

پیشنهاد یک سیستم ترکیبی چند هدفه به منظور تبدیل انرژی زمین گرمایی به هیدروژن مایع

کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی^(۶)، قزوین، ایران،
mahdiehshavandi6@gmail.com

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی^(۶)، قزوین، ایران،
saeedgoodarzvand69@gmail.com

دکتری مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
faramarzi.saman@wtiau.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی^(۶)، قزوین، ایران، m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

مهديه شوندي

سعید گودرزوند چگینی

سامان فرامرزی

مصطفی مافی*

چکیده

هیدروژن مایع راه‌حلی برای ذخیره و انتقال برق است که توسط منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی زمین گرمایی تولید می‌شود. در این مقاله، یک چرخه رانکین آلی و الکترولیز غشا پروتونی، چرخه تبرید جذب آبی آمونیاکی و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن برای ذخیره انرژی زمین گرمایی به‌عنوان هیدروژن مایع شبیه‌سازی و تحلیل می‌شوند. توان تولید شده توسط چرخه رانکین آلی برای تولید گاز هیدروژن در الکترولیزر استفاده می‌شود، علاوه بر این، سرمایه‌ش حاصل از چرخه تبرید جذبی برای پیش‌خنک کردن گاز هیدروژن تا دمای منفی ۲۶/۹ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود که در ادامه هیدروژن در دمای منفی ۲۵۳ توسط چرخه مبرد ترکیبی مایع می‌شود. نوآوری این مطالعه مبتنی بر استفاده از انرژی سرد حاصل از تبرید جذبی در چرخه تولید هیدروژن مایع و ادغام فرایند تولید هیدروژن مایع با سیستم انرژی زمین گرمایی است. با استفاده از انرژی، انرژی، و تجزیه و تحلیل اقتصادی، بازده چرخه نهایی در مقایسه با سیستم اولیه بهبود یافت. مصرف ویژه انرژی واحد مایع سازی ۸/۸۱ کیلووات ساعت برای هر کیلوگرم هیدروژن بود. در سه سال زمان بازپرداخت، با استفاده از آنالیز اقتصادی در سه سال دوره بازپرداخت حداقل قیمت فروش ۲ دلار و ۱۱ سنت محاسبه شد که کمتر از چرخه مشابه تولید هیدروژن مایع ارائه شده در گذشته بود.

واژه‌های کلیدی: چرخه مایع سازی هیدروژن، مصرف انرژی ویژه، تحلیل اقتصادی، انرژی زمین گرمایی، الکترولیزر غشاء پروتونی.

Proposing a multi-generation system to convert geothermal energy to LH₂

M. Shavandi

S. Goodarzvand Chegini

S. Faramarzi

M. Mafi

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

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

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Abstract

Liquid hydrogen is a solution for storing and transmitting electricity that is produced by renewable energy sources such as geothermal energy. In this paper, a Rankine cycle with a proton exchange membrane electrolyzer, an ammonia absorption refrigeration cycle, and a hydrogen liquefaction cycle are simulated and analyzed for storing geothermal energy as liquid hydrogen. The power generated by the Rankine cycle is used to produce hydrogen gas in the electrolyzer. Additionally, the cooling obtained from the absorption refrigeration cycle is used to pre-cool the hydrogen gas to a temperature of -9.26 °C, and then the hydrogen is liquefied at -253 °C by a mixed refrigeration cycle. The innovation of this study is based on using the cold energy obtained from the absorption refrigeration cycle in the liquid hydrogen production cycle and integrating the liquid hydrogen production process with the geothermal energy system. By using energy, exergy, and economic analysis, the final cycle efficiency was improved compared to the initial system. The special energy consumption of the liquefaction unit is 81.8 kWh per kilogram of hydrogen. In a three-year payback period, using economic analysis, the minimum selling price is calculated to be \$2.11, which is lower than a similar liquid hydrogen production cycle presented in the past.

Keywords: Hydrogen liquefaction cycle, specific energy consumption, economic analysis, geothermal energy, proton membrane electrolyzer.

صنعت خودرو، فلزکاری و تولید برق نیز مورد استفاده است. استفاده از انرژی زمین گرمایی می‌تواند یک راه حل عالی برای سیستم‌های چند هدفه باشد، که در این رابطه عبدالعلی پورعدل و همکاران [2] یک سیستم چند هدفه برای تولید هیدروژن، توان، آب شیرین و آب گرم را بر پایه انرژی زمین گرمایی پیشنهاد کردند. در کار آنها با استفاده از آنالیز انرژی سیستم مورد بررسی بهینه سازی شد. اکرمی و همکاران [۳] یک سیستم انرژی چند هدفه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی را از دیدگاه‌های انرژی و اقتصادی مورد مطالعه قرار دادند که هدف آنها استفاده از انرژی زمین گرمایی برای تولید برق بود. عبدالعلی پورعدل و همکاران [۴] دو سیستم ترکیبی قدرت و گرما بر

۱- مقدمه

با توجه به این واقعیت که بهره‌وری انرژی به دلیل افزایش قیمت انرژی، کمبود منابع و محدودیت‌های زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. افزایش کارایی چرخه‌های ذخیره سازی انرژی، اهمیت بسیار بالایی دارند. با بازیابی گرمای تلف شده و استفاده از آن در ترکیب با دیگر سیستم‌های ذخیره سازی یا تولید انرژی به ویژه سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیری چون انرژی زمین گرمایی، می‌توان کارایی و هزینه سیستم‌های ذخیره سازی انرژی را ارتقا داد [۱]. هیدروژن یکی از گزینه‌های اصلی ذخیره انرژی پاک و پایدار است که به عنوان ماده مصرفی در صنایع مختلفی همچون

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰۲۳/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۲۰۲۳/۰۶/۲۷

اساس چرخه رانکین و کالینا را پیشنهاد کردند که برای منبع زمین گرمایی سبلان مناسب بود. در پژوهشی دیگر عبداللهی و همکاران [۵] یک سیستم تولید حرارت، سرمایش و توان با استفاده از گاز طبیعی مایع به عنوان یک واحد بازیابی سرمایش ارائه کردند. در کار آنها دمای منبع زمین گرمایی از ۵۰ درجه سانتیگراد تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد در نقاط مختلف متغیر بود. علی رحمی و همکاران [۶] فرآیندی را مطالعه کردند که با استفاده از یک منبع انرژی زمین گرمایی، هیدروژن، اکسیژن، توان و سرمایش تولید می‌کند. چرخه رانکین آلی، الکترولیزر و چرخه تبرید جذبی در سیستم پیشنهادی آنها استفاده شد. الکترولیزر غشا پروتونی بیشترین نسبت تخریب انرژی را در بین تمام اجزا داشت. آنها از جزئیات چاه‌های زمین گرمایی سبلان به عنوان مطالعه موردی استفاده کردند. چرخه پیشنهادی آنها قادر بود که توان الکتریکی ۴۶۹۶ مگاوات ساعت را تامین کند. در کار حکمت شعار و همکاران [۷]، از یک مدل عددی برای بررسی سیستم چند هدفی پیشنهادی استفاده شد. آنها از تحلیل‌های ترمودینامیکی و انرژی‌واکنش‌میک استفاده کردند. تجزیه و تحلیل بر روی متغیرهای کلیدی از جمله دبی جریان جرمی زمین گرمایی، دمای تقطیر و دمای جریان ورودی چرخه رانکین آلی انجام شد. آنها از روش بهینه سازی چند هدفه بر اساس دبی جریان جرمی آب شیرین و پارامتر اقتصادی استفاده کردند. در سیستم پیشنهادی نفجی و همکاران [۸] از انرژی های تجدید پذیر برای تامین توان مورد نیاز یک الکترولیزر غشایی پروتون استفاده کردند. سیستم آنها دارای خروجی کربن صفر بود که در پژوهش حاضر نیز این نکته برای تولید و ذخیره سازی هیدروژن مورد توجه قرار گرفته است. الامام و دینجر [۹] از یک منبع انرژی تجدید پذیر برای تولید هیدروژن از آب با استفاده از الکترولیزر استفاده کردند، ظرفیت الکترولیزر ۱،۲۵ کیلوگرم در ساعت بود. در کلیه کارهای پیشنهادی بررسی شده در بالا محصول نهایی سیستم پیشنهادی، توان و در برخی موارد گاز هیدروژن، آب شیرین و آب گرم نیز بوده است، با توجه به مزیت‌های ذخیره سازی انرژی به صورت گازهای مایع که موجب سهولت در انتقال و امکان ذخیره و استفاده در زمان‌های مختلف می‌شود لزوم بررسی بیشتر سیستم‌های چند هدفه بر پایه ذخیره سازی انرژی به صورت پایدار همچون هیدروژن مایع احساس می‌شود که در این پژوهش انجام شده است. بعلاوه استفاده از روش‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر که خروجی کربن صفر دارند بدلیل پدیده گرمایش زمین هر سال اهمیت بیش تری پیدا می‌کند. توجه روزافزون به هیدروژن بسیاری از محققین را به بررسی روش‌های مختلف مایع سازی هیدروژن سوق داده است. در ادامه پژوهش‌های اخیر که در رابطه با مایع سازی هیدروژن بوده‌اند بررسی می‌شوند. همد و دینجر [۱۰] تجزیه و تحلیل انرژی را برای چرخه‌های مایع سازی هیدروژن مجهز به سیستم های پیش خنک کننده نیتروژن انجام دادند. دمای نهایی در واحد پیش خنک کننده منفی ۱۹۳ درجه سانتیگراد بود. آنها دبی جریان مبرد نیتروژن را بهینه کردند. یانگ و همکاران [۱۱] از انرژی سرد تلف شده یک سیستم بازیابی گاز طبیعی مایع در چرخه تولید هیدروژن مایع استفاده کردند. انرژی سرد واحد بازیابی گاز طبیعی مایع در بخش پیش سرمایش یک چرخه مایع سازی هیدروژن استفاده شد. ظرفیت چرخه ۳۰۰ تن در روز بود. نیتروژن و

گاز مبرد ترکیبی به ترتیب در قسمت‌های پیش سرمایش و سرمایش نهایی استفاده شد. هدف کاهش دبی جریان جرمی جریان گاز نیتروژن و به حداقل رساندن مصرف برق در قسمت پیش خنک‌کننده بود. در نهایت، مصرف ویژه انرژی از ۱۳،۵۸ کیلووات ساعت برای هر کیلوگرم هیدروژن مایع به مقدار ۱۱،۰۵ کیلووات ساعت برای هر کیلوگرم هیدروژن مایع کاهش یافت. در کار آنها قیمت تمام شده هیدروژن مایع از حدود ۵ دلار به ۲ دلار و ۵۳ سنت برای هر کیلوگرم کاهش یافت. بین و جو [۱۲] چرخه مایع سازی هیدروژن را با ظرفیت ۶۳ کیلوگرم در ساعت پیشنهاد کردند که دارای مصرف ویژه انرژی ۷،۱۳ و ضریب کارایی ۱۷ درصد بود. چرخه تبرید هلیوم در بخش خنک کننده چرخه مایع سازی هیدروژن استفاده شد، در حالی که نیتروژن در قسمت پیش سرمایش به عنوان مبرد مورد استفاده قرار گرفت. هیدروژن مایع در دمای منفی ۲۵۲ درجه و فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال مایع شد. مطالعات انجام گرفته در بالا مبتنی بر استفاده از مبرد نیتروژن، مبرد ترکیبی و یا مبرد هلیوم در بخش‌های پیش سرمایش و سرمایش نهایی مایع سازی هیدروژن بوده‌اند. با توجه به مصرف بالای انرژی در چرخه-های مایع سازی هیدروژن و تاثیر آن بر قیمت تمام شده هیدروژن مایع تولیدی، تمرکز پژوهش‌های اخیر بر کاهش مصرف برق در چرخه مایع سازی هیدروژن و بررسی میزان تاثیر گذاری آن بر قیمت تمام شده هیدروژن مایع تولیدی بوده است. افزودن چرخه مایع سازی هیدروژن مجهز به سیستم های سرمایش مبرد ترکیبی به سیستم های مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر با خروجی کربن صفر و ارائه راهکاری برای کاهش مصرف انرژی آن از موضوعاتی است که کم تر در گذشته بررسی شده است که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به این نکته که انجام انواع تجزیه و تحلیل های انرژی و انرژی و انرژی-اقتصادی برای دستیابی به راهکاری برای کاهش مصرف انرژی ویژه چرخه مایع سازی هیدروژن و افزایش رقابت پذیری این روش با دیگر روش‌های ذخیره سازی انرژی است، در نتیجه اهمیت انجام تحلیل اقتصادی و محاسبه قیمت تمام شده هر کیلوگرم هیدروژن مایع تولیدی در روش‌های مختلف اهمیت بسزایی دارد که در بعضی از تحقیقات گذشته کم تر مود توجه قرار گرفته است.

تمرکز این پژوهش بر چرخه مایع سازی هیدروژن است. یک سیستم چندگانه برای ذخیره انرژی زمین گرمایی به صورت هیدروژن مایع پیشنهاد شده است. نوآوری این پژوهش استفاده از یک چرخه سرد کننده آب-آمونیاک برای پیش سرمایش گاز هیدروژن قبل از ورود به چرخه مایع سازی هیدروژن است که موجب کاهش مصرف انرژی در چرخه مایع سازی هیدروژن می‌شود. مصرف ویژه انرژی چرخه مایع سازی هیدروژن مورد بررسی کم تر از چرخه های مشابه دیگر بوده است. تجزیه و تحلیل‌های انرژی، انرژی و اقتصادی برای ارزیابی چرخه مایع سازی هیدروژن پیشنهادی انجام شده است. تجزیه و تحلیل حساسیت برای بررسی تاثیر تغییر در متغیرهای کلیدی بر پارامترهای مربوط به چرخه مایع سازی هیدروژن استفاده می‌شود. مصرف ویژه انرژی ۸،۸۱ کیلو وات ساعت برای یک کیلوگرم هیدروژن مایع و ضریب کارایی ۰،۸۳ و حداقل قیمت فروش مایع هیدروژن تولیدی ۲،۱۱ دلار در این مطالعه است.

۲- مبانی و روش ها

۲-۱- مشخصات چرخه مورد مطالعه

طرحواره سیستم یکپارچه در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، سیستم چند هدفه از پنج زیرسیستم تشکیل شده است: الکترولایزر، رانکین آلی، سیستم جذبی آب-آمونیاک، تولید آبگرم، و چرخه مایع سازی هیدروژن. جریان های جریان سیستم پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. خواص جریان های زمین گرمایی بر اساس کار عبدالعلی پورعدل و همکاران [۲] و چرخه تبرید جذبی بر اساس کار [۱۳] است. جریان زمین گرمایی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد وارد چرخه جذب می شود و انرژی سرد حاصل از چرخه جذب، جریان هیدروژن را تا ۲۷- درجه سانتیگراد پیش سرد می کند. گرمای سیستم زمین گرمایی برای افزایش دمای جریان آب ورودی به الکترولایزر استفاده می شود. چرخه ارگانیک آلی و توان حاصل از سیستم زمین گرمایی به ترتیب در مایع سازی هیدروژن و الکترولایزر غشا پروتونی برای تولید گاز و مایع هیدروژن استفاده می شوند. دلیل استفاده از این مدل الکترولایزر در این پژوهش این است که الکترولایزر غشاء پروتونی در مقایسه با دیگر انواع الکترولایزر دارای مزیت های دمای کاری پایین (۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد)، طراحی کوچک تر، قابلیت اشغال فضای کم تر، قابلیت کار در چگالی جریان بالا (۲ امپر بر سانتی متر مربع)، تولید با خلوص ۹۹/۹۹ درصد هیدروژن و اکسیژن، کارایی بالا (۸۰ تا ۹۰ درصد) و پاسخ دهی سریع است [۱۴]. با توجه به نوع الکترولایزر در این پژوهش که از نوع فروفوهونری آس سی (ساخت موسسه فروفوهونر سازنده الکترولایزرهای غشاء پروتونی تولید کننده هیدروژن) است، هر سل الکترولایزر دارای مساحت فعال ۱۰۰ سانتی متر مربع و دبی تولید ۲۰ NL/h است، توده الکترولایزر دارای ۵۸ سل با ظرفیت تولید ۷۹ کیلوگرم بر ساعت هیدروژن است، همچنین برای هر سل الکترولایزر، بیشترین ولتاژ هر سل ۲/۲ ولت، بیشترین مقاومت فشاری ۲۰۷ بار است [۱۵]. جریان آب توسط گرمای جریان زمین گرمایی تا دمای ۶۰ درجه سانتیگراد گرم می شود، پس از آن جریان زمین گرمایی به چاه تزریق مجدد باز می گردد. در واحد الکترولایزر گاز هیدروژن از آب جدا می شود و سپس گاز هیدروژن تا فشار مناسب فشرده می شود تا وارد چرخه مایع سازی هیدروژن شود و به چرخه مایع سازی هیدروژن ارسال می شود. در این مطالعه چرخه مایع سازی هیدروژن شامل سه مرحله است، ابتدا با انرژی سرد چرخه جذبی تا ۲۷- درجه سانتیگراد پیش سرد می شود، سپس، با چرخه تبرید ترکیبی تا دمای ۱۹۵- درجه سانتیگراد سرد می شود، و مرحله سوم و نهایی،

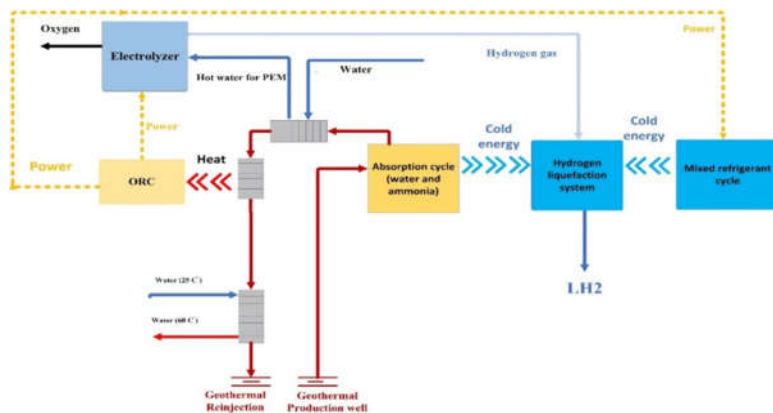
هیدروژن در ۲۵۳- درجه سانتیگراد مایع می شود. برخی از فرضیات مهمی در این مطالعه در نظر گرفته شده در زیر آورده شده اند:

- راندمان آدیباتیک کمپرسورها ۸۵ درصد است، در حالی که افت فشار برای هر جریان در یک مبادله کننده گرمایی ۳۰ کیلو پاسکال است [۱۲].
- جریان های جریان و تجهیزات در شرایط ثابت کار می کنند [۱۲].
- حداقل اختلاف دما در چرخه مایع سازی هیدروژن ۱ درجه سانتیگراد است [۱۶]. در حالی که برای

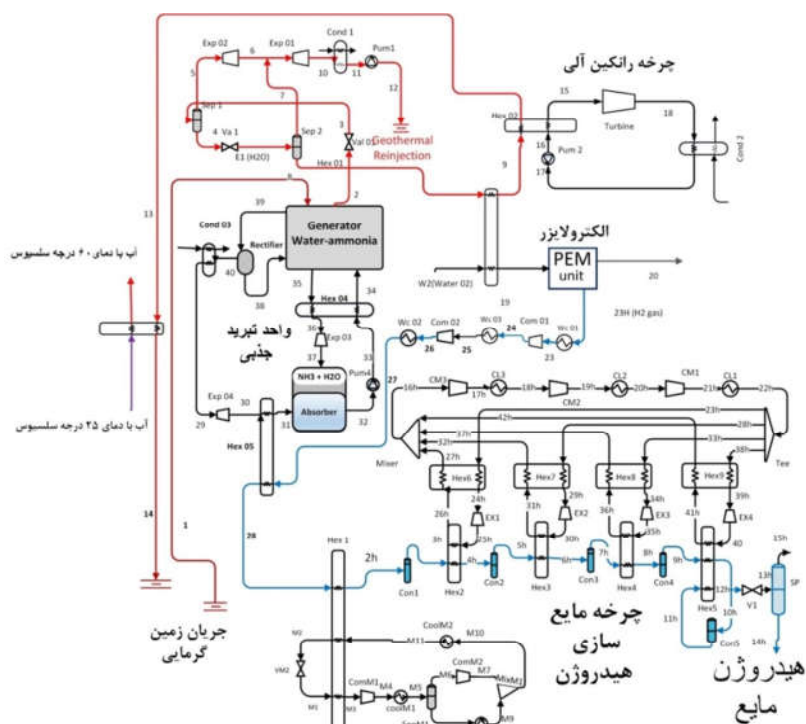
واحدهای دیگر بین ۴ تا ۲۰ درجه سانتیگراد است [۱۲].

- تغییر دما در الکترولایزر در نظر گرفته نشده است [۱۵].
- تغییر چگالی جریان در سلول های الکترولایزر نادیده گرفته شده و دمای الکترولایزر ۸۰ درجه سانتیگراد است [۱۵].
- انرژی فعال سازی در آند ۷۶ و در کاتد ۱۸ کیلوژول بر مول است، ضخامت غشاء ۵۰ میکرومتر و ثابت فارادی ۹۶۴ است [۱۵].
- دبی جریان زمین گرمایی ۳۶۰ تن بر ساعت و دمای آن ۲۰۰ درجه سانتیگراد است [۱۳].

در این مطالعه از نرم افزار Aspen hysys برای شبیه سازی جریان های مختلف و تجهیزات استفاده شده است، به جز واحد الکترولایزر که از نرم افزار ای ای اس استفاده شده است. برای مدل سازی سیستم زمین گرمایی متغیرهای اولیه گام به گام تغییر داده می شوند در حالی که در هر گام، تمام محدودیت ها در نظر گرفته می شوند. مدل پیشنهادی اولیه با استفاده از تجزیه و تحلیل انرژی، انرژی و حساسیت بررسی شده است تا بهترین مدل پیدا شود. در ابتدا، پارامترهای ورودی شامل جریان آب در تبخیرکننده و حداقل دمای نزدیکی در مبادله کننده های گرمایی، کارایی ایزنتروپی پمپ و توربین، جریان جرمی سیال چرخه رانکین آلی، فشار ورودی توربین به نرم افزار داده می شود در این پژوهش، تفاوت دمای نقطه پینچ (تنگش) در مبادله کن گرما بخش زمین گرمایی حداقل ۴ درجه سانتیگراد و در بخش مایع سازی هیدروژن ۱ درجه سانتیگراد است. سپس، نرم افزار ویژگی های مبادله کن گرما (دما، فشار، انتالپی و آنترپوی ویژه) را محاسبه می کند. سپس با استفاده از تعریف کارایی ایزنتروپی، مشخصات پمپ و توربین به دست می آید و با استفاده از معادلات انرژی، انتقال گرما سایر ویژگی های چرخه محاسبه می شوند و در نهایت مصرف ویژه انرژی و کارایی انرژی بخش مورد نظر سیستم مورد بررسی که در این پژوهش بخش مایع سازی هیدروژن است محاسبه می شود. روش انجام شده بر پایه کار مرجع [۱۷] است. در این تحقیق از دو معادله حالت استفاده شده است. بندیکت وب رابین اصلاح شده برای شبیه سازی جریان های هیدروژن خالص استفاده می شود، اما از معادلات حالت پنگ رابینسون برای تخمین خواص جریان های دیگر استفاده می شود. استفاده همزمان از دو معادله حالت بر اساس کارهای فرامرزی و همکاران [۱۸] و والنتی و همکاران [۱۹] انجام شده است.



شکل ۱- بلاک دیاگرام چرخه مورد بررسی به منظور تبدیل انرژی زمین گرمایی به هیدروژن مایع.



شکل ۲- مشخصات سیستم مورد بررسی به منظور تبدیل انرژی زمین گرمایی به هیدروژن مایع.

که از نوع کیوبیک دو پارامتری است. توضیحات و روابط بالا برای معادله حالت پنگ رابینسون مربوط به تعیین مشخصات مواد خالص بود، در حالی که برای مخلوط ها نیاز به استفاده از قانون اختلاط است. قوانین اختلاط مختلفی برای ترکیب گاز های سبک در دماهای پایین پیشنهاد شده است که در نهایت در این تحقیق از قانون اختلاط تصادفی (قانون اختلاط واندروالس) استفاده شده است [۱۸].

در جدول ۱ اعتبارسنجی مدل چرخه مایع سازی هیدروژن، رانکین آلی بخش زمین گرمایی و چرخه تبرید آب-آمونیاک در مقایسه با منابع معتبر آورده شده است. نتایج نشان دهنده تطابق خوبی بین زیرسیستم های مورد استفاده در مطالعه حاضر و منابع معتبر است.

معادله حالت پنگ رابینسون مشتق شده از رابطه واندروالس می-باشد و از نوع معادلات حالت نیمه تجربی است. در رابطه زیر معادله حالت پنگ-رابینسون آورده شده است:

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\theta}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (1)$$

$$\theta = [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (2)$$

θ ضریب بی بعد وابسته به دما T_r می باشد، a و b ضرایب ثابت معادله پنگ رابینسون هستند که با استفاده از قیدهای نقطه بحرانی (قیود واندروالس) بدست می آیند. معادله پنگ رابینسون را می توان با استفاده از ضریب تراکم پذیری به صورت یک معادله درجه سوم نوشت

$$SEC = \frac{W_{net}}{\dot{m}_l} \quad (8)$$

$$1 - \frac{I_{total}}{P_{net}} \quad (9)$$

Q_c گرمای جریان‌های سرد در مبادله‌کننده‌های گرمایی است.

روابط مربوط به بخش الکترولیزر در زیر آورده شده است:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (10)$$

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O, reacted}, \dot{N}_{O_2, out} = \frac{J}{4F} \quad (11)$$

$$\dot{N}_{H_2O, out} = \dot{N}_{H_2O, in} - \frac{J}{2F} \quad (12)$$

$$\dot{W}_{PEM} = V_{PEM} \times J \dot{W}_{PEM} = \dot{W}_{ORCT} \quad (13)$$

$$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm} \quad (14)$$

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} \times (T_{PEM} - 298) \quad (15)$$

$$V_{act,a} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2 \times J_{0,a}} \right), J_{0,a} = J_a^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,a}}{RT} \right) \quad (16)$$

$$V_{act,c} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2 \times J_{0,c}} \right), J_{0,c} = J_c^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,c}}{RT} \right) \quad (17)$$

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (18)$$

در روابط بالا مقادیر زیر بر اساس کار نیکزاد و همکاران [۱۵] و نی و همکاران [۲۲] انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه این پژوهش بیشتر بر روی بخش مایع‌سازی هیدروژن کار می‌کند برای کسب اطلاعات بیشتر در رابطه با بخش الکترولیزر این پژوهش به کار نیکزاد و همکاران [۱۵] و نی و همکاران [۲۲] مراجعه نمایید.

$$P_{O_2} \text{ (bar)} = 1. P_{H_2} \text{ (bar)} = 1, \lambda_a = 14 \quad (19)$$

$$\lambda_a = 10. \varepsilon = 0.8, L \text{ (}\mu\text{m)} = 10 \quad (20)$$

$$J_a^{ef} \text{ (A m}^{-2}\text{)} = 10^5 \times 1.7, E_{act,a} \text{ (kJ mol}^{-1}\text{)} = 76 \quad (21)$$

$$J_c^{ef} \text{ (A m}^{-2}\text{)} = 10^5 \times 4.6, E_{act,c} \text{ (kJ mol}^{-1}\text{)} = 18 \quad (22)$$

آنالیز اقتصادی برای ارزیابی چرخه مایع‌سازی هیدروژن انجام شده است. مخارج ساخت اولیه، جاری سالیانه و تعمیر و نگهداری به عنوان هزینه‌های سالانه برای بررسی جنبه اقتصادی چرخه پیشنهادی برآورد می‌شود. در این تحقیق کل هزینه سرمایه‌ای واحدهای مایع‌سازی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$C_{CAPEX,t} = C_{eq} (1 + C_{ins} + C_{pip} + C_{bld} + C_{elc} + C_{stf} + C_{isu} + C_{eng} + C_{cnt} + C_{ctg} + C_{wrc}) \quad (23)$$

$$C_{eq} = (1 + C_{del}) (C_{hex} + C_{com} + C_{oth}) \quad (24)$$

مقادیر ضرایب هزینه این مطالعه بر اساس روش تخمین هزینه کار فرامرزی و همکاران [۲۳] است. با توجه به اهمیت هزینه ساخت مبادله‌کننده‌های گرمایی روش تخمین هزینه آن‌ها بسیار اهمیت دارد. در این پژوهش هزینه ساخت مبادله‌کننده گرمایی بر اساس سطح انتقال گرما است و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴], [۲۵]:

$$C_{hex} = c_{p,hex} \cdot (30000 + 1900(A_{Hex})^{0.83}) \quad (25)$$

هزینه مبادله‌کننده‌های گرمایی نیز با فشار کاری مرتبط است، بنابراین ضریب هزینه فشار، هزینه مبادله‌کن گرمایی را با دقت بیشتری تخمین می‌زند. ضریب هزینه فشار در مبادله‌کن گرمایی با معادله زیر بر اساس کار نوربخش و همکاران [۲۶] محاسبه می‌شود:

$$c_{p,hex} = \alpha + \beta \ln A_{Hex} \quad (26)$$

جدول ۱- اعتبار سنجی مدل اولیه سیستم پیشنهادی.

بخش مایع‌سازی هیدروژن						
نوع جریان	دما °C	فشار kPa	انتالپی kJ kg ⁻¹		انتروپی kJ kg ⁻¹ °C	
			پژوهش حاضر [۱۸]	پژوهش حاضر [۱۸]	پژوهش حاضر [۱۸]	پژوهش حاضر [۱۸]
هیدروژن	۲۷	۲۰۰۰	۴۲۳۰	۴۲۳۰	۵۹	۵۸
هیدروژن	-۱۴۲	۱۹۷۰	۱۹۱۱	۱۹۱۱	۴۷	۴۷
هیدروژن	-۲۵۳	۱۳۰	-۲۲۲	-۲۲۰	۱۰	۱۰
مبرد ترکیبی	۲۴	۱۰۰	-۶	-۶	۱۷	۱۷
بخش چرخه رانکین آلی واحد زمین گرمایی						
نوع جریان	دما °C	فشار kPa	انتالپی kJ kg ⁻¹		انتروپی kJ kg ⁻¹ °C	
			پژوهش حاضر [۲]	پژوهش حاضر [۲]	پژوهش حاضر [۲]	پژوهش حاضر [۲]
R141b	۴۰	۱۳۳	۸۵	۸۵	۰.۳	۰.۴
R141b	۶۱	۲۵۸	۳۱۹	۳۱۹	۱	۱
بخش سرمایش جذبی آب-آمونیاک						
نوع جریان	دما °C	فشار kPa	انتالپی kJ kg ⁻¹		انتروپی kJ kg ⁻¹ °C	
			پژوهش حاضر [۱۳]	پژوهش حاضر [۱۳]	پژوهش حاضر [۱۳]	پژوهش حاضر [۱۳]
آمونیاک	۱۳۱	۱۵۰۱	۱۷۰۶	۱۷۰۶	۵.۲۶	۵.۳
آمونیاک	-۲۹	۱۰۱	۱۲۳۳	۱۲۳۳	۵.۱۶	۵.۱

۲-۲- آنالیز انرژی، اگزرژی و اقتصادی

معادله بالانس اگزرژی برای هر یک از تجهیزات سیستم مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود. معادلات آنالیز اگزرژی به شرح زیر است [۲۰]:

$$e_i + e_{Qi} = e_o + e_{Qo} + W_{sh} + I \quad (3)$$

$$e = e_c + e_p \quad (4)$$

$$e_p = h - h_0 - T(S - S_0) \quad (5)$$

$$e_{mix}^{ch} = \sum x_i e_{o,i}^{ch} + \bar{R} T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (6)$$

در جایی که زیرنویس‌های "i" و "o" به ترتیب مخفف جریان‌های ورودی و خروجی هستند، e_{Qo} اگزرژی انتقال گرما است، W_{sh} توان ورودی در دستگاه و I تخریب اگزرژی است، در حالی که زیرنویس‌های "c" و "p" به معنای اگزرژی شیمیایی و فیزیکی‌اند. راندمان اگزرژی را می‌توان برای دستگاه‌ها و کل چرخه محاسبه کرد. معادلات تخریب اگزرژی و بازده اگزرژی بر پایه روابط ارائه شده در کار عبدالعلی پورعدل و همکاران [۲] است. را برای همه دستگاه‌ها نشان می‌دهد. مصرف ویژه انرژی، ضریب کارایی و بازدهی اگزرژی کل چرخه به شرح زیر هستند [۲۱]:

$$COP = \frac{Q_c}{W_{net}} \quad (7)$$

ضرایب α و β بر اساس مرجع [۲۶] انتخاب می‌شوند. هزینه یک کمپرسور به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$C_{com} = 7900(H)^{0.62} \quad (24)$$

H کار کمپرسور است. مقدار هیدروژن مایع تولیدی سالانه به شرح زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$\dot{m}_{LH2,a} = Y_a \cdot 17280000 \cdot \dot{m}_{LH2} \quad (25)$$

$Y_a = 0.95$ که نرخ سالانه فعالیت چرخه است و \dot{m}_{LH2} دبی جریان جرمی هیدروژن مایع است. در معادله بالا، ۲۰۰ روز کاری برای چرخه مورد بررسی در نظر گرفته شده است [۲۸]. هزینه سالانه اولیه که وابسته به نرخ بهره سالانه (z) و دوره پرداخت (t) است، به شرح زیر است [۲۴]:

$$C_{CAPEX,a} = C_{CAPEX,t} \cdot \frac{z \cdot (1+z)^t}{(1+z)^t - 1} \quad (26)$$

مخارج جاری سالیانه شامل هزینه مصرف برق، هزینه گاز هیدروژن خوراک و شارژ میرد به دلیل نشت گاز در مبادله‌کننده‌های گرمایی، کمپرسورها و لوله‌ها می‌باشد [۲۹]. هزینه‌های سالانه جاری و تعمیر و نگه داری به شرح زیر محاسبه می‌شود [۱۸، ۳۰]:

$$C_{OPEX,a} = c_{el} \cdot \dot{m}_{LH2,a} \cdot SEC + C_{feed,a} + C_{feedf,a} \quad (27)$$

$$C_{O\&M,a} = c_{O\&M} \cdot C_{CAPEX,a} \quad (28)$$

c_{el} هزینه برق برای یک کیلووات ساعت است. $C_{O\&M}$ ضریب هزینه‌های عملیاتی و نگهداری است که به ترتیب از مقادیر ۰.۰۳ تا ۰.۱۲ برای چرخه‌های ساده و پیچیده در نظر گرفته شده است [۲۶]. ویژگی‌های جریان اصلی در جدول ۲ آورده شده است.

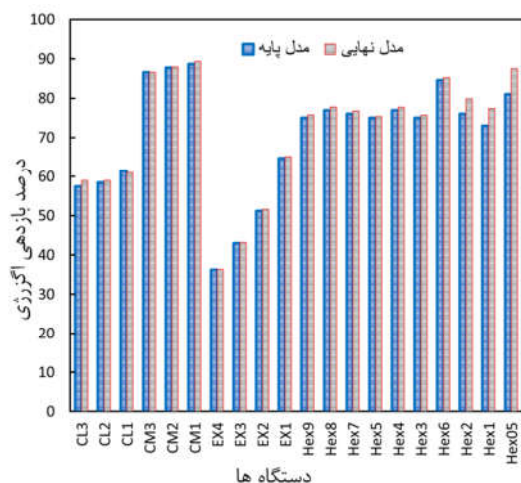
جدول ۲- مشخصات ترمودینامیکی جریان‌های اصلی سیستم

نام جریان	نوع سیال	مورد بررسی.	
		دما (درجه سانتیگراد)	فشار (کیلو پاسکال)
۲	آب (زمین گرمایی)	۱۷۵	۸۹۱
۲۸	هیدروژن	-۲۷	۲۰۰
۲۷	هیدروژن	۲۵	۲۰۰
۱	آب (زمین گرمایی)	۲۰۰	۸۹۱
h۲۲	هیدروژن (۴ درصد) هلیوم (۶۱ درصد) نیتروژن (۳۵ درصد)	۲۵	۱۴۴۵
h۲	هیدروژن	-۱۴۲	۱۹۷۰
۱۵	R123	۶۲	۲۵۹
۱۳	آب (زمین گرمایی)	۶۵	۱۰۱
۱۴	آب (زمین گرمایی)	۵۵	۱۰۱

۳- نتایج

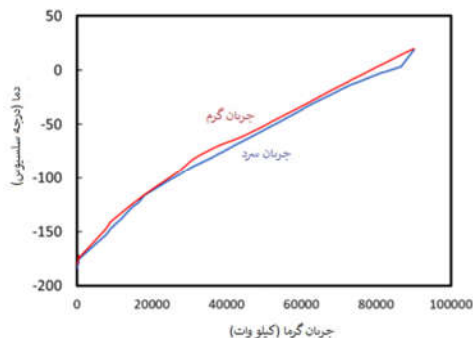
این پژوهش بر چرخه مایع سازی هیدروژن تمرکز دارد تا بهترین شرایط را برای سیستم پیشنهادی در بخش مایع سازی هیدروژن از نظر انرژی و چرخه‌های اقتصادی پیدا کند. در ادامه نتایج آنالیز انرژی و آنالیز حساسیت متغیرهای کلیدی آورده شده است. شکل ۳ تخریب انرژی مایع سازی هیدروژن را نشان می‌دهد.

سازای هیدروژن را نشان می‌دهد. با مقایسه میزان تخریب انرژی همه دستگاه‌ها و شناسایی دستگاه‌هایی با تخریب انرژی بالا می‌توان با کاهش تخریب انرژی راندمان چرخه را افزایش داد.



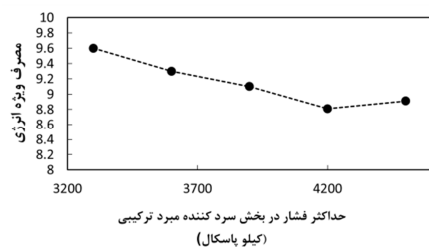
شکل ۳- تخریب انرژی دستگاه‌های مختلف در واحد مایع سازی.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، واضح است که در چرخه مایع سازی هیدروژن، مبادله‌کن گرمایی به نام Hex05 بالاترین راندمان انرژی را در بین تمام مبادله‌کن گرمایی دارد که برای مدل نهایی ۸ درصد در مقایسه با مبادله‌کن گرمایی پایه تخریب انرژی کم تری دارد. با تغییر پارامترهای مختلف در دستگاه‌هایی که تخریب انرژی زیادی داشتند مانند مبادله‌کن گرمایی می‌توان کارایی آنها را افزایش داد. اگرچه برخی از دستگاه‌ها تخریب انرژی بیشتری برای مورد نهایی خواهند داشت، تخریب کل انرژی چرخه در مورد نهایی به طور قابل توجهی کاهش یافته است. افت زیادی در تخریب انرژی دستگاه‌های مبادله‌کن گرمایی Hex1 و Hex05 دیده شده است که بدلیل کاهش حداقل دمای نزدیکی در آنها است. راندمان انرژی کمپرسورها برای هر دو حالت پایه و نهایی تقریباً بدون تغییر باقی ماند و راندمان انرژی در تمام مبادله‌کننده‌های گرمایی برای مدل نهایی افزایش یافت. مطابق شکل ۳، ۴ و ۵، مبادله‌کن گرمایی به عنوان مهم‌ترین وسایلی که به طور قابل توجهی بر کارایی کل چرخه تأثیر می‌گذارد، شناسایی شده‌اند. در نتیجه، کاهش تخریب انرژی در مبادله‌کن گرمایی به روش‌های مختلف، اصلاح منحنی‌های ترکیبی سرد و گرم و تنظیم حداقل دمای نزدیکی در محدوده مناسب امکان‌پذیر است. مقدار کم مقدار حداقل دمای نزدیکی میزان تخریب انرژی را کاهش می‌دهد، اما همین کار به سطح انتقال گرما بیشتری در مبادله‌کن گرمایی نیاز دارد، که منجر به هزینه‌های بیش‌تر طبق رابطه ۲۳ می‌شود. در مدل پایه، رویکرد حداقل دما بین ۱ تا ۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود [۳۱]، اما در مدل نهایی، به محدوده ۱ تا ۲ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد که این رویکرد بر پایه منبع [۱۱] انجام شده است. در شکل ۴ و ۵ مقایسه درصد تخریب انرژی دستگاه‌های مختلف بخش پیش‌سرمایش و بخش سرمایش نهایی مایع سازی هیدروژن آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد در بخش پیش



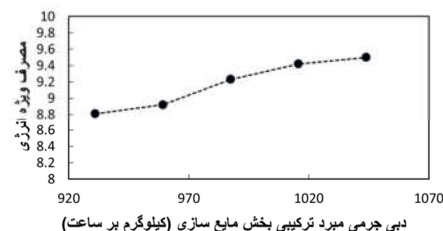
شکل ۷- منحنی سرد و گرم ترکیبی در مبادله‌کن گرمایی بخش پیش سرمايش در مدل نهایی.

همانطور که از شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، منحنی‌های ترکیبی در حالت نهایی نزدیکتر از منحنی‌های مدل پایه هستند، که این رویکرد برای کاهش تخریب اگزوزی انجام می‌شود. در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ آنالیز حساسیت پارامترهای کلیدی بر کارایی چرخه تولید هیدروژن مایع نشان داده شده است.



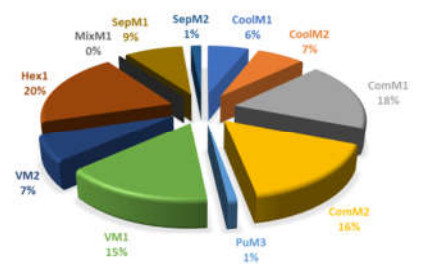
شکل ۸- تاثیر متغیر فشار حداکثر در بخش سرد کننده چرخه مایع سازی.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، فشار کاری ۴۲۰۰ کیلو پاسکال در بین دیگر مقادیر مصرف ویژه کم تری را نتیجه می‌دهد. مطابق شکل ۹، با افزایش دبی جریان جرمی سرد مبرد ترکیبی، مصرف ویژه انرژی افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که طبق انتظار با افزایش بازدهی کمپرسورها مصرف ویژه انرژی کاهش می‌یابد. نتایج تحلیل انرژی چرخه مایع سازی هیدروژن در جدول ۳ آورده شده و مدل پایه و نهایی در جدول ۳ مقایسه شده‌اند.

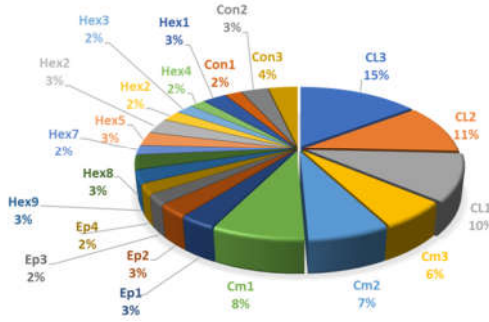


شکل ۹- تاثیر متغیر دبی جریان سرد کننده چرخه مایع سازی.

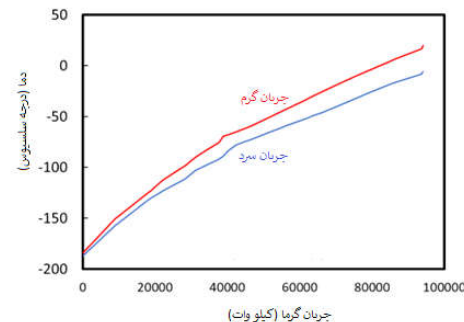
سرمايش مبادله‌کن گرمایی HEX1 با ۲۰ درصد نسبت به کل تخریب اگزوزی در این بخش، بیش‌ترین درصد تخریب اگزوزی را در این بخش دارد در حالی که در بخش سرمايش نهایی سرد کننده‌های مبرد (CL1, CL2, CL3) بیش‌ترین تاثیر را در تخریب اگزوزی دارند. در شکل-های ۶ و ۷ منحنی‌های ترکیبی جریان‌های گرم و سرد در مبادله‌کن گرمایی Hex1 را برای مدل نهایی و پایه نشان می‌دهد. هر چه مساحت بین دو نمودار کوچکتر باشد، تخریب اگزوزی در مبادله‌کن گرمایی کمتر می‌شود که منجر به راندمان اگزوزی بالاتر در مبادله‌کن گرمایی و همچنین کل چرخه می‌شود که هدف این مطالعه است.



شکل ۴- درصد تخریب اگزوزی دستگاه‌های مختلف بخش پیش سرمايش مایع سازی هیدروژن.



شکل ۵- درصد تخریب اگزوزی دستگاه‌های مختلف بخش سرمايش نهایی مایع سازی هیدروژن.



شکل ۶- منحنی سرد و گرم ترکیبی در مبادله‌کن گرمایی بخش پیش سرمايش در مدل اولیه.



شکل ۱۲- هزینه‌های سالانه مختلف.

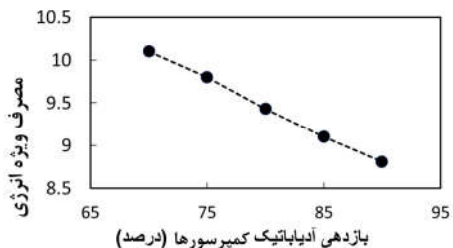
شکل ۱۲ سه نوع هزینه سالانه را برای مدل نهایی چرخه مایع سازی هیدروژن مقایسه می‌کند. مخارج سالانه جاری بیشترین هزینه است که مقدار آن ۱٫۶ میلیون دلار است. بزرگترین بخش بعدی هزینه‌ها مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری یا ساخت اولیه است که ۰٫۴ میلیون دلار را شامل می‌شود. هزینه باقیمانده هزینه تعمیر و نگه داری است. در جدول ۴ مقایسه‌ای بین خواص چرخه مایع سازی هیدروژن مورد بررسی در این پژوهش در مقایسه با دیگر چرخه‌های موجود انجام شده است. دلیل افزایش حداقل قیمت فروش هیدروژن مایع با وجود کاهش مصرف ویژه انرژی و بهبود کارایی نسبت به مرجع [۱۸]، ظرفیت تولید پایین پژوهش حاضر در مقایسه با کار مرجع [۱۸] است.

جدول ۴- کارایی مدل پایه و دیگر واحدهای مایع سازی.

انواع مدل‌ها	مصرف ویژه انرژی (کیلو وات ساعت بر کیلوگرم هیدروژن مایع)	ضریب کارایی	حداقل قیمت فروش هیدروژن مایع (در سه سال دوره برگشت سرمایه)
[۱۱]	۱۱٫۰۵	محاسبه نشده	۲/۵
پژوهش حاضر	۸٫۸۱	۰٫۸۸	۲/۱
[۱۸]	۸٫۸۵	۰٫۸۵	۲
بهبود نسبت به مرجع [۱۸]	+ ۱ درصد	+ ۴ درصد	- ۵ درصد

۴- جمع‌بندی

انرژی‌های تجدیدپذیر مانند زمین گرمایی را می‌توان به روش‌های مختلفی ذخیره کرد، یکی از این روش‌ها بر اساس تبدیل انرژی زمین گرمایی به هیدروژن مایع است که می‌تواند راه حلی برای گسترش فرآیندهای ذخیره سازی انرژی بدون انتشار کربن باشد. با استفاده از ذخیره سازی انرژی‌های تجدید پذیر به شکل هیدروژن مایع می‌توان بر مشکل ذخیره سازی و انتقال انرژی‌های تجدید پذیر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی غلبه کرده و با دستیابی به روش‌های اقتصادی‌تر استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر را گسترش داد زیرا



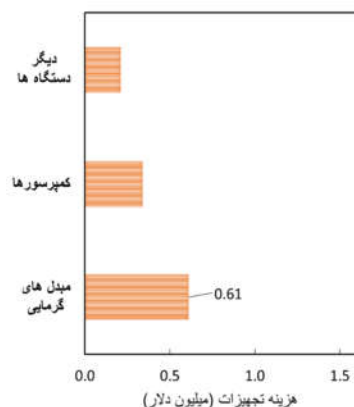
شکل ۱۰- تأثیر متغیر بازدهی آدیپاتیک کمپرسورهای مورد استفاده در بخش سرد کننده چرخه مایع سازی.

با توجه به جزئیات جدول ۳، کاملاً واضح است که مدل نهایی عملکرد بهتری نسبت به مدل پایه دارد. مدل نهایی دارای مصرف ویژه انرژی ۸٫۸۱ کیلو وات ساعت به ازای تولید یک کیلوگرم هیدروژن مایع است که کمتر از مدل پایه است. مصرف ویژه انرژی کمتر موجب کاهش هزینه برق مصرفی سالانه می‌شود که در بخش تحلیل اقتصادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۳- کارایی مدل پایه و نهایی واحد مایع سازی.

مدل نهایی	مصرف ویژه انرژی (کیلو وات ساعت بر کیلوگرم هیدروژن مایع)	ضریب کارایی
مدل پایه	۹٫۳	۰٫۸۳
مدل نهایی	۸٫۸۱	۰٫۸۸

شکل ۱۱ نتایج مربوط به تخمین هزینه‌های سرمایه گذاری تجهیزات اصلی را برای چرخه مایع سازی هیدروژن نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- هزینه انواع تجهیزات در بخش مایع سازی هیدروژن.

با توجه به شکل ۱۱، بیشترین نسبت کل هزینه تجهیزات مربوط به مبادله‌کن گرمایی است که ۰٫۶ میلیون دلار است. رتبه دوم به کمپرسورها مربوط است. در شکل ۱۲ مقایسه هزینه‌های مختلف سالانه نشان داده شده است.

[4] Abdolalipouradi M, Khalilarya S, Jafarmadar S. Exergoeconomic analysis of a novel integrated transcritical CO₂ and Kalina 11 cycles from Sabalan geothermal power plant. *Energy Conversion and Management*. 2019 Sep; 195: 420-435.

[5] Ebadollahi M, Rostamzadeh H, Ghaebi H, Amidpour M. Exergoeconomic analysis and optimization of innovative cascade bi-evaporator electricity/cooling cycles with two adjustable cooling temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 2019 Apr; 152: 890-906.

[6] Alirahmi SM, Assareh E, Pourghassab NN, Delpisheh M, Barelli L, Baldinelli A. Green hydrogen & electricity production via geothermal-driven multi-generation system Thermodynamic modeling and optimization. *Fuel*. 2022 Jan; 308: 122049.

[7] Hekmatshoar M, Deymi-Dashtebayaz M, Gholizadeh M, Dadpour D, Delpisheh M. Thermo-economic analysis and optimization of a geothermal-driven multi-generation system producing power, freshwater, and hydrogen. *Energy*. 2022 May; 247: 123434.

[8] Moradi Nafchi F, Afshari E, Baniasadi E, Javani N. A parametric study of polymer membrane electrolyser performance. energy and exergy analyses. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019 Jul; 44: 18662-18670.

[9] El-Emam RS, Dincer I. Development and assessment of a novel solar heliostat-based multigeneration system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018 Feb; 43: 2610-2620.

[10] Hammad A, Dincer I. Analysis and assessment of an advanced hydrogen liquefaction system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018 Jan; 43: 1139-1151/

[11] Yang JH, Yoon Y, Ryu M, An SK, Shin J, Lee CJ. Integrated hydrogen liquefaction process with steam methane reforming by using liquefied natural gas cooling system. *Applied Energy*. 2019 Dec; 255: 113840.

[12] Yin L, Ju Y. Process optimization and analysis of a novel hydrogen liquefaction cycle. *International Journal of Refrigeration*. 2020 Feb; 110: 219-230.

[13] Kanoglu M, Yilmaz C, Abusoglu A. Geothermal energy use in absorption precooling for Claude hydrogen liquefaction cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016 Jul; 41: 11185-11200.

[14] Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013 Apr; 38: 4901-4934.

[15] Nikzad, A., Mafi, M., and Faramarzi, S., Waste heat recovery as liquid hydrogen, In 31th Annual International Conference of the Iranian Association of Mechanical Engineers, Iran 2023.

[۱۶] فرامرزی س، موسوی نائینیان س م، مافی مصطفی، قاسمی اصل ر، اصلاح و بهینه‌سازی چرخه مایع‌ساز هیدروژن مجهز به سیستم تبخیرکننده گاز طبیعی مایع. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۱، ۵۲، ش. ۳، ص ۱۱-۲۰.

[17] Aasadnia M, Mehrpooya M. Conceptual design and analysis of a novel process for hydrogen liquefaction assisted by absorption precooling system. *Journal of Cleaner Production*. 2018 Dec; 205: 65-588.

[18] Faramarzi S, Nainiyan SMM, Mafi M, Ghasemiasl R. A novel hydrogen liquefaction process based on LNG cold energy and mixed refrigerant cycle. *International Journal of Refrigeration*. 2021 Nov; 131: 263-274.

[19] Valenti G, MacChi E, Brioschi S. The influence of the thermodynamic model of equilibrium-hydrogen on the simulation of its liquefaction. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012 Jul; 37: 10779-10788.

[20] Aasadnia M, Mehrpooya M, Ghorbani B. A novel integrated structure for hydrogen purification using the cryogenic method. *Journal of Cleaner Production*. 2021 Jan; 278: 123872.

انرژی‌های تجدید پذیری چون انرژی زمین گرمایی منابع پاک و پایدار انرژی محسوب می‌شوند. در این مطالعه یک چرخه مایع سازی هیدروژن در یک سیستم زمین گرمایی ادغام شده است که با استفاده از سرمایش بدست آمده از یک سیستم جذبی آب-آمونیاک گاز هیدروژن پیش سرد می‌شود. واحد الکترولایزر برای جداسازی گاز هیدروژن از آب با استفاده از توان سیستم زمین گرمایی استفاده شده است. این مطالعه بر روی واحد چرخه مایع سازی هیدروژن تمرکز دارد و برای یافتن بهترین مقادیر متغیرها از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. درصد اجزای مبرد و حداکثر فشار و دما برای دستیابی به راندمان بهتر بررسی شد. با انجام تحلیل‌های مختلف، مصرف ویژه انرژی مدل نهایی در مقایسه با مورد پایه ۵٪ بهبود داشت. برای ضریب کارایی این بهبود ۶٪ بود. مدل نهایی چرخه مایع سازی هیدروژن با کارهای قبلی مقایسه شد و نتایج نشان دهنده بهبود خواص ترمودینامیکی بود اما بهبود اقتصادی قابل توجهی بوجود نیامد زیرا مورد پیشنهادی در این مطالعه یک سیستم در مقیاس کوچک است که هزینه سرمایه‌گذاری بیشتری نسبت به چرخه‌ها با ظرفیت بالاتر دارد. هزینه سالانه سرمایه گذاری ۰/۴ میلیون دلار و هزینه جاری سالیانه ۱/۶ میلیون دلار بود. هزینه تولید هیدروژن مایع در این مطالعه ۱/۸۴ دلار برای ر کیلوگرم بود که با در نظر گرفتن سه سال زمان برگشت سرمایه، حداقل قیمت فروش هیدروژن مایع ۲/۱ دلار تخمین زده شد.

۵- نمادها

علائم انگلیسی

A_{Hex}	سطح تبادل گرما در مبادله‌کن گرمایی (m^2)
C_{CAPEX}	هزینه سرمایه گذاری (دلار)
C_{OPEX}	هزینه جاری (دلار)
$C_{O\&M}$	هزینه تعمیر و نگهداری (دلار)
e	اگرزوی (kW)
e^{ph}	اگرزوی فیزیکی (kW)
$f_{p,hex}$	ضریب هزینه فشار در مبادله‌کن گرمایی
H	آنتالپی (kJ/kg)
\dot{m}_{LH_2}	دبی هیدروژن مایع تولیدی (kg/h)
t	دوره برگشت سرمایه (سال)
Z	نرخ بهره

۶- مراجع

[1] Faramarzi S, Khavari A. An innovative mixed refrigerant hydrogen liquefaction cycle to store geothermal energy as liquid hydrogen. *Journal of Energy Storage*. 2023 Nov;72: 108008.

[۲] عبدالعلی پورعدل م، رستمی م، خلیل آریاش و یاری م، تحلیل انرژی و اگرزوی یک سیستم بر مبنای انرژی زمین گرمایی برای تولید همزمان توان، آب شیرین، گرمایش و هیدروژن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۰، ۵۱، ش. ۳، ص ۱۳۵-۱۴۴.

[3] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SMS, Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*. 2017 Apr; 124: 625-639.

- [21] Cardella U, Decker L, Sundberg J, Klein H. Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction International Journal of Hydrogen Energy. 2017 Apr; 42: 12339-12354.
- [22] Ni M, Leung MKH, Leung DYC. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. Energy Conversion and Management. 2008 Oct; 49: 2748-2756.
- [23] Faramarzi S, Mousavi Nainiyan SM, Mafi M, Ghasemiasl R. Energy, exergy, and economic analyses of an innovative hydrogen liquefaction process utilising liquefied natural gas regasification system International Journal of Exergy. 2022 Jul;38: 442-456.
- [24] Couper JR. Process Engineering Economics. CRC Press; 2003 Aug 27.
- [25] Faramarzi S, Mousavi Nainiyan SM, Mafi M, Ghasemiasl R. Genetic algorithm optimization of two natural gas liquefaction methods based on energy, exergy, and economy analyses: the case study of Shahid Rajace power plant peak-shaving system. Gas Processing Journal. 2021 Jun; 9: 91-108.
- [26] Nourbakhsh A, Khalilehdeh MN, Faramarzi S, Mafi M. Energy, exergy and economic analysis of a hydrogen liquefaction process integrated with a PRICO cycle. Gas Processing Journal. 2021 Jul; 9: 83-102.
- [27] Serio L, Bremer J, Claudet S, Delikaris D, Ferlin G, Pezzetti M, Pirote O. CERN experience and strategy for the maintenance of cryogenic plants and distribution systems. Materials Science and Engineering. 2015. ;101: 012140.
- [28] Faramarzi S, Mafi M, Nainiyan SM, Ghasemiasl R. Modification of a fuel peak-shaving system in Shahid Mofateh power plant. In29th Annual International Conference of the Iranian Association of Mechanical Engineers, Iran 2021.
- [۲۹] نوربخش سعداآباد آ، نامی خلیل‌ده م، رنجبر س‌ف، فرامرزی س، فیروزی ف. تولید بدون آلایندگی هیدروژن و مایع‌سازی آن با استفاده از انرژی خورشیدی و الکترولاایزر غشاء پروتونی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۱، د ۵۲، ش. ۲، ص ۱۷۳-۱۸۲.
- [30] Faramarzi S, Nainiyan SM, Mafi M, Ghasemiasl R. Proposing a simultaneous production cycle of liquid natural gas and liquid hydrogen. In29th Annual International Conference of the Iranian Association of Mechanical Engineers, Iran 2021.
- [31] Nikzad A, Mafi M, Faramarzi S. Hydrogen production from waste heat energy. In31th Annual International Conference of the Iranian Association of Mechanical Engineers, Iran 2023.