

# تولید بدون آلاینده‌گی هیدروژن و مایع سازی آن با استفاده از انرژی خورشیدی و الکترولایزر غشاء پروتونی

**آرش نوربخش سعداباد** دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، a\_nourbakhsh@tabrizu.ac.ir  
**مهدی نامی خلیله ده** دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، mahdinami77@yahoo.com  
**سید فرامرز رنجبر\*** استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، s.ranjbar@tabrizu.ac.ir  
**سامان فرامرزی** دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، faramarzi.saman@wtiau.ac.ir  
**فرهاد فیروزی** دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، f.firouzy@tabrizu.ac.ir

## چکیده

استفاده از انرژی خورشیدی و الکترولیز آب برای تولید توان و گاز هیدروژن در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، زیرا در این روش گاز هیدروژن و اکسیژن بدون هیچ گونه آلاینده‌گی از آب جدا می‌شوند، تولید هیدروژن در فرآیندهایی با خروجی کربن صفر، به نام هیدروژن سبز شناخته می‌شود که در این پژوهش از این روش استفاده شده است. آرایه‌های خورشیدی برای تامین توان الکترولایزر غشاء پروتونی و بخش مایع سازی استفاده شده‌اند، شهر بندر عباس برای اجرای سیستم پیشنهادی در نظر گرفته شده است. نوآوری این پژوهش پیشنهاد فرآیند ترکیبی تولید توان، جداسازی و مایع سازی گاز هیدروژن بدون آلاینده‌گی و با کارایی بالاتر در مقایسه با دیگر چرخه‌های مشابه است. ظرفیت تولید برق آرایه‌های خورشیدی ۶۰۰۰ کیلو وات است در حالی که ظرفیت جداسازی الکترولایزر ۴۳۸ کیلوگرم بر ساعت گاز اکسیژن و ۵۵ کیلوگرم بر ساعت گاز هیدروژن است. مصرف ویژه انرژی چرخه مایع سازی ۵٫۰۷ کیلو وات ساعت به ازای هر کیلوگرم هیدروژن مایع بوده و بیشترین تخریب انرژی مربوط به الکترولایزر و سپس مبادله‌کن‌های گرمایی است. **واژه‌های کلیدی:** انرژی پایدار، الکترولایزر غشاء پروتونی، جداسازی هیدروژن، فرآیند دما پایین، فرآیند سبز.

## Simulation, analysis and optimization of a non-emission process producing power, hydrogen gas and liquid hydrogen using solar energy and PEM electrolysis

**A. Nourbakhsh Saad Abad** Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran  
**M. Nami Khalilehdeh** Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran  
**S. F. Rangbar** Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran  
**S. Faramarzi** Department of Mechanical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
**F. Firouzy** Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

## Abstract

Method of power and hydrogen gas production by solar energy and water electrolysis has received attention in recent years, because hydrogen and oxygen gases are separated from water without any pollution, the mentioned method has net-zero carbon emissions, known as green hydrogen. In this study, solar cells are used to supply power for the proton exchange membrane (PEM) electrolysis and the liquefaction sections. Bandar Abbas city is selected for the proposed process. The novelties of this study are based on two points, first proposing an integrated process of solar power generation and separation and liquefaction of hydrogen gas without pollution and with higher efficiency compared to other similar cycles. The capacity of solar arrays is 6,000 kW, while the production capacity of the electrolysis section is 438 kg/h of oxygen gas and 55 kg/h of hydrogen gas. The specific energy consumption (SEC) of the liquefaction cycle is 5.07 kWh/kg. The highest rate of exergy destruction goes to the electrolysis section, followed by heat exchangers as the second rank.

**Keywords:** Sustainable energy, Proton exchange membrane, Hydrogen separation, Cryogenic process, Green process.

## ۱- مقدمه

فرآیند تولید هیدروژن، استفاده از الکترولایزر و انرژی خورشیدی برای تولید هیدروژن به عنوان فرآیندی با خروجی کربن صفر در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و با توجه به سرمایه گذاری و پیشرفت فناوری مربوط به این سیستم سبز، هزینه تولید هیدروژن با استفاده از این روش در سال‌ها اخیر کاهش یافته و در نتیجه تولید هیدروژن با استفاده از انرژی خورشیدی و الکترولایزر از نظر اقتصادی

یکی از روش‌های تولید انرژی پایدار استفاده از انرژی تجدید پذیر خورشیدی برای تامین توان سیستم‌های مختلف است. علاوه بر هیدروژن در صنایع مختلفی کاربرد دارد [1]. با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و لزوم کاهش گازهای گلخانه‌ای در فرآیندهای مختلف از جمله

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.ranjbar@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۹/۲۲

قابل رقابت با دیگر روش‌های تولید هیدروژن شده است [۲]. تولید پاک هیدروژن به دو شاخه هیدروژن سبز و هیدروژن آبی تقسیم می‌شود بدین صورت که هیدروژن تولید شده در مجموعه فرآیندهایی که خروجی کربن صفر دارند، هیدروژن سبز نام دارند ولی اگر فرآیندهای تولید هیدروژن دارای خروجی کربن باشند ولی از سیستم های جمع-آوری کربن استفاده شود، محصول تولیدی هیدروژن آبی نامیده می‌شود. در این پژوهش با توجه به استفاده از انرژی خورشیدی، محصول تولیدی از نوع هیدروژن سبز است که پاک ترین روش تولید هیدروژن است [3].

تولید هیدروژن با استفاده از سوخت های فسیلی در شرایطی که مجهز به سیستم‌های جمع آوری کربن باشند، به نام هیدروژن آبی شناخته می‌شوند، مزیت این روش، قابلیت انعطاف در اصلاح و مجهز نمودن سیستم‌های قدیمی تولید هیدروژن به چرخه‌های جمع آوری کربن است، اما این روش دو ایراد عمده دارد اولاً هزینه‌های ساخت و تعمیر و نگهداری فرآیندهای جمع آوری کربن بسیار بالا بوده و دوماً در این روش مقداری هر چند کم کربن قابل جمع آوری نخواهد بود و بعد از چند سال با کاهش کارایی چرخه درصد کربن خروجی افزایش می‌یابد [4]. استفاده از سیستم اصلاح متان در بخار برای جداسازی هیدروژن از گاز متان متداول ترین روش تولید هیدروژن در حال حاضر است، این روش خروجی کربن بالایی دارد اما با افزودن سیستم جمع آوری کربن قابلیت سازگاری با محیط زیست را دارد، در کار یانگ و همکاران [5] از سیستم اصلاح متان در بخار و بازیابی گاز طبیعی مایع برای تولید و مایع سازی هیدروژن استفاده شد. در سیستم پیشنهادی آنها از چرخه پیش‌سرمایش نیتروژنی و سیستم سرمایش دما پایین برایتون هیدروژنی استفاده شد. ۱۴۶۷۶۰ کیلو وات در بخش فشرده سازی واحدهای سرمایش برای مایع سازی ۹۸۳۳۱ کیلوگرم بر ساعت هیدروژن مایع استفاده شد.

با توجه به این نکته که بهترین روش انتقال و ذخیره سازی گاز هیدروژن مایع سازی آن است، انتخاب سیستم مایع سازی مناسب اهمیت بسیاری دارد و تکمیل کننده سیستم‌های تولید هیدروژن است [6]. با توجه به دمای بسیار پایین مایع سازی هیدروژن (حدوداً منفی ۲۵۰ درجه سلسیوس) توان مصرفی در سیستم‌های پیش سرمایش و سرمایش نهایی دمای پایین مایع سازی گاز هیدروژن زیاد بوده و بهینه‌سازی و افزایش کارایی چرخه مایع سازی اهمیت بسیار دارد. تامین برق با استفاده از منبع تجدید پذیر انرژی خورشیدی برای سیستم الکتروولایزر آب و کمپرسورهای بخش فشرده‌سازی سیستم مایع سازی هیدروژن، از موضوعاتی است که کم تر مورد مطالعه قرار گرفته و در این پژوهش بررسی خواهد شد. در ادامه مطالعات انجام شده در گذشته در رابطه استفاده از انرژی خورشیدی در سیستم‌های تولید هیدروژن و انواع روش‌های الکتروولایزر آب برای تولید هیدروژن و مایع سازی هیدروژن، مرور می‌شوند.

استفاده از انرژی خورشیدی و زمین گرمایی برای تامین توان مصرفی واحد های تولید هیدروژن در سال های گذشته مورد توجه بوده است. در کار بایسر و دینسر [7] یک سیستم تجدید پذیر تولید چندگانه بر پایه ادغام یک سیستم تولید توان بر پایه سیستم‌های انرژی خورشیدی و زمین گرمایی با استفاده از چرخه رانکین آلی و آرایه‌های خورشیدی بررسی شد، از یک سیستم گردش هوا برای انتقال گرمای

بیشتر از مازول های فتوولتایی به هوا استفاده شد، بازدهی انرژی چرخه ۲۸ درصد بود. نتایج نشان داد که تبخیر کننده در چرخه رانکین آلی بیش‌ترین تخریب انرژی را داشته است، که حدوداً ۳۷ درصد کل تخریب انرژی از کل سیستم بود. اسدینا و همکاران [8] استفاده از انرژی خورشیدی در ترکیب با یک چرخه تبرید جذبی برای کاهش دمای چرخه مایع سازی هیدروژن را بررسی کردند. چرخه رانکین و واحدهای پیش‌سرمایش و دما پایین در فرآیند مورد مطالعه در نظر گرفته شده بودند. یوکسل و همکاران [10]، [9]، استفاده از انرژی خورشیدی و زمین گرمایی برای تولید توان و هیدروژن را بررسی کردند.

الکتروولایزر غشاء پروتونی در مقایسه با دیگر انواع الکتروولایزر دارای مزیت‌های دمای کاری پایین (۲۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس)، طراحی کوچک‌تر، قابلیت اشغال فضای کم‌تر، قابلیت کار در چگالی جریان بالا (۲ آمپر بر سانتی متر مربع)، تولید با خلوص ۹۹/۹۹ درصد هیدروژن و اکسیژن، کارایی بالا (۸۰ تا ۹۰ درصد) و پاسخ‌دهی سریع است [۱۱]. نافچی و همکاران [۱۲] از انرژی خورشیدی برای تامین توان مورد نیاز یک الکتروولایزر غشاء پروتونی استفاده کردند. تاثیر تغییر متغیرهای مختلف بر عملکرد سیستم بررسی شد. کارایی چرخه پیشنهادی آنها دارای بازدهی انرژی ۴۱/۲۵ درصد بود. الامام و دینسر [۱۳] نیز از انرژی خورشیدی برای تولید هیدروژن از آب با استفاده از الکتروولایزر غشاء پروتونی استفاده کردند، ظرفیت الکتروولایزر غشاء پروتونی ۱/۲۵ کیلوگرم در ساعت بود.

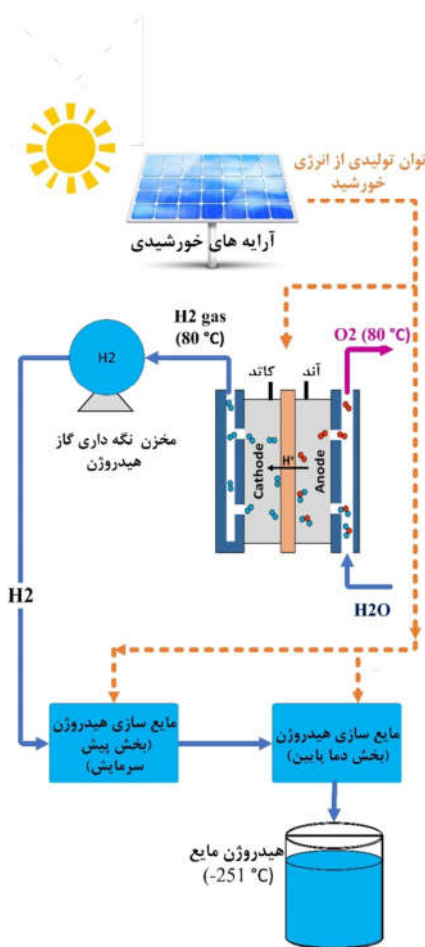
الکتروولایزر آب برای تولید هیدروژن در پژوهش های بسیاری بررسی شده است ولی ترکیب آن با واحدهای تامین توان از منابع تجدید پذیر و همچنین مایع سازی هیدروژن از موضوعاتی است که کم تر مورد توجه بوده و در این پژوهش نیز بررسی می‌شود. نوری و همکاران [14] چرخه‌ای برای تبدیل توان تولیدی به هیدروژن مایع و دی‌اکسیدکربن پیشنهاد کردند. چرخه پیشنهادی شامل پنج زیر سیستم بود که شامل سیستم‌های تولید توان فتوولتایی، الکتروولایزر جداسازی هیدروژن و اکسیژن از آب، چرخه سرمایش جذبی برای مایع سازی دی-اکسیدکربن، واحد تولید کننده توان با سوخت اکسیژن و چرخه مایع سازی هیدروژن بودند. چرخه پیشنهادی دارای ظرفیت ۳/۳ کیلوگرم بر ثانیه هیدروژن مایع و ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه کربن دی‌اکسید بود. بازدهی انرژی چرخه ۹۵ درصد و مصرف ویژه انرژی آن ۳/۳۵۹ بودرنجبر و همکاران [15] استفاده از چرخه ماتینات و چرخه رانکین آلی با مبدل غشاء پروتونی برای تولید همزمان توان و هیدروژن را بررسی کردند. از سیال کاری R123 در چرخه رانکین استفاده شد. چرخه رانکین آلی توان مورد نیاز الکتروولایزر برای واکنش شیمیایی را تامین می‌کرد و آب با دمای محیط وارد مبادله‌کننده گرمایی می‌شد و دمای آن را به دمای الکتروولایزر می‌رساند. هیدروژن تولیدی پس از ترک کاتد دمایش را به محیط می‌داد و با محیط هم‌دما می‌شد. الکتروولایزر، توان، حرارت و آب را به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌کرد. یکی از کاربرد اصلی استفاده از الکتروولایزر برای تولید هیدروژن با استفاده از برق خورشیدی، به منظور تبدیل توان انرژی تجدید پذیر خورشید به شکل هیدروژن برای امکان پذیر نمودن ذخیره سازی و انتقال برق خورشیدی است، بعلاوه این فرآیند کاملاً سازگار با محیط زیست است [۱۶].

فرامرزی و همکاران [18]، [17] چرخه مایع سازی هیدروژنی را پیشنهاد

است. از نرم افزارهای Meteonorm و PVsyst برای تعیین و مطالعه سیستم تولید برق خورشیدی در محل مورد نظر استفاده شده است.

## ۲-۲- واحد تبدیل کننده نور خورشید به برق

برای تامین توان با ظرفیت ۶ مگاوات، از سیستم متصل به شبکه<sup>۱</sup> آرایه‌های خورشیدی استفاده شده است که شامل پنل‌های خورشیدی و واحدهای تبدیل کننده جریان برق مستقیم و متناوب است. مشخصات واحد تولید برق خورشیدی بر پایه اطلاعات ارائه شده در کار نوری و همکاران [14] طراحی شده است. بیست هزار ماژول از نوع تک کریستال سیلیکونی در ۱۸۱۹ ردیف ۱۱ تایی قرارداد داده شده‌اند. زاویه آرایه‌ها<sup>۲</sup> ۲۸ و جهت گیری آرایه‌ها<sup>۳</sup> صفر در نظر گرفته شده است. آرایه‌ها دارای ولتاژ مدار باز<sup>۴</sup> ۳۹٫۷ ولت و جریان اتصال کوتاه<sup>۵</sup> ۹٫۸۳ آمپر هستند. حداکثر دما ۴۵ درجه سلسیوس و کارایی آنها ۱۵٫۲۸ درصد است.



شکل ۱- طرحواره فرآیند ترکیبی پیشنهادی.

دادند که شامل دو مرحله پیش سرمایه‌گذاری و سرمایه‌گذاری است. از مبرّد ترکیبی به منظور کاهش کار مصرفی در واحدهای فشرده سازی استفاده شد. استفاده از تبدیل کننده های ارتو به پارا و انتخاب معادلات حالت مناسب برای هیدروژن در دماهای بسیار پایین نیز بررسی شد، نتیجه این شد که معادله حالت مناسب برای گاز هیدروژن خالص در دماهای پایین بندیک-وب-رابین اصلاح شده و برای جریان های مبرّد ترکیبی، پنگ-رابینسون بوده است. مبادله کننده بخش پیش سرمایه‌گذاری بیشترین تخریب انرژی را داشت و مصرف ویژه انرژی کل چرخه ۸٫۸۵ کیلو وات ساعت به ازای تولید هر کیلوگرم هیدروژن مایع بود. در بخش سرمایه‌گذاری دما پایین از مبرّد های ننون، هلیوم و هیدروژن و در بخش پیش سرمایه‌گذاری از مبرّد های نیتروژن و مشتقاتی از هیدروکربن ها استفاده شد.

نوآوری این پژوهش تولید هیدروژن مایع با استفاده از برق خورشیدی در شهر بندرعباس و بدون هیچ گونه آلاینده‌ای به منظور تبدیل انرژی برق خورشیدی به گاز هیدروژن مایع برای ذخیره سازی و انتقال است. در چرخه پیشنهادی از توان انرژی خورشیدی برای الکترولیز آب و تامین توان بخش فشرده سازی واحد مایع سازی هیدروژن استفاده شده است در نتیجه فرآیند پیشنهادی هیچ گونه خروجی کربن نداشته و کاملاً سازگار با محیط زیست است. چرخه مایع سازی کارایی بالاتری نسبت به دیگر کارهای پیشنهادی در گذشته دارد که دلیل آن استفاده از سیستم مبرّد ترکیبی با چیدمانی اصلاح شده (تعداد مبادله کن های گرمایی بیشتر نسبت به چرخه مشابه) است. از آرایه‌های خورشیدی برای تامین برق و از الکترولایزر غشاء پروتونی برای جداسازی آب و تولید گاز هیدروژن استفاده شده است. شهر بندر عباس به عنوان محل مناسب برای اجرای فرآیند پیشنهادی انتخاب شده است. چرخه مایع سازی مبرّد ترکیبی برای مایع سازی هیدروژن و بیست هزار آرایه تک کریستال سیلیکونی برای تولید برق خورشیدی استفاده شده‌اند. همچنین نرخ عملکرد آرایه‌ها در ماه‌های مختلف سال بررسی شده است.

## ۲- مبانی و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات چرخه مورد مطالعه

فرآیند مورد بررسی شامل سه زیر سیستم می‌باشد: زیر سیستم تبدیل کننده نور خورشید به برق توسط سلول‌های خورشیدی، زیر سیستم الکترولایزر آب از نوع غشاء پروتونی و زیر سیستم مایع سازی هیدروژن مجهز به سیستم پیش سرمایه‌گذاری و دما پایین مبرّد ترکیبی، در شکل ۱ طرحواره چرخه مورد مطالعه نشان داده شده است. مجموعه‌ای از سلول‌های خورشیدی با استفاده از نور خورشید، برق تولید می‌کنند و برق تولیدی به دو بخش تبدیل می‌شود مقداری از آن به شبکه برق سراسری منتقل می‌شود و مقدار دیگر مورد نیاز واحد الکترولایزر را تامین می‌کند. واحد الکترولایزر، آب را الکترولیز کرده و هیدروژن را در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و فشار ۲۰۰۰ پاسکال تولید می‌کند. هیدروژن به مخزن ذخیره منتقل شده و در ادامه توسط واحد مایع سازی هیدروژن مایع سازی می‌شود. شهر بندر عباس در کشور ایران محل اجرای این طرح است. بعلاوه از نرم افزارهای ASPEN HYSYS و MATLAB برای شبیه‌سازی چرخه مایع سازی هیدروژن استفاده شده

<sup>1</sup> Grid-connected PV

<sup>2</sup> Array tilt angle

<sup>3</sup> Array azimuth angle

<sup>4</sup> Open-circuit voltage (VOC)

<sup>5</sup> Short circuit current (ISC)

### ۲-۳- واحد الکترولایزر

از الکترولایزر نوع غشاء پروتونی برای جداسازی هیدروژن و اکسیژن از آب ورودی با استفاده از جریان برق مستقیم استفاده می‌شود. واحد الکترولایزر غشاء پروتونی این پژوهش بر پایه نتایج کار سید متین و همکاران [19] در نظر گرفته شده است. ظرفیت تولید الکترولایزر ۵۵،۲۳ کیلوگرم بر ساعت گاز هیدروژن با دمای ۸۰ درجه سلسیوس است. مطابق شکل ۲، جریان E1 که آب بوده وارد الکترولایزر شده و پس از جداسازی جریان E6 که هیدروژن است از الکترولایزر خارج می‌شود. جریان خروجی دیگر از الکترولایزر E5 است که شامل اکسیژن و آب است، اکسیژن خروجی به سمت مخازن ذخیره یا دیگر فرآیندها می‌رود در حالی که آب دوباره وارد الکترولایزر می‌شود.

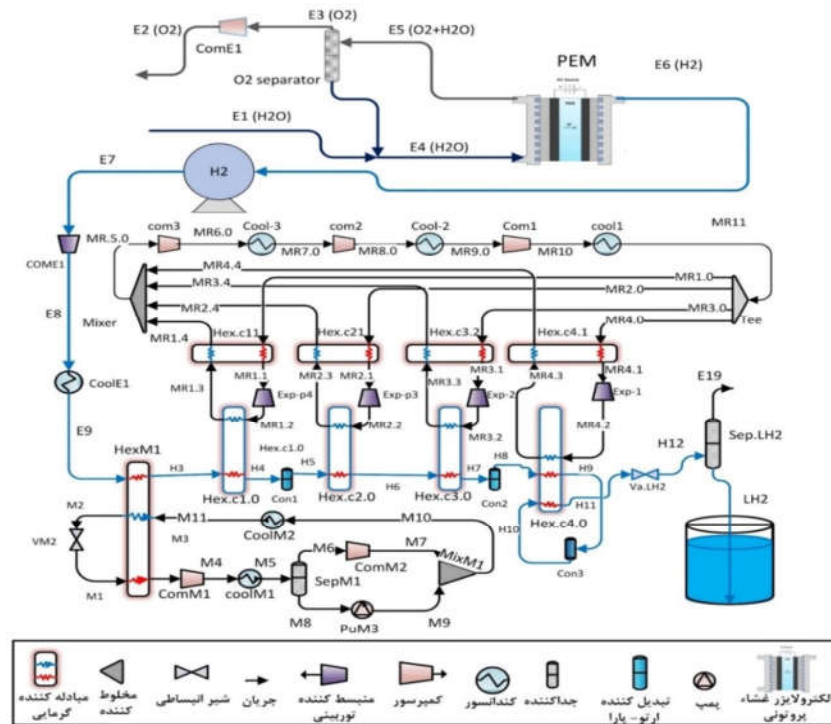
### ۲-۴- واحد مایع سازی هیدروژن

واحد مایع سازی هیدروژن شامل دو بخش پیش سرمایش و بخش نهایی (سرمایش دما پایین) است. در واحد پیش سرمایش مبرد ترکیبی در چرخه‌ای شامل یک مبادله کننده چند جریانی، یک شیر انبساطی، دو کولر هوایی و دو کمپرسور وظیفه کاهش دمای گاز هیدروژن تا دمای منفی ۱۹۰ درجه سلسیوس را دارد. در بخش سرمایش دما پایین مبرد ترکیبی دیگری شامل هلیوم، هیدروژن و نئون است و مطابق شکل ۲ مجموعه‌ای از مبادله‌کن‌های گرمایی، کمپرسورها، منبسط کننده‌ها، تبدیل کننده‌های ارتو-پارا و یک شیر انبساطی و یک جداکننده بکار گرفته شده‌اند تا دمای هیدروژن پیش سرد شده را تا دمای مایع سازی که منفی ۲۵۱ درجه سلسیوس است، کاهش دهند. مبرد ترکیبی بخش پیش سرمایش و سرمایش نهایی بر پایه مرجع [17] انتخاب شده‌اند. حداکثر فشار در چرخه سرد کننده پیش-سرمایش ۴۲۰۰ کیلو پاسکال و حداقل فشار آن ۳۳۰ کیلو پاسکال است، در بخش سرمایش نهایی حداکثر فشار ۱۵۰۵ کیلو پاسکال و کم‌ترین فشار ۱۰۱ کیلو پاسکال است. نسبت افزایش فشار در بخش

پیش سرمایش در دو مرحله انجام می‌شود که ۳/۳ و ۳/۵ است در حالی که در بخش سرمایش نهایی سه مرحله فشرده سازی با نسبت های ۲/۳، ۲/۷ و ۳/۱ انجام می‌شود. در این تحقیق، پس از بررسی روش‌های مختلف، برای مدل‌سازی خط جریان هیدروژن خالص از معادله حالت بندیک-وب-رابین اصلاح شده و برای جریان‌های مبرد ترکیبی و گاز طبیعی از معادله حالت پنگ-رابینسون استفاده شده است. روش مورد استفاده بر پایه کار فرامرزی و همکاران [۲۰] است.

### ۲-۵- تبدیل هیدروژن ارتو به پارا

هیدروژن در دما و فشار استاندارد، شامل ۲۵٪ گاز هیدروژن به صورت پارا و ۷۵٪ آن به صورت راست یا اورتو است که به آن ساختار معمولی هم گفته می‌شود. نسبت تعادلی هیدروژن پارا به راست (اورتو) به دمای آن بستگی دارد اما چون ساختار راست یک حالت برانگیخته است و تراز انرژی بالاتری نسبت به پارا دارد، ناپایدار است. در دمای بسیار پایین می‌توان گفت حالت تعادل تنها از پارا ساخته شده است. در شکل ۳ آرایش مولکولی در حالت ارتو و پارا نمایش داده شده است. فرایند دگرگونی هیدروژن از راست (اورتو) به پارا گرمازا است و آنقدر گرما تولید می‌کند که باعث بخار شدن بخشی از هیدروژن مایع می‌شود. در حالت معمولی این فرآیند بسیار کند است و زمان بسیار زیادی صرف این فرآیند می‌شود، اما با اعمال شرایطی می‌توان سرعت این جهش و تبدیل را بالا برد. این شرایط شامل به کارگیری مبدل‌هایی دارای کاتالیزور است که قابلیت تغییر جهت اسپین هسته و تبدیل هیدروژن ارتو به پارا را دارند [۲۱]. در این پژوهش از سه تبدیل کننده ارتو به پارا استفاده شده است، در تبدیل کننده ارتو به پارای اول درصد پارا تا ۴۷ درصد، در مبدل دوم تا ۷۴ درصد و در مبدل نهایی تا ۹۹/۹۹ درصد افزایش می‌یابد.

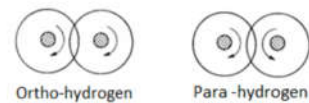


شکل ۲- دیاگرام چرخه پیشنهادی تولید هیدروژن مایع با استفاده از الکترولایزر و انرژی خورشیدی.

E6(H2)	۰٫۱۵	۸۰	۱۰۱	۳٫۱۱۹
MR5.0	۰٫۲۳۴	۲۳٫۴۴	۱۰۱	۱٫۱۷
MR11	۰٫۵۹۶	۲۰	۴۲۰۰	۱۷۴٫۵۳
E4(H2O)	۰٫۲۲	۸۰	۱۰۱	۸۴٫۳۳
E9	۰٫۱۵	۲۶٫۸۵	۲۰۰۰	۵۶٫۴۸
LH2	۰٫۱۵	-۲۵۱	۱۳۰	۱۷۷٫۱۹

### ۷-۲- سنجش اعتبار

سنجش اعتبار پژوهش حاضر بر پایه مقایسه نتایج شبیه‌سازی بخش الکترولایزر با نتایج تجربی کار یوروی و همکاران [25] در شکل ۴ انجام شده است، در شکل ۴، پتانسیل غشایی در مقادیر مختلف چگالی جریان برای کار یوروی و همکاران [25] و پژوهش حاضر نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی الکترولایزر در این پژوهش است. اعتبار سنجی روش شبیه‌سازی بخش مایع‌سازی هیدروژن کار حاضر با مقایسه مشخصات چرخه پیشنهادی پریکو<sup>۲</sup> ارائه شده توسط شرکت بلک‌اندویچ<sup>۳</sup> انجام شده است. در جدول ۲ نتایج اعتبار سنجی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی چرخه پریکو با استفاده از روش پژوهش حاضر و مرجع [26] آورده شده است.



شکل ۳- آرایش مولکول هیدروژن در حالت ارتو و پارا [۲۲].

### ۶-۲- فرضیات

- تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز است [۲۳].
  - افت فشار در مبادله‌کننده‌های گرمایی ۳۰ کیلو وات و در کولرها ۵۰ کیلو وات در نظر گرفته شده است [5].
  - حداقل دمای نزدیکی در نقطه تنگش<sup>۱</sup> ۱ تا ۸ درجه سلسیوس در مبادله‌کننده‌های گرمایی در نظر گرفته شده است [5].
- بر پایه کار بین و همکاران [24]، بازدهی آدیاباتیک کمپرسورها ۸۰ درصد، توربین منبسط‌کننده‌ها ۸۵ درصد و پمپ‌ها ۸۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند.

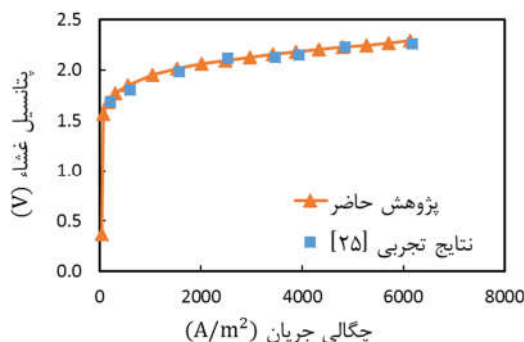
جدول ۱- مشخصات جریان‌های فرآیند مورد مطالعه.

نام جریان	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)	دما (درجه‌ی سلسیوس)	فشار (کیلو پاسکال)	اگزروی (کیلووات)
E2(O2)	۰٫۱۲۱۸	۸۰	۱۰۱	۲۹٫۰۶

<sup>2</sup> PRICO®

<sup>3</sup> Black & Veatch

<sup>1</sup> Pinch point



شکل ۴- صحت سنجی پژوهش حاضر در مقایسه با نتایج کار بوروی و همکاران [25] برای الکترولیزر غشاء پروتونی.

جدول ۲- اعتبارسنجی نتایج روش مایع سازی استفاده شده در این پژوهش و مرجع [26] در محاسبه مشخصات چرخه‌ی پریکو.

مشخصات چرخه	مرجع [26]	پژوهش حاضر
حداقل دمای نزدیکی در مبادله‌کننده گرمایی (درجه سلسیوس)	۳	۳
مصرف ویژه انرژی (کیلووات ساعت بر کیلوگرم گاز مایع)	۰٫۲۸۱	۰٫۲۸۰

## ۸-۲- تحلیل انرژی و انرژی

در تحلیل انرژی که یکی از انواع تحلیل‌های ترمودینامیکی است مصرف انرژی فرآیند مایع سازی به صورت کمی بررسی می‌شود و از نظر بهینه بودن در قالب شاخص‌هایی مانند مصرف ویژه انرژی<sup>۱</sup> که برابر با کار مصرفی در چرخه مایع سازی به ازای تولید یک کیلوگرم هیدروژن مایع است. تحلیل انرژی کل فرآیند مورد مطالعه انجام شده است و انرژی جریان‌ها با صرف نظر کردن از انتقال انرژی جنبشی و پتانسیل به صورت زیر در نظر گرفته شده اند [27]:

$$Ex = Ex^{ph} + Ex^{ch} \quad (1)$$

$$Ex^{ph} = h - h_0 - T(S - S_0) \quad (2)$$

$$Ex_{mixture}^{ch} = \sum_i x_i Ex_i^{ch} + RT_0 \sum_j x_j \ln x_j \quad (3)$$

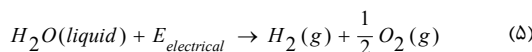
انرژی شیمیایی در پژوهش مورد مطالعه قابل صرف نظر نبوده زیرا در الکترولیزر و تبدیل کننده‌های ارتو به پارا واکنش شیمیایی وجود دارد. انرژی شیمیایی جریان‌ها با استفاده از رابطه ۳ و مقادیر انرژی استاندارد ارائه شده در کتاب کوتاس [28] محاسبه می‌شوند. تخریب انرژی با استفاده از معادله موازنه انرژی در تجهیزات طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [29], [28]:

$$Ex_i + Ex_{Q_i} = Ex_o + Ex_{Q_o} + W_{sh} + I \quad (4)$$

رابطه اخیر جهت محاسبه برگشت‌ناپذیری یا انرژی از بین رفته مورد استفاده قرار می‌گیرد و در آن  $Ex_o$  و  $Ex_i$  انرژی جریان مواد خروجی و ورودی هستند،  $Ex_{Q_o}$  و  $Ex_{Q_i}$  انرژی جریان انتقال گرمای ورودی و خروجی،  $W_{sh}$  کار محوری انجام شده روی یا توسط فرآیند و  $I$  برگشت‌ناپذیری یا انرژی از بین رفته می‌باشند.

## ۹-۲- الکترولیزر غشاء پروتونی

الکترولیزر آب با استفاده از جریان برق مستقیم بین دو الکتروند آند و کاتد انجام می‌شود که توسط یک غشاء از هم جدا شده‌اند. واکنش طبق رابطه زیر انجام می‌شود:



انرژی الکتریکی مورد نیاز در الکترولیزر است. رابطه انرژی گیبس برای الکترولیزر در زیر آورده شده است [1]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6)$$

$\Delta H$  اختلاف آنتالپی و  $\Delta S$  اختلاف آنتروپی هستند. بر پایه کار نامی و همکاران [1] اتلافات در این پژوهش در بخش الکترولیزر در نظر گرفته نشده‌است. نرخ مولی جریان هیدروژن و جریان اکسیژن تولیدی در الکترولیزر غشاء پروتونی از رابطه زیر بدست می‌آید [30]:

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O, reacted} \quad (7)$$

$$\dot{N}_{O_2, out} = \frac{J}{4F} \quad (8)$$

$F$  ثابت فارادی<sup>۲</sup> و  $J$  چگالی جریان است. ولتاژ الکترولیزر طبق روابط زیر بدست می‌آید.

$$E_{el} = EX_{el} = JV \quad (9)$$

$$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm} \quad (10)$$

$E_{el}$  انرژی ورودی و  $E_{el}$  انرژی ورودی به الکترولیزر،  $V_0$  پتانسیل معکوس که با استفاده از رابطه نرست<sup>۳</sup> و بر پایه کار نامی و همکاران [30] بدست می‌آید.  $V_{act,c}$  پتانسیل اضافه فعال سازی کاتد،  $V_{act,a}$  پتانسیل اضافه فعال سازی آند و  $V_{ohm}$  پتانسیل اهمی است.

## ۳- نتایج

### ۳-۱- آرایه‌های خورشیدی

در شکل ۵ مقدار میانگین تابش خورشید و دمای محیط در ماه‌های مختلف سال در شهر بندر عباس (شهر مورد نظر برای استقرار سیستم پیشنهادی) نمایش داده شده‌اند. در ماه اردیبهشت بیش‌ترین مقدار تابش و در آذر ماه کم‌ترین مقدار تابش مشاهده شده است، در حالی که بیش‌ترین دمای محیط در ماه تیر و کم‌ترین دما در دی ماه اتفاق افتاده است.

<sup>2</sup> Faraday constant

<sup>3</sup> Nernst equation

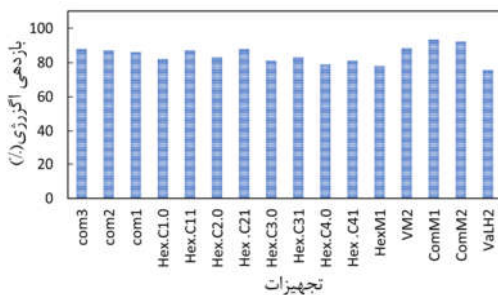
<sup>1</sup> Specific energy consumption (SEC)

جدول ۳- مشخصات الکترولایزر غشاء پروتونی شبیه سازی شده.

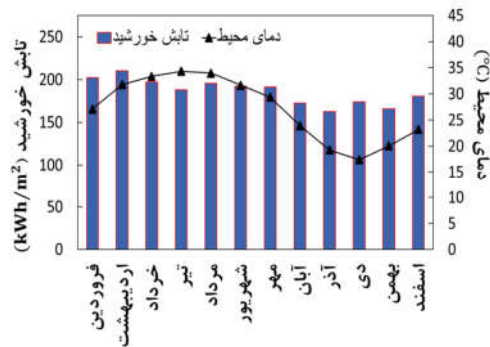
مقدار	مشخصه الکترولایزر
۱۰۱ کیلوپاسکال	فشار جریان اکسیژن تولیدی در الکترولایزر
۱۰۱ کیلوپاسکال	فشار جریان هیدروژن تولیدی در الکترولایزر
۷۶ (kJ/mol)	انرژی فعال سازی آند ( $E_{act,a}$ )
۱۸ (kJ/mol)	انرژی فعال سازی کاتد ( $E_{act,c}$ )
۱۰۰ میکرومتر	ضخامت غشاء
$170000 (A/m^2)$	$J_a^{ref}$
$460000 (A/m^2)$	$J_c^{ref}$
۹۶۴۸۶ (C/mol)	ثابت فارادی ( $F$ )

### ۳-۳- آنالیز انرژی و اگزرژی چرخه مایع سازی هیدروژن

در شکل ۷ بازدهی اگزرژی تجهیزات نشان داده شده است. بازدهی اگزرژی کل ۴۲ درصد است. در شکل ۸ و ۹ نمودارهای ترکیبی جریان سرد و گرم برای مبادله کننده گرمایی در دو مقدار حداقل دمای نزدیکی ۳/۴ درجه سلسیوس و ۱ درجه سلسیوس نمایش داده شده‌اند. همانطور که از شکل ۸ و ۹ مشخص است در حداقل دمای نزدیکی ۱ درجه سلسیوس نمودارهای ترکیبی سرد و گرم به یکدیگر نزدیک‌تر هستند که موجب کاهش تخریب اگزرژی در مبادله کننده گرمایی شده و احتیاج به مبادله کننده بزرگتری است زیرا نیاز به سطح تبادل گرمایی بیشتری دارد که نتیجه آن هزینه بیشتر ساخت مبادله کننده گرمایی است، بنابراین یافتن مقدار بهینه حداقل دمای نزدیکی در طراحی مبادله کننده‌های گرمایی بسیار حائز اهمیت است زیرا تاثیر مستقیم بر مقدار تخریب اگزرژی در مبادله کننده‌ها و هزینه ساخت آن‌ها دارد. در کار بین و همکاران [24] و برشتاد و همکاران [32] مقدار بهینه حداقل دمای نزدیکی برای مبادله کننده‌های گرمایی در یک چرخه مایع سازی هیدروژن، حداقل ۱ درجه سلسیوس معرفی شده است که در این پژوهش نیز حداقل مقدار ۱ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

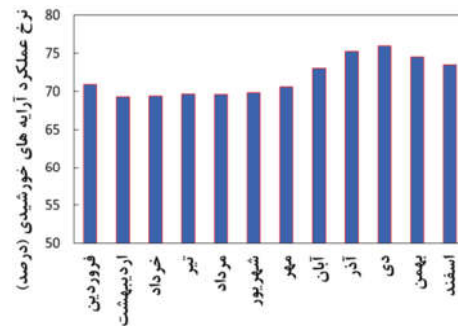


شکل ۴- بازدهی اگزرژی تجهیزات واحد مایع سازی هیدروژن.



شکل ۳- میانگین تابش خورشید و دمای محیط در ماه‌های سال (شهر بندرعباس).

نرخ عملکرد آرایه‌های خورشیدی برابر است با نسبت مقدار انرژی خروجی از سیستم نسبت به انرژی‌ای که سیستم در حالت مرجع می‌تواند تولید کند. در شکل ۶ نرخ عملکرد آرایه‌های خورشیدی در ماه‌های مختلف سال نشان داده شده‌اند. بهترین نرخ عملکرد در دی ماه و آذر ماه اتفاق می‌افتد.



شکل ۶- نرخ عملکرد آرایه‌های خورشیدی در ماه‌های سال برای سیستم مورد استفاده در این پژوهش.

### ۳-۲- الکترولایزر غشاء پروتونی

مشخصات الکترولایزر غشاء پروتونی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ آورده شده است. طراحی الکترولایزر مورد استفاده در این پژوهش بر پایه کار سیدامین و همکاران [19] انجام شده است و مشخصات بیش‌تر در این منابع موجود است. با توجه به نوع الکترولایزر در این پژوهش که از نوع فروف‌هونر آ‌سی<sup>۱</sup> [۳۱] (ساخت موسسه فروف‌هونر سازنده الکترولایزرهای غشاء پروتونی تولید کننده هیدروژن) است، هر سل الکترولایزر دارای مساحت فعال ۱۰۰ سانتی متر مربع و نرخ تولید ۲۰ NL/h است، توده الکترولایزر دارای ۳۹ سل با ظرفیت تولید ۵۴ کیلوگرم بر ساعت هیدروژن است، همچنین برای هر سل الکترولایزر، بیشترین ولتاژ هر سل ۲/۲ ولت، بیشترین مقاومت فشاری ۲۰۷ بار، ضخامت غشاء ۱۰۰ میکرومتر، انرژی فعال سازی آند و کاتد به ترتیب ۷۶ و ۱۸ کیلوژول بر مول است.

<sup>1</sup> Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE

در جدول ۴ مشخصات مبادله کننده‌های گرمایی بکار رفته در چرخه مایع‌سازی هیدروژن نشان داده شده است. ضریب عملکرد کل سیستم ۶۵ درصد است.

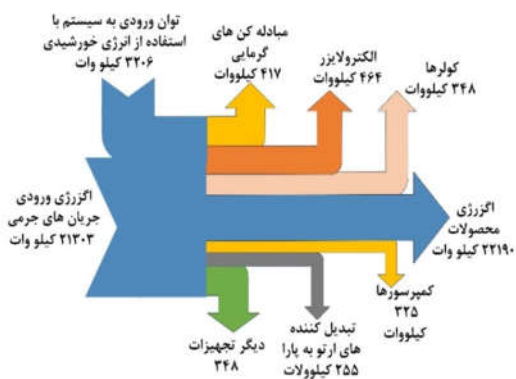
جدول ۴- مشخصات مبادله کننده‌های گرمایی واحد مایع سازی.

نام مبادله کن گرمایی	حداقل دمای نزدیکی (درجه سلسیوس)	گرمای منتقل شده (کیلو وات)	LMTD (درجه سلسیوس)
HexM1	۱	۷۳۱۱۸	۱۷/۳
HexC1.0	۲/۲	۲۶۵۱	۵/۳
HexC11	۱/۱	۲۱۶۰۹	۱/۴
HexC2.0	۳/۹	۱۳۹۳	۶/۲
HexC21	۱	۱۹۵۸۸	۱/۳
HexC3.0	۲/۴	۱۶۸۷	۵/۹
HexC31	۱/۲	۱۴۳۰۱	۱/۵
HexC4.0	۳/۳	۳۶۷	۶/۵
HexC4.1	۳/۲	۱۰۱۵۷	۵/۶



شکل ۱۰- درصد تخریب اگزرژی در دستگاه‌های مختلف.

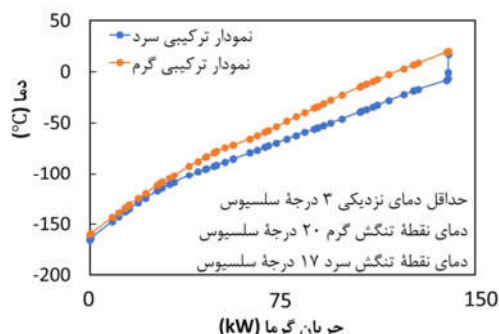
در شکل ۱۱ جریان ورود و خروج اگزرژی برای سیستم مورد مطالعه نشان داده شده است. توان تولیدی در بخش آرایه‌های خورشیدی به عنوان اگزرژی ورودی در نظر گرفته شده است.



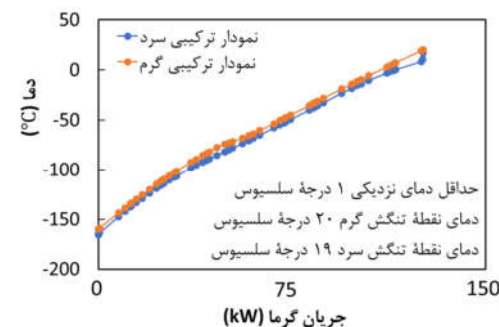
شکل ۱۱- نمودار جریان اگزرژی ورودی و خروجی از سیستم پیشنهادی.

### ۳-۴- مقایسه سیستم پیشنهادی با دیگر روش‌ها

در جدول ۵ مشخصات چرخه ترکیبی مورد بررسی در این پژوهش با کار یانگ و همکاران [5] و نامی و همکاران [30] مقایسه شده است. در کار یانگ و همکاران [5] از سیستم پیش سرمایه‌گذاری نیتروژنی و سیستم سرمایه‌گذاری با گاز هیدروژن استفاده شد. استفاده از سیستم بازبازی گاز طبیعی مایع برای تامین بخشی از سرمایه‌گذاری پیش سرمایه‌گذاری نیتروژنی استفاده شد. ظرفیت چرخه پیشنهادی یانگ و همکاران [5] ۳۰۰ تن در روز هیدروژن مایع با دمای ۲۵۱- درجه سلسیوس و فشار ۱۳۰ کیلو پاسکال بود. چرخه مایع سازی مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای مصرف ویژه انرژی ۵،۰۷ بوده که توان مورد نیاز آن توسط آرایه‌های خورشیدی تامین می‌شود که نسبت به کار یانگ و همکاران [5] با مقدار ۱۱،۰۵ عملکرد بهتری دارد زیرا در پژوهش حاضر از مبرد ترکیبی استفاده شده است که موجب کاهش تخریب اگزرژی در مبادله کننده‌های گرمایی می‌شود. چرخه پیشنهادی نامی و همکاران [30] دارای فرآیندی ترکیبی شامل واحد تولید توان و الکترو لایزر بوده که فاقد چرخه مایع سازی هیدروژن بوده و گاز هیدروژن محصول آن بوده است و از توان تولید شده واحد رانکین آلی استفاده شده است. در حالی که در پژوهش حاضر هیدروژن خروجی به



شکل ۸- نمودار ترکیبی سرد و گرم مبادله کن گرمایی واحد پیش سرمایه‌گذاری با حداقل دمای نزدیکی ۳ درجه سلسیوس.



شکل ۹- نمودار ترکیبی سرد و گرم مبادله کن گرمایی واحد پیش سرمایه‌گذاری با حداقل دمای نزدیکی ۱ درجه سلسیوس.

در شکل ۱۰ درصد تخریب اگزرژی دستگاه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است الکترو لایزر بیشترین تخریب اگزرژی را دارد، در حالی که مبادله کننده‌های گرمایی و کولرها نیز سهم بالایی در تخریب اگزرژی کل سیستم دارند.



• واحد مایع سازی دارای ظرفیت ۱٫۲۹ تن در روز و مصرف ویژه انرژی ۵٫۰۷ است. حداقل دمای نزدیکی در نقطه تنگش در مبادله کن‌های گرمایی در بازه ۱ تا ۳ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. در بخش مایع سازی مبادله کن‌های گرمایی دارای بیش‌ترین تخریب انرژی بوده در حالی که در کل فرآیند ترکیبی پیشنهادی، واحد الکترولیز بیش‌ترین تخریب انرژی را دارد.

## ۵- نمادها

علائم انگلیسی

$E_x$	انرژی (kW)
$Ex^{ch}$	انرژی شیمیایی (kW)
$Ex^{ph}$	انرژی فیزیکی (kW)
$I$	تخریب انرژی (kW)
$G$	انرژی آزاد گیبس (J/mol)
$H$	انتالپی (kJ/kg)
$T$	دما (K)
$S$	آنترپی (kJ/kgK)
$Ex_{Q_i}$	انرژی ناشی از انتقال گرما (kW)
$W_{sh}$	کار محوری (kW)
$\dot{N}_{H_2, out}$	دبی مولی جریان هیدروژن (mol/s)
$\dot{N}_{H_2O, reacted}$	دبی مولی جریان آب (mol/s)
$J$	چگالی جریان ( $A/m^2$ )
$F$	ثابت فارادی (C/mol)
$\dot{N}_{O_2, out}$	دبی مولی جریان اکسیژن (mol/s)
$E_{el}$	انرژی مصرفی در الکترولیزر (kW)
$V$	ولتاژ الکترولیزر (v)

## ۶- مراجع

- [1] Akrami E., Nemati, A., Nami H., and Ranjbar F., Exergy and exergoeconomic assessment of hydrogen and cooling production from concentrated PVT equipped with PEM electrolyzer and LiBr-H<sub>2</sub>O absorption chiller, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 2, 2018.
- [2] یاری، م.، غایبی، ه.، و قوامی گرگری، س.، تحلیل انرژی و انرژی سیستم نوین ریفرمینگ بخار آب بیوگاز خورشیدی برای تولید هیدروژن، *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز* د ۴۸، شماره ۴، ص ۳۱۹-۳۲۸، ۱۳۹۸.
- [3] Nami H., Mohammadkhani F., and Ranjbar F., Utilization of waste heat from GTMHR for hydrogen generation via combination of organic Rankine cycles and PEM electrolysis, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 127, pp. 589-598, 2016.

صورت مایع است و از توان تولید شده در واحد آرایه‌های خورشیدی استفاده شده است.

## جدول ۳- عملکرد سیستم ترکیبی مورد استفاده در پژوهش حاضر و کارهای یانگ و همکاران [5] و نامی و همکاران [30].

مشخصات سیستم	پژوهش حاضر	[5]	[30]
سیستم جداسازی هیدروژن	الکترولیزر غشاء پروتونی	اصلاح متان در بخار <sup>۱</sup>	الکترولیزر غشاء پروتونی
روش تامین برق مصرفی سیستم	آرایه‌های خورشیدی	شبکه برق سراسری	چرخه رانکین آلی
نوع میرد بخش مایع سازی	میرد ترکیبی	هیدروژن	بخش مایع سازی ندارد
مصرف ویژه انرژی بخش مایع سازی هیدروژن	۵٫۰۷	۱۱٫۰۵	بخش مایع سازی ندارد

## ۴- جمع‌بندی

در این پژوهش استفاده از انرژی خورشیدی و الکترولیزر برای تولید هیدروژن بدون هیچ گونه آلاینده‌گی، بررسی شده است. در اکثر چرخه‌های مایع سازی هیدروژن ارائه شده در گذشته توان مصرفی و گاز هیدروژن از فرآیندهایی تامین می‌شدند که دارای آلاینده‌گی بودند، در این مقاله با ترکیب یک چرخه مایع سازی هیدروژن با سیستم تولید هیدروژن سبز، در مجموع فرآیندی ترکیبی پیشنهاد شده است که خروجی آن هیدروژن مایع در دمای منفی ۲۵۱ درجه سلسیوس و فشار ۱۰۱ کیلوپاسکال است که نیازی به تامین توان از خارج از سیستم ندارد و توان مورد نیاز آن از واحد آرایه‌های خورشیدی تامین می‌شود و علاوه خروجی کربن فرآیند پیشنهادی در این پژوهش صفر است. شهر بندر عباس بدلیل امکان تامین مناسب انرژی خورشیدی و همچنین آب مورد نیاز برای جداسازی و تولید هیدروژن و همچنین دسترسی به آب‌های آزاد، برای اجرای فرآیند ترکیبی پیشنهادی بررسی و پیشنهاد شده است.

- از الکترولیزر غشاء پروتونی با ظرفیت تولید گاز ۱۲۱ گرم گاز اکسیژن و ۱۵ گرم گاز هیدروژن در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۰۱ کیلوپاسکال برای جداسازی آب استفاده شده است. الکترولیزر مورد استفاده دارای ضخامت غشاء ۱۰۰ میکرومتر و نیازمند ۲۹۱۴ کیلووات برق جریان مستقیم است.
- آرایه‌های خورشیدی از نوع تک کریستال سیلیکونی با زاویه ۲۸ درجه و جهت‌گیری صفر درجه در شهر بندر عباس در نظر گرفته شده‌اند که قابلیت تولید ۶۰۰۰ کیلو وات برق دارند و در دی ماه دارای بهترین نرخ عملکرد هستند.

<sup>1</sup> Steam methane reforming (SMR)

- cold energy and mixed refrigerant cycle, *Int. J. Refrig.*, Vol. 131, No. 1, pp. 263–274, 2021.
- [21] Donaubaer P. J., Cardella U., Decker L., and Klein H., Kinetics and Heat Exchanger Design for Catalytic Ortho-Para Hydrogen Conversion during Liquefaction, *Chem. Eng. Technol.*, Vol. 42, No. 3, pp. 669–679, 2019.
- [22] Smith E. M., A POSSIBLE METHOD OF IMPROVING ENERGY EFFICIENT PARA-LH2 PRODUCTION, 1984.
- [۲۳] نامی ح.، جمالی س.، رنجبر ف.، و یاری م.، تحلیل ترمودینامیکی و مطالعه ی پارامتری یک سیستم تولید همزمان با ترکیب چرخه ی توربین گاز و چرخه ی کالینا، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د ۴۷، شماره ۳، ص ۲۷۱-۲۷۹، ۱۳۹۷.
- [24] Yin L. and Ju Y., Process optimization and analysis of a novel hydrogen liquefaction cycle, *Int. J. Refrig.*, Vol. 110, pp. 219–230, 2020.
- [25] Irooi T., Yasuda, K., Siroma Z., Fujiwara N., and Miyazaki Y., Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells, *J. Power Sources*, Vol. 112, No. 2, pp. 583–587, 2002.
- [26] Xu X., Liu J., Jiang C., and Cao L., The correlation between mixed refrigerant composition and ambient conditions in the PRICO LNG process, *Appl. Energy*, Vol. 102, pp. 1127–1136, 2013.
- [۲۷] نوربخش سعادتآباد آ.، رادمان س.، رنجبر س.، ف.، و نامی خلیله ده م.، تحلیل ترموآکونومیک و بهینه سازی چندهدفه یک سیستم راندمان بالا بر مبنای چرخه های توربین گاز و رانکین مجهز به ژنراتور ترموالکتریک، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۴۰۱ (انتشار آنلاین).
- [28] Kotas T. J., Exergy analysis of simple processes, in *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Elsevier, 1985.
- [29] Faramarzi S., Mousavi Nainiyan S. M., Mafi M., and 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 Process.*, Vol. 9, No. 1, pp. 91–108, 2021.
- [30] Nami H., Akrami E., and Ranjbar F., 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, 2017.
- [31] Fraunhofer ISE testing operation of hydrogen feed-in to gas grid, *Fuel Cells Bull.*, vol. 2018, No. 4, p. 11, 2018.
- [32] Berstad D., Skaugen G., and Wilhelmens Ø., Dissecting the exergy balance of a hydrogen liquefier: Analysis of a scaled-up claudie hydrogen liquefier with mixed refrigerant pre-cooling, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 11, pp. 8014–8029, 2021.
- [4] Yu M., Wang K., and Vredenburg H., Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 41, pp. 21261–21273, 2021.
- [5] Yang J. H., Yoon Y., Ryu M., An S. K., Shin J., and Lee C. J., Integrated hydrogen liquefaction process with steam methane reforming by using liquefied natural gas cooling system, *Appl. Energy*, Vol. 255, 2019.
- [6] Faramarzi S., Mafi M., SMM Nainiyan, and Ghasemiasl R., Modification of a fuel peak-shaving system in Shahid Mofateh power plant, ISME, Tehran, 2021.
- [7] Bicer Y. and Dincer I., Analysis and performance evaluation of a renewable energy based multigeneration system, *Energy*, Vol. 94, pp. 623–632, 2016.
- [8] Aasadnia M., Mehrpooya M., and Ansarinassab H., A 3E evaluation on the interaction between environmental impacts and costs in a hydrogen liquefier combined with absorption refrigeration systems, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 159, 2019.
- [9] Yuksel Y. E., Ozturk M., and Dincer I., Energetic and exergetic assessments of a novel solar power tower based multigeneration system with hydrogen production and liquefaction, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 26, pp. 13071–13084, 2019.
- [10] Yuksel Y. E., Ozturk M., and Dincer I., Analysis and assessment of a novel hydrogen liquefaction process, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 16, pp. 11429–11438, 2017.
- [11] Shiva Kumar, S. and Himabindu V., Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, *Mater. Sci. Energy Technol.*, Vol. 2, No. 3, 2019.
- [12] Moradi Nafchi F., Baniasadi E., Afshari E., and Javani N., Performance assessment of a solar hydrogen and electricity production plant using high temperature PEM electrolyzer and energy storage, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 11, 2018.
- [13] El-Emam R. S. and Dincer I., Development and assessment of a novel solar heliostat-based multigeneration system, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 5, 2018.
- [14] Nouri M., Miansari M., and Ghorbani B., Exergy and economic analyses of a novel hybrid structure for simultaneous production of liquid hydrogen and carbon dioxide using photovoltaic and electrolyzer systems, *J. Clean. Prod.*, Vol. 259, p. 120862, 2020.
- [15] Ranjbar S. F., Nami H., Khorshid A., and Mohammadpour H., 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.
- [16] Moradi R. and Groth K. M., Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 23, pp. 12254–12269, 2019.
- [17] Faramarzi S., Mousavi Nainiyan S. M., Mafi M., and Ghasemiasl R., Proposing a simultaneous production cycle of liquid natural gas and liquid hydrogen, ISME, Tehran, 2021.
- [۱۸] فرامرزی، س.، موسوی نائینیان، س. م.، مافی، م.، و قاسمی اصل، ر.، اصلاح و بهینه سازی چرخه مایع ساز هیدروژن مجهز به سیستم تبخیر کننده گاز طبیعی مایع، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره ۳، ۱۴۰۱ (انتشار آنلاین).
- [19] Seydmatin P., Karimian S., Rostamzadeh H., and Amidpour M., Electricity and hydrogen co-production via scramjet multi-expansion open cooling cycle coupled with a PEM electrolyzer, *Energy*, Vol. 199, p. 117364, 2020.
- [20] Faramarzi S., Nainiyan S. M. M., Mafi M., and Ghasemiasl R., A novel hydrogen liquefaction process based on LNG