpornwichanop, Thermodynamic analysis of the novel chemical looping process for two-grade hydrogen production with CO2 capture, Energy Conversion and Management, 180 (2019) 325-337.

[۱۳] A.A.D. Zare, M. Yari, H. Nami, F. Mohammadkhani, Low-carbon hydrogen, power and heat production based on steam methane reforming and chemical looping combustion, Energy Conversion and Management, 279 (2023) 116752.

[۱٤] A.A.D. Zare, M. Yari, Comprehensive examination and analysis of thermodynamics in a multi-generation hydrogen, heat, and power system based on plastic waste gasification integrated biogas-fueled chemical looping combustion, Process Safety and Environmental Protection, 183 (2024) 976-991.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[۱۵] W.G. Davies, S. Babamohammadi, Y. Yan, P.T. Clough, S.M. Soltani, Exergy analysis in intensification of sorption-enhanced steam methane reforming for clean hydrogen production: Comparative study and efficiency optimisation, Carbon Capture Science & Technology, 12 (2024) 100202.
[۱۶] Q. Wang, R. Macián-Juan, M. Yang, P. Zhang, X. Liu, B. Yang ,R. Li, H. Cheng, Y. Wang, S. Fang, Thermo-economic characteristics and cost-influencing mechanism analysis of an advanced nuclear-powered zero-carbon hydrogen-electricity co-production system with sulfur-iodine process and combined cycle, International Journal of Hydrogen Energy, 78 (2024) 688-702.
[۱۷] H. Ni, X. Qu, W. Peng, G. Zhao, P. Zhang, Study of two innovative hydrogen and electricity co-production systems based on very-high-temperature gas-cooled reactors, Energy, 273 (2023) 127206.
[۱۸] S. Guo ,D. Zhang, X. Li, X.a. He, H. Wang, J. Deng, X. Zhang, W. Tian, S. Qiu, G. Su, Exergy analysis of biomass and nuclear hydrogen production system, International Journal of Hydrogen Energy, 57 (2024) 1354-1363.
[۱۹] M. Ishaq, I. Dincer, A novel integrated gas-cooled fast nuclear reactor and vanadium chloride thermochemical cycle for sustainable fuel production, Journal of Cleaner Production, 468 (2024) 142853.
[۲۰] S. Schröders, K. Verfondern, H.-J. Allelein, Energy economic evaluation of solar and nuclear driven steam methane reforming processes, Nuclear Engineering and Design, 329 (2018) 234-246.
[۲۱] H. Nami, F. Mohammadkhani, F. Ranjbar, Utilization of waste heat from GTMHR for hydrogen generation via combination of organic Rankine cycles and PEM electrolysis, Energy Conversion and Management, 127 (2016) 589-598.
[۲۲] N. Norouzi, S. Talebi, M. Fani, H. Khajehpour, Exergy and exergoeconomic analysis of hydrogen and power cogeneration using an HTR plant, Nuclear Engineering and Technology, 53(8) (2021) 27.۲۷۶۰-۵۳
[۲۳] A.A. Darabadi Zare, F. Mohammadkhani, M. Yari, An efficient biogas-base tri-generation of power, heating and cooling integrating inverted Brayton and ejector transcritical CO2 cycles: exergoeconomic evaluation, Scientia Iranica, (2024).
[۲۴] A.A.D. Zare, M. Yari, Techno economic analysis of efficient and environmentally friendly methods for hydrogen, power, and heat production using chemical looping combustion integrating plastic waste gasification and thermochemical copper chlorine cycles ,Energy, 289 (2024) 129941.
[۲۵] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M.J. Moran, Thermal design and optimization, John Wiley & Sons, 1995.
[۲۶] M. Ji, J. Wang, Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators, International Journal of Hydrogen Energy, 46(78) (2021) 38612-38635.
[۲۷] R. Hegner, B. Atakan, A polygeneration process concept for HCCI-engines–Modeling product gas purification and exergy losses, International Journal of Hydrogen Energy.۱۲۹۷-۱۲۸۷ (۲۰۱۷) (۲)۴۲ ,
[۲۸] Y. Shirasaki, T. Tsuneki, Y. Ota, I. Yasuda, S. Tachibana, H. Nakajima, K. Kobayashi, Development of membrane reformer system for highly efficient hydrogen production from natural gas, International Journal of Hydrogen Energy, 34(10) (2009) 4482-4487.
[۲۹] E. Tosto, D. Martinez-Diaz, R. Sanz, G. Azzato, J.A. Calles, J.A. Medrano, E. Fernandez, D.A.P. Tanaka, F. Gallucci, D. Alique, Systematic experimental assessment of concentration polarization and inhibition in Pd-based membranes for hydrogen purification, Fuel Processing Technology, 213 (2021) 106661.
[۳۰] S. Yun, S.T. Oyama, Correlations in palladium membranes for hydrogen separation: A review, Journal of membrane science, 375(1-2) (2011) 28-45.
[۳۱] A.A.D. Zare, M. Yari ,F. Mohammadkhani, H. Nami, U. Desideri, Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a multi-generation gas-to-X system based on fuel-rich combustion to produce power, hydrogen, steam and heat, Sustainable Cities and Society, 86 (2022) 104139.
[۳۲] O. Balli, T.H. Karakoc, Exergetic, exergoeconomic, exergoenvironmental damage cost and impact analyses of an aircraft turbofan engine (ATFE), Energy, 256 (2022) 124620.
[۳۳] A.D. Zare, R.K. Saray, S. Mirmasoumi, K. Bahlouli, Optimization strategies for mixing ratio of biogas and natural gas co-firing in a cogeneration of heat and power cycle, Energy, 181 (2019) 635-644.
[۳۴] Z. Sun, S. Wang, M. Aziz, Highly integrated system for ammonia and electricity production from biomass employing direct chemical looping :exergy and exergoeconomic analyses, Energy Conversion and Management, 251 (2022) 115013.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[۳۵] K.S. Ng, J. Sadhukhan, Process integration and economic analysis of bio-oil platform for the production of methanol and combined heat and power, Biomass and Bioenergy, 35(3) (2011) 1153-1169.
[۳۶] V. Spallina, D. Pandolfo, A. Battistella, M.C. Romano, M.V.S. Annaland, F. Gallucci, Techno-economic assessment of membrane assisted fluidized bed reactors for pure H2 production with CO2 capture, Energy Conversion and Management, 120 (2016) 257-273.
[۳۷] F. Mohammadkhani, N. Shokati, S. Mahmoudi, M. Yari, M. Rosen, Exergoeconomic assessment and parametric study of a Gas Turbine-Modular Helium Reactor combined with two Organic Rankine Cycles, Energy, 65 (2014) 533-543.

ACCEPTED MANUSCRIPT