تولید همزمان توان و هیدروژن با استفاده از حرارت اتلافی موتور جت فضایی

هادی غائبی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

hghaebi@uma.ac.ir

پوریا سیدمتین

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

میثم نجفی ارشادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

بهزاد عباسزاده

دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۳/۵
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۱۲/۱۳

کلمات کلیدی:
تحلیل ترمودینامیکی
اسکرمجت
انبساط چند مرحله‌ای
خنک کن بازیابی چند مرحله-ای
PEM الکترولایزر

چکیده

در این پژوهش، 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 و همچنین مطالعه اثرات انبساط چند مرحله‌ای بر روی سیستم پیشنهادی پیاده سازی شد. برای دبی جرمی سوخت ۰/۴کیلوگرم 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 اعضای مختلف سیکل پیشنهادی دارد. بعد از آن مسیر خنک کن اول با بیش از ۳۹ در صد اتلاف اگزرژی رتبه دوم را از لحاظ اتلاف اگزرژی داراست. بازده انرژی و اگزرژی سیستم ارائه شده به ترتیب ۱۳/۰۱ در صد و ۲۲/۱۲ در صد به دست آمده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

۱. مقدمه

علاقه به مطالعه و توسعه وسایل نقلیه مافوق صوت با پیشران هوامکنده از قرن پیش مورد توجه قرار گرفته است. به منظور دست یافتن به و سایل 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[۱] 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 سیستم‌هایی است که برای خنک کاری 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.

در پژوهشی چنگ و همکاران [۳۱] یک طرح سیستم مدیریت حرارتی مبتنی بر سرمایش غیر مستقیم سوخت اسکرمجت را ارائه دادند، که در آن از یک مبدل حرارتی بای پس متصل به مولد برق سیکل بسته برایتون به صورت موازی برای منبع حرارتی و به صورت سری برای منبع سرد برای استفاده کامل از ظرفیت جذب حرارت سوخت استفاده شده است. نتایج به دست آمده توسط مدل کوپلینگ سیستم مدیریت حرارتی مبتنی بر خنک کننده غیر مستقیم سوخت نشان داد که این سیستم مدیریت حرارتی عملکرد بسیار خوبی در حفاظت از دیواره محفظه احتراق دارد، و بالاترین دمای دیواره محفظه احتراق در چگالی شار حرارتی با حداکثر مقدار نزدیک به ۵/۴۹ مگاوات بر متر مربع بیش از ۱۳۲۵ کلوین نیست. همچنین در پژوهشی دیگر کاندا و همکاران [۷] یک سیکل انبساطی خنک کن بازیابی برای موتور اسکرمجت با سوخت هیدروژن ارائه دادند تا ویژگی های عملکردی سیستم خنک کن بازیاب را مورد تحلیل و بررسی قرار دهند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که برای پرواز در اعداد ماخ بالا دبی جرمی سوخت مورد نیاز برای خنک کاری مورد نیاز در شرایط عملکردی مناسب، از دبی جرمی استوکیومتری سوخت تجاوز می‌کند. علاوه براین سوخت بیشتری از آنچه که برای انجام عملیات پروازی اسکرمجت مورد نیاز است باید حمل شود[۸]. از طرفی، نبود خنک کاری 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 سیستم‌های خنک کاری دو و چند مرحله‌ای اسکرمجت را با یک مطالعه صرفا پارامتری مطرح کردند [۱۰, ۱۱]. کین و همکاران [۱۲] در یک مطالعه کامل‌تر یک سیکل خنک کن بازیاب باز[۲] دو مرحله‌ای برای اسکرمجت ارائه و عملکرد آن را تحلیل نمودند. پارامترهای مهم مورد مطالعه آنها در تحقیق 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 مگاپا سکال توان خالص تولیدی ۸ کیلووات بر هر گرم سوخت در نتایج این تحقیق گزارش شده است. یو و همکاران [۳۲] نیز ویژگی های انتقال حرارت آشفته سوخت های هیدروکربنی در موتور های اسکرمجت با واکنش های شیمیایی گرمازا را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که واکنش های شیمیایی گرمازا عملکرد انتقال حرارت همرفتی را بهبود می بخشند، حتی اگر تغییرات عدد رینولدز سیال و عدد پرانتل حاصل از شیمی کوچک باشد.

[۱] Scramjet

[۲] Open Cooling Cycle

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

امروزه با توجه به لزوم استفاده هرچه موثرتر از منابع محدود انرژی موجود، موضوع بازیابی انرژی هدررفت 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 که نیازمند مقادیر قابل توجهی توان هستند که 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 ۶۱/۶۹ کیلووات را به ازای دبی جرمی جریان سوخت ۰/۴ کیلوگرم بر ثانیه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، اندک مطالعات صورت گرفته نیز صرفا تولید توان مطرح شده است بدون توجه 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. 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 سوخت‌های 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 اجزا سازنده آن (فرآیند الکترولیز) بد ست آورد. الکترولیز آب یک فرآیند الکترو شیمیایی است. سه نوع مختلف الکترولیز آب وجود دارد: الکترولیز آلکالاین، اکسید جامد و PEM[۳] 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 شیمیایی خطرناک بودن [۲۰] اشاره کرد. استفاده از PEM برای تولید هیدروژن یکی از رایج ترین روش های تولید هیدروژن در سیستم های استفاده کننده از منابع سطح پایین به دلیل سازگاری خوب با این سیستم ها به عنوان تکنولوژی تولید هیدروژن آینده معرفی شده است [۲۱, ۲۲]. از این رو مطالعات زیادی نیز بر روی آنها صورت گرفته است.

لوئنگ و همکاران[۲۳] 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 ارئه دادند. که در آن از الگوی اتلاف اهمی پیچیده‌ای در الکترودها و جسم میانی استفاده کرده اند. در تحقیق دیگری 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 می شود. در نتایج حاصل از تحلیل آنها بازده انرژی۳/۶ در صد و بازده اگزرژی ۲۲/۷درصد 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 هر دو 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 سازگاری مناسب با محیط را دارند. نامی و همکاران [۲۷] یک

[۳] Protone Exchange Membrain

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

تحلیل انرژی و اگزرژی بر روی تولید هیدروژن از گرمای هدر رفت از یک سیستم نمونه MCFC[۴] تلفیق شده با سیکل رانکین ارگانیک و PEM ارائه کرده اند. خالص تولید توان گزارش شده در این تحقیق۱۳۱,۲۱ مگاوات است.

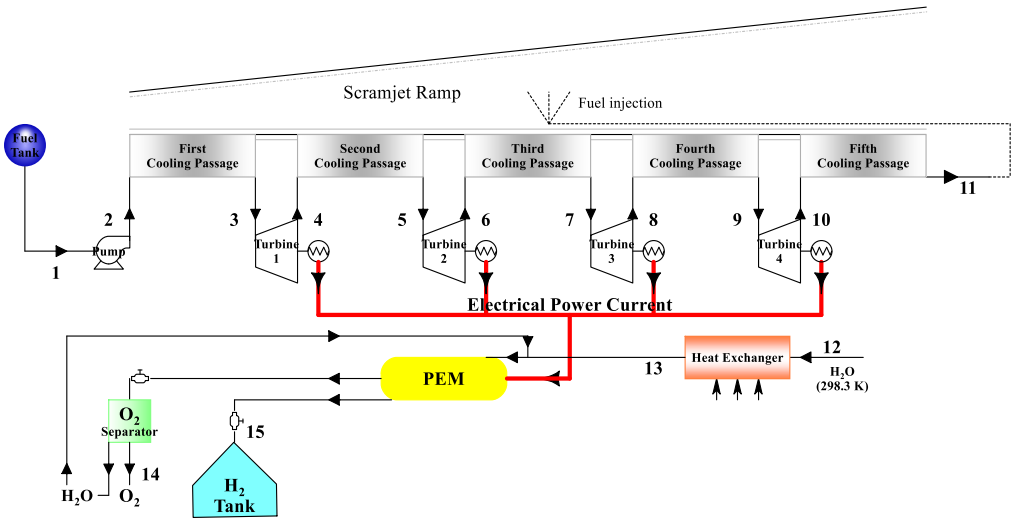
بر اساس مطالعه پیشینه پژوهشی و مرور تحقیقات مشابه صورت گرفته در این زمینه، استخراج هیدروژن به روش PEM الکترولایزر و با استفاده از گرمای هدررفت اسکرمجت می‌تواند در حوزه این موتورها و کلا در صنعت هوافضا بسیار مفید و کاربردی باشد و تا کنون مطالعه خاصی بر روی آن صورت نگرفته است. هیدروژن تولید شده از این 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. علاوه بر این انجام یک مطالعه جامع بر روی تاثیرات انبساط چند مرحله‌ای نیز مد نظر این تحقیق بوده است. در سیستم نوین ارائه شده توان الکتریکی ورودی مورد نیاز PEM از طریق توان تولید شده در زیر سیکل توان تامین می شود. 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 ارایه 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. هیدروژن، 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 اسکرمجت به سرعت تبدیل به گاز فوق بحرانی می‌شود. سپس هیدروژن فوق بحرانی وارد توربین اول می شود (نقطه ۳). هیدروژن تحت شرایط آیزنتروپیک منبسط شده و توان الکتریکی تولید می‌کند. در طی این فرآیند دمای هیدروژن افت پیدا می‌کند و خنک می شود 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 می‌شود و با عبور از توربین دوم دمای آن کاهش یافته و توان الکتریکی تولید می‌کند (فرآیند ۵-۶). این فرآیند 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 ۸-۷ 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 می شود (نقطه ۱۵). در سمت آند نیز گاز اکسیژن در اثر یونیزه شدن آزاد شده و پس از جدا سازی از آب و بخار آب اضافی باقی مانده از واکنش، در مخزن مخصوص خود ذخیره می شود (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.

[۴] Molten Carbone Fuel Cell

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]



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

۳. فرضیات و روابط حاکم بر مساله

۱،۳. 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
- 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]:

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

که در آن ΔG انرژی آزاد گیبس و $(T\Delta S)$ انرژی حرارتی مورد نیاز اســـت. مقادیر مورد نیاز و برای هیدروژن، اکســـیژن 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]:

$$\dot{N}_{H_۲} = \frac{J}{۲F} \quad (۲)$$

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:

$$V = V_{.} + V_{act,a} + V_{act,c} + V_{Ohm} \quad (۴)$$

$V_{.}$ پتانسیل بازگشت پذیر است که از تفاوت بین انرژی آزاد واکنش دهنده و محصول ناشی می شود و از معادله نرنست[۵] به دست می‌آید [۲۳]:

$$V_{.} = ۱.۲۲۹ - ۸.۵ \times ۱۰^{-۴}(T_{PEM} - ۲۹۸) \quad (۵)$$

$V_{act,a}$، $V_{act,c}$ و V_{ohm} به ترتیب پتانسیل فعالسازی آند، پتانسیل فعالسازی کاتد، پتانسیل فعالسازی اهمیک الکترولیت تعریف می شوند. پتانسیل 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]:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [۰.۵۱۳۹(x) - ۰.۳۲۶]exp\left[۱۲۶۸\left(\frac{۱}{۳۰۳} - \frac{۱}{T}\right)\right] \quad (۶)$$

که در آن x فاصله از برابر با فاصله اندازه گیری شده از سطح کاتد در هر مکان از درون PEM است. مقدار $\lambda(x)$ را می تواند 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:

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

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

$$V_{ohm,PEM} = J\,R_{PEM} \quad (۹)$$

پتانسیل فعالسازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F}sinh^{-۱}\left(\frac{J}{۲J_{.,i}}\right), i = a, c \quad (۱۰)$$

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

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

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

۳,۳. تحلیل ترمودینامیکی

[۵] Nernst equation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

در این بخش، مدلسازی ترمودینامیکی سیستم ارائه شده با جزئیات بیان می‌شود. هر جز از 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:

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

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

بازده انرژی سیکل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{en} = \frac{LHV_{H_۲} \cdot \dot{m}_{۱۵} + (۱ - \eta_G) \cdot \dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{totla}} \quad (۱۴)$$

که در آن $LHV_{H_۲}$ سطح پایین محتوای انرژی $H_۲$ بوده و از منابع و مراجع ترمودینامیکی قابل حصول است و مقدار آن ۱۲۰,۲۱۱ (kJ/kg) در نظر گرفته شده است[۲۸] . 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 شـــکل (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]:

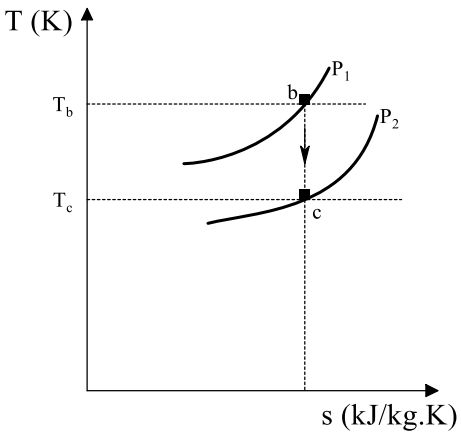
$$T_c = T_b\{۱ - \eta_t[۱ - \pi^{(۱-\gamma)/\gamma}]\} \quad (۱۵)$$

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

$$w_t = \eta_t C_p T_b\left[۱ - \pi^{(۱-\gamma)/\gamma}\right] \quad (۱۶)$$

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

$$\pi = \frac{P_b}{P_c} \quad (۱۷)$$



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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

پارامترها	معادلات
بار حرارتی مسیر خنک کن i ام	$\dot{Q}_i = \dot{m}_i c_p (T_{۲□+۱} - T_{۲□})$
کار مخصوص توربین i ام	$w_{ti} = \eta_t c_p T_{۲□+۱}\left[۱ - {\pi_i}^{(۱-\gamma)/\gamma}\right]$
کار مخصوص پمپ	$w_p = \frac{P_۲ - P_۱}{\eta_p \rho_۱}$
توان خالص مخصوص	$w_{net} = \sum_{i=۱}^{۴} w_{ti} + w_p$
تولید الکتریسیته خالص	$\dot{W}_{net} = \dot{m}_. w_{net}$
بار حرارتی مبدل حرارتی	$\dot{Q}_{HE} = \dot{m}_w (h_{۱۳} - h_{۱۲})$
ظرفیت خنک کاری کل	$\dot{Q}_{total} = \sum_{ı=۱}^{۴} \dot{Q}_{ı\ i} + \dot{Q}_{HE}$

معادله تعادل اگزرژی برای عضو i ام یک سیستم به شکل زیر قابل بیان است [۳۰]:

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

نرخ تخریب اگزرژی عضو i ام و و به ترتیب نرخ های اگزرژی سوخت و محصول هستند.

به طریق مشابه برای کل سیستم معادله تعادل اگزرژی را به صورت زیر داریم:

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

بازده اگزرژی جزء i ام به صورت زیر تعریف می‌شود[۳۰]:

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

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:

$$Y_{D,i} = \dot{E}x_{D,i} / \dot{E}x_{D,total} \quad (۲۲)$$

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

جدول ۲- معادلات اگزرژی اجزای تشکیل دهنده سیکل ارائه شده

اجزا	اگزرژی سوخت	اگزرژی محصول	تخریب اگزرژی	بازده اگزرژی	نسبت تخریب اگزرژی
مسیر خنک کن i ام	$\dot{E}x_{F,CPi} = \dot{Q}_i\left(۱ - \frac{T_.}{T_{ref-scr}}\right)$	$\dot{E}x_{P,CPi} = \dot{E}x_{۲□+۱} - \dot{E}x_{۲□}$	$\dot{E}x_{D,CPi} = \dot{E}x_{F,CPi} - \dot{E}x_{P,CPi}$	$\eta_{ex,CPi} = \frac{\dot{E}x_{P,CPi}}{\dot{E}x_{F,CPi}}$	$Y_{D,CPi} = \frac{\dot{E}x_{D,CPi}}{\dot{E}x_{D,total}}$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

توربین iام	$\dot{E}x_{F,ti} = \dot{E}x_{۲\square+۱} - \dot{E}x_{۲\square+۲}$	$\dot{E}x_{P,ti} = \dot{m}_i w_{ti}$	$\dot{E}x_{D,ti} = \dot{E}x_{F,ti} - \dot{E}x_{P,ti}$	$\eta_{ex,ti} = \frac{\dot{E}x_{P,ti}}{\dot{E}x_{F,ti}}$	$Y_{D,ti} = \frac{\dot{E}x_{D,ti}}{\dot{E}x_{D,total}}$
پمپ	$\dot{E}x_{F,p} = \dot{m}_۱ w_p$	$\dot{E}x_{P,p} = \dot{E}x_۲ - \dot{E}x_۱$	$\dot{E}x_{D,p} = \dot{E}x_{F,p} - \dot{E}x_{P,p}$	$\eta_{ex,p} = \frac{\dot{E}x_{P,p}}{\dot{E}x_{F,p}}$	$Y_{D,p} = \frac{\dot{E}x_{D,p}}{\dot{E}x_{D,total}}$
PEM	$\dot{E}x_{F,PEM} = (۱ - \eta_G)\dot{W}_{net}$	$\dot{E}x_{P,PEM} = \dot{E}x_{۱٤} + \dot{E}x_{۱۰}$	$\dot{E}x_{D,PEM} = \dot{E}x_{F,PEM} - \dot{E}x_{P,PEM}$	$\eta_{ex,PEM} = \frac{\dot{E}x_{P,PEM}}{\dot{E}x_{F,PEM}}$	$Y_{D,PEM} = \frac{\dot{E}x_{D,PEM}}{\dot{E}x_{D,total}}$
مبدل حرارتی	$\dot{E}x_{F,HE} = \dot{Q}_{HE}\left(۱ - \frac{T_۰}{T_{ref-scr}}\right)$	$\dot{E}x_{P,HE} = \dot{E}x_{۱۳} - \dot{E}x_{۱۲}$	$\dot{E}x_{D,HE} = \dot{E}x_{F,HE} - \dot{E}x_{P,HE}$	$\eta_{ex,HE} = \frac{\dot{E}x_{P,HE}}{\dot{E}x_{F,HE}}$	$Y_{D,HE} = \frac{\dot{E}x_{D,HE}}{\dot{E}x_{D,total}}$

٤. 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 می شود. 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 است شامل می‌شود.

جدول ۳- برخی داده های ورودی مورد نیاز شبیه سازی

ردیف	پارامتر	یکا	مقادیر
۱	فشار پشت پمپ، $P_۲$	MPa	۲۲
۲	دمای میانگین بدنه اسکرمجت، T_{av}	K	۱۰۰۰
۳	فشار محفظه احتراق اسکرمجت، $P_{۱۱}$	MPa	۱
۴	دمای مخزن سوخت، $T_۱$	K	۲۵
۵	فشار مخزن سوخت، $P_۱$	MPa	۰,۲۴
۶	نرخ دبی جرمی جریان، $\dot{m}_۰$	kg/s	۰,۴
۷	نرخ دبی جرمی آب ورودی به PEM، $\dot{m}_{۱۲}$	kg/s	۰,۲
۸	دمای آب ورودی به اسکرمجت، $T_{۱۲}$,	K	۲۹۸
۹	دمای PEM ، T_{PEM}	K	۳۵۳
۱۰	بازده توربین، η_t		۰,۸

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

۱۱	بازده پمپ، η_p		۰,۷
۱۲	بازده توان ژنراتور، η_G		۰,۶۵

جدول ۴- پارامترهای ورودی استفاده شده به منظور شبیه سازی PEM [۲۵]

ردیف	پارامتر	یکا	مقادیر
۱	P_{O_2}	MPa	۰,۱
۲	P_{H_2}	MPa	۰,۱
۳	T_{PEM}	K	۳۵۳
۴	$E_{act,a}$	kJ/mol	۷۶
۵	$E_{act,c}$	kJ/mol	۱۸
۶	λ_a	Ω^{-1}	۱۴
۷	λ_c	Ω^{-1}	۱۰
۸	D	μm	۱۰۰
۹	J_c^{ref}	A/m^2	۱.۷×۱۰^۵
۱۰	J_a^{ref}	A/m^2	۴.۶×۱۰^۳
۱۱	F	C/mol	۹۶۴۸۶

با اجرای کد تو سعه داده شده برخی پارامترهای کلیدی جریان شامل دما، فشار، دبی جرمی، آنتالپی، آنتروپی و اگزرژی برای نقاط سیکل ارائه شده (مطابق شکل(۱) به دست می‌آیند که در جدول (۵) آورده شده اند.

جدول ۵- پارامترهای ترمودینامیکی جریان در هر نقطه از سیکل

شـــ ماره نقطه	T (K)	P (MPa)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s $(kJ/kg.K)$	$\dot{E}x$ (kW)
۱	۲۵	۰,۲۴	۰,۴	۴۷۹,۴	۲۰,۲۵	۲۵۱۰
۲	۵۴,۹	۲۲	۰,۴	۵۷۹,۸	۲۰,۲۵	۲۵۵۱
۳	۱۰۰۰	۲۲	۰,۴	۱۴۳۸۷	۴۸,۸۳	۴۷۵۸
۴	۷۱۴,۴	۴,۶۹	۰,۴	۱۰۰۱۰	۵۰,۲۲	۲۸۴۶
۵	۱۰۰۰	۴,۶۹	۰,۴	۱۴۲۳۵	۵۵,۱۹	۳۹۵۹
۶	۸۴۱,۵	۲,۱۶۶	۰,۴	۱۱۸۵۶	۵۵,۸۱	۲۹۳۶

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

۷	۱۰۰۰	۲,۱۶۶	۰,۴	۱۴۲۱۳	۵۸,۳۸	۳۵۸۱
۸	۹۱۶,۴	۱,۴۷۲	۰,۴	۱۲۹۵۹	۵۸,۶۷	۳۰۴۵
۹	۱۰۰۰	۱,۴۷۱	۰,۴	۱۴۲۰۷	۵۹,۹۷	۳۳۹۳
۱۰	۹۱۶,۴	۱	۰,۴	۱۲۹۵۴	۶۰,۲۶	۲۸۵۹
۱۱	۱۰۰۰	۱	۰,۴	۱۴۲۰۲	۶۱,۵۷	۳۲۰۷
۱۲	۲۹۰	۰,۱۰۱	۰,۰۳۲۱	۷۰,۷۵	۰,۲۵۱	۷۷,۵۱
۱۳	۳۵۳	۰,۱۰۱	۰,۰۳۲۱	۳۳۴,۳	۱,۰۷۳	۷۸,۳۱
۱۴	۳۵۳	۰,۱۰۱	۰,۰۹۲۹	۵۰,۳۶	۰,۱۵۶	۱۲,۰۴
۱۵	۳۵۳	۰,۱۰۱	۰,۰۱۱۷۱	۴۷۲۰	۵۵,۸۱	۲,۳۷۹

۱,٤. اعتبار سنجی

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

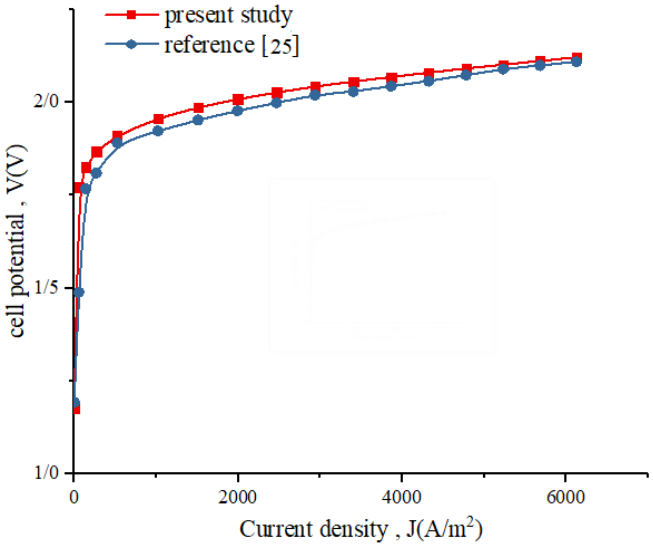
جدول ۶- اعتبار سنجی مربوط به سیکل خنک کن بازیاب برای مدل سیستم ارائه شده در این مطالعه با کار تحقیق کین و همکاران [۱۲]

پارامتر های مقایسه ای	فشار پشت پمپ، $P_2(MPa)$											
	۲۴		۲۰		۱۵		۱۰		۵		۳	
	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	Present study
δ (%)	۶۱,۲	۶۱,۲	۵۸,۹۹	۵۸,۹۹	۵۵,۲۵	۵۵,۲۵	۴۹,۴۴	۴۹,۴۴	۳۷,۸۱	۳۷,۸۱	۲۷,۶۳	۲۷,۶۳
ϕ (%)	۳۷,۹۶	۳۷,۹۶	۳۷,۱	۳۷,۱	۳۵,۵۹	۳۵,۵۹	۳۳,۰۸	۳۳,۰۸	۲۷,۴۳	۲۷,۴۳	۲۱,۶۵	۲۱,۶۵
$w_{net}\left(\frac{MJ}{kg}\right)$	۸,۲۶۶	۸,۷۴۱	۸,۰۳۰	۸,۴۲۵	۷,۵۹۶	۷,۸۹۲	۶,۸۶۶	۷,۰۶۲	۵,۳۰۵	۵,۴۰۰	۳,۸۹۱	۳,۹۴۷

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

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 درصد خطای انجام محاسبات بسیار پایینی دارد.

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



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. به طوریکه بیشترین خطای ایجاد شده بین نتایج کار حاضر با مطالعه صورت گرفته توسط احمدی و همکاران کمتر از ۲ درصد بوده است.

۲,٤. 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.

جدول ۷- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

ردیف	پارامتر	یکا	مقدار
۱	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن اول، $\dot{Q}_{۱}$	kW	۵۵۲۳
۲	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن دوم، $\dot{Q}_{۲}$	kW	۱۶۹۰
۳	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن سوم، $\dot{Q}_{۳}$	kW	۹۴۲,۵
۴	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن چهار، $\dot{Q}_{۴}$	kW	۴۹۹,۲
۵	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن پنجم $\dot{Q}_{۵}$	kW	۴۹۹,۲
۶	توان پمپ، w_{t1}	$\frac{MJ}{kg}$	۰,۴۳۵۳
۷	توان توربین ۱، w_{t1}	$\frac{MJ}{kg}$	۴,۱۵۸

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

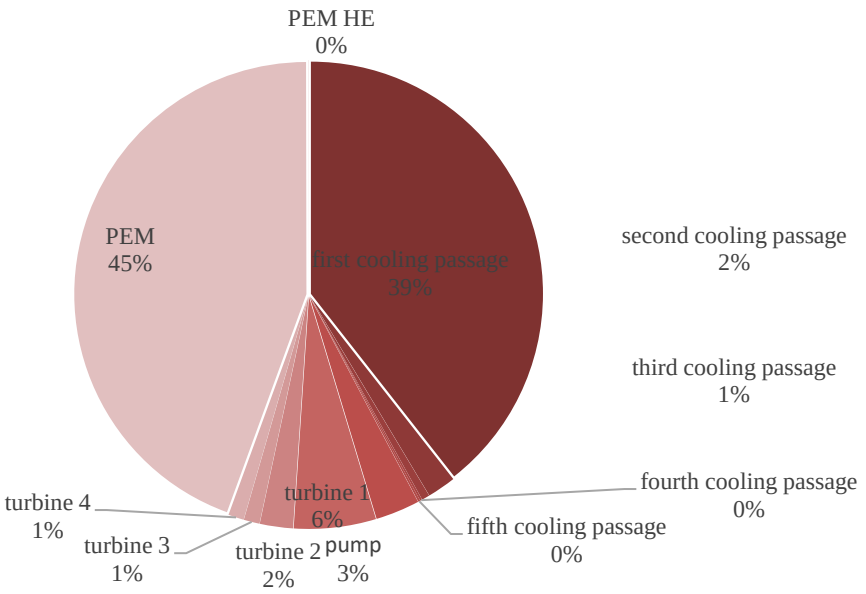
۸	توان توربین ۲، w_{t2}	$\frac{MJ}{kg}$	۲,۳۰۸
۹	توان توربین ۳، w_{t3}	$\frac{MJ}{kg}$	۱,۲۱۷
۱۰	توان توربین ۴، w_{t4}	$\frac{MJ}{kg}$	۱,۲۱۷
۱۱	توان خالص خروجی، $\dot{W}_{net}$	kW	۳۳۸۶
۱۲	توان ورودی PEM ، $\dot{W}_G$	kW	۲۲۰۱
۱۳	تولید هیدروژن، $\dot{m}_{H_۲}$	kg/h	۴۲,۱۴
۱۴	بار حرارتی مبدل PEM ، $\dot{Q}_{HE}$	kW	۵۲,۷۲
۱۵	ظرفیت خنک کاری کل، $\dot{Q}_{total}$	kW	۹۲۰۶,۲۶
۱۶	بازده انرژی کل سیستم، η_{en}	%	۱۳,۰۱

طبق نتایج فوق، مشاهده می شود 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 در نتیجه 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 مستقیم 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. 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 که 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 ارائه خواهند شد. 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، بازده اگزرژی هر جز و درصد تخریب اگزرژی هر جز هستند.

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 می شود PEM با بیش از ۴۴ درصد تخریب اگزرژی بالاترین میزان تخریب اگزرژی را در بین اجزای سیکل ارئه شده دارا ست 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 این جز 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 جز PEM و مسیر خنک کن اول صورت گیرد. به منظور نمایش هرچه بهتر منابع اصلی تخریب اگزرژی در سیستم، نمودار پای درصد تخریب اگزرژی سیستم نیز مطابق شکل (۴) ارائه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]



شکل ۴- نمودار دایروی توزیع تخریب اگزرژی

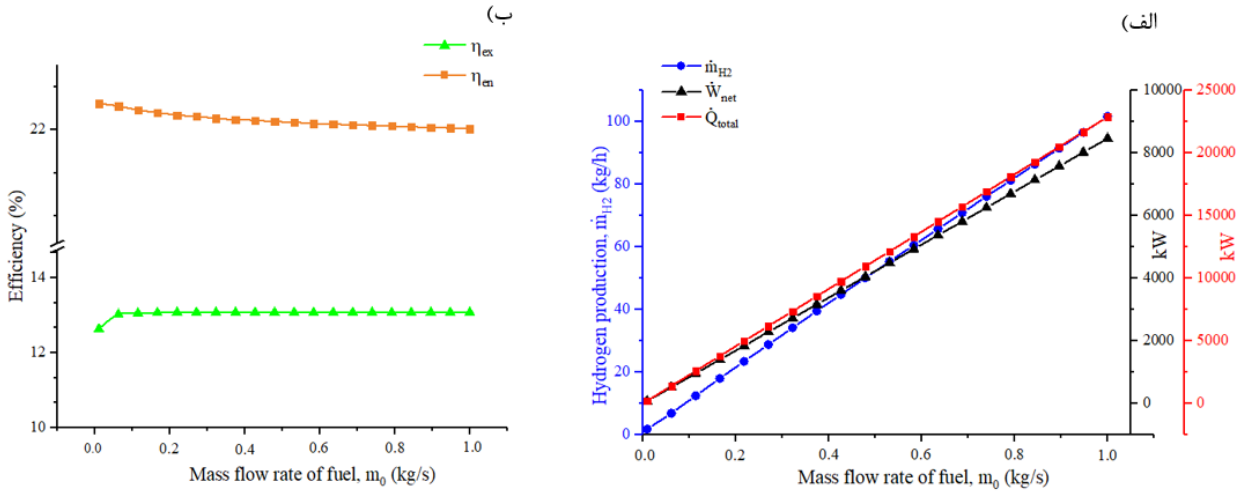
۳,٤. مطالعه پارامتری

در این بخش اثر چندین پارامتر مهم بر روی ا صلی ترین مح صولات و اهداف سی ستم ارائه شده مورد مطالعه قرار گرفته ا ست. نرخ دبی جرمی سوخت، فشار پشت پمپ، دمای متوسط بدنه اسکرمجت و بازده توان ژنراتو از جمله پارامتر های انتخابی به منظور مطالعه هستند.

۱,۳,٤. 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 واگزرژی ن شان داده شده ا ست. هر سه مح صول ا صلی سیکل ارائه شده یعنی تولید توان، خنک کاری ا سکرمجت و تولید هیدروژن با افزایش دبی جرمی سوخت افزایش می‌یابند (شکل ۵-الف). و میزان توان تولیدی و خنک کاری 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 ا ست. 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). و افزایش چگالی جریان الکترولایزر سبب افزایش تولید هیدروژن می شود. بازده انرژی و اگزرژی سی ستم 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 هر دو مقیاسی هستند حاصله از تقسیم این دو بخش تولید و مصرف انرژی است. پس در نتیجه ثابت می‌مانند. شکل ۵-ب این موضوع را نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

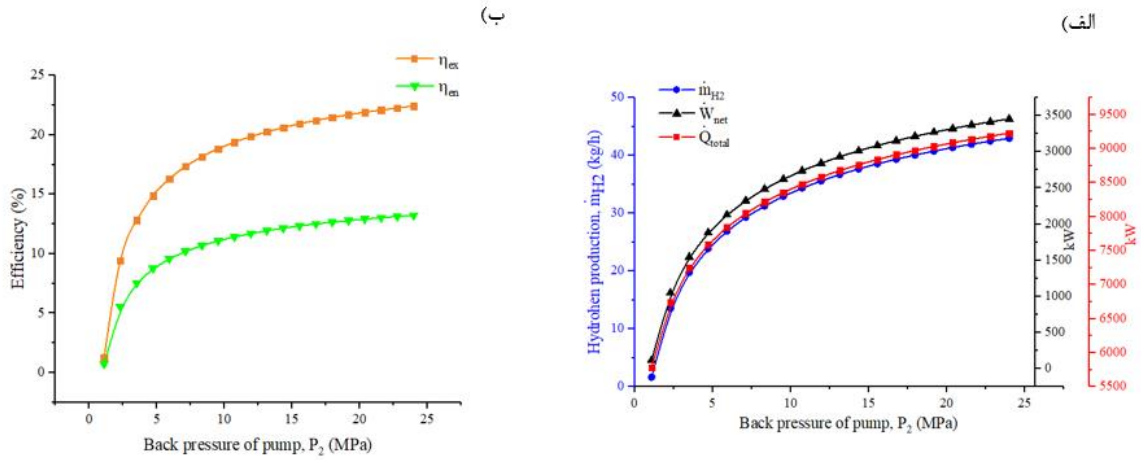


شکل ۵- اثر تغییرات نرخ دبی جرمی سوخت بر سیستم

۲،۳،٤. 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 (الف) 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 دارند. 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 بالعکس. 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 (ب) 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 است، روند افزایشی خواهند داشت .

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]



شکل ۶- تاثیر فشار پشت پمپ بر عملکرد سیستم

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق 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.

٦. 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 necjournals.ir on 2026-11-14]

علایم یونانی

η بازده (٪)

ρ چگالی ($kg.m^{-3}$)

γ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه

منابع

[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]," ۱۹۷٦.

[۲] R. Barthélémy, "Recent progress in the National Aerospace Plane program," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. ٤, no. ٥, pp. ۳-۱۲, ۱۹۸۹.

[۳] R. Baurle and D. Eklund, "Analysis of dual-mode hydrocarbon scramjet operation at Mach ٤-٦,٥," Journal of Propulsion and Power, vol. ۱۸, no. ٥, pp. ۹۹۰-۱۰۰۲, ۲۰۰۲.

[٤] S. Beckel, J. Garrett, and C. Gettinger, "Technologies for robust and affordable scramjet propulsion," in ۱٤th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, ۲۰۰٦, p. ۷۹۸۰.

[٥] N. Gascoin, P. Gillard, E. Dufour, and Y. Touré, "Validation of transient cooling modeling for hypersonic application," Journal of thermophysics and heat transfer, vol. ۲۱, no. ۱, pp. ۸٦-۹٤, ۲۰۰۷.

[٦] 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 ۱۳th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference, ۲۰۰٥, p. ۳٤۰۳.

[۷] T. Kanda, G. Masuya, and Y. Wakamatsu, "Propellant feed system of a regeneratively cooled scramjet," Journal of Propulsion and Power, vol. ۷, no. ۲, pp. ۲۹۹-۳۰۱, ۱۹۹۱.

[۸] X. Li, J. Cao, and J. Du. "Performance analysis of an ethylene-fueled scramjet with adjustable finite-rate chemistry." Aerospace Science and Technology, vol. ۱۲۷, pp. ۱۰۷۷۳۷, ۲۰۲۲.

[۹] T. Edwards, "Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: ۱۹۰۳-۲۰۰۳," Journal of propulsion and power, vol. ۱۹, no. ٦, pp. ۱۰۸۹-۱۱۰۷, ۲۰۰۳.

[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. ۳٤, no. ۱۷, pp. ۷۳۳٤-۷۳٤۱, ۲۰۰۹.

[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. ٥۰, no. ۸, pp. ۱۹۰۸-۱۹۱٤, ۲۰۰۹.

[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. ۲۲۳, no. ٦, pp. ٥۹۹-٦۰۷, ۲۰۰۹.

[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. ٥٤, no. ٤, pp. ۹٥٥-۹٦۳, ۲۰۱۱.

[۱٤] H. Cho, A. D. Smith, and P. Mago, "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization," Applied Energy, vol. ۱۳٦, pp. ۱٦۸-۱۸٥, ۲۰۱٤.

[۱٥] 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. ٦٦, pp. ۱۲-۱۹, ۲۰۱۷.

[۱٦] A. R. Choudhuri and S. Gollahalli, "Combustion characteristics of hydrogen–hydrocarbon hybrid fuels," International journal of hydrogen energy, vol. ۲٥, no. ٥, pp. ٤٥۱-٤٦۲, ۲۰۰۰.

[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. ۳۹, □□. ۸, □□. ۳۹۱۴–۳۹۲٥, ۲۰۱۴.

[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. ۲۱, no. ۱, pp. ۲٤-۳۰, ۲۰۱۲

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]

[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. ۳۰, no. ۷, pp. ۷۹۵-۸۰۲, ۲۰۰۵.
[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. ٤٠, no. ۳۹, pp. ۱۳۲٤۳-۱۳۲۵۷, ۲۰۱۵.
[۲۱]M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," International journal of hydrogen energy, vol. ۳۸, no. ۱۲, pp. ٤۹۰۱-٤۹۳٤, ۲۰۱۳.
[۲۲]R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina, "Simple PEM water electrolyser model and experimental validation," international journal of hydrogen energy, vol. ۳۷, no. ۲, pp. ۱۹۲۷-۱۹۳۸, ۲۰۱۲.
[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. ٤۹, no. ۱۰, pp. ۲۷۴۸–۲۷۵۶, ۲۰۰۸.
[۲٤]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. ۳٤, no. ۳, pp. ۱۱٤۳-۱۱۵۸, ۲۰۰۹.
[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. ۳۸, no. ٤, pp. ۱۷۹۵-۱۸۰۵, ۲۰۱۳.
[۲٦]F. Sorgulu and I. Dincer, "A renewable source based hydrogen energy system for residential applications," International Journal of Hydrogen Energy, vol. ٤۳, no. ۱۱, pp. ۵۸٤۲-۵۸۵۱, ۲۰۱۸.
[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. ۱۱٤, pp. ٦۳۱-٦۳۸, ۲۰۱۷.
[۲۸]Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Thermodynamics: an engineering approach," Sea, vol. ۱۰۰۰, p. ۸۸٦۲, ۲۰۰۲.
[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. ۳۷, no. ۹, pp. ۷۳٦۵-۷۳۷۲, ۲۰۱۲.
[۳۰]A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, "Thermal Design and Optimization John Wiley and Sons," Inc. New York, ۱۹۹٦.
[۳۱]K. Cheng, J. Xu, C. Dang, J. Qin, and W. Jing. "Performance evaluation of fuel indirect cooling based thermal management system using liquid metal for hydrocarbon-fueled scramjet." Energy, vol. ۲٦۰, pp. ۱۲۵۰٦۸, ۲۰۲۲.
[۳۲]W. Yu, W. Zhou, Z. Jia, and Z. Han. "Characteristics of scramjet regenerative cooling with endothermic chemical reactions." Acta Astronautica, vol. ۱۹۵, pp. ۱-۱۱, ۲۰۲۲.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-14]