نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص: ۱- ۱۷

J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 1, 2023: 1−17

DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4

تحلیل ترمودینامیکی سیکل خنک کن اسکرمجت به منظور تولید توان الکتریکی و هیدروژن با استفاده از PEM

هادی غائبی[۱و*]، پوریا سیدمتین [۲]، بهزاد عباس‌زاده[۳]

*۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۳۱

چکیده

در پژوهش حاضر، یک سیکل جدید خنک کن بازیابی باز چند مرحله‌ای اسکرمجت به همراه تولید توان و هیدروژن، که در آن سوخت اسکرمجت همان مبرد سیستم خنک کن می‌باشد، ارائه شده است. تحلیل جامع ترمودینامیکی و اگزرژی به منظور ارزیابی عملکرد سیستم، محاسبه میزان تولید توان و هیدروژن بر روی سیستم پیشنهادی پیاده سازی شد. برای دبی جرمی سوخت ۰/۴ کیلوگرم برثانیه، ظرفیت خنک کاری سیستم جدید ارائه شده ۹/۱۶ مگاوات، خالص توان تولیدی ۳/۳۸ مگاوات و میزان هیدروژن تولیدی ۴۲/۲ کیلوگرم بر ساعت محاسبه شده است. از سوی دیگر، نتایج ارزیابی اگزرژی نشان داد که PEM الکترولایزر با بیش از ۴۴ درصد اتلاف اگزرژی بالاترین میزان اتلاف اگزرژی را در بین تمام اجزای مختلف سیکل پیشنهادی دارد. بعد از آن مسیر خنک کن اول با بیش از ۳۹ درصد اتلاف اگزرژی رتبه دوم را از لحاظ اتلاف اگزرژی داراست. بازده انرژی و اگزرژی سیستم ارائه شده به ترتیب ۱۳/۰۱ درصد و ۲۲/۱۲ درصد به دست آمده است. نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک نشان داد که افزایش دبی جرمی به معنای افزایش تولید توان و خنک کاری خواهد بود و نیز در دبی جرمی سوخت ثابت با افزایش فشار پشت پمپ توان تولیدی افزایش می‌یابد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** hghaebi@uma.ac.ir

کلمات کلیدی: تحلیل ترمودینامیکی، اسکرمجت، هیدروژن، انبساط چند مرحله‌ای، خنک کن بازیابی چند مرحله‌ای، PEM الکترولایزر

۱- مقدمه

علاقه مندی به مطالعه و توسعه وسایل نقلیه مافوق صوت با پیشران هوامکنده از قرن پیش مورد توجه قرار گرفته است. به منظور دست یافتن به وسایل نقلیه مافوق صوت عملیاتی‌تر با قابلیت های بهتر همچون توانایی حمل بار با سرعت و ارتفاع پروازی بالا و یا انجام ماموریت‌های فضایی، موتورهای اسکرمجت[1] مطرح شده و مورد مطالعه قرار گرفتند [۱-۴]. به دلیل بار حرارتی بسیار بالای محفظه احتراق اسکرمجت، مدیریت حرارتی یکی از چالش‌های کلیدی این تکنولوژی به شمار می‌آید [۵]. اهمیت مدیریت حرارتی اسکرمجت و اثرات آن بر عملکرد این وسیله نقلیه مافوق صوت، توجه بسیاری از محققان مربوط به این حوزه را، در سال های اخیر، به خود جلب کرده است. در این بین سیستم خنک کن بازیابی یکی از عملی ترین و کاربردی ترین سیستم هایی

[1] Scramjet

نحوه استناد به این مقاله: هادی غائبی، پوریا سیدمتین، بهزاد عباس‌زاده. تحلیل ترمودینامیکی سیکل خنک کن اسکرمجت به منظور تولید توان الکتریکی و هیدروژن با استفاده از **PEM**. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۱) :۱-۱۷. **DOR:** 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

است که برای خنک‌کاری اسکرمجت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. در این روش سوخت از میان مسیرهای خنک کن عبور داده می‌شود تا قبل از اینکه به عنوان سوخت وارد محفظه احتراق شود و بسوزد، از ظرفیت جذب گرمای آن به منظور خنک کاری اسکرمجت استفاده شود. کاندا و همکاران [۷] یک سیکل انبساطی خنک‌کن بازیابی برای موتور اسکرمجت با سوخت هیدروژن ارائه دادند تا ویژگی‌های عملکردی سیستم خنک کن بازیاب را مورد تحلیل و بررسی قرار دهند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که برای پرواز در سرعت ماخ بالا دبی جرمی سوخت مورد نیاز برای خنک کاری، در شرایط عملکردی مناسب، از دبی جرمی استوکیومتری سوخت تجاوز می‌کند. و علاوه براین سوخت بیشتری از آنچه که برای انجام عملیات پروازی اسکرمجت مورد نیاز است باید حمل شود [۸]. از طرفی، نبود خنک‌کاری کافی به طور نسبی به معنای کاهش سرعت پروازی است [۹]. در نتیجه افزایش ظرفیت خنک کاری برای پروازهای سرعت بالا امری ضروری است. از این رو باوو و همکاران در طی تحقیقات خود در طی سال ۲۰۰۹ ایده سیستم های خنک کاری دو و یا چند مرحله‌ای اسکرمجت را با یک مطاله صرفا پارامتری مطرح کردند [۱۰, ۱۱]. کین و همکاران [۱۲] در یک مطالعه کاملتر یک سیکل خنک بازیاب باز[1] دو مرحله‌ای برای اسکرمجت ارائه و عملکرد آن را تحلیل نمودند. پارامترهای مهم مورد مطالعه آنها ضریب افزایش ظرفیت خنک کنندگی، ضریب کاهش دبی جرمی سوخت و همچنین توان خالص تولیدی بودند. نتایج حاصل از تحلیل آنها نشان داد که سیکل باز خنک کن بازیابی عملکرد خوبی را برای کار در اسکرمجت ها از خود نشان می‌دهد و دارای قابلیت پیشرفت و توسعه بسیاری است. برای شرایط فشار پشت پمپ ۲۰ مگاپاسکال توان خالص تولیدی ۸ کیلووات بر هر گرم سوخت در نتایج این تحیق گزارش شده است.

امروزه روز با توجه به لزوم استفاده هرچه موثرتر از منابع محدود انرژی موجود، موضوع بازیابی انرژی هدر رفت مطرح می‌شود. به خصوص که در وسایل نقلیه امروزی سیستم های کمکی بسیاری همچون سیستم تغذیه سوخت، سیستم های راداری و ارتباطی و سیستم های کنترلی وجود دارند و نیازمند مقادیر قابل توجهی توان هستند. این امر ضرورت استفاده از سیستم های بازیاب به همراه تولید توان را هرچه بیشتر آشکار می‌کند تا بتوان بخشی از این نیاز ها را تامین نمود [۱۳]. سیستم های تولید همزمان گزینه بسیار مناسبی برای بهره برداری از انرژی هدر رفت و تبدیل آن به سایر شکل های سودمند انرژی است. این سیستم ها بازده بالاتر و اتلاف اگزرژی کمتری دارند و به طور همزمان و با یک منبع انرژی چندین محصول تولید می‌کنند. سیستم های تولید چند محصوله، سازگاری خوبی با منابع انرژی سطح پایین همچون انرژی هدر رفت دارند [۱۴]. اما در مورد بازیابی انرژی هدر رفت اسکرمجت، با وجود پتانسیل بسیار بالا، متاسفانه تا به امروز مطالعات بسیار کمی در این حوزه صورت گرفته است. که از جمله آنها می‌توان به مطالعه آقایان لی و وانگ [۱۵] اشاره کرد. مطالعه آنها یک تحلیل صرفا اگزرژیایی بر روی سیستم تلفیقی TEG و خنک کن بازیابی اسکرمجت است. نتایج مطالعه آنها تولید توان 61.69 کیلو وات را به ازای دبی جرمی جریان سوخت ۰,۴ کیلوگرم بر ثانیه، نشان می‌دهد. علاوه بر این، اندک مطالعات صورت گرفته نیز صرفا تولید توان مطرح شده است. بدون اینکه به تولید سایر شکل های مفید انرژی همچون تولید اکسیژن، تولید هیدروژن و یا تولید آب شیرین که همه‌ی اینها در صنعت هوافضا هم پرکاربرد و هم هزینه بر هستند، توجه شود. اما هیدروژن به دلیل اینکه به عنوان سوخت نیز کاربرد دارد، به طور ویژه اهمیت دارد. در بین سوخت های مورد استفاده برای اسکرمجت هیدروژن به دلیل ویژگی های خوب اشتعال پذیری (تاخیر کم در اشتعال پذیری و پایداری شعله بالا) نسبت به سوخت های هیدروکربنی برتری دارد [۱۶-۱۸].

هیدروژن به طور خالص در طبیعت وجود ندارد ولی می‌توان آن را از روش هایی همچون تبدیل بایومس، بازیابی بخار-متان و جداسازی آب به اجزای سازنده آن (فرآیند الکترولیز) بدست آورد. الکترولیز آب یک فرآیند الکتروشیمیایی است. سه نوع متداول الکترولیز آب وجود دارد: الکترولیز آلکالاین، اکسید جامد و PEM[2] لکترولایزر [۱۹]. تولید هیدروژن با استفاده از PEM مزایایی را نسبت به سایر روش ها دارد. که از جمله آنها می‌توان به قابلیت به کارگیری آن با استفاده از منابع انرژی سطح پایین، جا گیر نبودن، بدون خطرات محیط زیستی و بدون ماده شیمایی خطرناک بودن [۲۰] اشاره کرد. استفاده از PEM برای تولید هیدروژن

[1] Open Cooling Cycle
[2] Protone Exchange Membrain

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

یکی از رایج ترین روش های تولید هیدروژن در سیستم های استفاده کننده از منابع سطح پایین انرژی، همچون انرژی بازیاب، به عنوان تکنولوژی تولید هیدروژن در آینده معرفی شده است [۲۱, ۲۲]. از اینرو مطالعات زیادی نیز بر روی آنها صورت گرفته است.

لوئنگ و همکاران[23] PEM الکترولایزر را از دو دیدگاه ترمودینامیک و اگزرژی مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. نتایج تحلیل آنها نشان داد که میزان تولید هیدروژن و بازده اگزرژی PEM ارتباط مستقیمی با دمای کاری PEM، میزان فعالیت الکترولیت آن و ضخامت جداره الکترود دارد. مارانگیو و همکاران [۲۴] یک مدل برای مطالعه تئوری PEM ارائه دادند. که در آن از الگوی اتلاف اهمی پیچیده‌ای در الکترودها و جسم میانی استفاده کرده اند. در تحقیقی دیگر احمدی و همکاران [۲۵] یک مطالعه انرژی و اگزرژی بر روی PEM کوپل شده با سیکل خورشیدی و مبدل انرژی حرارتی اقیانوسی (OTEC) ، انجام داده اند. در مدل ارائه شده توسط آنها توان الکتریکی ورودی PEM به وسیله توربین سیکل رانکین آلی (ORC) تامین می‌شود. در نتایج حاصل از تحلیل آنها بازده انرژی ۳,۶ درصد و بازده اگزرژی ۲۲,۷ درصد گزارش داده شده است. ضمن اینکه مقدار تولید هیدروژن ۱,۲ کیلوگرم بر ساعت به دست آمده است. تولید هیدروژن به جهت مصارف خانگی توسط سیستم هایی با منابع انرژی تجدید پذیر عنوان پژوهش دیگری است که سورگولو و دینسر [۲۶] انجام داده اند. در این مطالعه هردو سیستم برپایه انرژی خورشیدی و بادی با الکترولایزر، سلول سوختی و سیستم تبرید جذبی با هدف تولید توان الکتریکی، سرمایش، گرمایش و هیدروژن برای مصارف خانگی تلفیق شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم های حاضر در این مطالعه پتانسیل لازم و عملکرد مناسب برای استفاده در بخش مصارف خانگی و نیز سازگاری مناسب با محیط را دارند. نامی و همکاران [۲۷] یک تحلیل انرژی و اگزرژی بر روی تولید هیدروژن از گرمای هدر رفت از یک سیستم نمونه MCFC[1] تلفیق شده با سیکل رانکین ارگانیک و PEM ارائه کرده اند. خالص تولید توان گزارش شده در این تحقیق ۱۳۱,۲۱ مگاوات است.

بر اساس مطالعه پیشینه پژوهشی و مرور تحقیقات مشابه صورت گرفته در این زمینه، استخراج هیدروژن به روش PEM الکترولایزر و با استفاده از گرمای هدر رفت اسکرمجت می‌تواند در حوزه این موتورها و کلا در صنعت هوافضا بسیار مفید و کاربردی باشد و تا کنون مطالعه خاصی بر روی آن صورت نگرفته است. هیدروژن تولید شده از این طریق را حتی می‌توان به چشم تامین بخشی از سوخت اسکرمجت و در نهایت بهبود عملکرد کل سیستم اسکرمجت از دیدگاه انرژی و اقتصادی ارزیابی کرد. هدف پژوهش حاضر ارائه یک سیکل جدید خنک کن بازیابی باز چند مرحله‌ای اسکرمجت است که علاوه بر انجام خنک کاری مورد نظر، توان و هیدروژن نیز تولید کند. در سیستم نوین ارائه شده توان الکتریکی ورودی مورد نیاز PEM از طریق توان تولید شده در زیر سیکل توان تامین می‌شود. این در حالی است که گرمای هدر رفت اسکرمجت به عنوان منبع گرمایی اصلی سیکل در نظر گرفته شده است.

۲-توصیف سیکل

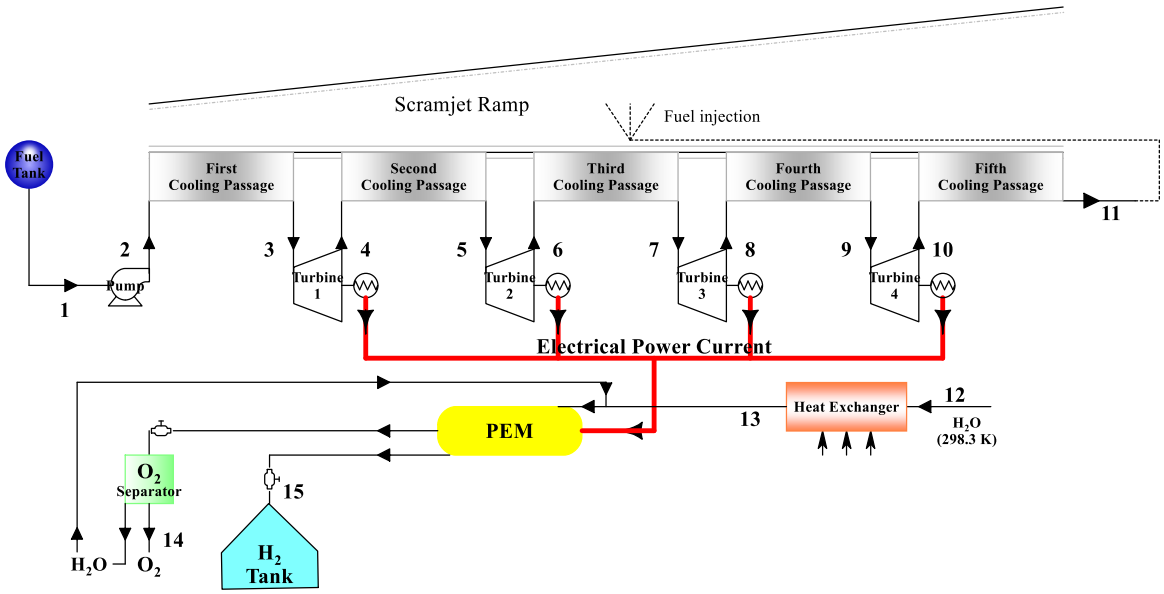
شماتیکی از سیکل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید. سیکل ارائه شده از دو زیر سیکل خنک کاری به همراه تولید توان و زیر سیکل PEM با هدف تولید هیدروژن تشکیل شده است. هیدروژن مایع از مخزن سوخت به ورودی مسیر خنک اول (نقطه۲) پمپاژ می‌شود. این عمل توسط پمپی که در خروجی مخزن سوخت قرار گرفته (نقطه ۱) صورت می‌گیرد. هیدورژن، که در این سیستم به عنوان مبرد-سوخت مورد استفاده قرار گرفته است، در همان حال که به صورت پیوسته به درون مسیر خنک کن جاری می‌شود با جذب گرما از محفظه سوخت اسکرمجت به سرعت تبدیل به گاز فوق بحرانی می‌شود. سپس هیدروژن فوق بحرانی وارد توربین اول می‌شود (نقطه ۳). هیدروژن تحت شرایط آیزنتروپیک منبسط شده و توان الکتریکی تولید می‌کند. در طی این فرآیند دمای هیدروژن افت پیدا می‌کند و خنک می‌شود و می‌توان دوباره از ظرفیت خنک کاری آن استفاده کرد. هیدروژن خنک شده با جریان یافتن در مسیر خنک کن دوم (فرآیند ۴-۵) دوباره تا شرایط فوق بحرانی گرم شده و با عبور از توربین دوم دمای آن کاهش یافته و توان الکتریکی تولید می‌کند (فرآیند ۵-۶). این فرآیند

[1] Molten Carbone Fuel Cell

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

گرم شدن مبرد با هدف خنک کاری اسکرمجت و سرد شدن آن در طی عبور از توربین با هدف تولید توان دو بار دیگر نیز به طور پیوسته در مسیرهای خنک کن سوم و چهارم (فرآیند های ۶-۷ و ۸-۹) و همچنین توربین های ۳ و ۴ (فرآیند های ۷-۸ و ۹-۱۰) تکرار می‌شود. سرانجام خروجی آخرین مسیر خنک کن اسکرمجت به عنوان سوخت وارد محفظه احتراق می‌شود (نقطه ۱۱). و سیکل باز خنک کاری چند مرحله‌ای را کامل می‌کند. PEM الکترولایزر برای تولید هیدروژن نیاز به توان الکتریکی و مقداری گرما دارد. همانطورکه در شکل (۱) نشان داده شده است. آب ورودی به PEM (نقطه۱۲) به منظور رسیدن به دمای محفظه PEM با عبور از یک مبدل حرارتی پیش گرم می‌شود (فرآیند ۱۲-۱۳). در فرآیند الکترولایزینگ گاز هیدروژن H_2 به وسیله جریان الکتریکی وارده یونیزه شده و شروع به ترک کاتد می‌کند. هیدروژن تولیدی به وسیله اتصالات موجود به سمت مخزن ذخیره گاز هیدروژن هدایت شده و در آنجا ذخیره می‌شود (نقطه ۱۵). در سمت آند نیز گاز اکسیژن در اثر یونیزه شدن آزاد شده و پس از جداسازی از آب و بخار آب اضافی باقی مانده از واکنش، در مخزن مخصوص خود ذخیره می‌شود (نقطه۱۴). آب اضافی باقیمانده از واکنش به محفظه الکترولایزر، به منظور استفاده دوباره در فرآیند های بعدی، بازگردانده می‌شود و بدین شکل سیکل تولید هیدروژن را تکمیل می‌کند.



شکل ۱- شماتیک سیستم خنک بازیابی باز چند مرحله‌ای اسکرجت ارائه شده

۳-فرضیات و روابط حاکم بر مساله

۳-۱ فرضیات

- مدلسازی ریاضی حالت پایا-جریان پایا
- گرمای ویژه ثابت
- گاز کامل بعد از مسیر خنک کن اولیه
- هیچ افت فشاری در مسیر خنک کن وجود ندارد.
- هیچ اتلاف گرمایی در توربین وجود ندارد.
- معادلات ترمودینامیکی صفر بعدی حاکم است.
- دما و فشار مرجع به ترتیب: ۲۹۸ درجه کلوین و ۰/۱۰۱ مگاپاسکال است.
- دمای بدنه اسکرمجت ثابت و برابر با دمای میانگین بدنه در نظر گرفته شده است.
- بازده آیزنتروپیک توربین ها : ۸۰ درصد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

- بازده آیزنتروپیک پمپ: ۷۰ درصد
- آب در دمای ۲۹۸ درجه کلوین وارد مبدل حرارتی PEM می‌شود.
- هیچ اتلاف انرژی در الکترولایزر وجود ندارد.

۲-۳ مدلسازی PEM

روابط حاکم بر محاسبات مربوط به PEM به یک مدلسازی ترموالکتریک منجر می‌شود. انرژی کل مورد نیاز الکترولایزر را می‌توان به شکل زیر به دست آورد[۲۸]:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (۱)$$

که در آن ΔG انرژی آزاد گیبس و $(T\Delta S)$ انرژی حرارتی مورد نیاز است. مقادیر مورد نیاز و برای هیدروژن، اکسیژن و آب در جداول ترمودینامیکی موجود است [۲۸]. انرژی کل برابر با مقدار انرژی است که در تئوری برای الکترولیز آب بدون هیچگونه تلفات مورد نیاز است. نرخ دبی جرمی مولار هیدروژن از رابطه زیر به دست آورده می‌شود [۲۳]:

$$\dot{N}_{H_{2out}} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O,reacted} \quad (۲)$$

که درآن J چگالی جریان و F ثابت فارادی می‌باشد. نرخ انرژی الکتریک ورودی به PEM برابر است با:

$$E_{electric} = JV \quad (۳)$$

که در آن $E_{electric}$ برابر با نرخ انرژی الکتریکی ورودی است و V به شکل زیر به دست می‌آید:

$$V = V_0 + V_{act,a} + V_{act,c} + V_{o\square m} \quad (۴)$$

V_0پتانسیل بازگشت پذیر است، که از تفاوت بین انرژی آزاد واکنش دهنده و محصول ناشی می‌شود و از معادله نرنست[1] به دست می‌آید [۲۳]:

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{PEM} - 298) \quad (۵)$$

$V_{act,a}$، $V_{act,c}$ و $V_{o\square m}$به ترتیب پتانسیل فعالسازی آند، پتانسیل فعالسازی کاتد، پتانسیل فعالسازی اهمیک الکترولیت تعریف می‌شوند. پتانسل اهمیک در PEM ناشی از مقاومت عضو مبادله‌گر پروتون در برابر تبادل یون‌های هیدروژن است. مقاومت اهمیک عضو مبادله گر در ارتباط با درجه رطوبت و همچنین ضخامت آن است [۲۳]. تابع رسانائی یونی مکانی PEM $(\lambda(x))$ توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۲۹]:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326]\, exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (۶)$$

که در آن x برابر با فاصله اندازه گیری شده از سطح کاتد در هر مکان از درون PEM است. مقدار $\lambda(x)$ را می‌تواند توسط مقادیر محتوای آب در لبه صفحه‌ی الکترود های کاتد و آند به دست آورد:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D}x + \lambda_c \quad (۷)$$

که در آن D نشان دهنده ضخامت عضو مبادله گر، λ_c و λ_a نشانگر محتوای آب در سطح کاتدی و آندی هستند. مقاومت اهمیک کلی از رابطه زیر به دست می‌آید:

[1] Nernst equation

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (۸)$$

بر اساس قانون اهم، ما معادله زیر را برای پتانسیل اهمیک داریم:

$$V_{o\square m,PEM} = JR_{PEM} \quad (۹)$$

پتانسل فعالسازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} sin\square^{-1}\left(\frac{J}{2J_{a,i}}\right), i = a, c \quad (۱۰)$$

که در آن چگالی جریان مبادله‌ای است، یک پارامتر مهم در محاسبه پتانسل فعالسازی است، و از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$J_{0,i} = J_i^{ref}\, exp\left(-\frac{E_{act,i}}{RT}\right), i = a, c \quad (۱۱)$$

که در آن J_i^{ref} ضریب پیش پتانسیل مرجع و $E_{act,i}$ انرژی فعالسازی برای کاتد و آند است.

۳-۳ تحلیل ترمودینا میکی

در این بخش، مدلسازی ترمودینامیکی سیستم ارائه شده با جزئیات بیان می‌شود. هر یک از اجزای سیستم به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود. فرم عمومی معادلات بقای جرم و انرژی برای هر حجم کنترل در شرایط جریان ثابت به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (۱۲)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out}\,\square_{out} - \sum \dot{m}_{in}\,\square_{in} \quad (۱۳)$$

بازده انرژی سیکل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{en} = \frac{LHV_{H_2}.\dot{m}_{15} + (1-\eta_G).\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{total}} \quad (۱۴)$$

که در آن LHV_{H_2} سطح پایین محتوای انرژی H_2 بوده و از منابع و مراجع ترمودینامیکی قابل حصول است و مقدار آن برابر است با (kJ/kg) 120.211 در نظر گرفته شده است[28]. و همچنین $\dot{Q}_{total}$ ظرفیت خنک کاری کل که به عنوان منبع گرمایی اصلی سیستم مطرح شده است.

یک توربین در نظر می‌گیریم که در طی یک فرآیند آیزنتروپیک بین دو حالت b وc کار می‌کند، مطابق شکل (۲). و با فرض اینکه هیچگونه اتلافی از لحاظ اصطکاک مکانیکی در سیستم توربین وجود نداشته باشد، با استفاده از روابط ترمودینامیک برای دمای خروجی توربین داریم [۲۸]:

$$T_c = T_b\{1 - \eta_t[1 - \pi^{(1-\gamma)/\gamma}]\} \quad (۱۵)$$

با استفاده از معادله بالا برای توان مخصوص توربین نیز داریم:

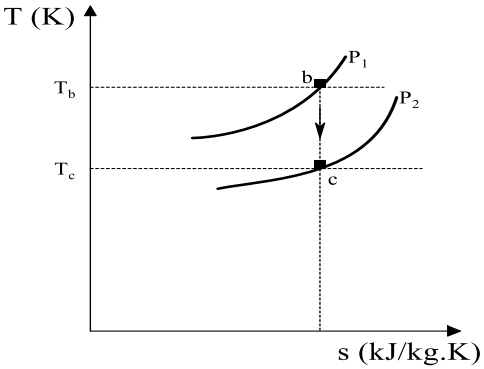
$$w_t = \eta_t C_p T_b[1 - \pi^{(1-\gamma)/\gamma}] \quad (۱۶)$$

در روابط بالا η_t بازده آیزنتروپیک توربین، C_pظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت سیال، نسبت ظرفیت گرمایی سیال γ و π نسبت فشار توربین می‌باشد که به شکل زیر بیان می‌شود:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

$$\pi = \frac{p_b}{p_c} \quad (۱۷)$$



شکل ۲- دیاگرام T-S یک مرحله انبساط آیزنتروپیک توربین

برخی از معادلات ترمودینامیکی بر اساس روابط تعادل انرژی و جرمی در جدول (۱) لیست شده اند.

جدول ۱- معادلات انرژی اجزای تشکیل دهنده سیکل شبیه سازی شده

پارامترها	معادلات
بار حرارتی مسیر خنک کن iام	$\dot{Q}_i = \dot{m}_i . C_p . (T_{2i+1} - T_{2i})$
کار مخصوص توربین iام	$w_{ti} = \eta_t C_p T_{2i+1}\left[1 - \pi_i^{(1-\gamma)/\gamma}\right]$
کار مخصوص پمپ	$w_p = \frac{P_2 - P_1}{\eta_p \rho_1}$
توان خالص مخصوص	$w_{net} = \sum_{i=1}^{4} w_{ti} - w_p$
تولید الکتریسیته خالص	$\dot{W}_{net} = \dot{m}_0 . w_{net}$
بار حراراتی مبدل حراراتی	$Q_{HE} = \dot{m}_w . (□_{13} - □_{12})$
ظرفیت خنک کاری کل	$\dot{Q}_{total} = \sum_{i=1}^{5} \dot{Q}_i + \dot{Q}_{HE}$

معادله تعادل اگزرژی برای عضو i ام یک سیستم به شکل زیر قابل بیان است [30]:

$$\dot{E}x_D^i = \dot{E}x_F^i - \dot{E}x_P^i \quad (۱۸)$$

$\dot{E}x_D^i$نرخ تخریب اگزرژی عضو i ام و $\dot{E}x_F^i$و $\dot{E}x_P^i$ به ترتیب نرخ های اگزرژی سوخت و محصول هستند. به طریق مشابه برای کل سیستم معادله تعادل اگزرژی را به صورت زیر داریم:

$$\dot{E}x_D^{total} = \dot{E}x_F^{total} - \dot{E}x_P^{total} \quad (۱۹)$$

بازده اگزرژی جزء i ام به صورت زیر تعریف می‌شود[30]:

$$\eta_{ex}^i = \dot{E}x_P^i / \dot{E}x_F^i \quad (۲۰)$$

و به طریق مشابه برای بازده اگزرژی کل سیستم داریم که:

$$\eta_{ex}^{total} = \dot{E}x_P^{total} / \dot{E}x_F^{total} \quad (۲۱)$$

علاوه بر این، به منظور مقایسه بین تخریب اگزرژی در بین اجزای مختلف سیستم پارامتر نسبت تخریب اگزرژی تعریف می‌شود:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

$$Y_D^i = \dot{E}x_D^i / \dot{E}x_D^i \quad (۲۲)$$

معادلات تحلیل اگزرژی برخی از اجزای مهم سیستم در جدول (۲) آورده شده اند.

جدول -۲ معادلات تحلیل اگزرژی برخی از اجزای مهم سیستم

اجزا	اگزرژی سوخت	اگزرژی محصول	تخریب اگزرژی	نسبت تخریب اگزرژی
مسیر خنک کن i ام	$\dot{E}x_{F,i} = \dot{Q}i\left(1-\frac{T_0}{T_{ref-scr}}\right)$	$\dot{E}x_{P,Q1} = \dot{E}x_3 - \dot{E}x_2$	$\dot{E}x_{D,Q1} = \dot{E}x_{F,Q1} - \dot{E}x_{P,Q1}$	$y_{D,Qi=\frac{\dot{E}x_{D,Qi}}{\dot{E}x_{D,total}}}$
توربین i ام	$\dot{E}x_{F,ti} = \dot{E}x_{2i+1} - \dot{E}x_{2i+2}$	$\dot{E}x_{P,ti} = \dot{m}_i.w_{ti}$	$\dot{E}x_{D,ti} = \dot{E}x_{F,ti} - \dot{E}x_{P,ti}$	$y_{D,ti=\frac{\dot{E}x_{D,ti}}{\dot{E}x_{D,total}}}$
پمپ	$\dot{E}x_{F,p} = \dot{m}_1.w_p$	$\dot{E}x_{P,p} = \dot{E}x_2 - \dot{E}x_1$	$\dot{E}x_{D,p} = \dot{E}x_{F,p} - \dot{E}x_{P,p}$	$y_{D,p} = \frac{\dot{E}x_{D,p}}{\dot{E}x_{D,total}}$
PEM	$\dot{E}x_{F,_{PEM}} = \eta_G.\dot{W}_{net}$	$\dot{E}x_{P,PEM} = \dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{16}$	$\dot{E}x_{D,PEM} = \dot{E}x_{F,PEM} - \dot{E}x_{P,PEM}$	$y_{D,PEM} = \frac{\dot{E}x_{D,PEM}}{\dot{E}x_{D,total}}$
مبدل حرارتی	$\dot{E}x_{F,HE} = Q_{HE}\left(1-\frac{T_0}{T_{ref-HE}}\right)$	$\dot{E}x_{P,HE} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{12}$	$\dot{E}x_{D,HE} = \dot{E}x_{F,HE} - \dot{E}x_{P,HE}$	$y_{D,HE} = \frac{\dot{E}x_{D,HE}}{\dot{E}x_{D,total}}$

۴-نتایج

در این بخش به ارائه و بررسی نتایج حاصل از اجرای برنامه کامپیوتری که به منظور تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم مورد نظر در نرم افزار Engineering equation solver (EES) توسعه داده شده است، پرداخته می‌شود. به منظور اجرای کد یکسری اطلاعات به عنوان داده های ورودی لازم است که در جداول (۳) و (۴) آورده شده اند. جدول (۳) شامل برخی داده‌های مهم ورودی لازم جهت شبیه سازی کلی است و جدول (۴) برخی پارامترهای ورودی که برای مدلسازی الکتروشیمیایی PEM مورد نیاز را شامل می‌شود.

جدول ۳- برخی داده های ورودی مورد نیاز شبیه سازی

پارامتر	مقادیر
$P_2(MPa)$فشار پشت پمپ،	۲۲
$T_{av}(K)$دمای میانگین بدنه اسکرمجت،	۱۰۰۰
$P_{11}(MPa)$فشار محفظه احتراق اسکرمجت،	۱
$T_1(K)$دمای مخزن سوخت،	۲۵
$P_1(MPa)$فشار مخزن سوخت،	۰/۲۴
$\dot{m}_0(kg/s)$نرخ دبی جرمی جریان،	۰/۴
$\dot{m}_{12}(kg/s)$PEMنرخ دبی جرمی آب ورودی به	۰/۲
$T_{12}(K)$, دمای آب ورودی به اسکرمجت،	۲۹۸
$T_{PEM}(K)$ ، PEMدمای	۳۵۳
η_tبازده توربین،	۰/۸
η_pبازده پمپ،	۰/۷
η_Gبازده توان ژنراتور،	۰/۶۵

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

جدول ۴- پارامترهای ورودی استفاده شده به منظور شبیه سازی[25] PEM

پارامتر	مقادیر
$P_{O_2}(MPa)$	0.1
$P_{H_2}(MPa)$	0.1
$T_{PEM}(K)$	353
$E_{act,a}(kJ/mol)$	76
$E_{act,c}(kJ/mol)$	18
$\lambda_a\ (\Omega^{-1})$	14
$\lambda_c\ (\Omega^{-1})$	10
$D(\mu m)$	100
$J_c^{ref}(A/m^2)$	1.7×10^5
$J_a^{ref}(A/m^2)$	4.6×10^3
$F(C/mol)$	96486

با اجرای کد توسعه داده شده برخی پارامترهای کلیدی جریان شامل دما، فشار، دبی جرمی، آنتالپی، آنتروپی و اگزرژی برای نقاط سیکل ارائه شده (مطابق شکل۱) به دست می‌آیند که در جدول (۵) آورده شده اند.

جدول ۵- پارامترهای ترمودینامیکی جریان در هر نقطه از سیکل

شماره نقطه	T (K)	P (MPa)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s $(kJ/kg.K)$	$\dot{E}x$ (kW)
1	25	0.24	0.4	479.4	20.25	2510
2	54.9	22	0.4	579.8	20.25	2551
3	1000	22	0.4	14387	48.83	4758
4	714.4	4.69	0.4	10010	50.22	2846
5	1000	4.69	0.4	14235	55.19	3959
6	841.5	2.166	0.4	11856	55.81	2936
7	1000	2.166	0.4	14213	58.38	3581
8	916.4	1.472	0.4	12959	58.67	3045
9	1000	1.471	0.4	14207	59.97	3393
10	916.4	1	0.4	12954	60.26	2859
11	1000	1	0.4	14202	61.57	3207
12	290	0.101	0.0321	70.75	0.251	77.51
13	353	0.101	0.0321	334.3	1.073	78.31
14	353	0.101	0.0929	50.36	0.156	12.04
15	353	0.101	0.01171	4720	55.81	2.379

۴-۱ اعتبار سنجی

به منظور اعتبار سنجی سیکل خنک کن بازیاب اسکرمجت، سیستم ارائه شده در تحقیق کین و همکاران [۱۲] مورد مطالعه مقایسه ای قرار گرفته و نتایج در قالب جدول (۶) مشخص شده است.

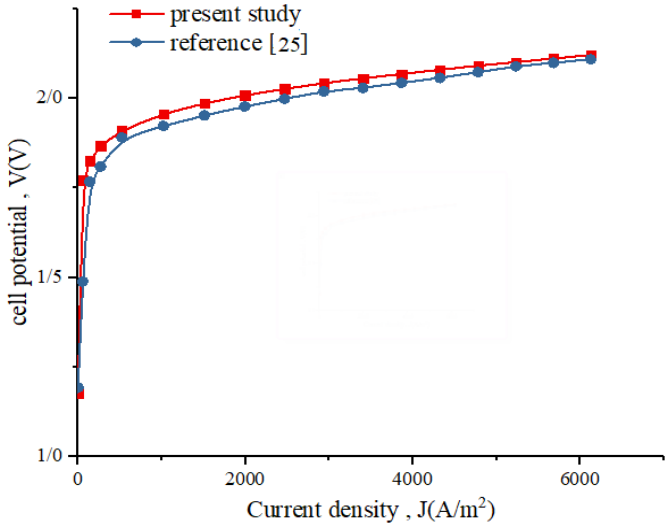
همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌کنید، نتایج اعتبار سنجی سیکل خنک کن بازیابی اسکرمجت حاکی از این است که کد محاسباتی نوشته شده برای مدلسازی و تحلیل سیکل خنک کن بازیابی پژوهش حاضر از نظر صحت عملکردی مطابقت خوبی با نتایج ارائه شده در مطالعه کین و همکاران داشته و بیشترین درصد خطای محاسباتی ۲/۶ درصد بوده است.

برای اعتبار سنجی PEM از نتایج حاصل از تحقیق احمدی و همکاران [۲۵] استفاده شده است. در شکل (۳) نتایج اعتبارسنجی تحقیق حاضر مشاهده می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

جدول ۶- اعتبار سنجی مربوط به سیکل خنک کن بازیاب برای مدل سیستم ارائه شده در این مطالعه [12]

پارامترهای مقایسه ای	فشار پشت پمپ، $P_2(MPa)$											
	3		5		10		15		20		24	
	Present study	Qin et al	Present study	Qin et al	Present study	Qin et al	Present study	Qin et al	Present study	Qin et al	Present study	Qin et al
δ (%)	27.53	27.63	37.11	37.81	49.04	49.44	55.15	55.25	58.89	58.99	61.2	61.2
درصد خطا(%)	0.3		1.8		0.8		0.2		0.1		0	
ϕ (%)	21.14	21.65	27.23	27.43	32.85	33.08	35.1	35.59	36.5	37.1	37.8	37.96
درصد خطا(%)	2.3		0.7		0.5		1.4		1		0.2	
$w_{net}\left(\frac{MJ}{kg}\right)$	3.947	3.891	5.400	5.305	7.062	6.866	7.792	7.596	8.425	8.30	8.541	8.266
درصد خطا(%)	1.25		1.8		2.1		2.6		1.4		2.5	



شکل ۳- اعتبار سنجی PEM مربوط به مطالعه حاضر با کار احمدی و همکاران [۲۵]

شکل (۳) به خوبی نشان می‌دهد که مدلسازی الکتروشیمیایی PEM در مطالعه حاضر از دقت و صحت عملکردی خوبی برخوردار بوده است. بطوریکه بیشترین خطای ایجاد شده بین نتایج کار حاضر با مطالعه صورت گرفته توسط احمدی و همکاران کمتر از ۲ درصد بوده است.

۴-۲ نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی

حال در این بخش به نتایج حاصل تحلیل انرژی سیستم ارائه شده و اجزای آن پرداخته می‌شود. با توجه به شکل (۱) و روابط ترمودینامیکی بیان شده در بخش۳، مهم ترین نتایج حاصل از تحلیل انرژی در قالب جدول (۷) بیان گردیده اند.

مطابق با این نتایج، مشاهده می‌شود که بیشترین خنک کاری توسط مسیر خنک کن اول صورت گرفته است. علت این امر وجود اختلاف دمای خیلی زیاد بین هیدروژن مایع ورودی به مسیر خنک کن اول و هیدروژن در حالت بحرانی خروجی مسیر خنک کن اول و درنتیجه اختلاف بالای آنتالپی ورودی و خروجی مسیر خنک کن اول می‌باشد. چرا که، طبق روابط (جدول ۱)، گرمای جذب شده توسط مسیر خنک کن رابطه مستقیمی با اختلاف دمای ورودی و خروجی دارد. در مورد تولید توان نیز طبق نتایج جدول، توربین۱ بیشترین نرخ تولید توان را در بین توربین ها دارد. این موضوع از نسبت فشار کاری بالای توربین ناشی می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

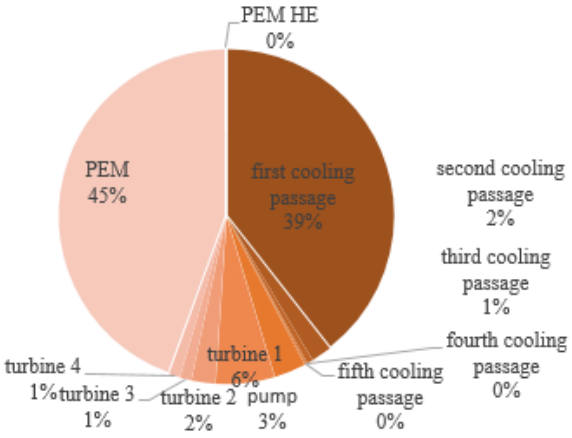
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

چون طبق روابط توان توربین، توان تولیدی توسط توربین با نسبت فشار توربین رابطه مستقیم دارد. میزان تولید هیدروژن این سیکل با نرخ تولید ۴۲,۱۲ کیلو گرم در ساعت، مقدار قابل توجهی است. بازده انرژی سیکل ارائه شده ۱۳,۰۱ درصد است و در مقایسه با سیستم های استفاده کننده از منابع گرمایی سطح پایین مشابه، که معمولا بازده های پایینی دارند، می‌توان ارزیابی بازده خوب را به بازده آن نسبت داد. در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی برای عملکرد سیستم در قالب جداول و نمودارها خواهیم پرداخت. جدول (۸) نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی برای سیکل ارئه شده در تحقیق را نشان می‌دهد. ستون های جدول از راست به چپ به ترتیب مربوط به اجزای تشکیل دهنده سیکل، اگزرژی سوخت هر جز، اگزرژی محصول هر جز، تخریب اگزرژی هر جز و درصد تخریب اگزرژی هر جز هستند.

جدول ۷- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\dot{Q}_1(kW)$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن اول،	۵۵۲۳	$w_{t3}(\frac{MJ}{kg})$توان توربین ۳،	۱,۲۱۷
$\dot{Q}_2(kW)$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن دوم،	۱۶۹۰	$w_{t4}(\frac{MJ}{kg})$توان توربین ۴،	۱,۲۱۷
$\dot{Q}_3(kW)$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن سوم،	۹۴۲,۵	$\dot{W}_{net}(kW)$ توان خالص خروجی،	۳۳۸۶
$\dot{Q}_4(kW)$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن چهار،	۴۹۹,۲	$\dot{W}_G(kW)$ ، PEMتوان ورودی	۲۲۰۱
$\dot{Q}_5(kW)$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن پنجم	۴۹۹,۲	$\dot{m}_{H_2}(kg/h)$تولید هیدروژن،	۴۲,۱۴
$w_{t1}(\frac{MJ}{kg})$توان پمپ،	۰,۴۳۵۳	$\dot{Q}_{HE}(kW)$ ، PEMبارحرارتی مبدل	۵۲,۷۲
$w_{t1}(\frac{MJ}{kg})$توان توربین ۱،	۴,۱۵۸	$\dot{Q}_{total}(kW)$ظرفیت خنک کاری کل،	۹۲۰۶,۲۶
$w_{t2}(\frac{MJ}{kg})$توان توربین ۲،	۲,۳۰۸	$\eta_{en}(\%)$بازده انرژی کل سیستم،	۱۳,۰۱

نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی بیانگر این موضوع است که بازده اگزرژی کل سیکل برابر ۲۲,۱۲ درصد است. همانطور که در جدول بالا مشاهده می‌شود PEM با بیش از ۴۴ درصد تخریب اگزرژی بالاترین میزان تخریب اگزرژی را در بین اجزای سیکل ارائه شده دارد و دلیل این امر وقوع واکنش شیمیایی است. واکنش های شیمیایی یکی از منابع اصلی تخریب اگزرژی در یک سیستم ترمودینامیک هستند. بعد از PEM مسیر خنک کن اول، با نزدیک به ۴۰ درصد تخریب اگزرژی در جایگاه دوم قرار دارد. تخریب اگزرژی بالای مسیر خنک کن اول با توجه به اختلاف دمای کاری زیاد آن قابل تفسیر است. چرا که اختلاف دمای زیاد نیز یکی از عوامل اصلی تخریب اگزرژی در سیستم های ترمودینامیکی است. پس می‌توان این طور نتیجه گرفت که هرگونه تلاش در جهت بهبود عملکرد سیستم از نظر اگزرژی باید در جهت کاهش اتلاف اگزرژی در دو جزء PEM و مسیر خنک کن اول صورت گیرد. به منظور نمایش هرچه بهتر منابع اصلی تخریب اگزرژی در سیستم، نمودار دایروی درصد تخریب اگزرژی سیستم نیز مطابق شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴- نمودار دایروی توزیع تخریب اگزرژی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

جدول ۸- نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی

اجزای سیکل	$\dot{E}x_F(kW)$	$\dot{E}x_P(kW)$	$\dot{E}x_D(kW)$	$\eta_{ex}(\%)$	$Y_D(\%)$
مسیر خنک کن اول	۳۹۲۱	۲۲۰۷	۱۷۱۴	۵۶,۲۸	۳۹,۴۱
مسیر خنک کن دوم	۱۲۰۰	۱۱۱۳	۸۶,۶۳	۹۲,۷۸	۱,۹۹۲
مسیر خنک کن سوم	۶۶۹,۴	۶۵۴,۲	۲۴,۲	۹۶,۳۸	۰,۵۵۶۴
مسیر خنک کن چهارم	۳۵۴,۴	۳۴۸	۶,۴۰۳	۹۸,۱۹	۰,۱۴۷۲
مسیر خنک کن پنجم	۳۵۴,۴	۳۴۸	۶,۴۰۳	۹۸,۱۹	۰,۱۴۷۲
پمپ	۱۷۴,۱	۴۰,۱۴	۱۳۴	۲۳,۰۵	۳,۰۸۱
توربین ۱	۱۹۱۲	۱۶۶۳	۲۸۴,۶	۸۷	۵,۷۱۶
توربین ۲	۱۰۲۴	۹۲۳,۱	۱۰۰,۵	۹۰,۱۸	۲,۳۱
توربین ۳	۵۳۵,۳	۴۸۷	۴۸,۲۸	۹۰,۹۸	۱,۱۱
توربین ۴	۵۳۴,۵	۴۸۷	۴۷,۵	۹۱,۱۱	۱,۰۹۲
PEM	۲۲۰۱	۲۶۹,۶	۱۹۳۱	۱۲,۲۵	۴۴,۴۱
PEMمبدل حرارتی	۱,۸۸۳	۰,۸۰۴۶	۱,۰۷۸	۴۲,۷۴	۰,۰۲۴۷
کل سیستم	۶۵۰۱	۱۴۴۰	۵۰۶۱	۲۲,۱۲	-

۴-۳ مطالعه پارامتری

در این بخش اثر دو پارامتر مهم بر روی اصلی ترین محصولات و اهداف سیستم ارائه شده مورد مطالعه قرار گرفته است. نرخ دبی جرمی سوخت و فشار پشت پمپ پارامترهای انتخابی به منظور مطالعه هستند.

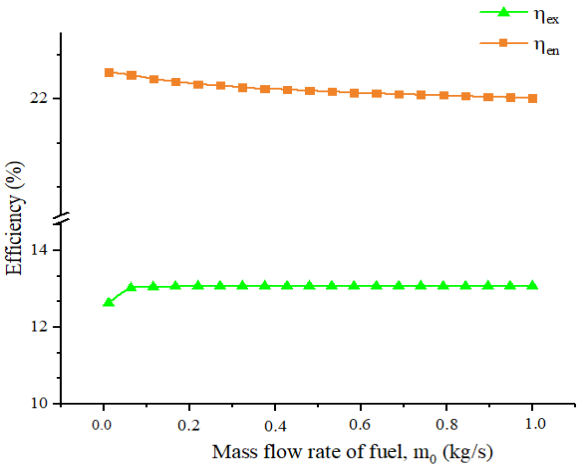
۴-۳-۱ تاثیر نرخ دبی جرمی سوخت بر روی سیستم

در شکل (۵) اثرات نرخ دبی جرمی سوخت بر روی توان خالص تولیدی، ظرفیت خنک کاری کل، تولید هیدروژن و همچنین بازده انرژی و اگزرژی نشان داده شده است. هر سه محصول اصلی سیکل ارائه شده یعنی تولید توان، خنک کاری اسکرمجت و تولید هیدروژن با افزایش دبی جرمی سوخت افزایش می‌یابند (شکل a-۵). و میزان توان تولیدی و خنک‌کاری اسکرمجت رابطه مستقیم با نرخ دبی جرمی سوخت اسکرمجت دارند. از طرفی تفاضل انرژی جریان در ورودی و خروجی هر یک از تجهیزات تولید توان و خنک کاری ثابت باقی مانده است. بنابراین افزایش دبی جرمی به معنای افزایش تولید توان و خنک کاری خواهد بود. علاوه بر این، افزایش توان تولیدی که بخشی از آن به عنوان ورودی توان الکتریکی PEM است، موجب افزایش چگالی جریان الکترولایزر می‌شود (طبق معادله ۳). از طرفی افزایش چگالی جریان الکترولایزر سبب افزایش تولید هیدروژن می‌شود. بازده انرژی و اگزرژی سیستم با تغییرات نرخ دبی جرمی سوخت تقریبا ثابت هستند. اینطور می‌توان استدلال کرد که با تغییر نرخ دبی جرمی هر دو پارامتر انرژی تولیدی و مصرفی برای تولید تقریبا به یک نسبت یکسان افزایش می‌یابند. و بازده انرژی و اگزرژی

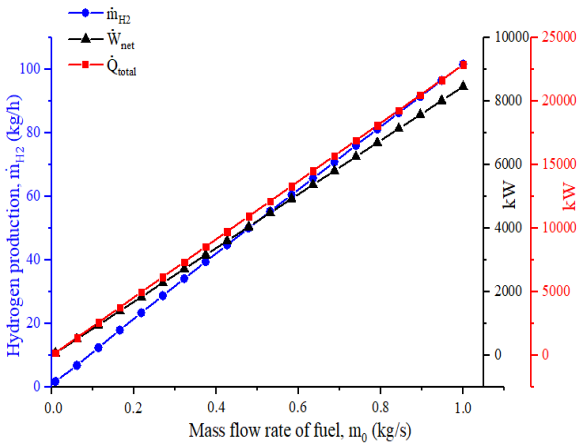
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

هر دو مقیاسی هستند حاصل از تقسیم این دو بخش تولید و مصرف انرژی، پس در نتیجه ثابت باقی خواهند ماند. شکل (۵-b) این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل (۵-b)



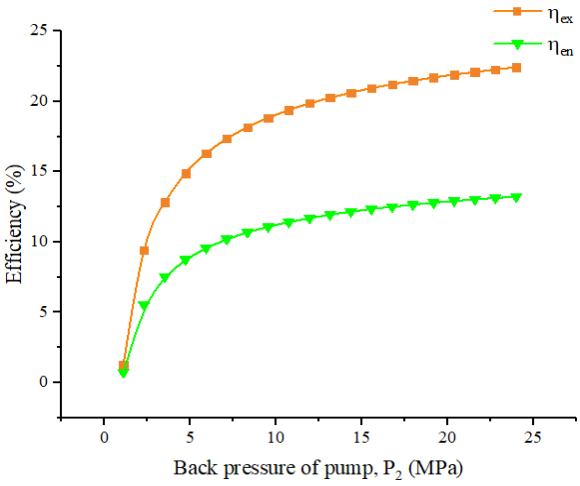
شکل (۵-a)

شکل ۵- اثر تغییرات نرخ دبی جرمی سوخت بر سیستم

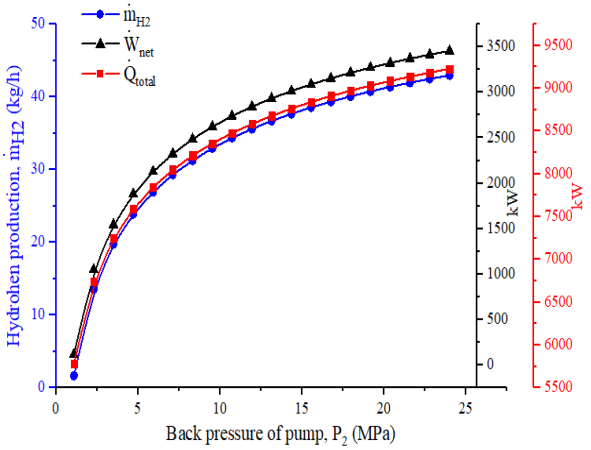
۴-۳-۲ اثر فشار پشت پمپ بر سیستم

اثر تغییرات فشار پشت پمپ بر سیستم در قالب دو قسمت a وb شکل (۶) نشان داده شده است. قسمت a در شکل (۶) اثر تغییرات فشار پشت پمپ بر خالص توان تولیدی، میزان خنک کاری اسکرمجت و همچنین تولید هیدروژن را نشان می‌دهد. که هر سه این پارامترها با افزایش فشار پشت پمپ روند صعودی به خود می‌گیرند. افزایش فشار پشت پمپ به معنای افزایش نسبت فشار کاری توربین ها است. و ما از روابط توان توربین می‌دانیم که توان تولیدی توربین با نسبت فشار رابطه مستقیم دارد (جدول ۱). پس در دبی جرمی سوخت ثابت با افزایش فشار پشت پمپ توان تولیدی افزایش می‌یابد و بلعکس. از طرفی دمای نقاط ورودی مسیر های خنک کن رابطه مستقیم با نسبت فشار توربین دارد. یعنی افزایش نسبت فشار در فرآیند انبساط سیال به معنای افت فشار و دمای بیشتر است. و این افزایش دما یعنی افزایش اختلاف آنتالپی جریان ورودی و خروجی مسیرهای خنک کن. پس با افزایش فشار پشت پمپ در دبی جرمی ثابت میزان خنک کاری مسیر های خنک کن و در نتیجه ظرفیت خنک کاری کل سیکل خنک افزایش می‌یابد. همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد، افزایش تولید توان منجر به افزایش تولید هیدروژن می‌شود. قسمت b شکل (۶) تاثیر تغییرات فشار پشت پمپ بر بازده انرژی و اگزرژی را نشان می‌دهد. روند افزایش انرژی های تولیدی توسط سیستم نسبت به روند افزایش جذب گرما در مسیر های خنک کن که به عنوان منبع گرمایی راه انداز سیکل ارائه شده است، با نرخ بیشتری است. در نتیجه بازده انرژی و اگزرژی که تناسبی از حاصل تقسیم این دو پارامتر تولیدی و مصرفی هستند، روند افزایشی خواهند داشت.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]



شکل (b-۶)



شکل (a-۶)

شکل ۶- تاثیر فشار پشت پمپ بر عملکرد سیستم

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر یک سیکل جدید خنک کن بازیاب باز چند مرحله‌ای اسکرمجت به منظور تولید توان و هیدروژن ارائه شده است. که در آن، زیر بخش تولید توان از گرمای هدر رفت در فرآیند خنک کاری اسکرمجت به عنوان منبع گرمایی سیکل استفاده کرده و توان الکتریکی تولید می‌کند. بخشی از توان تولید شده در سیکل برای تامین نیاز توان PEM الکترولایزر به کار گرفته می‌شود تا با استفاده از آن هیدروژن تولید شود. تحلیل انرژی و اگزرژی به منظور ارزیابی عملکرد سیستم ارائه شده در تحقیق حاضر صورت گرفته است. و در کنار آن، یک مطالعه جامع پارامتری به منظور درک هرچه بهتر و بیشتر از عملکرد سیستم نیز صورت گرفته است. برخی نتایج قابل توجه بر اساس داده و ورودی های موجود به شرح زیر می‌باشند:

- توان خالص تولیدی سیستم ۳۳۸۶ کیلو وات می‌باشد.
- ظرفیت خنک کاری کل سیستم ۹۶۱۲ کیلو وات می‌باشد.
- مقدار هیدروژن تولیدی ۴۲,۱۴ کیلوگرم بر ساعت می‌باشد.
- بازده کل انرژی و اگزرژی سیستم ارائه شده به ترتیب ۱۳,۰۱ و ۲۲,۱۲ درصد می‌باشد.

بر طبق نتایج حاصله از تحلیل اگزرژی می‌توان واکنش شیمیایی (واکنش الکتروشیمیایی صورت گرفته در PEM) و فرآیند انتقال حرارت را به عنوان منابع اصلی تخریب اگزرژی در سیستم ارائه شده معرفی کرد.

نماد ها

$\dot{E}_x$	نرخ اگزرژی (kW)	$\dot{W}$	نرخ توان (kW)
h	آنتالپی $(kJ.kg^{-1})$	J	چگالی جریان $(A.m^{-2})$
$\dot{N}$	دبی جرمی مولار $(Mol.s^{-1})$	F	ثابت فارادی (C/mol)
$\dot{m}$	دبی جرمی $(kg.s^{-1})$	V	پتانسیل الکتریکی (V)
P	فشار (MPa)	E	انرژی الکتریکی (KJ/mol)
$\dot{Q}$	نرخ تبادل حرارتی (kW)	$\lambda(x)$	رسانایی اهمی مکانی
s	آنتروپی مخصوص $(kJ.kg^{-1}.K^{-1})$	D	ضخامت عضو میانی (m)
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت $(kJ.K^{-1})$	G	انرژی آزاد گیبس (kJ)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

علایم یونانی

η بازده (٪)

ρ چگالی ($kg.m^{-3}$)

γ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه

مراجع

[۱] E. Andrews Jr and E. Mackley, "Analysis of experimental results of the inlet for the NASA hypersonic research engine aerothermodynamic integration model.[wind tunnel tests of ramjet engine hypersonic inlets]," 1976.

[۲] R. Barthélémy, "Recent progress in the National Aerospace Plane program," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 4, no. 5, pp. 3-12, 1989.

[۳] R. Baurle and D. Eklund, "Analysis of dual-mode hydrocarbon scramjet operation at Mach 4-6.5," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 18, no. 5, pp. 990-1002, 2002.

[۴] S. Beckel, J. Garrett, and C. Gettinger, "Technologies for robust and affordable scramjet propulsion," in *14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, 2006, p. 7980.

[۵] N. Gascoin ,P. Gillard, E. Dufour, and Y. Touré, "Validation of transient cooling modeling for hypersonic application," *Journal of thermophysics and heat transfer*, vol. 21, no. 1, pp. 86-94, 2007.

[۶] E. Daniau, M. Bouchez, O. Herbinet, P.-M. Marquaire, N. Gascoin, and P. Gillard, "Fuel reforming for scramjet thermal management and combustion optimization," in *AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference*, 2005, p. 3403.

[۷] T. Kanda, G. Masuya, and Y. Wakamatsu, "Propellant feed system of a regeneratively cooled scramjet," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 7, no. 2, pp. 299-301, 1991.

[۸] B. Youn and A. Mills, "Cooling panel optimization for the active cooling system of a hypersonic aircraft," *Journal of thermophysics and heat transfer*, vol. 9, no. 1, pp. 136-143, 1995.

[۹] T. Edwards, "Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 1903-2003," *Journal of propulsion and power*, vol. 19, no. 6, pp. 1089-1107, 2003.

[۱۰] W. Bao, J. Qin, W. Zhou, and D. Yu, "Parametric performance analysis of multiple re-cooled cycle for hydrogen fueled scramjet," *international journal of hydrogen energy*, vol. 34, no. 17, pp. 7334-7341, 2009.

[۱۱] W. Bao, J. Qin, W. Zhou, and D. Yu, "Performance limit analysis of Recooled Cycle for regenerative cooling systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 8, pp. 1908-1914, 2009.

[۱۲] J. Qin, W. Bao, W. Zhou, and D. Yu, "Performance cycle analysis of an open cooling cycle for a scramjet," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 223, no. 6, pp. 599-607, 2009.

[۱۳] W. Bao, J. Qin, W. Zhou, D. Zhang, and D. Yu, "Power generation and heat sink improvement characteristics of recooling cycle for thermal cracked hydrocarbon fueled scramjet," *Science China Technological Sciences*, vol. 54, no. 4, pp. 955-963, 2011.

[۱۴] H. Cho, A. D. Smith, and P. Mago, "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization," *Applied Energy*, vol. 136, pp.۲۰۱۴ ,۱۸۵-۱۶۸ .

[۱۵] X. Li and Z. Wang, "Exergy analysis of integrated TEG and regenerative cooling system for power generation from the scramjet cooling heat," *Aerospace Science and Technology*, vol. 66, pp. 12-19, 2017.

[۱۶] A. R. Choudhuri and S. Gollahalli, "Combustion characteristics of hydrogen–hydrocarbon hybrid fuels," *International journal of hydrogen energy*, vol. 25, no. 5, pp. 451-462, 2000.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

[۱۷] W. Huang, "Design exploration of three-dimensional transverse jet in a supersonic crossflow based on data mining and multi-objective design optimization approaches," *international journal of hydrogen energy*, vol. 39, no. 8, pp. 3914-3925, 2014.

[۱۸] W. Huang, M. Pourkashanian, L. Ma, D. B. Ingham, S.-b. Luo, and Z.-g. Wang, "Effect of geometric parameters on the drag of the cavity flameholder based on the variance analysis method," *Aerospace Science and Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 24-30, 2012.

[۱۹] M. Momirlan and T. N. Veziroglu, "The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet," *International journal of hydrogen energy*, vol. 30, no. 7, pp. 795-802, 2005.

[۲۰] Z. Abdin, C. Webb, and E. M. Gray, "Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell," *international journal of hydrogen energy*, vol. 40, no. 39, pp. 13243-13257, 2015.

[۲۱] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," *International journal of hydrogen energy*, vol. 38, no. 12, pp. 4901-4934, 2013.

[۲۲] R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina, "Simple PEM water electrolyser model and experimental validation," *international journal of hydrogen energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1927-1938, 2012.

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

[۲۴] F. Marangio, M. Santarelli, and M. Cali, "Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 1143-1158, 2009.

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

[۲۶] F. Sorgulu and I. Dincer, "A renewable source based hydrogen energy system for residential applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 11, pp. 5842-5851, 2018.

[۲۷] 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," *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 631-638, 2017.

[۲۸] Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Thermodynamics: an engineering approach," *Sea*, vol. 1000, p. 8862, 2002.

[۲۹] P. Esmaili, I. Dincer, and G. Naterer, "Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production with molybdenum-oxo catalysts," *international journal of hydrogen energy*, vol. 37, no. 9, pp. 7365-7372, 2012.

[۳۰] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, "Thermal Design and Optimization John Wiley and Sons," *Inc. New York*, 1996.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]

چکیده انگلیسی:

Thermodynamic analysis of Scramjet cooling cycle for electric power and Hydrogen production via PEM

Hadi Ghaebi [1,*], Pourya seyedmatin[2], Pourya seyedmatin[3]

1,*- Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabibili, Ardabil, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, University of Tarbiat modares, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, University of Shahid Rajaei, Tehran, Iran

Received: June 2022, Accepted: September 2022

Abstract

A novel scramjet multi-stage open cooling cycle for electricity and hydrogen co-production is proposed in which the fuel of scramjet is used as coolant of cooling cycle. Thermodynamic and exergetic examination of the advanced system have been conducted to appraise the system's performance, electricity and hydrogen productions and multi-expansion effects. In this integral system, the waste heat of scramjet cooling cycle drives the power sub-cycle, whilst the PEM electrolyzer input electricity is supplied by a portion of net electricity output. It is figured out that the multi-expansion process reveals more advantages in comparison to the single-expansion process in terms of more cooling capacity, electricity, and H_2 production. For the fuel mass flow rate of 0.4 kg/s, the cooling capacity of the new proposed cycle is computed 9.16 MW, the net electricity output is calculated about 3.38 MW and the hydrogen production is attained 42.2 kg/h. On the other hand, the exergetic results have proved the fact that PEM electrolyzer has the highest exergy destruction ratio by 44% among different components of the cycle. In this case, the energy and exergy efficiencies of the overall set-up are acquired by 13.01% and 22.12%, correspondingly. The outcomes of parametric evaluation demonstrated that the electricity and hydrogen production have directly proportional to the back pressure of pump and increasing it generates more electricity and hydrogen. But, increasing the mass flow rate does not have any tangible impact on energy and exergy efficiencies of whole set-up and both remain approximately constant accordingly.

Key words: Thermodynamic analysis, Scramjet, Hydrogen; Multi-expansion, M-OCC, PEM electrolyzer,
*corresponding author : **hghaebi@uma.ac.ir**

Cite this article as: Hadi Ghaebi, Pourya seyedmatin, Pourya seyedmatin, Thermodynamic analysis of Scramjet cooling cycle for electric power and Hydrogen production via PEM. Journal of Energy Conversion, 2023, 10 (1), 1-17. DOR**:** **20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.6.4]