مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 42-50

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تولید هیدروژن با استفاده از بازیاب گرمای اتلافی از سیستم تولید توان و بدون آلایندگی ماتیانت توسط الکترولایزر غشاء پروتونی

سیدفرامرز رنجبر[1*]، حسین نامی[2]، علیرضا خورشید غازانی[3]، حامد محمدپور[4]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5147687464، s.ranjbar@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 تیر 1395

پذیرش: 12 شهریور 1395

ارائه در سایت: 11 مهر 1395

کلید واژگان:

الکترولایزر غشاء پروتونی

تولید هیدروژن

چرخه ماتیانت

چرخه رانکین آلی

راندمان اگزرژی

چکیده

در این تحقیق ترکیب چرخه‌ی ماتیانت وچرخه‌ی رانکین آلی با مبدل غشاء پروتونی برای تولید همزمان توان و هیدروژن از دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. از حرارت اتلافی در چرخه‌ی ماتیانت به عنوان گرمای مورد نیاز برای راه‌اندازی چرخه‌ی رانکین آلی استفاده شده است. اثر پارامترهای طراحی مانند دمای اواپراتور، حداقل اختلاف دمایی در مبدل گرمایی، درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی توربین چرخه‌ی رانکین آلی و راندمان آیزنتروپیک توربین چرخه‌ی رانکین آلی بر مقدار هیدروژن تولیدی، توان تولیدی توسط چرخه‌ی رانکین آلی و راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش مقدار حداقل اختلاف دمایی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و نهایتا هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی کاهش می‌یابند. همچنین افزایش دمای اواپراتور باعث بهینه شدن توان تولیدی چرخه رانکین آلی، هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی می‌شود. با افزایش درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی توربین، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و در نهایت هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی کاهش می‌یابد. همچنین مطابق با انتظار، با افزایش راندمان توربین، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و نهایتا هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد.

Hydrogen production using waste heat recovery of MATIANT non-emission system via PEM electrolysis

Seyed Faramarz Ranjbar*, Hossein Nami, Alireza Khorshid Ghazani, Hamed Mohammadpour

Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5147687464, Tabriz, Iran, s.ranjbar@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 July 2016
Accepted 02 September 2016
Available Online 02 October 2016

Keywords:
PEM electrolysis
Hydrogen production
MATIANT system
ORC
Exergy efficiency

ABSTRACT

In the current study, with the aim of power and hydrogen production, combination of Matiant cycle with an ORC unit and PEM electrolysis has been analyzed from the viewpoints of energy and exergy. Waste heat of the Matiant cycle is used to run the ORC. Effect of some designing variables, i.e. evaporator temperature, minimum temperature difference in heat exchanger, degree of superheating in ORC turbine inlet and isentropic efficiency of ORC turbine on the rate of produced hydrogen, ORC produced power and exergy efficiency of the combined system has been investigated. It is observed that, increasing the minimum temperature difference leads to decrease in the rate of produced hydrogen, ORC produced power and consequently exergy efficiency of the combined system. Also, change in the evaporator temperature optimizes the rate of produced hydrogen, ORC produced power and therefore the exergy efficiency of the combined system. Also, results showed that increasing the degree of superheating in the ORC turbine inlet decreases the rate of produced hydrogen, ORC produced power and the exergy efficiency of the combined system. As expected, increasing the isentropic efficiency of ORC turbine leads to an increase in rate of produced hydrogen, ORC produced power and therefore the exergy efficiency of the combined system.

1- مقدمه

با توجه به افزایش نیاز به انرژی در کشورهای در حال توسعه و نیز مسئله آلایندگی در اثر مصرف بی رویه سوخت، استفاده از سیستم‌های انرژی با حداقل آلایندگی و راندمان بالا، اهمیت چشم‌گیری یافته است. از جمله راه‌های جلوگیری از تلفات انرژی در سیستم‌های تولید توان، استفاده از گرمای اتلافی در مبدل‌های حرارتی است. از جمله راه‌های مهار آلایندگی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. F. Ranjbar, H. Nami, A. Khorshid Ghazani, H. Mohammadpour Hydrogen production using waste heat recovery of MATIANT non-emission system via PEM electrolysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 43-50, 2016 (in Persian)

استفاده از چرخه‌های تولید توان اوکسی‌فیول[1] است که در آن‌ها واکنش احتراق سوخت، به جای هوا با اکسیژن خالص صورت می‌گیرد [1]. چرخه اوکسی‌فیول ماتیانت[2] از جمله سیستم‌های تولید توان بدون آلایندگی می‌باشد که برای اولین بار توسط ماتیو و یانتوسکی در سال 1999 در انجمن مهندسان مکانیک امریکا[3] مطرح شد [2-4]. هدف از مطالعه‌ی آن‌ها ارائه‌ی چرخه‌ی تولید توان با محفظه احتراق اوکسی‌فیول بود که این چرخه نه‌تنها توانایی ذخیره‌سازی تمام دی‌اکسیدکربن تولید شده در محفظه احتراق را داشت، بلکه از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک نیز راندمان نسبتا بالایی داشت. از آنجاییکه دی‌اکسیدکربن ذخیره‌سازی شده در چرخه‌ی ماتیانت از منظرگاه تهیه‌ی ترکیبات ارزشمندی همچون متانول اهمیت زیادی دارد، سلطانیه و همکارانش از چرخه‌ی ماتیانت به عنوان مولد توان و دی‌اکسیدکربن، در یک چرخه‌ی تولید همزمان استفاده کردند که هدف آن‌ها استفاده از دی‌اکسیدکربن تولید شده در واحد متانول‌سازی بود [5].

از جمله راهکارهای بهبود عملکرد چرخه‌های تولید توان، ترکیب کردن چرخه‌های متفاوت اما سازگار به لحاظ ترمودینامیکی با یکدیگر می‌باشد. در مقایسه با دیگر واحدهای تولید توان، به عنوان چرخه‌های قابل ترکیب با سایر سیستم‌ها، چرخه‌های رانکین آلی از نقاط قوت خاصی برخوردار هستند. برای مثال سیال کاری استفاده شده در چرخه‌ی رانکین آلی نسبت به آب، افت آنتالپی کمتری در توربین‌های تولید توان دارند که همین امر موجب بالا بودن دبی سیال کاری شده و نهایتا منجر به پایین بودن میزان تلفات و بالا بودن راندمان آدیاباتیک توربین می‌شود [6]. مطالعات بسیاری در مورد بازیاب گرمای اتلافی از سیستم‌های تولید توان توسط چرخه‌های رانکین آلی صورت گرفته است که به مواردی از آن‌ها اشاره می‌شود. یاری و همکارانش از چرخه رانکین آلی برای تولید توان از گرمای اتلافی سیستم توربین گاز با سیال هلیوم استفاده کردند [7]. آن‌ها نشان دادند بازیاب گرما توسط چرخه رانکین آلی، راندمان انرژی و اگزرژی سیستم ترکیبی را 3 درصد افزایش داده و تخریب اگزرژی را 5 درصد کاهش می‌دهد. همچنین یاری و همکارانش ترکیب سیستم توربین گاز با سیال هلیوم با پیکر بندی‌های مختلف از چرخه رانکین آلی را مطالعه کردند [8]. نتیجه مطالعه آنها این بود که چرخه رانکین آلی با ساده ترین پیکربندی بهترین عملکرد ترمودینامیکی را دارد. پوریا احمدی و همکارانش از چرخه رانکین آلی برای تولید توان از انرژی اقیانوس استفاده کردند [9]. آن‌ها نشان دادند که راندمان انرژی و اگزرژی سیستم ترکیبی به ترتیب 3.6 درصد و 22.7 درصد می‌باشد و همچنین نتیجه گرفتند از این توان تولیدی توسط چرخه رانکین آلی می‌توان برای تولید هیدروژن به مقدار 1.2 کیلوگرم بر ساعت استفاده کرد.

از سوی دیگر با توجه به رشد سریع جمعیت در کشورهای صنعتی و افزایش استانداردهای زندگی در جوامع پیشرفته و به دنبال آن افزایش میزان تولید و انتشار کربن‌دی‌اکسید، استفاده از سوخت‌های پاک و سازگارتر با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی که عامل اصلی گرم شدن کره‌ی زمین می‌باشد نیاز به معرفی سوختی قابل اعتماد، مقرون به صرفه و با منبع پایدار، بیش از پیش احساس می‌شود. به همین دلیل هیدروژن به عنوان یک سوخت پاک و جایگزین معرفی شده است. محققین مطالعات زیادی را در مورد تولید هیدروژن با روش‌های گوناگون انجام داده‌اند که به مواردی از آن‌ها اشاره می‌شود. خالد و همکاران سیستم‌های انرژی یکپارچه هیدروژنی را از نقطه نظر انرژی و اگزرژی مورد بررسی قرار دادند [10]. آنها یک سیستم ترکیبی بر مبنای انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی و فتوولتائیک خورشیدی را مطرح کردند و بدین نتیجه رسیدند که بازده انرژی و اگزرژی به ترتیب برابر 26 و 26.8 درصد می‌باشد و سیستم پیشنهادی سالانه 1523 کیلوگرم هیدرژن تولید می‌کند. یوکسل و همکاران سیستم ترکیبی جدیدی برپایه انرژی خورشیدی به منظور تولید همزمان توان، هیدروژن، آب گرم، سرمایش و گرمایش مطرح کردند و نتیجه‌ی مطالعه‌ی آن‌ها این بود که دمای سطح داخلی لوله‌های جاذب و شدت تابش خورشید رابطه مستقیم بر میزان تولید هیدروژن از الکترولایزر غشاء پروتونی دارد [11]. آکار و دینسر سیستم تولید هیدروژن فوتوالکتروشیمیایی را به صورت تجربی بررسی کردند و هدف سیستم مطرح شده نه تنها تولید هیدروزن از طریق واکنش تجریه آب بلکه تبدیل محصولات به مواد ارزشمندی همچون کلرین و سدیم هیدروکسید بود. تولید هیدروژن توسط سیستم ذکر شده درحالت بدون تابش و تابش با شدت 1200 وات بر متر مربع به ترتیب برابر 145 و 295 مول در ساعت گزارش شد [12]. احمدی و همکاران ترکیبی از سیستم خورشیدی با انرژی اقیانوس و الکترولایزر غشاء پروتونی را از نقطه نظر انرژی واگزرژی مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش دادند مقدار هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر غشاء پروتونی برابر با 1.2 کیلو گرم در ساعت می‌باشد درحالیکه بازده اگزرژی الکترولایزر غشاء پروتونی برابر با 56.5 درصد می‌باشد [9]. احمدی و همکاران سیستم‌های جدید تولید همزمان انرژی را برپایه انرژی خورشیدی برای تولید توان، هیدروژن و آب شیرین مطرح کردند و نتیجه این بود که در حالت بهینه برای سیتم ترکیبی مطرح شده بازده اگزرژی 60 درصد و آهنگ هزینه کل صرف شده برابر با 154 دلار بر ساعت می‌باشد [13].

در این مطالعه، به منظور استفاده از گرمای هدر شده در مبدل حرارتی چرخه‌ی ماتیانت، از ترکیب واحد تولید توان رانکین آلی و الکترولایزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن استفاده شد. ترکیب سیستم پیشنهادی ذکر شده، با تبدیل گرمای اتلافی به هیدروژن تولیدی، نه تنها عملکرد چرخه‌ی پایه را بهبود می‌دهد، بلکه ماهیت بدون آلایندگی آن را نیز حفظ می‌کند. اثرات تغییر پارامترهای طراحی چرخه‌ی رانکین آلی در راندمان سیستم ترکیبی و نیز مقدار هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر غشاء پروتونی مورد بررسی قرار گرفته است. لیو و همکارانش از بازیاب اتلاف حرارتی گازهای خروجی موتور احتراقی برای تولید هیدروژن به شیوه‌ی ریفورم کردن بخار- متانول[4] (فرآیندی گرماگیر) استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که در شرایط پایه دبی هیدروژن تولید شده 1.34 مول بر دقیقه بوده که به ازای هر 1.6 مول هیدروژن یک مگاژول از گرمای بازیاب شده مورد مصرف قرار می‌گرفت [14]. لی و همکارانش از بازیاب اتلاف حرارتی راکتور دما بالا توسط چرخه‌ی رانکین آلی با سیال کاری مختلف برای تولید هیدروژن استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند زمانیکه از اتلاف حرارت برای تولید هیدروژن استفاده شود، راندمان کلی سیستم تا 13.57 درصد قابلیت افزایش خواهد داشت [15].

[1] Oxy-fuel
[2] Matiant
[3] ASME
[4] Steam-Methanol reforming

2- مدل سازی و تحلیل انرژی

به منظور مدلسازی ترمودینامیکی، سیستم ترکیبی پیشنهادی به سه قسمت تقسیم می‌شود: سیستم تولید توان و بدون آلایندگی ماتیانت، چرخه رانکین آلی و الکترولایزر غشاء پروتونی.

شکل 1 دیاگرام شماتیک از سیستم ترکیبی پیشنهادی رانشان می‌دهد، دراین سیستم چرخه‌ی رانکین آلی، حرارت هدر رفته از چرخه‌ی ماتیانت را به وسیله‌ی تبخیر سیال مورد نظر در اواپراتور بازیابی می‌کند.

سیال تبخیر شده در اواپراتور در توربین چرخه‌ی رانکین آلی منبسط شده و تولید توان می‌کند و سپس از توان تولید شده دراین چرخه برای تولید هیدروژن توسط الکترولیز غشاء پروتونی استفاده می‌شود. تعادل انرژی و قوانین حاکم بر هر یک از بخش‌های سیستم ترکیبی در قسمت‌های بعدی بیان گردیده است.

2-1- تحلیل انرژی

2-1-1- چرخه ماتیانت

چرخه‌ی ماتیانت در واقع یک چرخه‌ی فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید بدون آلایندگی است که سیال کاری آن دی‌اکسیدکربن بوده و سوخت توسط اکسیژن خالص سوزانده می‌شود.

بدلیل عملکرد چرخه در دما و فشار بالا نیازمند تجهیزات پیشرفته در زمینه‌ی توربین‌ها خواهیم بود. مهمترین ویژگی این چرخه، قابلیت جداسازی تمام دی‌اکسیدکربن تولید شده در محفظه‌ی احتراق می‌باشد.

همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، متان به عنوان سوخت با اکسیژن خالص وارد محفظه احتراق شده و محصولات احتراق که ترکیبی از بخار آب و دی‌اکسیدکربن می‌باشد در دمای 1300 درجه‌ی سانتی‌گراد محفظه احتراق را ترک کرده و به منظور تولید توان در توربین منبسط می‌شود، سپس به منظور استفاده از انرژی بالای سیال خروجی از توربین، سیال وارد مبدل حرارتی شده و جریان ورودی و خروجی توربین دی‌اکسیدکربن را گرم می‌کند [5]، در مرحله‌ی بعدی سیال وارد مبدل گرمایی شده و تا حدودی خنک می‌شود، درواقع این حرارت اتلافی در مبدل گرمایی منبع اصلی راه‌اندازی چرخه‌ی رانکین آلی و نهایتا تولید هیدروژن است. سپس سیال وارد واحد جداکننده‌ی بخار می‌شود، با توجه به اختلاف زیاد مقدار گرمای ویژه برای دی‌اکسیدکربن و بخار آب، دی‌اکسید کربن موجود در محصولات احتراق که در بخشی از چرخه به عنوان سیال کاری ایفای نقش می‌کند، در مرحله‌ی چگالش بخار آب، کاملا قابل جداسازی و ذخیره است. دی‌اکسیدکربن جداشده وارد کمپرسور 3مرحله شده و فشار آن افزایش یافته و نهایتا از آن به عنوان سیال ورودی به توربین تولید توان استفاده می‌شود. روابط بقای انرژی برای قسمت‌های اصلی چرخه‌ی ماتیانت به قرار زیر است [5]:

برای اکسپندرها، پمپ و کمپرسور با استفاده از تعریف راندمان آیزنتروپیک:

$$\eta_{\text{isen.expander}} = \frac{\dot{w}_{\text{expander}}}{\dot{w}_{\text{isen .expander}}} \tag{1}$$

$$\eta_{\text{isen.compressor}} = \frac{\dot{w}_{\text{isen.compressor}}}{\dot{w}_{\text{compressor}}} \tag{2}$$

$$\eta_{\text{isen.pump}} = \frac{\dot{w}_{\text{isen.pump}}}{\dot{w}_{\text{pump}}} \tag{3}$$

برای مبدل‌های حرارتی و پیش‌گرمکن از تعریف بقای انرژی:

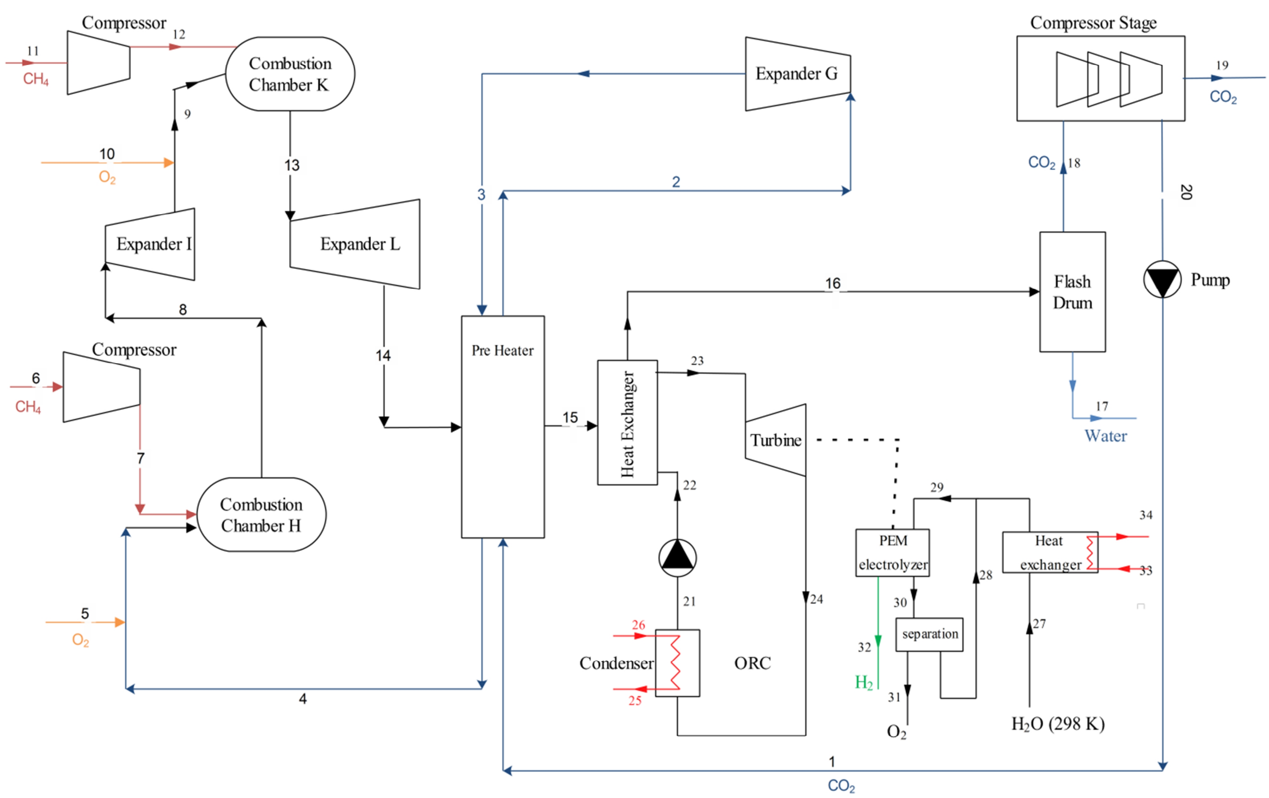

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed combined system

شکل 1 شماتیک چرخه‌ی ترکیبی پیشنهادی

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e \quad (4)$$

جزئیات بیشتر در مورد مدل‌سازی چرخه‌ی ماتیانت در منابع [2-5] موجود می‌باشد.

2-1-2- سیکل رانکین آلی

دیاگرام شماتیک چرخه رانکین آلی در شکل 1 نمایش داده شده است، چرخه‌ی رانکین آلی از حرارت اتلافی چرخه ماتیانت برای تولید توان استفاده می‌کند. توربین و پمپ چرخه‌ی رانکین آلی به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته شده و بالانس انرژی برای تولید و مصرف توان با روابط زیر بیان می‌گردند [9]:

$$\dot{W}_{\mathrm{ORCT}} = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{24}) \quad (5)$$

$$\dot{W}_{\mathrm{ORCP}} = \dot{m}_{21}(h_{22} - h_{21}) \quad (6)$$

که ORCT و ORCP به ترتیب بیانگر توربین و پمپ چرخه‌ی رانکین آلی می‌باشد.

از افت فشار در لوله‌ها و همچنین خطوط انتقال صرف نظر گردیده است [9].

3-1-2- الکترولایزر غشاء پروتونی

دیاگرام شماتیک الکترولایزر غشاء پروتونی در سمت راست شکل 1 ترسیم گردیده است، همانطور که مشاهده می‌گردد چرخه رانکین آلی توان مورد نیاز الکترولایزر برای واکنش الکترو شیمیایی را تامین می‌کند. آب مایع در شرایط محیط وارد مبدل حرارتی می‌گردد که آن را به دمای الکترولایزر می‌رساند، سپس آب گرم شده برای تولید هیدروژن وارد الکترولایزر می‌گردد. هیدروژن تولید شده بعد از ترک کاتد، گرمای خود را به محیط داده و به دمای محیط می‌رسد و مخلوطی از اکسیژن و آب باقیمانده آند را ترک می‌کند که اکسیژن تولیدی از آب جدا می‌گردد و آب باقیمانده نیز برای ادامه فرایند تولید هیدروژن وارد چرخه می‌گردد. در حالت کلی الکترولایزر غشاء پروتونی وظیفه تبدیل آب، توان و حرارت به هیدروژن و اکسیژن را دارد.

1-3-1-2- مدلسازی ترموشیمیایی الکترولایزر غشاء پروتونی

در گام اول محاسبه میزان انرژی تئوری برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیت ضروری به نظر می‌رسد که کل انرژی مورد نیاز از رابطه‌ی (7) بدست می‌آید:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (7)$$

ΔG انرژی الکتریکی مورد نیاز (انرژی آزاد گیبس) و $T\Delta S$ انرژی گرمایی مورد نیاز در واحد ژول بر مول هیدروژن می‌باشد. مقادیر گیبس، آنتالپی و آنتروپی برای آب، هیدروژن و اکسیژن در جداول ترمودینامیکی موجود می‌باشند [16,17]. انرژی تئوری لازم برای الکترولیز آب بدون اتلافات در نظر گرفته شده است.

آهنگ جریان مولی برای هیدروژن تولیدی از رابطه‌ی (8) بدست می‌آید [16]:

$$\dot{N}_{\mathrm{H_2,out}} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{\mathrm{H_2O,reacted}} \quad (8)$$

در معادله (8)، F بیانگر ثابت فارادی و J بیانگر چگالی جریان می‌باشد. به طور مشابه آهنگ جریان مولی اکسیژن تولیدی و آب باقیمانده می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$\dot{N}_{\mathrm{H_2,out}} = \frac{J}{4F} \quad (9)$$

$$\dot{N}_{\mathrm{H_2O,out}} = \dot{N}_{\mathrm{H_2O,in}} - \frac{J}{2F} \quad (10)$$

آهنگ جریان مولی آب ورودی ($\dot{N}_{\mathrm{H2O,in}}$) در این حالت، پارامتری مشخص می‌باشد.

انرژی الکتریکی مورد نیاز که برابر با اگزرژی ورودی می‌باشد به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$E_{\mathrm{electric}} = Ex_{\mathrm{electric}} = JV \quad (11)$$

E_{electric} و Ex_{electric} به ترتیب به عنوان انرژی و اگزرژی ورودی می‌باشند و پارامتر V نیز به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$V = V_0 + V_{\mathrm{act,c}} + V_{\mathrm{act,a}} + V_{\mathrm{ohm}} \quad (12)$$

در رابطه‌ی فوق، V_0 پتانسیل برگشت پذیر می‌باشد که توسط معادله نرنست[1] بدست می‌آید و $V_{\mathrm{act,c}}$ و $V_{\mathrm{act,a}}$ و V_{ohm} به ترتیب بیانگر پتانسیل فعال کننده کاتد و پتانسیل فعال کننده آند و پتانسیل اهمیک می‌باشد.

$$V_0 = 1.229 - 0.00085(T_{\mathrm{PEM}} - 298) \quad (13)$$

مقاومت یونی غشاء تابعی از محتوی رطوبت، ضخامت غشاء و دمای آن می‌باشد [18]. رسانایی یونی محلی الکترولایزر غشاء پروتونی نیز از رابطه (15) بدست می‌آید [19]:

$$\sigma_{\mathrm{PEM}}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326]\exp[1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})] \quad (14)$$

$\lambda(x)$ محتوی آب در موقعیت x (عمق غشای اندازه‌گیری شده از سطح کاتد) که می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_{\mathrm{a}} - \lambda_{\mathrm{c}}}{D}x + \lambda_{\mathrm{c}} \quad (15)$$

λ_{c} و λ_{a} محتوی آب در سطح غشاء در سمت کاتد و آند می‌باشند و D نیز نشان دهنده ضخامت غشاء می‌باشد. مقاومت اهمی کل می‌تواند به صورت زیر بیان گردد [20]:

$$R_{\mathrm{PEM}} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{\mathrm{PEM}}[\lambda(x)]} \quad (16)$$

بنابراین معادله (17) بیانگر پتانسیل اهمیک بر پایه قانون اهم می‌باشد:

$$V_{\mathrm{ohm}} = JR_{\mathrm{PEM}} \quad (17)$$

درواقع پتانسیل فعالساری همان پتانسیل فعالسازی الکترودهاست که انرژی لازم برای واکنش الکتروشیمیایی را فراهم می‌کند، بنا براین:

$$V_{\mathrm{act},i} = \frac{RT}{F}\sinh^{-1}(\frac{J}{2J_{0,i}}) = \frac{RT}{F}\mathrm{Ln}[\frac{J}{2J_{0,i}} + \sqrt{1 + \left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)^2}] \qquad i = \mathrm{a,c} \quad (18)$$

در رابطه‌ی (18)، J_0 تبادل چگالی جریان بوده و به صورت زیر بیان می‌گردد [9]:

$$J_{0,i} = J_i^{\mathrm{ref}}\exp(\frac{-E_{\mathrm{act},i}}{RT}) \quad , i = \mathrm{a,c} \quad (19)$$

که در آن E_{act} انرژی فعالسازی و J^{ref} فاکتور پتانسیل اولیه می‌باشد، جزئیات بیشتر در مورد الکترولایزر غشاء پروتونی در مراجع [19-22] موجود می‌باشد.

3- تحلیل اگزرژی

تحلیل اگزرژی می‌تواند ابزاری قدرتمند برای تعیین نوع و میزان دقیق اگزرژی هدر رفته در هر قسمت از سیستم‌های انرژی باشد [23]. به همین دلیل می‌تواند نقش موثری در استفاده مفید از انرژی در سیستم‌های تبدیل انرژی بازی کند [24]. با بکار بردن قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای هر یک از اجزا، بالانس اگزرژی بدین صورت خواهد بود [6]:

[1] Nernst equation

$$\sum_{\text{in}} \dot{E}_i = \sum_{\text{out}} \dot{E}_j + \dot{E}_\text{D} + \dot{E}_\text{L} \quad (20)$$

$\sum_\text{in} \dot{E}_i$ و $\sum_\text{out} \dot{E}_j$ به عنوان آهنگ اگزرژی ورودی و خروجی بیان می‌گردند. $\dot{E}_\text{L}$ و $\dot{E}_\text{D}$ به ترتیب بیانگر اگزرژی هدر رفت و اگزرژی تخریب شده می‌باشند.

با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل، اگزرژی ویژه‌ی جریانی به صورت مجموع اگزرژی ویژه‌ی فیزیکی و اگزرژی ویژه‌ی شیمیایی بیان می‌گردد [6].

$$e_\text{i} = e_\text{ph,i} + e_\text{ch,i} \quad (21)$$

اگزرژی ویژه شیمیایی جریانی وابسته به دما و فشار جریان و همچنین دما و فشار محیط می‌باشد:

$$e_\text{i}^\text{ph} = h_\text{i} - h_0 - T_0(S_\text{i} - S_0) \quad (22)$$

همچنین اگزرژی شیمیایی مخصوص برای ترکیب یک گاز ایده‌آل از رابطه‌ی (23) قابل محاسبه است.

$$e_\text{mix}^\text{ch} = \sum x_i e_{0,i}^\text{ch} + \bar{\text{R}} T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (23)$$

در رابطه‌ی (23)، x_i کسر مولی و $e_{0,i}^\text{ch}$ اگزرژی شیمیایی استاندارد i امین جز می‌باشد.

3-1- بازده اگزرژی

درصدی از اگزرژی ورودی به سیستم که در محصولات تولیدی موجود باشد به عنوان راندمان اگزرژی سیستم‌های انرژی تعریف می‌شود.

بازده اگزرژی برای سیستم ترکیبی از طریق رابطه (24) بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_\text{net} + \dot{N}_{\text{H}_2,\text{out}} \times \dot{E}_{\text{H}_2}}{\dot{E}_\text{in}} \quad (24)$$

در رابطه‌ی (24)، $\dot{W}_\text{net}$ نشان دهنده‌ی توان خالص تولیدی در چرخه‌ی ماتیانت، $\dot{E}_\text{in}$ نشان دهنده‌ی اگزرژی ورودی به سیستم ترکیبی (اگزرژی سوخت) و $\dot{E}_{\text{H}_2}$ بیانگر مقدار اگزرژی هیدروژن تولیدی می‌باشد.

4- نتایج

4-1- فرضیات و اطلاعات ورودی

برای مدل‌سازی سیستم ترکیبی پیشنهادی از نرم‌افزار EES استفاده شده است. به منظور ساده‌سازی در مساله‌ی شبیه‌سازی فرضیات زیر به کار گرفته شده است [19,5]:

- سیستم ترکیبی در حالت پایا کار می‌کند.
- افت فشار و تلفات حرارتی در لوله‌ها و مبدل‌های حرارتی ناچیز است.
- تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز است.
- برای تبخیر کردن سیال چرخه‌ی رانکین آلی در مبدل گرمایی، حداقل اختلاف دمایی[1] 2 تا 10 درجه در نظر گرفته شده است.
- برای بخار ورودی به توربین چرخه‌ی رانکین آلی 0 تا 15 درجه فوق گرم بودن در نظر گرفته شده است.
- سیال کاری در چرخه‌ی رانکین آلی R123 می‌باشد.
- دمای کندانسور در چرخه رانکین آلی 25 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است.
- برای اکسپندرها، توربین، پمپ‌ها و کمپرسور راندمان آیزنتروپیک در نظر گرفته شده است.

همچنین پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی الکترولایزر غشاء پروتونی در جدول 1 آورده شده است.

4-2- اعتباردهی نتایج

به منظور اعتباردهی و صحت‌سنجی نتایج مطالعه‌ی حاظر، از نتایج گزارش شده در منابع [5] و [19] به طور جداگانه برای سیستم ماتیانت و الکترولایزر غشاء پروتونی استفاده شده است. جدول 2 مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تحلیل سلطانیه و همکاران [5] و تحلیل حاضر در مورد چرخه‌ی ماتیانت را نشان می‌دهد، همچنین شکل 2 مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از منبع [19] و تحلیل حاضر در مورد الکترولایزر غشاء پروتونی را نشان می‌دهد. همانطور که از جدول 2 و شکل 2 مشخص است، همخوانی خوبی بین نتایج ناشی از شبیه‌سازی و نتایج گزارش شده در منابع وجود دارد.

مطابق شکل 2 پتانسیل سلول برای جریان‌های کمتر از $300\ \text{A/m}^2$

جدول 1 پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی الکترولایزر غشاء پروتونی

Table 1 Input parameters for PEM electrolysis modeling

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
1.0	$P_{\text{O}_2} = P_{\text{H}_2}$(atm)	80	T_PEM(°C)
50	D(μm)	76	$E_\text{act,a}$(kJ/mol)
96486	F(C/mol)	18	$E_\text{act,c}$(kJ/mol)
1.7×10^5	J_a^ref(A/m^2)	14	λ_a
4.6×10^3	J_c^ref(A/m^2)	10	λ_c

جدول 2 مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تحلیل حاضر و ارایه شده در منابع در مورد چرخه‌ی ماتیانت

Table 2 Comparison of the results obtained from the present work and those reported in the literature for the MATIANT cycle.

سلطانیه وهمکاران [5]	مطالعه‌حاضر	پارامتر
1573	1573	دمای بالای چرخه [K]
40	40	فشار پایین اکسپندرها [bar]
873	873	دمای اکسپندر CO_2 [K]
300	300	فشار بالای چرخه [bar]
185	185	انرژی ورودی [MW]
89.7	90.25	توان تولیدی [MW]
48.45	48.79	راندمان اگزرژی [%]

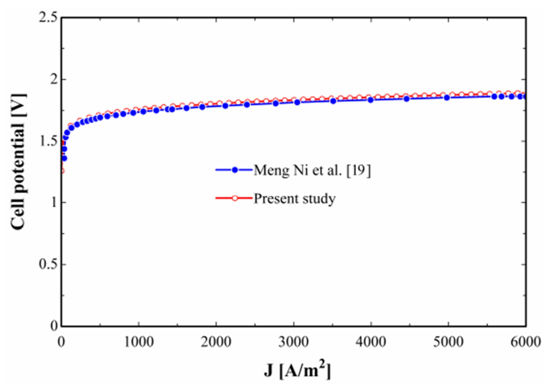

Fig. 2 Comparison of the results obtained from the present model and those reported in the literature for the PEM electrolysis

شکل 2 مقایسه‌ی نتایج منبع [19] و مطالعه‌ی حاضر در مورد شبیه‌سازی الکترولایزر غشاء پروتونی

[1] Pinch Point temperature difference

رشد جهشی دارد. اما برای جریان‌های بیش از $300\ A/m^2$ تغییر پتانسیل سلول با چگالی جریان به کندی صورت می‌گیرد. برای توجیه این امر باید اشاره کرد که تغییر پتانسیل فعال‌کننده‌ی آند و کاتد به ازای چگالی جریان عامل تغییر ناگهانی پتانسیل جریان برای چگالی جریان کمتر از $300A/m^2$ می‌باشد [19].

4-3- مطالعه‌ی پارامتریک

این قسمت از مطالعه، به منظور نشان دادن اثر پارامترهای طراحی مربوط به چرخه‌ی رانکین آلی در رفتار ترمودینامیکی سیستم ترکیبی ارائه شده است. اثر چهار پارامتر اثرگذار دمای اواپراتور، حداقل اختلاف دمایی در مبدل گرمایی، درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی به توربین چرخه‌ی رانکین آلی و راندمان آیزنتروپیک توربین چرخه‌ی رانکین آلی در مقدار هیدروژن تولیدی، توان تولیدی توسط چرخه‌ی رانکین آلی و راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است.

4-3-1- دمای اواپراتور

اثر افزایش دمای اواپراتور در هیدروژن تولیدی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و بازده اگزرژی سیستم ترکیبی ارائه شده، در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده‌اند. افزایش دمای اواپراتور، توان تولیدی چرخه رانکین آلی، هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی را بهینه می‌کند. در واقع افزایش دمای اواپراتور، آنتالپی مبرد بخار شده‌ی ورودی به توربین چرخه‌ی رانکین آلی را افزایش می‌دهد ولی همزمان دبی مبرد را نیز کاهش می‌دهد. دو پارامتر ذکر شده اثر متضادی در توان تولیدی چرخه رانکین آلی و هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر دارد که این امر موجب پیدایش مقدار بهینه برای هیدروژن تولیدی می‌شود. بهینه شدن راندمان اگزرژی با تغییر در دمای اواپراتور نیز به همین شیوه قابل توجیه است. توان چرخه‌ی رانکین آلی، مقدار هیدروژن تولیدی و راندمان اگزرژی به ترتیب دارای مقدار بیشینه‌ی 1238 کیلووات، 12.11 کیلوگرم بر ساعت و 43.92 درصد در دمای اواپراتور 355 کلوین می‌باشد.

4-3-2- حداقل اختلاف دمایی در مبدل گرمایی

حداقل اختلاف دمایی بین سیال گرم و مبرد چرخه رانکین آلی به طور شماتیک در شکل 5 دیده می‌شود. رعایت حداقل اختلاف دمایی در

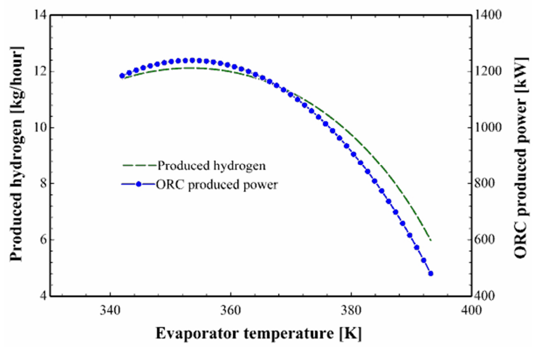

Fig. 3 Effect of evaporator temperature on the rate of produced hydrogen and ORC produced power

شکل 3 اثر افزایش دمای اواپراتور در هیدروژن تولیدی و توان تولیدی چرخه رانکین آلی

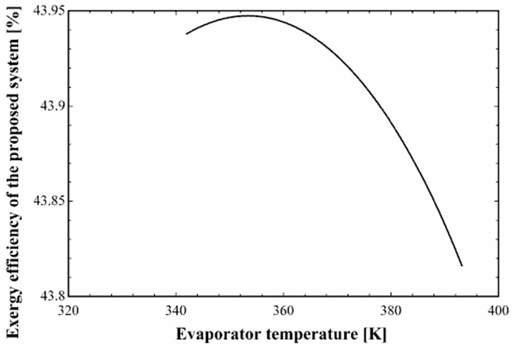

Fig. 4 Effect of evaporator temperature on the exergy efficiency of the combined system

شکل 4 اثر افزایش دمای اواپراتور در بازده اگزرژی سیستم ترکیبی

مبدل‌های حرارتی برای اطمینان از عدم اتلاق دمایی[1] ضروری است. اثر افزایش حداقل اختلاف دمایی مبدل حرارتی در هیدروژن تولیدی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و بازده اگزرژی سیستم ترکیبی ارائه شده در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده‌اند. همانطور که از این شکل‌ها قابل مشاهده است با افزایش مقدار حداقل اختلاف دمایی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و نهایتا هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی کاهش می‌یابد. در واقع افزایش حداقل اختلاف دمایی، باعث افزایش برگشت ناپذیری در مبدل حرارتی و نهایتا کاهش گرمای منتقل شده به مبرد چرخه رانکین آلی می‌شود. به ازای حداقل اختلاف دمایی 2 درجه و دمای اواپراتور 370 کلوین، توان چرخه‌ی رانکین آلی، مقدار هیدروژن تولیدی و راندمان اگزرژی به ترتیب دارای مقدار 1117 کیلووات، 11.26 کیلوگرم بر ساعت و 43.91 درصد می‌باشد.

4-3-3- درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی به توربین چرخه‌ی رانکین آلی

شکل‌های 8 و 9 اثر تغییر در درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی به توربین چرخه رانکین آلی در هیدروژن تولیدی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و بازده اگزرژی سیستم ترکیبی ارائه شده را نشان می‌دهند. با افزایش درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و در نهایت هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی کاهش می‌یابد. در واقع افزایش درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی به معنی کاهش گرمای بازیاب شده توسط مبرد و نهایتا کاهش دبی

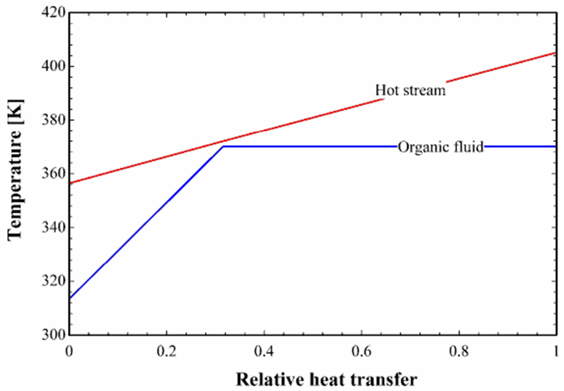

Fig. 5 Minimum temperature difference between the hot fluid and ORC working fluid

شکل 5 حداقل اختلاف دمایی بین سیال گرم و مبرد چرخه رانکین آلی

[1] Temperature cross

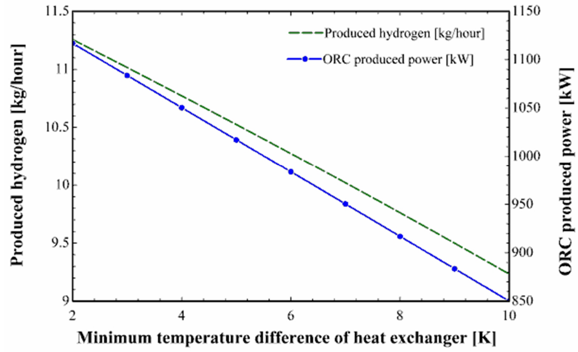

Fig. 6 Effect of the minimum temperature difference of heat exchanger on the rate of produced hydrogen and ORC produced power

شکل 6 اثر افزایش حداقل اختلاف دمایی مبدل حرارتی در هیدروژن تولیدی و توان تولیدی چرخه رانکین آلی

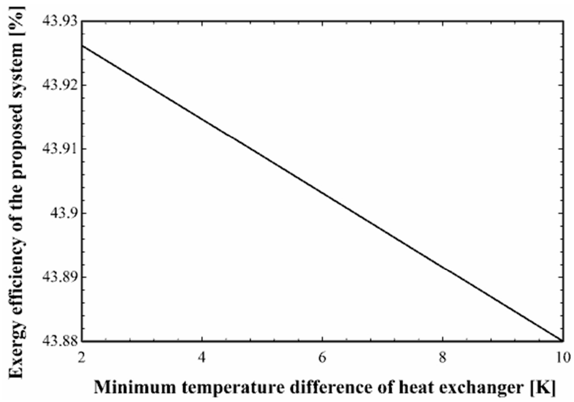

Fig. 7 Effect of the minimum temperature difference of heat exchanger on the exergy efficiency of the combined system

شکل 7 اثر افزایش حداقل اختلاف دمایی مبدل حرارتی در بازده اگزرژی سیستم ترکیبی

سیال کاری چرخه رانکین آلی می‌شود. با کاهش دبی مبرد، توان چرخه رانکین آلی، هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و نیز راندمان اگزرژی کاهش می‌یابد. در واقع طبق روابط موجود در مدل‌سازی الکترولایزر کاهش توان تولیدی توربین چرخه‌ی رانکین آلی دلیلی بر کاهش هیدروژن تولیدی است. همچنین طبق رابطه‌ی (24)، کاهش هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر سبب کاهش راندمان اگزرژی می‌شود. بیشترین توان تولیدی چرخه رانکین

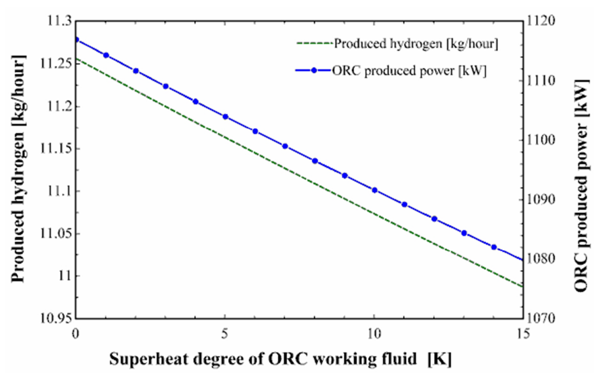

Fig. 8 Effect of superheating degree of ORC turbine inlet on the rate of produced hydrogen and ORC produced power

شکل 8 اثر افزایش درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی به توربین چرخه رانکین آلی در هیدروژن تولیدی و توان تولیدی چرخه

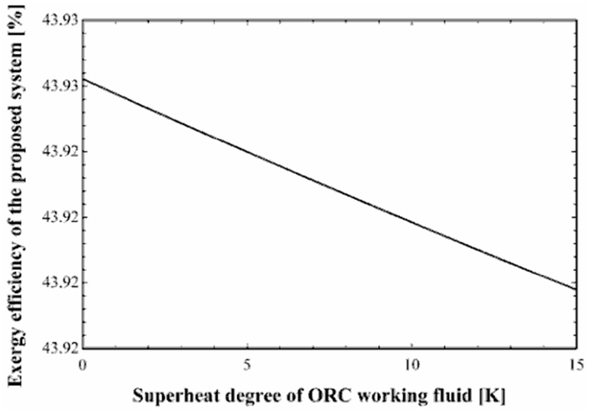

Fig. 9 Effect of superheating degree of ORC turbine inlet on the exergy efficiency of combined system

شکل 9 اثر افزایش درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی به توربین در بازده اگزرژی سیستم ترکیبی

آلی، هیدروژن تولیدی و راندمان اگزرژی به ازای درجه فوق گرمی صفر یا همان حالت بخار اشباع حاصل می‌شود.

4-3-4- راندمان آیزنتروپیک توربین چرخه‌ی رانکین آلی

برای چرخه رانکین آلی می‌توان توربین‌های با بازده‌های متفاوت به کار برد. اثر افزایش راندمان آیزنتروپیک توربین در هیدروژن تولیدی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و بازده اگزرژی سیستم ترکیبی ارائه شده در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده‌اند. درواقع توربین با راندمان آیزنتروپیک بالا دارای تلفات کمتری نسبت به توربین با راندمان پایین خواهد بود، همین کاهش تلفات در توربین یا به نوعی افزایش راندمان توربین سبب بهبود عملکرد توربین و افزایش توان تولیدی توسط توربین می‌شود. بنابراین با افزایش راندمان توربین، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و نهایتا هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد.

4-4- نتیجه‌گیری

دراین تحقیق یک سیستم ترکیبی ازچرخه‌های ماتیانت و رانکین آلی به همراه الکترولایزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گرفته است. از گرمای اتلافی چرخه‌ی ماتیانت به عنوان منبع گرما برای راه‌اندازی چرخه رانکین آلی استفاده گردیده است. اثر پارامترهای طراحی موثر بر

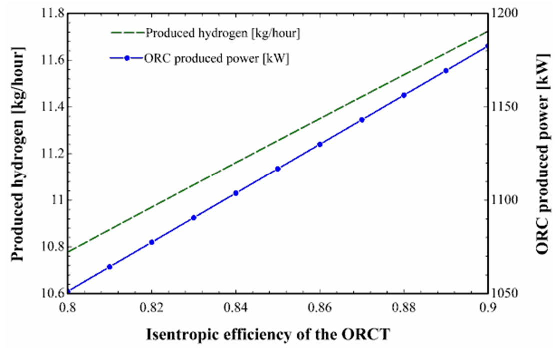

Fig. 10 Effect of isentropic efficiency of ORC turbine on the rate of produced hydrogen and ORC produced power

شکل 10 اثر افزایش راندمان آیزنتروپیک توربین چرخه رانکین آلی در هیدروژن تولیدی و توان تولیدی چرخه

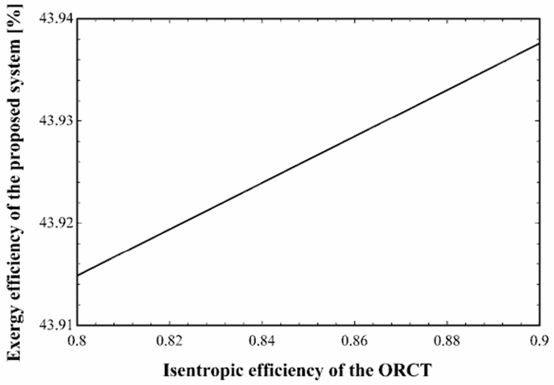

Fig. 11 Effect of isentropic efficiency of ORC turbine on the exergy efficiency of combined system

شکل 11 اثر افزایش راندمان آیزنتروپیک توربین چرخه رانکین آلی در بازده اگزرژی سیستم ترکیبی

سیستم ترکیبی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مهم حاصل از این مطالعه به صورت زیر می‌باشند:

افزایش دمای اواپراتور عامل بهینه شدن توان تولیدی چرخه رانکین آلی، هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی می‌باشد

با افزایش مقدارحداقل اختلاف دمایی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و نهایتا هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی کاهش می‌یابد.

به ازای حداقل اختلاف دمایی 2 درجه در مبدل حرارتی و دمای اواپراتور 370 کلوین، توان چرخه‌ی رانکین آلی، مقدار هیدروژن تولیدی و راندمان اگزرژی به ترتیب دارای مقدار 1117 کیلووات، 11.26 کیلوگرم بر ساعت و 43.91 درصد می‌باشد.

با افزایش درجه‌ی فوق گرم بودن بخار ورودی، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و در نهایت هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی کاهش می‌یابد.

بیشترین توان تولیدی چرخه رانکین آلی، هیدروژن تولیدی و راندمان اگزرژی به ازای درجه فوق گرمی صفر یا همان حالت بخار اشباع حاصل می‌شود.

با افزایش راندمان آیزنتروپیک توربین، توان تولیدی چرخه رانکین آلی و نهایتا هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر و همچنین راندمان اگزرژی سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد.

5- فهرست علایم

D	ضخامت (μm)
E_{ELECTRIC}	توان داده شده به الکترولایزر(kW)
E_{PRODUCT}	توان داده شده به مصرف مستقیم (kW)
Ex	آهنگ اگزرژی (kW)
$E_{\mathrm{act,i}}$ i = a, c	انرژی فعالسازی کاتد و آند (kJ/mol)
F	ثابت فارادی (C/mol)
G	انرژی آزاد گیبس (J/mol)
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kgK)
$J_{i,0}$ i = a, c	چگالی جریان مبدل (A/m²)
J_i^{ref} i = a, c	فاکتور پتانسیل اولیه اند و کاتد
J	چگالی جریان (A/m²)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/h)
$\dot{N}$	دبی مولی(mol/s)
P	فشار(kPa)
$\dot{Q}$	آهنگ گرما (kW)
R	ثابت جهانی گازها (kJ/kgK)
R_{PEM}	مقاومت اهمیک (Ώ)
s	آنتروپی مخصوص (kJ/kgK)
T_{PEM}	دمای الکتروالایزر(K)
V_0	پتانسیل برگشت پذیر(V)
$V_{\mathrm{act},i}$ i = a, c	پتانسیل فعال کننده آند و کاتد(V)

علایم یونانی

η	بازده(%)
σ	رسانایی محلی غشای مبدل پروتونی(s/m)
λ	آب موجود در سطح غشای آند و کاتد(Ω^{-1})

زیرنویس‌ها

A	آند
Evap	اواپراتور
c	کاتد
cold	سرد
in	ورودی
Out	خروجی
ohm	اهمیک
p	پمپ
t	توربین

6- مراجع

[1] M. B. Toftegaard, J. Brix, P. A. Jensen, P. Glarborg, A. D. Jensen, Oxy-fuel combustion of solid fuels, *Progress in energy and combustion science*, Vol. 36, No. 5, pp. 581-625, 2010.

[2] O. Bolland, H. M. Kvamsdal, J. C. Boden, A Comparison of the Efficiencies of the Oxy-Fuel Power Cycles Water-Cycle, Graz-Cycle and Matiant-Cycle, Chapter 29. *Capture and Separation of Carbon Dioxide from Combustion Sources*. Vol. 1, pp. 499 – 511, 2005.

[3] P. Mathieu, R. Nihart, Zero-emission MATIANT cycle, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 121, No. 1, pp. 116-120, 1999.

[4] P. Mathieu, R. Nihart, Sensitivity analysis of the MATIANT cycle, *Energy Conversion and Management*, Vol. 40, No. 15, pp. 1687-1700, 1999.

[5] M. Soltanieh, K. M. Azar, M. Saber, Development of a zero emission integrated system for co-production of electricity and methanol through renewable hydrogen and CO 2 capture, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 7, pp. 145-152, 2012.

[6] 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*, Vol. 65, pp. 533-543, 2014.

[7] M. Yari, S. Mahmoudi, Utilization of waste heat from GT-MHR for power generation in organic Rankine cycles, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 366-375, 2010.

[8] M. Yari, S. Mahmoudi, A thermodynamic study of waste heat recovery from GT-MHR using organic Rankine cycles, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 2, pp. 181-196, 2011.

[9] P. Ahmadi, I. Dincer, M. A. Rosen, Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 4, pp. 1795-1805, 2013.

[10] F. Khalid, I. Dincer, M. A. Rosen, Analysis and assessment of an integrated hydrogen energy system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 19, pp. 7960-7967, 2016.

[11] Y. E. Yuksel, M. Ozturk, I. Dincer, Thermodynamic performance assessment of a novel environmentally-benign solar energy based integrated system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 119, pp. 109-120, 2016.

[12] C. Acar, I. Dincer, Experimental investigation and analysis of a hybrid photoelectrochemical hydrogen production system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016.

[13] P. Ahmadi, I. Dincer, M. A. Rosen, Multi-objective optimization of a novel solar-based multigeneration energy system, *Solar Energy,* Vol. 108, pp. 576-591, 2014.

[14] C.-H. Liao, R.-F. Horng, Investigation on the hydrogen production by methanol steam reforming with engine exhaust heat recovery strategy, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 41, No. 9, pp. 4957-4968, 2016.

[15] P.-J. Li, T.-C. Hung, B.-S. Pei, J.-R. Lin, C.-C. Chieng, G.-P. Yu, A thermodynamic analysis of high temperature gas-cooled reactors for optimal waste heat recovery and hydrogen production, *Applied energy,* Vol. 99, pp. 183-191, 2012.

[16] Mannaerts, Sebastiaan H. "Extensive quantities in thermodynamics."*European Journal of Physics,* Vol. 35, No. 3, pp. 383-397. 2014.

[17] M. Chase, Tr. NIST-JANAF Thermochemical Tables, *Journal of Physical and Chemical Reference Data, Monograph,* Vol. 9, 1998.

[18] P. Esmaili, I. Dincer, G. Naterer, Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production with molybdenum-oxo catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 37, No. 9, pp. 7365-7372, 2012.

[19] M. Ni, M. K. Leung, D. Y. Leung, Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant, *Energy conversion and management,* Vol. 49, No. 10, pp. 2748-2756, 2008.

[20] V. Gurau, F. Barbir, H. Liu, An analytical solution of a half-cell Model for PEM fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society,* Vol. 147, No. 7, pp. 2468-2477, 2000.

[21] J. Nieminen, I. Dincer, G. Naterer, Comparative performance analysis of PEM and solid oxide steam electrolysers, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 35, No. 20, pp. 10842-10850, 2010.

[22] H. Ghaebi, B. Farhang, Using various organic rankine cycles for production of power and hydrogen by incorporating geothermal energy and proton exchange membrane (A comparative study), *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 16, No. 6, pp. 138-148, 2016. (in Persian فارسی)

[23] M. A. Rosen, I. Dincer, Exergoeconomic analysis of power plants operating on various fuels, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 23, No. 6, pp. 643-658, 2003.

[24] O. Balli, H. Aras, Energetic and exergetic performance evaluation of a combined heat and power system with the micro gas turbine (MGTCHP), *International Journal of Energy Research,* Vol. 31, No. 14, pp. 1425-1440, 2007.