



تولید توان در چرخه رانکین آلی از گرمای تلف شده انرژی زمین گرمایی و بویلرها به منظور تولید هیدروژن با استفاده از الکترولایزر غشاء پروتونی ابوالفضل نیکزاد¹، مصطفی مافی^{2*}، سامان فرامرزی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران.

2- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران.

3- دکتری مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* ایران، قزوین، کدپستی ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸، m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

استفاده از الکترولایزر آب برای تولید هیدروژن در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است زیرا در این روش، آب بدون هیچ گونه آلاینده ای به گاز هیدروژن و اکسیژن تجزیه می شود. در این تحقیق، یک چرخه رانکین آلی و الکترولایزر مدل سازی و تحلیل شده تا از گرمای تلف شده برای راه اندازی الکترولایزر استفاده شود. توان تولید شده چرخه رانکین آلی برای تولید هیدروژن در یک الکترولایزر غشاء پروتونی مصرف می گردد. مدل سازی و کدنویسی برای الکترولایزر با استفاده از نرم افزار EES انجام شده است و تحلیل های ترمودینامیکی به منظور شناخت و بررسی عملکرد مدل پیشنهادی انجام گردید. به ازای دمای اواپراتور 67 درجه سلسیوس، توان چرخه رانکین آلی و بازده حرارتی به ترتیب مقادیر 220 کیلووات و 8/5% حاصل گردید. ظرفیت تولید الکترولایزر مورد نظر در این پژوهش 27 کیلوگرم بر ساعت گاز هیدروژن با دمای 80 درجه سلسیوس و فشار 101 کیلو پاسکال به دست آمد. الکترولایزر آب با استفاده از جریان برق مستقیم بین دو الکتروند آند و کاتد انجام شد که توسط یک غشاء از هم جدا شده بودند. پتانسیل غشایی در مقادیر مختلف چگالی جریان برای انجام اعتبار سنجی مدل شبیه سازی شده، محاسبه و مقایسه بین آنها انجام شد.

کلیدواژگان: الکترولایزر غشاء پروتونی، جداسازی هیدروژن، چرخه رانکین آلی، بازیابی گرمای تلف شده

Power generation in organic Rankine cycle from wasted heat of geothermal energy and boilers to produce hydrogen using a proton exchange membrane electrolyzer

1- Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* Postal Code: 34148-96818, Qazvin, Iran, m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

Received: 22 July 2023 Accepted: 26 December 2023

Abstract

The use of water electrolysis to produce hydrogen gas has received much attention in recent years, because in this method, water is decomposed into hydrogen and oxygen gas without any pollution. In this research, an organic Rankine cycle (ORC) is simulated and analyzed to utilize waste heat to run an electrolyzer. The power generated by ORC is used to produce hydrogen in proton exchange membrane electrolyzer (PEME). Model and codes for the electrolyzer is done by EES software, and thermodynamic analyzes are utilized in order to examine the performance of the proposed model. For the evaporator temperature of 67 °C, the ORC power and thermal efficiency are obtained at 220 kW and 8.5%, respectively. The production capacity of the electrolyzer considered in this research is 27 kg/hour of hydrogen gas with a temperature of 80 °C and a pressure of 101 kPa. Water electrolysis is performed using direct current between two electrodes, anode and cathode, which are separated by a membrane. To validate the simulated model, membrane potential at different values of current density is calculated.

Keywords: Proton exchange membrane electrolyzer, hydrogen separation, organic Rankine cycle, waste heat recovery

1- مقدمه

افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی خطرناک بسیاری از جمله بارش‌های اسیدی، تغییرات آب و هوای جهانی و آلودگی هوا شده است. بیش از 50 درصد انرژی مصرف شده در جهان به عنوان گرما هدر می‌رود. بازیابی گرمای تلف شده می‌تواند کارایی سیستم را افزایش داده و منجر به کاهش تولید CO_2 و مصرف سوخت شود. چرخه رانکین آلی که یک فناوری قابل اعتماد برای تبدیل کارآمد منابع حرارتی با دمای کم یا متوسط به الکتریسیته است، به عنوان راه‌حلی امیدوارکننده برای بازیابی گرمای تلف شده شناخته شده است [1].

بازیابی گرمای تلف شده یکی از مهم‌ترین زمینه‌های توسعه برای چرخه رانکین آلی است، که در آن از یک سیال آلی با نقطه جوش کم استفاده می‌شود. چرخه رانکین را می‌توان برای نیروگاه‌های حرارتی یا صنعتی یا فرایندهای کشاورزی اعمال کرد [2]. با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه تولید توان الکتریکی از منابع حرارتی دما پایین، در سال‌های اخیر توجه فراوانی به چرخه ارگانیک رانکین که پرکاربردترین چرخه برای این منظور است، جلب شده است [3]. این سیکل بخاطر بازده زیاد و سادگی آن به‌طور گسترده برای تبدیل حرارت دما پایین به توان، مورد استفاده قرار می‌گیرد [4-5].

روی و همکاران [6] حرارت اتلافی یک نیروگاه 840 مگاواتی را به عنوان منبع حرارتی، برای چرخه ارگانیک رانکین در نظر گرفته و بهینه‌سازی را برای تولید توان حداکثر انجام دادند. آن‌ها در طی این پژوهش به این نتیجه رسیدند که اگر دمای تبخیر در اواپراتور، نزدیک به دمای ورودی منبع گرم باشد، تولید توان کمتری خواهیم داشت و بهتر است دما و فشار تبخیر در اواپراتور را نسبتاً کمتر انتخاب کنیم. هوانگ و همکاران [7] عملکرد دو سیکل رانکین دو حلقه‌ای متفاوت را مورد مطالعه قرار دادند. این دو سیستم هر دو دارای حلقه دما بالا و پایین بودند اما تعداد مراحل آن‌ها برای بازیابی گرما از اگزوز موتور متفاوت بود. آن‌ها دریافتند که عملکرد عملکرد چرخه تک مرحله‌ای نسبت به چرخه‌ی دو مرحله‌ای بهتر است. کیم و همکاران [8] یک چرخه رانکین تک حلقه‌ای با سیال R134a برای بازیابی گرمای تلف شده از گازهای خروجی (دما بالا و دما پایین) را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سیستم تک حلقه‌ای رانکین بالاترین توان خالص خروجی را در مقایسه با سایر سیستم‌های رانکین معمولی در شرایط موتور ثابت دارد. یون و همکارانش [9] عملکرد سیکل رانکین موازی دوگانه را در مقایسه با سیکل رانکین منفرد برای بازیابی گرمای تلف شده از گازهای خروجی موتور دریایی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که رانکین دوگانه می‌تواند خروجی بالاتری را در مقایسه با مدل‌های توزیع که با یک سیکل رانکین منفرد می‌توان بدست آورد، تولید کند. آندرس هرناندز و همکاران [10] یک استراتژی کنترلی کارآمد برای تنظیم گرمایش فوق‌العاده در یک نیروگاه آزمایشی چرخه رانکین آلی 11 کیلوواتی که برای بازیابی گرمای اتلاف استفاده شده است، ارائه کردند. هولیک و همکاران [11] بهینه‌سازی حرارتی-اقتصادی چرخه رانکین مورد استفاده برای بازیابی گرمای تلف شده در نیروگاه‌های تولید همزمان بیوگاز را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که واحد بازیابی حرارت تلف شده بر اساس چرخه رانکین بخار بهتر از واحد ORC با استفاده از تولون به عنوان سیال کار بود زیرا توان خروجی بالاتر، دوره بازپرداخت کوتاه‌تر را نشان داد و دوره بازپرداخت سرمایه‌گذاری‌ها به شدت به نرخ جریان جرمی گازهای خروجی بستگی دارد. یانگ‌مینگ و همکاران [12] مجموعه‌ای از سیستم‌های بازیابی گرمای تلف

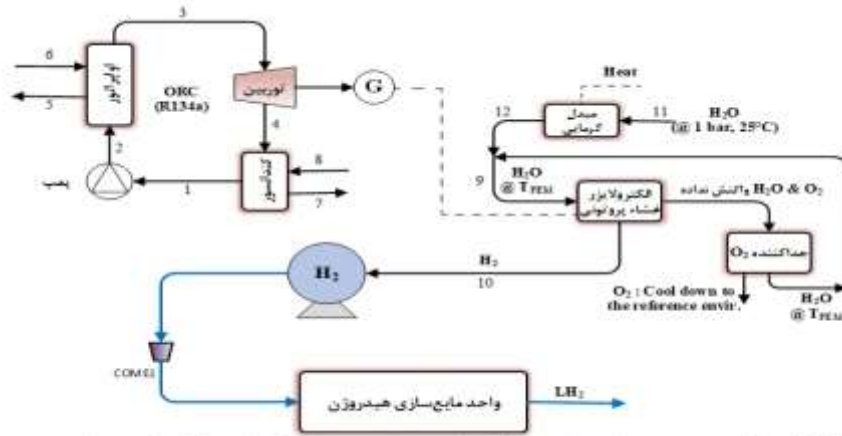
شده را با راندمان بالا شامل توربین قدرت، چرخه رانکین بخار و چرخه رانکین آلی (ORC) طراحی و آزمایش کردند و نتایج محاسبات نشان داد که با استفاده از این سیستم امکان تولید توان تا 1079/1 کیلووات در 100 درصد بار وجود دارد. مروه گل و همکاران [13] طراحی و آنالیز حرارتی سیستم‌های ORC دو حلقه‌ای برای سیستم بازیابی حرارت هدر رفته کشتی کانتینری را انجام دادند و سیالاتی که برای استفاده در کشتی مناسب هستند انتخاب کردند.

الکترولایزرهای غشاء پروتونی به عنوان یک فناوری بدون آلودگی و با افزایش بهره‌وری محسوب می‌شوند. هیدروژن را می‌توان به راحتی و از منابع مختلفی مانند زیست توده، الکترولیز آب، گاز طبیعی، پروپان و متانول تولید کرد. تولید هیدروژن از الکترولیز آب، که تقسیم مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن با استفاده از برق است، هنگامی که در ترکیب با فناوری‌های دیگر استفاده می‌شود، می‌تواند خیلی مفید باشد. هنگامی که برای الکترولیز آب از برق تولید شده توسط چرخه‌های مختلف استفاده می‌شود، هیدروژن انرژی استفاده نشده را برای دفعات بعدی ذخیره می‌کند و می‌تواند به عنوان یک سوخت و منبع انرژی برای حمل و نقل و بخش‌های انرژی در نظر گرفته شود [14]. علمکرد بالا، بازده ولتاژ بالا، پاسخ سریع سیستم و طراحی سلول فشرده برخی از مزایای الکترولایزرهای غشاء پروتونی نسبت به باقی الکترولایزرها می‌باشد که سبب انتخاب این الکترولایزر در پژوهش حاضر شد و همچنین هزینه‌ی بالای قطعات، اجزای خورنده‌ی اسیدی و دوام نسبتاً کم برخی از معایب آن است [15].

تقسیم مولکول‌های آب یا الکترولیز، قدیمی‌ترین فرآیند الکتروشیمیایی شناخته شده است و از اوایل دهه 1900 در تولید تجاری هیدروژن استفاده شده است [16]. در بسیاری از پژوهش‌ها الکترولیز آب برای تولید هیدروژن بررسی شده است ولی ترکیب آن با واحدهای تامین توان از گرمای تلف شده و همچنین مایع‌سازی هیدروژن از موضوعاتی است که کم‌تر مورد توجه بوده و در این پژوهش نیز بررسی می‌شود. اونها و همکاران [17] غشاهای الکترولیت پلیمری را برای تخمین تغییرات دما و فشار برای توان تولید هیدروژن الکترولیز آب مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که برای فشارهای بالا، ولتاژ بطور قابل توجهی تحت تاثیر تغییرات دما است و دمای بالاتر باعث کاهش ولتاژ می‌شود. همچنین، ولتاژ متناسب با فشار است و در فشارهای بالاتر ولتاژ بیشتری نیاز است. راثو و همکاران [18] سلول‌های خورشیدی چند منظوره را با الکترولایزر غشاء پروتونی ترکیب کردند. آن‌ها بطور تجربی بازده تولید هیدروژن شش ماژول را اندازه‌گیری کردند و حداکثر مقدار آن را 16/8 درصد برای یک ماژول یافتند. تاثیر دما بر عملکرد الکترولایزر غشاء پروتونی و مشخصه‌های ولتاژ جریان مورد بررسی قرار دادند. جریان بالاتر در ولتاژ پایین مزیت اصلی طرح پیشنهادی آن‌ها بود که منجر به افزایش قابل توجه کارایی سیستم می‌شود. منگ و همکاران [19] پارامترهای v-z از الکترولایزر غشاء پروتونی را برای تولید هیدروژن از آب بررسی کردند و یک مدل الکتروشیمیایی را برای استفاده در فعال‌سازی و ظرفیت‌های بالای اهمیت توسعه دادند. تجزیه و تحلیل حساسیت همچنین نشان داد که هرچه دمای عملیاتی بالاتر باشد پتانسیل سلول کم‌تر می‌شود و ظرفیت بالای فعال‌سازی آن، منبع اصلی افت ولتاژ است.

هیدروژن کاربرد زیادی در فرایندهای صنعتی از جمله صنایع پتروشیمی، صنایع هوافضا، پیل‌های سوختی، سوخت خودروها و ... دارد. یکی از دلایل مایع سازی این گاز، کم کردن حجم و بالا بردن دانسیته‌ی آن برای حمل و نقل

انبساط سیال تبخیر شده در اواپراتور تولید توان می‌کند و از این توان تولید شده برای تولید هیدروژن توسط الکترولایزر غشاء پروتونی استفاده می‌شود. قوانین حاکم و تعادل انرژی بر هر یک از بخش‌های سیستم ترکیبی در قسمت‌های بعدی بیان شده است. هزینه تجهیزات و آنالیز اقتصادی در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار نگرفته است و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به



شکل ۱ دیاگرام چرخه پیشنهادی تولید توان از گرمای هدر رفته به منظور استفاده از الکترولایزر غشاء پروتونی

منظور بررسی مقدار تاثیرگذاری استفاده از توان گرمای تلف شده بر قیمت تمام شده هیدروژن مایع تولیدی انجام گیرد.

2-2- چرخه رانکین آلی

دیاگرام شماتیک چرخه رانکین آلی در شکل ۱ نمایش داده شده است. چرخه رانکین آلی برای تولید توان از حرارت تلف شده استفاده می‌کند. پمپ و توربین چرخه رانکین آلی به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته شده و تعادل انرژی برای تولید و مصرف توان با روابط زیر بیان می‌شوند [22]:

$$\dot{W}_{ORCP} = \frac{\dot{m}_O(h_2 - h_1)}{\eta_P} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{ORCT} = \dot{m}_O \eta_T (h_3 - h_4) \quad (2)$$

که زیر نویس‌های ORCP و ORCT به ترتیب بیانگر توربین و پمپ سیکل رانکین آلی، η_T و η_P به ترتیب بازده آیزنتروپیک پمپ و توربین و \dot{m}_O دبی جرمی چرخه رانکین آلی است. افت فشار در خطوط انتقال و لوله‌ها صرف نظر شده است [22].

2-3- واحد الکترولایزر غشاء پروتونی

در الکترولایزر، توان تولید شده توسط ORC توسط PEME برای تولید هیدروژن مصرف می‌شود. آب مایع در شرایط محیط وارد مبدل حرارتی می‌شود تا به دمای الکترولایزر PEME برسد. سپس آب گرم شده برای تولید هیدروژن وارد PEME می‌شود. هیدروژن تولید شده در کاتد تا شرایط محیطی خنک می‌شود. مخلوطی از آب واکنش نداده و اکسیژن تولید شده از آند خارج می‌شود، سپس اکسیژن از آب جدا می‌شود تا از آب واکنش نداده برای چرخه تولید هیدروژن بعدی استفاده مجدد شود. طراحی الکترولایزر مورد استفاده در این پژوهش بر پایه کار فرامرزی و همکاران [23] انجام شده است. هر سل الکترولایزر دارای مساحت فعال 100 سانتی متر مربع و توده الکترولایزر دارای 39 سل با ظرفیت تولید 27 کیلوگرم بر ساعت هیدروژن است، همچنین برای

آسان تر به واحدهای صنعتی می‌باشد. در کار یانگ و همکاران [20] از سیستم اصلاح متان در بخار و بازیابی گاز طبیعی مایع برای تولید و مایع‌سازی هیدروژن استفاده شد. در سیستم پیشنهادی آن‌ها از چرخه پیش‌سرمایش نیتروژنی و سیستم سرمایش دما پایین برای تون هیدروژنی استفاده شد. 146760 کیلو وات در بخش فشرده‌سازی واحدهای سرمایش برای مایع‌سازی 98331

کیلوگرم بر ساعت هیدروژن مایع استفاده شد. با توجه به این نکته که بهترین روش انتقال و ذخیره‌سازی گاز هیدروژن مایع‌سازی آن است، انتخاب سیستم مایع‌سازی مناسب اهمیت بسیاری دارد و تکمیل‌کننده سیستم‌های تولید هیدروژن است. فرامرزی و همکاران [21] چرخه مایع‌سازی هیدروژنی را پیشنهاد دادند که شامل دو مرحله پیش‌سرمایش و سرمایش دما پایین بود. از مبرد ترکیبی به منظور کاهش کار مصرفی در واحدهای فشرده‌سازی استفاده شد. استفاده از تبدیل‌کننده‌های ارتو به پارا و انتخاب معادلات حالت مناسب برای هیدروژن در دماهای بسیار پایین نیز بررسی شد و نتیجه این شد که معادله حالت مناسب برای گاز هیدروژن خالص در دماهای پایین بندیک-وب-رابین اصلاح شده و برای جریان‌های مبرد ترکیبی، پنگ-رابینسون بوده است. نوآوری این پژوهش تولید هیدروژن مایع با بکارگیری گرمای تلف شده برای تولید توان در چرخه رانکین و استفاده از الکترولایزر غشاء پروتونی به منظور تبدیل انرژی برق به گاز هیدروژن مایع برای ذخیره‌سازی و انتقال است. در چرخه پیشنهادی از توان چرخه رانکین برای الکترولایزر آب و تامین توان بخش فشرده‌سازی واحد مایع‌سازی هیدروژن استفاده شده است در نتیجه فرآیند پیشنهادی کاملاً سازگار با محیط زیست است.

2- مبانی و روش‌ها

2-1- مشخصات چرخه مورد مطالعه

برای مدل‌سازی ترمودینامیکی، سیستم ترکیبی پیشنهادی به سه قسمت تقسیم شد: سیستم تولید توان (چرخه رانکین آلی)، الکترولایزر غشاء پروتونی و واحد مایع‌سازی هیدروژن.

دیاگرام شماتیک از سیستم ترکیبی پیشنهادی در شکل 1 نمایش داده شده است. در این سیستم حرارت تلف شده توسط چرخه رانکین آلی با تبخیر سیال مورد نظر در اواپراتور بازیابی قرار گرفت. توربین چرخه رانکین آلی با

$$V_{ohm} = R_{PEM} \times J, R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]}$$

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139 \times \lambda(x) - 0.326] \times \exp[1268 \times (\frac{1}{303} - \frac{1}{T})] \quad (12)$$

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c$$

نرخ تولید هیدروژن (مول بر ثانیه):

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (13)$$

2-4- واحد مایع‌سازی هیدروژن

واحد مایع‌سازی هیدروژن شامل دو بخش پیش‌سرمایش و بخش نهایی (سرمایش دما پایین) است. در واحد پیش‌سرمایش مبرد ترکیبی در چرخه‌ای شامل یک مبادله‌کننده چند جریانی، یک شیر انبساطی، دو کولر هوایی و دو کمپرسور وظیفه کاهش دمای گاز هیدروژن تا دمای منفی 190 درجه سلسیوس را دارد. در بخش سرمایش دما پایین مبرد ترکیبی دیگری شامل هلیوم، هیدروژن و نئون است و مجموعه‌ای از مبادله‌کننده‌های گرمایی، کمپرسورها، منبسط‌کننده‌ها، تبدیل‌کننده‌های ارتو-پارا، یک شیر انبساطی و یک جداکننده بکار گرفته شده‌اند تا دمای هیدروژن پیش‌سرد شده را تا دمای مایع‌سازی که منفی 251 درجه سلسیوس است، کاهش دهند. مبرد ترکیبی بخش پیش‌سرمایش و سرمایش نهایی بر پایه مرجع [27] انتخاب شده‌اند. حداکثر فشار در چرخه سردکننده پیش‌سرمایش 4200 کیلو پاسکال و حداقل فشار آن 330 کیلو پاسکال است، در بخش سرمایش نهایی حداکثر فشار 1505 کیلو پاسکال و کم‌ترین فشار 101 کیلو پاسکال است. نسبت افزایش فشار در بخش پیش‌سرمایش در دو مرحله انجام می‌شود که 3/3 و 3/5 است در حالی که در بخش سرمایش نهایی سه مرحله فشرده‌سازی با نسبت‌های 2/3، 2/7 و 3/1 انجام می‌شود. با توجه به اینکه تمرکز این پژوهش بر بخش تولید توان از گرمای هدر رفته و بخش الکترولایزر است، جزئیات بیشتری برای بخش مایع‌سازی در این مطالعه اشاره نشده و اطلاعات بیشتر در مورد بخش مایع‌سازی در کار فرامرزی و همکاران [23] آورده شده است.

2-5- اطلاعات ورودی و فرضیات

برای شبیه‌سازی سیستم ترکیبی پیشنهادی از نرم افزار EES استفاده شده است. به منظور ساده‌سازی در مساله‌ی مدل‌سازی فرضیات زیر به کار گرفته شده است:

- کل سیستم تحت شرایط حالت پایدار کار می‌کند.
- افت فشار و تلفات حرارتی در مبدل‌های حرارتی و لوله‌ها ناچیز است.
- تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز است.
- دما و فشار محیط به ترتیب 298/15 K و 1 bar است.
- دما در کل الکترولایزر ثابت است.
- برای تبخیر کردن سیال چرخه رانکین آلی در مبدل گرمایی، حداقل اختلاف دمایی 2 تا 9 درجه در نظر گرفته شده است.
- توزیع چگالی جریان در کل سلول یکنواخت است.
- سیال کاری در چرخه‌ی رانکین آلی R134a می‌باشد.

هر سل الکترولایزر، بیش‌ترین ولتاژ هر سل 2/2 ولت، بیش‌ترین مقاومت فشاری 207 بار، ضخامت غشاء 100 میکرومتر، انرژی فعال‌سازی آند و کاتد به ترتیب 76 و 18 کیلوژول بر مول است. برای شروع مدل‌سازی ترموشیمیایی PEME، محاسبه انرژی تئوری مورد نیاز برای تولید هیدروژن الکترولیتی ضروری است. انرژی مورد نیاز برای PEME از طریق ORC تامین می‌شود. کل توان خروجی چرخه رانکین حدود 220 kW است که 103 kW آن برای PEME و 117 kW آن برای واحد مایع‌سازی اختصاص می‌یابد. همچنین انرژی الکترونیکی مورد نیاز الکترولایزر برابر با انرژی ورودی می‌باشد.

تحلیل ترمودینامیک سیستم PEME با مدل‌سازی الکترووشیمیایی آن انجام می‌شود که بر اساس آن انرژی کلی برای سیستم الکترولایزر بر اساس رابطه (3) تعیین می‌گردد:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

که در آن ΔG تغییرات انرژی آزاد گیبس و $T\Delta S$ انرژی گرمایی مورد نیاز بر حسب $J/mol H_2$ و ΔH میزان انرژی ورودی به سیستم الکترولایزر یا همان تغییرات آنتالپی تشکیل آب می‌باشد. مقادیر انرژی آزاد گیبس و آنتالپی و انتروپی آب، هیدروژن و اکسیژن از جداول ترمودینامیکی قابل محاسبه می‌باشد [24].

نرخ مولی تولید هیدروژن، اکسیژن و آب به ترتیب از معادلات زیر بدست می‌آید که در آن J چگالی جریان و F ضریب ثابت فارادی می‌باشد [25]:

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O, reacted} \quad (4)$$

$$\dot{N}_{O_2, out} = \frac{J}{4F} \quad (5)$$

$$\dot{N}_{H_2O, out} = \dot{N}_{H_2O, in} - \frac{J}{2F} \quad (6)$$

معادلات (7-13) سایر معادلات ترمودینامیکی و ترموشیمیایی مربوط به مدل‌سازی الکترولایزر PEM را نشان می‌دهد که در این معادلات دما بر حسب کلونین است [26]:

مصرف برق الکترولایزر (وات):

$$\dot{W}_{PEM} = V_{PEM} \times J = \dot{W}_{ORCT} \quad (7)$$

ولتاژ الکترولایزر (ولت):

$$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm} \quad (8)$$

ولتاژ نرنست (ولت):

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} \times (T_{PEM} - 298) \quad (9)$$

ظرفیت بالای فعال‌سازی آند (ولت):

$$V_{act,a} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{J}{2 \times J_{0,a}}\right), J_{0,a} = J_a^{ref} \exp\left(\frac{-E_{act,a}}{RT}\right) \quad (10)$$

ظرفیت بالای فعال‌سازی کاتد (ولت):

$$V_{act,c} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{J}{2 \times J_{0,c}}\right), J_{0,c} = J_c^{ref} \exp\left(\frac{-E_{act,c}}{RT}\right) \quad (11)$$

ظرفیت بالای اهمیتیک (ولت):

ورودی و خروجی در حجم کنترل هستند. نرخ جریان جرمی و ex انرژی ورودی فیزیکی است. انتقال انرژی کل هر واحد واکنش و محصول، ترکیبی از هر دو واکنش انرژی فیزیکی و شیمیایی است [33]، که با دما و فشار واکنش دهنده‌ها و محصولات مرتبط است [34]:

$$e_i = e_{ph,i} + e_{ch,i} \quad (15)$$

جدول 3 مقایسه نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر و نتایج گزارش شده در منبع [28] برای چرخه رانکین

مطالعه حاضر	آلد و همکاران [28]	پارامتر
33,4	33,39	نرخ جریان جرمی سیال مبدل حرارتی (kg/s)
73,33	73,33	دمای سیال ورودی مبدل حرارتی (°C)
101,7	101,68	نرخ جریان جرمی آب خنک‌کننده (kg/s)
4,44	4,44	دمای منبع آب خنک‌کننده (°C)
16,95	16,95	فشار ورودی توربین (bar)
4,52	4,41	فشار خروجی توربین (bar)
259,8	254,81	توان توربین (kW)
39,94	39,97	توان پمپ (kW)
54,85	54,76	دمای سیال خروجی مبدل حرارتی (°C)
9,85	9,92	دمای آب خنک‌کننده خروجی (°C)
219,9	214,25	توان خالص خروجی (kW)
0,085	0,083	راندمان حرارتی

بیان کلی انرژی فیزیکی را می‌توان در معادله (16) نشان داد:

$$e_i^{ph} = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) \quad (16)$$

که در آن h_o و s_o به ترتیب آنترپی مخصوص و آنتالپی مخصوص در شرایط استاندارد می‌باشد. انرژی شیمیایی مخصوص برای ترکیب یک گاز ایده‌آل از معادله (17) بدست می‌آید:

$$e_{mix}^{ch} = \sum x_i e_{o,i}^{ch} + \bar{R}T_o \sum x_i \ln x_i \quad (17)$$

3- نتایج

3-1- چرخه رانکین آلی

در جدول 4 مشخصات تمامی نقاط سیکل رانکین آلی آورده شده است. مشخصات چرخه شبیه‌سازی شده آورده شده است. شکل 2 ب مقایسه دیگری را بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های منگ و همکاران برای دمای عملیاتی بین 298 K تا 353 K و چگالی جریان 5000 A/m^2 ارائه می‌کند. همخوانی نسبتاً خوبی دوباره بدست آمده است. بنابراین، مدل الکتروشیمیایی توسعه‌یافته به اندازه کافی تایید می‌شود. برای تجزیه و تحلیل نشان داده شده در شکل 2، پتانسیل سلول با افزایش دما کاهش می‌یابد. در دمای عملیاتی بالاتر،

پارامترهای ورودی ORC و پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی ترمودینامیکی الکترولایزر PEM به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 آورده شده است و سایر اطلاعات چرخه ORC در منبع [28] موجود می‌باشد.

جدول 1 پارامترهای ورودی ORC

مقادیر	پارامتر
R134a	سیال کاری
0,8	راندمان توربین
16,95	فشار ورودی توربین (bar)
0,75	راندمان پمپ
12	نرخ جریان جرمی سیال کاری (kg/s)

جدول 2 پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی ترمودینامیکی الکترولایزر PEM [29]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
96486	F (C/mol)	1	P_{O_2} (atm)
14	λ_a	1	P_{H_2} (atm)
10	λ_c	353	T (K)
0,8	ε	298	T_o (K)
100	L (μm)	373	T_{source} (K)
$1,7 \times 10^5$	J_a^{ref} (A/m^2)	76	$E_{act,a}$ (kJ/mol)
$4,6 \times 10^5$	J_c^{ref} (A/m^2)	18	$E_{act,c}$ (kJ/mol)

2-6- سنجش اعتبار

برای صحت‌سنجی و اعتباردهی نتایج مطالعه‌ی حاضر، از نتایج گزارش شده در منابع [28] و [29] بطور جداگانه برای سیستم رانکین و الکترولایزر غشاء پروتونی استفاده شده است. جدول 3 مقایسه نتایج بدست آمده از منبع [28] و تحلیل حاضر را نشان می‌دهد. طبق شکل 2 الف پتانسیل سلول برای جریان‌های کمتر از 300 A/m^2 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 300 A/m^2 است [29,30].

2-7- انرژی

با توجه به اینکه تجزیه و تحلیل انرژی، تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی سیستم را کامل می‌کند، معادله تعادل انرژی را برای هر یک از اجزای سیستم اعمال می‌کنیم. انرژی از چهار بخش فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل تشکیل شده است. با نادیده گرفتن تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل، مقادیر انرژی فیزیکی و شیمیایی اکثر مواد را می‌توان در منبع [31] یافت. به طور کلی نرخ تعادل انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت [32]:

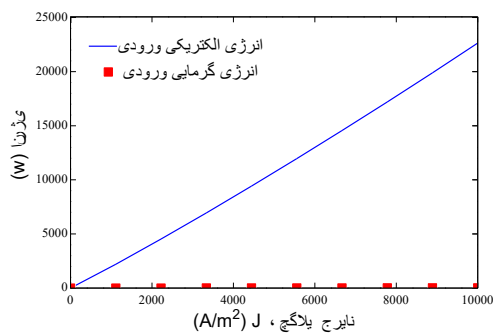
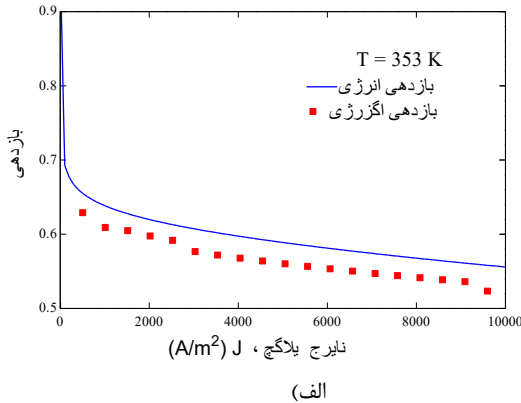
$$\dot{E}x_Q + \sum_{in} \dot{m}_{in} ex_{in} = \sum_{out} \dot{m}_{out} ex_{out} + \dot{E}x_w + \dot{E}x_D \quad (14)$$

که $\dot{E}x_Q$ به انرژی مرتبط با انتقال حرارت اشاره دارد، $\dot{E}x_w$ مقدار انرژی مربوط به کار است و $\dot{E}x_D$ تخریب انرژی است. اندیس‌های in و out به ترتیب

چگالی جریان (J)، دمای منبع گرمایی (T_6)، فشار ورودی توربین ($P_{in,T}$) و راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ انتخاب شده اند.

3-3- تاثیر چگالی جریان

اثر افزایش چگالی جریان در بازه انرژی و بازه اگزرژی، انرژی الکتریکی ورودی و انرژی گرمایی ورودی سیستم ترکیبی ارائه شده، در شکل های 3 الف و 3 ب نشان داده شده اند.



(ب)

شکل 2 تاثیر چگالی جریان بر:

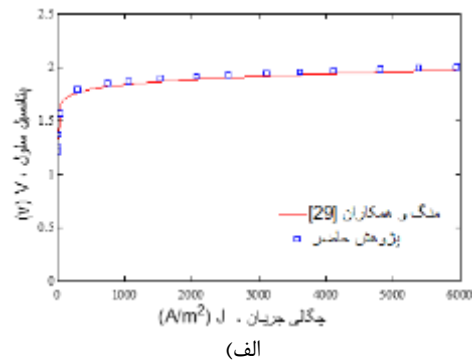
الف) بازه انرژی و بازه اگزرژی در دمای 373 K (ب) انرژی الکتریکی ورودی و انرژی گرمایی ورودی.

شکل 3 الف تاثیر چگالی جریان را بر بازه انرژی و اگزرژی الکترولایزر PEM در دمای 353 K نشان می دهد. هر دو بازه با نرخ کاهشی با چگالی جریان (J) کاهش می یابند. برای درک بهتر، انرژی الکتریکی ورودی و انرژی حرارتی ورودی مطالعه و در شکل 3 ب ارائه شده است. انرژی ورودی با افزایش J افزایش می یابد. در چگالی جریان بسیار کم، تقاضای انرژی الکتریکی به طور قابل توجهی با افزایش J افزایش می یابد (در چگالی جریان های پایین ورودی انرژی الکتریکی بسیار کم است، بنابراین افزایش غیر خطی آن با J را نمی توان در شکل 3 ب مشاهده کرد)، در حالی که انرژی حرارتی ورودی به صورت خطی با J افزایش می یابد. همانطور که کل انرژی ورودی (مجموع انرژی الکتریکی ورودی و انرژی حرارتی ورودی) با J افزایش می یابد، بازه انرژی با J کاهش می یابد (شکل 3 الف).

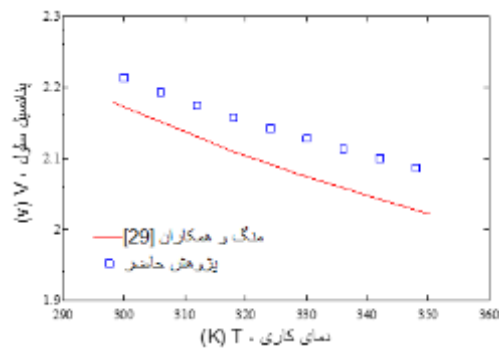
واکنش الکتروشیمیایی سریع تر انجام می شود، بنابراین چگالی جریان تبدیلی بالاتر است، که منجر به پتانسیل فعال سازی کمتر می شود. علاوه بر این، رسانایی یونی الکترولیت با دما افزایش می یابد که منجر به یک مازاد پتانسیل اهمی کمتر می شود. اثرات ترکیبی افزایش دما منجر به کاهش قابل توجهی در پتانسیل سلول می شود.

جدول 4 مشخصات تمام نقاط چرخه ORC

نقاط	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	Exergy (kJ/kg)
1	12,6	4,52	69,0.1	1,32	36,85
2	13,27	16,95	70,12	1,22	68,88
3	65,17	16,95	285,1	1,36	70,88
4	15,94	4,52	260,8	1,33	36,75
5	54,85	1,19	229,7	0,76	54,7
6	73,33	1,2	307,01	0,99	63,56
7	9,85	1,19	41,52	0,14	50,51
8	4,44	1,2	18,87	0,06	51,96



الف)



ب)

شکل 1 مقایسه نتایج مطالعه حاضر و منبع [28] در رابطه با شبیه سازی الکترولایزر غشاء پروتونی.

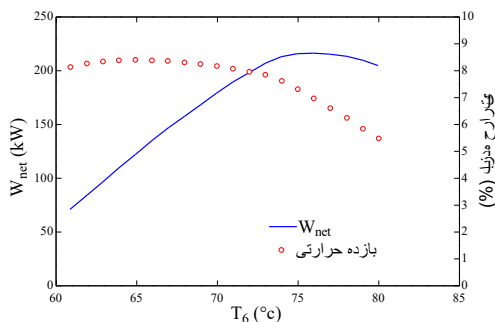
الف) تاثیر چگالی جریان بر پتانسیل سلول. ب) تاثیر دمای کاری بر پتانسیل سلول

3-2- مطالعه پارامتریک

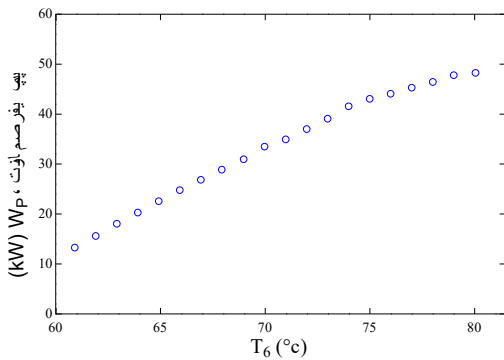
یک مطالعه پارامتری جامع به منظور بررسی تاثیر پارامترهای طراحی ORC و واحد مایع سازی هیدروژن بر چندین متغیر انجام شده است که عملکرد کلی سیستم توسط آن ها مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور پارامترهای

فعال سازی کمتری می شود. در نتیجه، پتانسیل سلول با افزایش دما کاهش می یابد (شکل 5 ب). با ترکیب اثر دما بر ورودی های انرژی الکتریکی و حرارتی، دمای عملیاتی بالا برای تولید هیدروژن توسط الکترولایزر PEM توصیه می شود. با این وجود، دمای عملیاتی معمولاً نباید از 373 کلوین تجاوز کند زیرا برای حفظ رسانایی یونی بالای الکترولیت PEM به آب مایع نیاز است.

در عمل، ضخامت غشای الکترولیت الکترولایزر PEM می تواند از 50 تا 200 میکرومتر باشد. اثر ضخامت الکترولیت PEM بر بازده انرژی الکترولایزر PEM در شکل 5 ج نشان داده شده است. با افزایش ضخامت غشاء، بازده انرژی کاهش می یابد که دلیلش این است که یک غشای الکترولیت ضخیم تر دارای پتانسیل اهمی بالاتر و پتانسیل عملیاتی بالاتری است (شکل 5 د). هر چه ورودی انرژی الکتریکی بیشتر باشد، بازده انرژی کمتری را به همراه دارد.



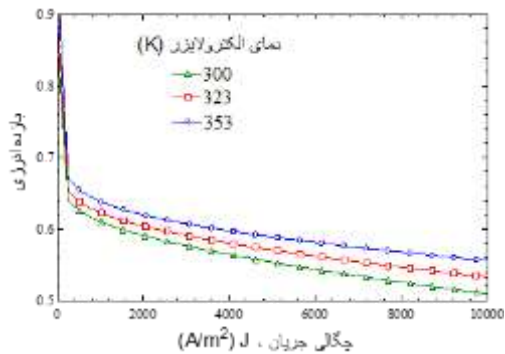
الف



ب

شکل 4 تاثیر دمای منبع گرمایی بر:

الف) توان خالص خروجی و بازده حرارتی. ب) توان مصرفی پمپ.



از شکل 3 ب می توان دریافت که انرژی الکتریکی ورودی 2 مرتبه بزرگتر از ورودی انرژی حرارتی است. با توجه به تجزیه و تحلیل های قبلی، الکترولایزر PEM در حالت گرمای کار می کند، بنابراین انرژی حرارتی فقط برای گرم کردن آب تغذیه مورد نیاز است، که تنها مقدار کمی از انرژی برای الکترولایزر PEM است که در دمای پایین تر از 373 K کار می کند. بنابراین، بازده انرژی و بازده انرژی تقریباً توسط ورودی انرژی الکتریکی به تنهایی کنترل می شود. بنابراین ما چگالی جریان 5000 A/m^2 را برای الکترولایزر غشاء پروتونی در نظر گرفتیم. از آنجایی که الکتروسیسته دارای انرژی خلی خلی است، بازده انرژی و بازده انرژی در مطالعه حاضر تقریباً یکسان است.

3-4- تاثیر دمای منبع گرمایی

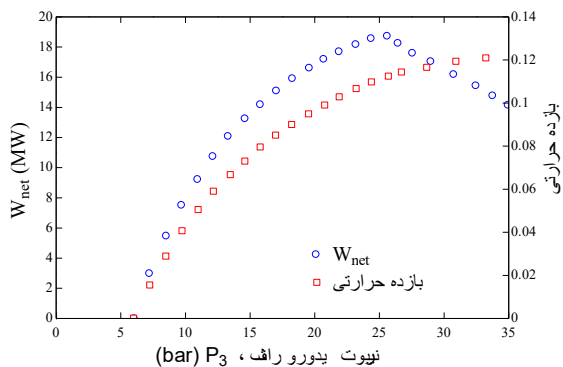
با در نظر گرفتن دمای 72 درجه به عنوان نقطه طراحی، اثر تغییر دمای منبع زمین گرمایی از 60 درجه سلسیوس تا 80 درجه سلسیوس بر پارامترهای بازده حرارتی، توان خالص خروجی و توان مصرفی پمپ چرخه رانکین مورد بررسی قرار گرفت. شکل 4 الف تغییرات در توان خروجی چرخه رانکین و راندمان حرارتی زمانی که دمای منبع زمین گرمایی از 60 درجه تا 80 درجه سلسیوس تغییر می کند را نشان می دهد. از نمودار می توان دریافت که وقتی دمای منبع از نقطه طراحی کم تر می شود، بازده حرارتی ابتدا به حداکثر 8/4 درصد در دمای 64 درجه سلسیوس افزایش می یابد و پس از آن شروع به کاهش می کند در حالی که توان خالص خروجی همچنان کاهش می یابد. از طرف دیگر، اگر دمای منبع زمین گرمایی بیشتر از نقطه طراحی افزایش یابد، بازده حرارتی کاهش می یابد در حالی که توان خالص خروجی تا حداکثر 217 کیلووات در دمای منبع 77 درجه سلسیوس افزایش می یابد که فراتر از آن هر افزایشی در دمای منبع، توان خالص خروجی سیکل رانکین را کاهش می دهد. این رفتار به این دلیل رخ می دهد که وقتی دمای منبع زمین گرمایی بالاتر از دمای طراحی افزایش می یابد، ویژگی های سیستم ایجاب می کند که سیال عامل بیشتری در اواپراتور تبخیر شود. به منظور برآورده شدن نیاز سیستم، دبی سیال عامل و همچنین قدرت مورد نیاز پمپ افزایش می یابد (شکل 4 ب). افزایش دبی سیال عامل در ابتدا قدرت بیشتری نسبت به توان اضافی مصرف شده توسط پمپ تولید می کند و از این رو باعث افزایش اولیه در توان خالص خروجی سیکل رانکین تا حداکثر مقدار (همانطور که در شکل 4 الف نشان داده شده است) می شود. اثر مصرف برق توسط پمپ بر تولید نیروی ناخالص اضافی ناشی از افزایش دبی سیال کاری سبقت می گیرد و در نتیجه توان خالص خروجی کمتری تولید می کند. افزایش دمای منبع همچنین باعث افزایش گرمای ورودی به سیستم می شود و در نتیجه باعث کاهش راندمان حرارتی می شود. علاوه بر این، کاهش دمای منبع زمین گرمایی کمتر از دمای طراحی شده، باعث کاهش مقدار سیال عامل بخار شده در اواپراتور می شود و این منجر به کاهش توان خالص خروجی می شود. همچنین باعث کاهش گرمای ورودی به سیستم می شود و در نتیجه باعث افزایش راندمان حرارتی تا نقطه اوج می گردد و پس از آن دوباره به طور مداوم سقوط می نماید.

همانطور که مشخص شد بازده انرژی تقریباً با بازده انرژی یکسان است. بنابراین در تحلیل زیر فقط بازده انرژی مورد بحث قرار می گیرد. بازده انرژی الکترولایزر PEM در دماهای کاری معمولی 300 K، 323 K و 353 K در شکل 5 الف نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش دما بازده انرژی افزایش می یابد. در دمای کاری بالاتر، الکترودهای الکترولایزر PEM واکنش پذیرتر هستند که منجر به چگالی جریان تبدیلی بالاتر و متعاقباً پتانسیل

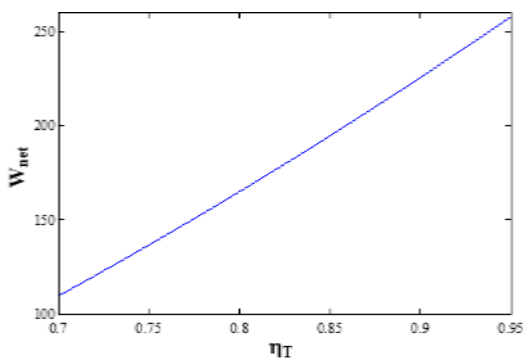
روش مدل‌سازی فرآیند تبادل گرما فرض می‌کند که ایزو بارها در نمودارهای آنتالپی-دما (T-H) در حالت غیراشباع خطوط مستقیم هستند. به منظور کاهش خطای مرتبط با این فرض حد بالای $0.81P_{crit}$ (که P_{crit} فشار بحرانی است) برای فشار ورودی توربین تعیین گردید. یک حد پایین $0.01P_{crit}$ نیز انتخاب شد تا اطمینان حاصل شود که خلاء کندانسور همیشه در محدوده‌های عملاً قابل دستیابی باقی می‌ماند. بنابراین، محاسبات چرخه فقط برای فشار ورودی توربین (TIP) در محدوده $0.01P_{crit} < TIP < 0.81P_{crit}$ انجام شد. وجود حداکثر خروجی کار مربوط به مقدار گرمایی است که می‌تواند به چرخه وارد شود زیرا شرایط عملیاتی متفاوت است. همچنین به دلیل رعایت مسائل ایمنی و محدودیت‌های موجود در استفاده از تجهیزات سیکل رانکین آلی فشار ورودی توربین در این تحقیق $16/95 \text{ bar}$ در نظر گرفته شده است.

3-6- تاثیر راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ چرخه رانکین آلی

شکل 5 اثر افزایش راندمان آیزنتروپیک توربین و راندمان آیزنتروپیک پمپ در توان خروجی چرخه رانکین آلی سیستم ترکیبی ارائه شده را نشان می‌دهد. می‌توان توربین و پمپ‌های متفاوت که بازده‌های متفاوتی دارند را برای چرخه رانکین آلی انتخاب کرد. در حقیقت هرچه راندمان آیزنتروپیک پمپ و توربین بالا باشد، تلفات آن پایین می‌آید. همین کاهش تلفات باعث بهبود عملکرد پمپ و توربین و کاهش مصرف برق پمپ و افزایش توان تولیدی توسط توربین می‌گردد. راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب $0/8$ و $0/75$ است. بنابراین افزایش راندمان پمپ و توربین، سبب افزایش توان تولیدی چرخه رانکین آلی و همچنین راندمان انرژی و در نتیجه هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر سیستم ترکیبی می‌شود.



شکل 6 تاثیر فشار ورودی توربین بر راندمان حرارتی و توان خروجی سیکل رانکین

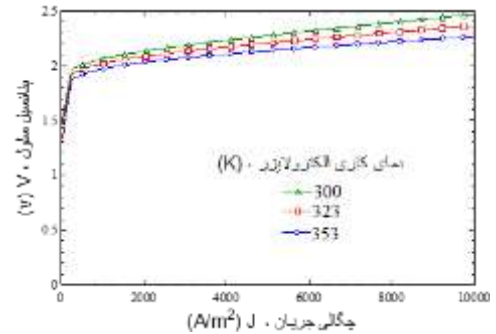


شکل 5 بازده انرژی و پتانسیل سلول به عنوان تابعی از دما، چگالی جریان و ضخامت الکترولیت PEME

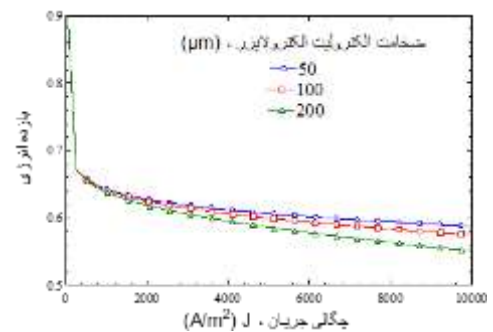
3-5- تاثیر فشار ورودی توربین

شکل 6 راندمان حرارتی و توان خروجی چرخه رانکین در برابر فشار ورودی توربین را نشان می‌دهد. توان خروجی و راندمان حرارتی چرخه رانکین آلی با افزایش فشار ورودی توربین افزایش می‌یابند. توان خروجی در فشار $P_3=25 \text{ bar}$ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن شروع به کاهش می‌کند در حالی که راندمان حرارتی طور پیوسته افزایش می‌یابد.

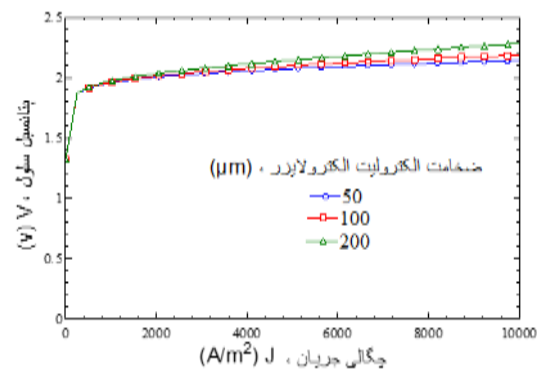
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

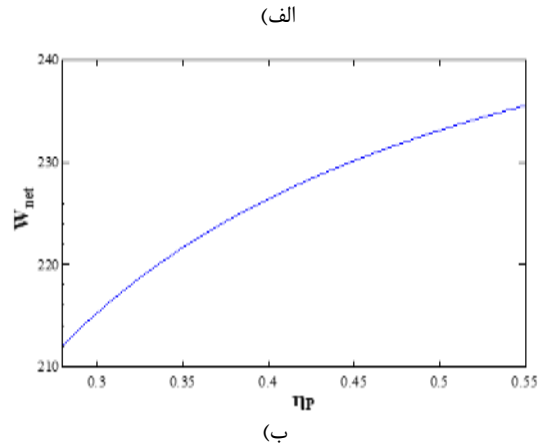
- بیشترین راندمان اگزرژی هیدروژن تولیدی و توان تولیدی چرخه رانکین آلی، به ازای حالت بخار اشباع حاصل می‌گردد و با افزایش فوق گرم بودن بخار ورودی توربین، کاهش می‌یابد.
- به ازای اختلاف دمایی 3 درجه در مبدل حرارتی و دمای اواپراتور 340 کلوین، توان چرخه رانکین آلی، راندمان اگزرژی، مقدار هیدروژن تولیدی و بازده حرارتی به ترتیب دارای مقدار 220 کیلووات، 57 درصد و 26/8 کیلوگرم بر ساعت و 8/5٪ است.

5- پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

هزینه تجهیزات و آنالیز اقتصادی در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار نگرفته است و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به منظور بررسی مقدار تاثیرگذاری استفاده از توان گرمای تلف شده بر قیمت تمام شده هیدروژن مایع تولیدی انجام گیرد همچنین پیشنهاد می‌شود استفاده از سیستم پیشنهادی برای ذخیره انرژی زمین گرمایی مورد بررسی قرار گیرد.

6- فهرست علائم

E_{act}	انرژی فعال‌سازی (J)
E_x	اگزرژی (J)
e	اگزرژی ویژه (Jkg^{-1})
F	ثابت فارادی (Cmol^{-1})
h	آنتالپی ویژه (Jkg^{-1})
J	چگالی جریان (Am^{-2})
J_0	تبادل چگالی جریان (Am^{-2})
J_{ref}	فاکتور پتانسیل اولیه (Am^{-2})
L	ضخامت غشاء (μm)
\dot{m}	دبی جرمی (kgs^{-1})
$\dot{N}_{H_2,out}$	دبی مولی جریان هیدروژن (mols^{-1})
$\dot{N}_{H_2O,reacted}$	دبی مولی جریان آب (mols^{-1})
$\dot{N}_{O_2,out}$	دبی مولی جریان اکسیژن (mols^{-1})
ORC	چرخه رانکین آلی
PEME	الکترولیزر غشاء پروتونی
\dot{Q}	نرخ گرما (w)
R_{PEM}	مقاومت اهمی کل (Ω)
TIP	فشار ورودی توربین (bar)
\dot{W}	نرخ کار انجام شده (w)
علائم یونانی	
Δ	اختلاف
η	بازدهی
σ_{PEM}	رسانایی یونی محلی (sm^{-1})
$\lambda(x)$	محتوی آب در عمق x (عمق غشای اندازه‌گیری شده از سطح کاتد) (Ω^{-1})
λ_c	محتوی آب در سطح غشاء در سمت کاتد (Ω^{-1})
λ_a	محتوی آب در سطح غشاء در سمت آند (Ω^{-1})
بالانویس‌ها	
ch	شیمیایی
ph	فیزیکی
زیرنویس‌ها	



شکل 7 تاثیر راندمان توربین و پمپ ORC بر توان خروجی سیکل رانکین

4- جمع‌بندی

در این تحقیق، برای راه‌اندازی سیکل رانکین آلی از گرمای تلف شده به عنوان منبع گرما استفاده شد. سیکل رانکین آلی با نرخ جریان جرمی ثابت مدل‌سازی شد و از منبع حرارتی موجود و شرایط خنک‌کاری برای محاسبه چرخه رانکین بر اساس اختلاف دمای نقطه پینچ ثابت در مبدل‌های حرارتی چرخه استفاده شد. مشاهده شد که هرچه دمای منبع گرمایی (گرمای تلف شده) بیشتر باشد، با افزایش فشار ورودی توربین کار خروجی چرخه نیز افزایش می‌یابد اما با این حال باید مراقب بود زیرا فشار ورودی توربین بسیار بزرگ می‌تواند منجر به کاهش کار خروجی و هیدروژن تولیدی توسط الکترولیزر غشاء پروتونی شود. نتایج نشان می‌دهد که شرایط بهینه‌سازی کار مکانیکی خروجی با شرایط بهینه‌سازی بازده حرارتی چرخه متفاوت است. حداکثر خروجی کار در شرایطی به دست می‌آید که بهترین تعادل بین حرارت ورودی به چرخه و راندمان حرارتی وجود دارد. چرخه رانکین که با گرمای تلف شده تغذیه می‌شود باید طوری طراحی شود که در صورت امکان در ناحیه حداکثر کار خروجی عمل کند، اما از شرایطی که ممکن است باعث تغییر نقطه فشار و در نتیجه کاهش سرعت گرمای وارد شده به چرخه شود، اجتناب شود. این امر به ویژه برای مواردی که سیال منبع گرمایی تغییر حالت می‌دهد بسیار مهم است، زیرا این تغییر در نقطه پینچ می‌تواند باعث کاهش ناگهانی در کار خروجی چرخه شود. بهینه‌سازی کار مکانیکی خروجی هنگام طراحی سیستم‌های ORC برای بازیابی توان مفید از گرمای تلف شده ایده‌ی بسیار مطلوبی است. در این پژوهش یک سیستم ترکیبی از چرخه‌ی رانکین و واحد مایع‌سازی هیدروژن همراه با الکترولیزر غشاء پروتونی به منظور تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گرفته است. اثر پارامترهای طراحی موثر بر سیستم ترکیبی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مهم حاصل از این مطالعه به صورت زیر می‌باشد:

- افزایش دمای منبع گرمایی عامل بهینه شدن توان تولیدی چرخه رانکین آلی، راندمان اگزرژی و متعاقباً هیدروژن تولیدی توسط الکترولیزر سیستم ترکیبی می‌باشد.
- با افزایش راندمان آی‌نتروپیک توربین، راندمان اگزرژی و نیز توان تولیدی چرخه رانکین آلی و در نتیجه هیدروژن تولیدی توسط الکترولیزر افزایش می‌یابد.

- [16] E. Zoulias and E. Varkaraki, "A review on water electrolysis," *Tcjtst*, Vol. 4, No. 2, pp. 41–71, 2004, [Online]. Available: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/jorna1/docs/zoulias.pdf>.
- [17] K. Onda, T. Kyakuno, K. Hattori, and K. Ito, "Prediction of production power for high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis," *J. Power Sources*, Vol. 132, No. 1–2, pp. 64–70, 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.01.046.
- [18] S. Rau et al., "Highly Efficient Solar Hydrogen Generation-An Integrated Concept Joining III-V Solar Cells with PEM Electrolysis Cells," *Energy Technol.*, Vol. 2, No. 1, pp. 43–53, 2014, doi: 10.1002/ente.201300116.
- [19] M. Ni, M. K. H. Leung, and D. Y. C. Leung, "Electrochemistry modeling of proton exchange membrane (PEM) water electrolysis for hydrogen production," *16th World Hydrog. Energy Conf. 2006, WHEC 2006*, Vol. 1, No. June, pp. 33–39, 2006.
- [20] J. H. Yang, Y. Yoon, M. Ryu, S. K. An, J. Shin, and C. J. Lee, "Integrated hydrogen liquefaction process with steam methane reforming by using liquefied natural gas cooling system," *Appl. Energy*, Vol. 255, No. September, p. 113840, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113840.
- [21] S. Faramarzi, S. M. Mousavi Nainiyan, M. Mafi, and R. Ghasemiasl, "Modification and optimization of an integrated hydrogen liquefaction process with an LNG regasification system," *J. Mech. Eng.*, 2021, [Online]. Available: https://tumechj.tabrizu.ac.ir/article_12868.html.
- [22] M. Imran, B. S. Park, H. J. Kim, D. H. Lee, M. Usman, and M. Heo, "Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for waste heat recovery applications," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 87, pp. 107–118, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.091.
- [23] F. Faramarzi Ranjbar, Arash Nourbakhsh Saadabad, Mahdi Nami Khaliledeh, Saman Faramarzi, "Simulation, analysis and optimization of a non-emission process producing power, hydrogen gas and liquid hydrogen using solar energy and PEM electrolysis," *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 02, No. 04, pp. 26–48, 2022.
- [24] M. W. Chase, "Thermochemical Tables," *J. Phys. Chem. Ref. Data Monogr.*, Vol. 9, p. 1, 1998.
- [25] H. Nami, E. Akrami, and F. Ranjbar, "Hydrogen production using the waste heat of Benchmark pressurized Molten carbonate fuel cell system via combination of organic Rankine cycle and proton exchange membrane (PEM) electrolysis," *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 114, pp. 631–638, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.018.
- [26] H. Kianfard, S. Khalilarya, and S. Jafarmadar, "Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 177, No. September, pp. 339–349, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.057.
- [27] S. Faramarzi, S. M. Mousavi Nainiyan, M. Mafi, R. Ghasemiasl, "Proposing a simultaneous production cycle of liquid natural gas and liquid hydrogen." 2021.
- [28] A. Auld, A. Berson, and S. Hogg, "Organic rankine cycles in waste heat recovery: A comparative study," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 9–18, 2013, doi: 10.1093/ijlct/ctt033.
- [29] M. Ni, M. K. H. Leung, and D. Y. C. Leung, "Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 49, No. 10, pp. 2748–2756, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.03.018.
- [30] S. F. Ranjbar, H. Nami, A. Khorshid, and H. Mohammadpour, "Hydrogen production using waste heat recovery of MATIANT non-emission system via PEM electrolysis," *Modares Mech. Eng.*, Vol. 16, No. 10, pp. 42–50, 2017, [Online]. Available: <https://mme.modares.ac.ir/article-15-3305-en.html>.
- [31] T. J. Kotas, "Exergy Concepts for Thermal Plants," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 2, No. 3, pp. 105–114, 1980, doi: 10.1016/0142-727X(80)90028-4.
- [32] B. Kurs and K. Okten, "ScienceDirect Thermodynamic analysis of a Rankine cycle coupled with a concentrated photovoltaic thermal system for hydrogen production by a proton exchange membrane electrolyzer plant," Vol. 4, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.003.
- [33] S. Faramarzi, S. Gharanli, M. Ramazan-zade Mohammadi, A. Rahimtabar, Ali J Chamkha, "Energy, exergy, and economic analysis of an innovative hydrogen liquefaction cycle integrated into an absorption refrigeration system and geothermal energy," *Energy*, Vol. 282, 128891, 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128891.

کندانسور	cond
بحرانی	crit
ورودی	in
خروجی	out

6- مراجع

- [1] A. Mahmoudi, M. Fazli, and M. R. Morad, "A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle," *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 143, No. July, pp. 660–675, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136.
- [2] C. L. Chen, P. Y. Li, and S. N. T. Le, "Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery in a Refinery," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 55, No. 12, pp. 3262–3275, 2016, doi: 10.1021/acs.iecr.5b03381.
- [3] H. Chen, D. Yogi Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, "Energetic and exergetic analysis of CO₂- and R32-based transcritical Rankine cycles for low-grade heat conversion," *Appl. Energy*, Vol. 88, No. 8, pp. 2802–2808, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.01.029.
- [4] H. Chen, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, "A supercritical Rankine cycle using zeotropic mixture working fluids for the conversion of low-grade heat into power," *Energy*, Vol. 36, No. 1, pp. 549–555, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.10.006.
- [5] R. Rayegan and Y. X. Tao, "A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs)," *Renew. Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 659–670, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.07.010.
- [6] J. P. Roy, M. K. Mishra, and A. Misra, "Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle," *Energy*, Vol. 35, No. 12, pp. 5049–5062, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.08.013.
- [7] H. Huang, J. Zhu, and B. Yan, "Comparison of the performance of two different Dual-loop organic Rankine cycles (DORC) with nanofluid for engine waste heat recovery," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 126, pp. 99–109, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.07.081.
- [8] Y. M. Kim, D. G. Shin, C. G. Kim, and G. B. Cho, "Single-loop organic Rankine cycles for engine waste heat recovery using both low- and high-temperature heat sources," *Energy*, Vol. 96, pp. 482–494, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.092.
- [9] E. Yun, H. Park, S. Y. Yoon, and K. C. Kim, "Dual parallel organic Rankine cycle (ORC) system for high efficiency waste heat recovery in marine application," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 6, pp. 2509–2515, 2015, doi: 10.1007/s12206-015-0548-5.
- [10] A. Hernandez, F. Ruiz, S. Gusev, R. De Keyser, S. Quoilin, and V. Lemort, "Experimental validation of a multiple model predictive control for waste heat recovery organic Rankine cycle systems," *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 193, No. May, p. 116993, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116993.
- [11] M. Holik, M. Živić, Z. Virag, A. Barac, M. Vujanović, and J. Avsec, "Thermo-economic optimization of a Rankine cycle used for waste-heat recovery in biogas cogeneration plants," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 232, No. February, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113897.
- [12] J. Qu, Y. Feng, Y. Zhu, S. Zhou, and W. Zhang, "Design and thermodynamic analysis of a combined system including steam Rankine cycle, organic Rankine cycle, and power turbine for marine low-speed diesel engine waste heat recovery," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 245, p. 114580, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114580.
- [13] M. G. Civgin and C. Deniz, "Analyzing the dual-loop organic rankine cycle for waste heat recovery of container vessel," *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 199, No. September, p. 117512, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117512.
- [14] F. Z. Aouali, M. Becherif, H. S. Ramadan, M. Emziane, A. Khellaf, and K. Mohammedi, "Analytical modelling and experimental validation of proton exchange membrane electrolyser for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 2, pp. 1366–1374, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.101.
- [15] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 12, pp. 4901–4934, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.

[34] S. Faramarzi, A. Khavari, "An innovative mixed refrigerant hydrogen liquefaction cycle to store geothermal energy as liquid hydrogen," *J. Energy Storage*, 2023, Vol. 72, 108008, doi: 10.1016/j.est.2023.108008.