

## 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

میشم 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

### 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 آگرژی 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 ۰/۴ کیلوگرم بر ثانیه، 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 آگرژی نشان داد که PEM الکترولایزر با بیش از ۴۴ درصد اتلاف آگرژی بالاترین میزان اتلاف آگرژی را در بین تمام اعضای مختلف سیکل پیشنهادی دارد. بعد از آن مسیر خنک کن اول با بیش از ۳۹ درصد اتلاف آگرژی رتبه دوم را از لحاظ اتلاف آگرژی داراست. بازده انرژی و آگرژی سیستم ارائه شده به ترتیب ۱۳/۰۱ درصد و ۲۲/۱۲ درصد به دست آمده است.

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

## 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 وسایل نقلیه مافوق صوت عملیاتی تر با قابلیت های بهتر همچون توانایی حمل بار با سرعت و ارتفاع پروازی بالا و یا انجام ماموریت های فضایی، موتورهای اسکرمجت<sup>۱</sup> مطرح شده و مورد مطالعه قرار گرفتند [۱-۴].

به دلیل بار حرارتی بسیار بالای محفظه احتراق اسکرمجت مدیریت حرارتی یکی از چالش های کلیدی این تکنولوژی به شمار می آید [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 است که برای خنک کاری اسکرمجت مورد استفاده قرار می گیرد [۶]. در این روش سوخت از میان مسیرهای خنک کن عبور داده می شود 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 می کند. علاوه بر این 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 سیستم های خنک کاری دو و چند مرحله ای اسکرمجت را با یک مطالعه صرفا پارامتری مطرح کردند [۱۰، ۱۱]. کین و همکاران [۱۲] در یک مطالعه کامل تر یک سیکل خنک کن بازیاب باز<sup>۲</sup> دو مرحله ای 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 می دهد و دارای قابلیت پی شرفت و توسعه بسیاری است. برای شرایط فشار پشت پمپ ۲۰ مگا پاسکال 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.

<sup>۱</sup> Scramjet

<sup>۲</sup> Open Cooling Cycle

امروزه با توجه به لزوم استفاده هرچه موثرتر از منابع محدود انرژی موجود، موضوع بازیابی انرژی هدررفت به خصوص که در وسایل نقلیه انرژی 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 می کند تا بتوان بخشی از این نیازها 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 انرژی کمتری دارند و به طور همزمان و با یک منبع انرژی چندین محصول تولید می کنند. 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، متأسفانه تا به امروز مطالعات بسیار کمی در این حوزه صورت گرفته است. که از جمله آنها می توان به مطالعه آقایان لی و وانگ [۱۵] اشاره کرد. مطالعه آنها یک تحلیل صرفاً انرژی 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 می دهد. علاوه بر این، اندک مطالعات صورت گرفته نیز صرفاً 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 همه ی 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 سوخت های هیدروکربنی برتری دارد [۱۶-۱۸].

هیدروژن به طور خالص در طبیعت وجود ندارد ولی می توان آن را از روش هایی همچون تبدیل بایومس، بازیابی بخار-متان و جداسازی آب به اجزا سازنده آن (فرآیند الکترولیز) بدست آورد. الکترولیز آب یک فرآیند الکتروشیمیایی است. سه نوع مختلف الکترولیز آب وجود دارد: الکترولیز آلكالین، اکسید جامد و PEM<sup>۳</sup> الکترولیزر [۱۹]. تولید هیدروژن با استفاده از PEM مزایایی را نسبت به سایر روش ها دارد. که از جمله آنها می توان به قابلیت به کارگیری آن با استفاده از منابع انرژی سطح پایین، جاگیر 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 الکترولیزر را از دو دیدگاه ترمودینامیک و انرژی مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. نتایج تحلیل آنها نشان داد که میزان تولید هیدروژن و بازده انرژی PEM ارتباط مستقیمی با دمای کاری PEM، میزان فعالیت الکترولیت آن و ضخامت جداره الکتروود دارد. مارانگیو و همکاران [۲۴] یک مدل برای مطالعه تئوری PEM ارائه دادند. که در آن از الگوی اتلاف اهمی پیچیده ای در الکتروودها و جسم میانی استفاده کرده اند. در تحقیق دیگری احمدی و همکاران [۲۵] یک مطالعه انرژی و انرژی 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 انرژی ۳/۶ درصد و بازده انرژی 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 هر دو سیستم برپایه انرژی خورشیدی و بادی با الکترولیزر، 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 می دهد 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

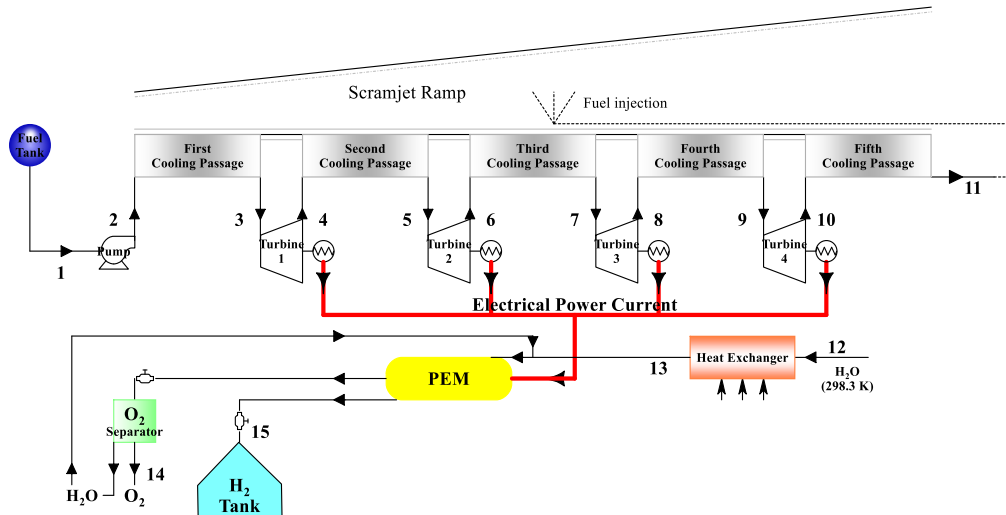
<sup>۳</sup> Proton Exchange Membrain

تحلیل انرژی و انرژی بر روی تولید هیدروژن از گرمای هدر رفت از یک سیستم نمونه<sup>۴</sup> MCFC 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 هدررفت اسکرمجت می تواند 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 می توان 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 مرحله ای 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 مرحله ای 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 می کنید. 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 (نقطه ۲) پمپاژ می شود. این عمل توسط پمپی که در خروجی مخزن سوخت قرار گرفته (نقطه ۱) صورت می گیرد. 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 می شود با جذب گرما از اسکرمجت به سرعت تبدیل به گاز فوق بحرانی می شود. سپس هیدروژن فوق بحرانی وارد توربین اول می شود (نقطه ۳). هیدروژن تحت شرایط آیزنتروپیک متبسط شده و توان الکتریکی تولید می کند. در طی این فرآیند دمای هیدروژن افت پیدا می کند و خنک می شود و می توان 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 می شود و با عبور از توربین دوم دمای آن کاهش یافته و توان الکتریکی تولید می کند (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 ۷-۸ و ۸-۹) و همچنین توربین های ۳ و ۴ (فرآیند های ۸-۹ و ۹-۱۰) تکرار می شود. سرانجام خروجی آخرین مسیر خنک کن اسکرمجت به عنوان سوخت وارد محفظه احتراق می شود (نقطه ۱۱). و سیکل باز خنک کاری چند مرحله ای را کامل می کند. PEM الکترولایزر برای تولید هیدروژن نیاز به توان الکتریکی و مقداری گرما دارد. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است. آب ورودی به PEM (نقطه ۱۲) به منظور رسیدن به دمای محفظه PEM با عبور از یک مبدل حرارتی پیش گرم می شود (فرآیند ۱۲-۱۳). در فرآیند الکترولایزینگ گاز هیدروژن  $H_2$  به وسیله جریان الکتریکی وارد یونیزه شده و شروع به ترک کاتد می کند. 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 (نقطه ۱۴). آب اضافی باقیمانده از واکنش به محفظه الکترولایزر، به منظور استفاده دوباره در فرآیند های بعدی، بازگردانده می شود و بدین شکل سیکل تولید هیدروژن را تکمیل می کند.

<sup>۴</sup> Molten Carbone Fuel Cell



شکل ۱- شماتیک سیستم خنک‌کننده بازتابی 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 خنک‌کننده اولیه
- هیچ افت فشاری در مسیر خنک‌کننده 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]:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (1)$$

که در آن  $\Delta G$  انرژی آزاد گیبس و  $(T\Delta S)$  انرژی حرارتی مورد نیاز است. مقادیر مورد نیاز و برای هیدروژن، اکسیژن و آب در جدول 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]:

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

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

$$E_{electric} = JV \quad (3)$$

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

$$V = V_o + V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohm} \quad (4)$$

$V_o$  پتانسیل بازگشت پذیر است که از تفاوت بین انرژی آزاد واکنش دهنده و محصول ناشی می‌شود و از معادله نرنست<sup>۵</sup> به دست می‌آید [۲۳]:

$$V_o = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{PEM} - 298) \quad (5)$$

$V_{act,c}$ ،  $V_{act,a}$  و  $V_{ohm}$  به ترتیب پتانسیل فعالسازی آند، پتانسیل فعالسازی کاتد، پتانسیل فعالسازی اهمیک الکترولیت تعریف می‌شوند. پتانسیل اهمیک در PEM ناشی از مقاومت عضو مبادله گر 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]:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139 \ln(x) - 0.326] \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{3.3} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

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 می‌تواند توسط مقادیر محتوای آب در لبه صفحه‌ی الکترودهای کاتد و آند به دست آورد:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c \quad (7)$$

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

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (8)$$

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

$$V_{ohm,PEM} = J R_{PEM} \quad (9)$$

پتانسیل فعالسازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J}{2J_{i,i}} \right), i = a, c \quad (10)$$

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

$$J_{i,i} = J_i^{ref} \exp \left( -\frac{E_{act,i}}{RT} \right), i = a, c \quad (11)$$

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

<sup>۵</sup> Nernst equation

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:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (12)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (13)$$

بازده انرژی سیکل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{en} = \frac{LHV_{H_2} \cdot \dot{m}_{H_2} + (1 - \eta_G) \cdot \dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{total}} \quad (14)$$

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 ۱۲۰,۲۱۱  $(kJ/kg)$  در نظر گرفته شده است [۲۸]. و همچنین 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  $b$  و  $c$  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]:

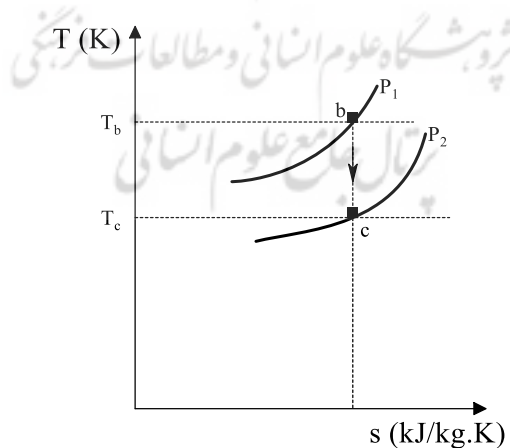
$$T_c = T_b \left\{ 1 - \eta_t \left[ 1 - \pi^{(1-\gamma)/\gamma} \right] \right\} \quad (15)$$

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

$$w_t = \eta_t C_p T_b \left[ 1 - \pi^{(1-\gamma)/\gamma} \right] \quad (16)$$

در روابط بالا  $\eta_t$  بازده آیزنتروپیک توربین،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت سیال، نسبت ظرفیت گرمایی سیال  $\gamma$  و  $\pi$  نسبت فشار توربین می‌باشد که به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\pi = \frac{P_b}{P_c} \quad (17)$$



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

معادلات	پارامترها
$\dot{Q}_i = \dot{m}_i c_p (T_{\square+1} - T_{\square})$	بار حرارتی مسیر خنک کن $i$ ام
$w_{ti} = \eta_t c_p T_{\square+1} [1 - \pi_i^{(1-\gamma)/\gamma}]$	کار مخصوص توربین $i$ ام
$w_p = \frac{P_r - P_1}{\eta_p \rho \lambda}$	کار مخصوص پمپ
$w_{net} = \sum_{i=1}^4 w_{ti} + w_p$	توان خالص مخصوص
$\dot{W}_{net} = \dot{m} w_{net}$	تولید الکتریسیته خالص
$\dot{Q}_{HE} = \dot{m}_w (h_{1r} - h_{1r'})$	بار حرارتی مبدل حرارتی
$\dot{Q}_{total} = \sum_{i=1}^4 \dot{Q}_i + \dot{Q}_{HE}$	ظرفیت خنک کاری کل

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

$$\dot{E}x_F^i = \dot{E}x_P^i + \dot{E}x_D^i \quad (18)$$

نرخ تخریب انرژی عضو  $i$  ام و  $w$  به ترتیب نرخ های انرژی سوخت و محصول هستند. به طریق مشابه برای کل سیستم معادله تعادل انرژی را به صورت زیر داریم:

$$\dot{E}x_F^{total} = \dot{E}x_P^{total} + \dot{E}x_D^{total} \quad (19)$$

بازده انرژی جزء  $i$  ام به صورت زیر تعریف می شود [۳۰]:

$$\eta_{ex}^i = \dot{E}x_P^i / \dot{E}x_F^i \quad (20)$$

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

$$\eta_{ex}^{total} = \dot{E}x_P^{total} / \dot{E}x_F^{total} \quad (21)$$

علاوه بر این، به منظور مقایسه بین تخریب انرژی در بین اجزای مختلف سیستم پارامتر نسبت تخریب انرژی تعریف می شود:

$$Y_{D,i} = \dot{E}x_{D,i} / \dot{E}x_{D,total} \quad (22)$$

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

جدول ۲- معادلات انرژی اجزای تشکیل دهنده سیکل ارائه شده

اجزا	انرژی سوخت	انرژی محصول	تخریب انرژی	بازده انرژی	نسبت تخریب انرژی
مسیر خنک کن $i$ ام	$\dot{E}x_{F,CPI}$ $= \dot{Q}_i \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_{scr}} \right)$	$\dot{E}x_{P,CPI}$ $= \dot{E}x_{\square+1}$ $- \dot{E}x_{\square}$	$\dot{E}x_{D,CPI}$ $= \dot{E}x_{F,CPI} - \dot{E}x_{P,CPI}$	$\eta_{ex,CPI}$ $= \frac{\dot{E}x_{P,CPI}}{\dot{E}x_{F,CPI}}$	$Y_{D,CPI}$ $= \frac{\dot{E}x_{D,CPI}}{\dot{E}x_{D,total}}$



$Y_{D,ti} = \frac{\dot{E}x_{D,ti}}{\dot{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,ti} = \frac{\dot{E}x_{P,ti}}{\dot{E}x_{F,ti}}$	$\dot{E}x_{D,ti} = \dot{E}x_{F,ti} - \dot{E}x_{P,ti}$	$\dot{E}x_{P,ti} = \dot{m}_i w_{ti}$	$\dot{E}x_{F,ti} = \dot{E}x_{\square+\gamma} - \dot{E}x_{\square+\gamma}$	توربین نام
$Y_{D,p} = \frac{\dot{E}x_{D,p}}{\dot{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,p} = \frac{\dot{E}x_{P,p}}{\dot{E}x_{F,p}}$	$\dot{E}x_{D,p} = \dot{E}x_{F,p} - \dot{E}x_{P,p}$	$\dot{E}x_{P,p} = \dot{E}x_{\gamma} - \dot{E}x_{\gamma}$	$\dot{E}x_{F,p} = \dot{m}_v w_p$	پمپ
$Y_{D,PEM} = \frac{\dot{E}x_{D,PEM}}{\dot{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,PEM} = \frac{\dot{E}x_{P,PEM}}{\dot{E}x_{F,PEM}}$	$\dot{E}x_{D,PEM} = \dot{E}x_{F,PEM} - \dot{E}x_{P,PEM}$	$\dot{E}x_{P,PEM} = \dot{E}x_{\gamma_1} + \dot{E}x_{\gamma_2}$	$\dot{E}x_{F,PEM} = (\gamma - \eta_G) \dot{W}_{net}$	PEM
$Y_{D,HE} = \frac{\dot{E}x_{D,HE}}{\dot{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,HE} = \frac{\dot{E}x_{P,HE}}{\dot{E}x_{F,HE}}$	$\dot{E}x_{D,HE} = \dot{E}x_{F,HE} - \dot{E}x_{P,HE}$	$\dot{E}x_{P,HE} = \dot{E}x_{\gamma_2} - \dot{E}x_{\gamma_1}$	$\dot{E}x_{F,HE} = \dot{Q}_{HE} \left( \gamma - \frac{T_{ref}}{T_{ref-scr}} \right)$	مبدل حرارتی

#### ۴. نتایج

در این بخش به ارائه و بررسی نتایج حاصل از اجرای برنامه کامپیوتری که به منظور تحلیل انرژی و انرژی 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 داده های مهم ورودی لازم جهت شبیه سازی کلی است و جدول (۴) برخی پارامترهای ورودی که برای مدل سازی الکتروشیمیایی PEM مورد نیاز است شامل می شود.

جدول ۳- برخی داده های ورودی مورد نیاز شبیه سازی

ردیف	پارامتر	یکا	مقادیر
۱	فشار پشت پمپ، $P_p$	MPa	۲۲
۲	دمای میانگین بدنه اسکرمجت، $T_{av}$	K	۱۰۰۰
۳	فشار محفظه احتراق اسکرمجت، $P_{\gamma_1}$	MPa	۱
۴	دمای مخزن سوخت، $T_{\gamma_1}$	K	۲۵
۵	فشار مخزن سوخت، $P_{\gamma_1}$	MPa	۰٫۲۴
۶	نرخ دبی جرمی جریان، $\dot{m}$	kg/s	۰٫۴
۷	نرخ دبی جرمی آب ورودی به $\dot{m}_{\gamma_2,PEM}$	kg/s	۰٫۲
۸	دمای آب ورودی به اسکرمجت، $T_{\gamma_2}$	K	۲۹۸
۹	دمای PEM، $T_{PEM}$	K	۳۵۳
۱۰	بازده توربین، $\eta_t$		۰٫۸

۰.۷		بازده پمپ، $\eta_p$	۱۱
۰.۶۵		بازده توان ژنراتور، $\eta_G$	۱۲

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	$\lambda_a$	$\Omega^{-1}$	۱۴
۷	$\lambda_c$	$\Omega^{-1}$	۱۰
۸	$D$	$\mu m$	۱۰۰
۹	$J_c^{ref}$	$A/m^2$	$۱.۷ \times ۱۰^{-۵}$
۱۰	$J_a^{ref}$	$A/m^2$	$۴.۶ \times ۱۰^{-۳}$
۱۱	$F$	C/mol	۹۶۴۸۶

با اجرای کد تو سعه داده شده برخی پارامترهای کلیدی جریان شامل دما، فشار، دبی جرمی، آنتالپی، آنتروپی و آگرژی 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

شماره 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	۱۴۳۳۵	۵۵.۱۹	۳۹۵۹
۶	۸۴۱.۵	۲.۱۶۶	۰.۴	۱۱۸۵۶	۵۵.۸۱	۲۹۳۶

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

#### ۱,۴. اعتبار سنجی

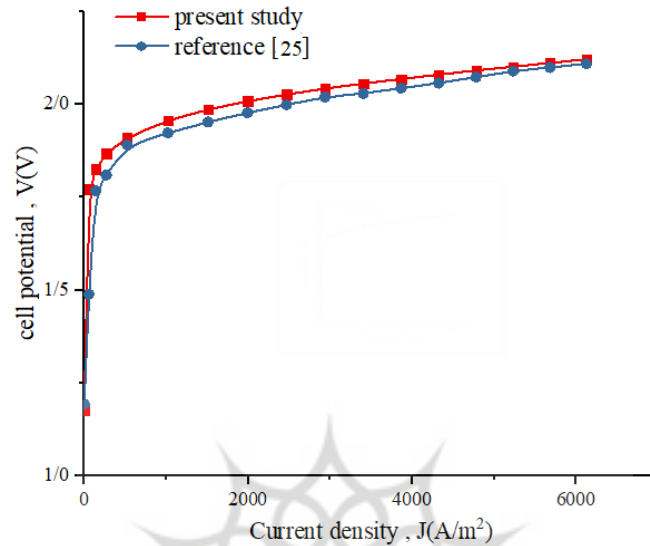
به منظور اعتبار سنجی سیکل خنک کن بازیاب اسکرمجت، سیستم ارائه شده در تحقیق کین و همکاران [۱۲] اعتبار سنجی شده و نتایج در قالب جدول (۶) مشخص شده است.

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]

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

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.

#### ۲,۴. 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 بخش ۳، مهم ترین نتایج حاصل از تحلیل انرژی در قالب جدول (۷) بیان گردیده اند.

جدول ۷- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

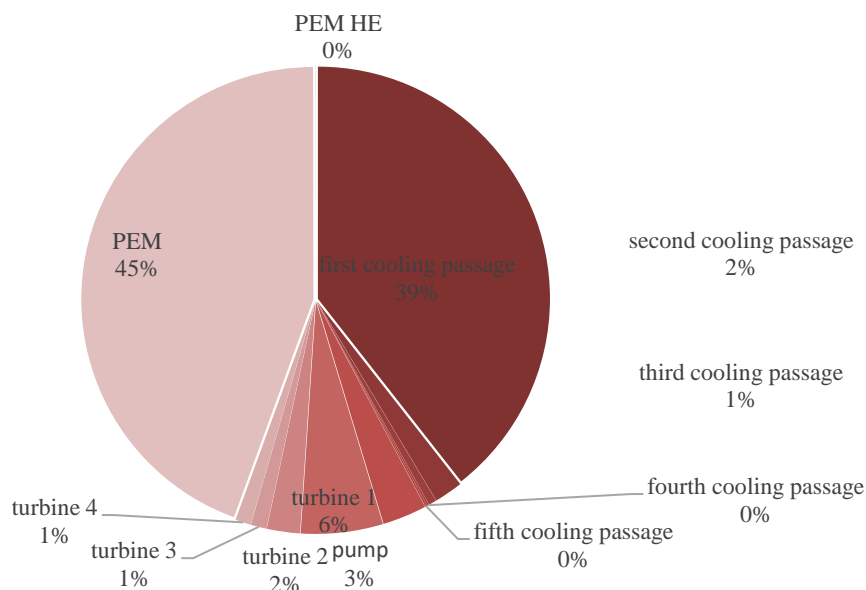
ردیف	پارامتر	یکا	مقدار
۱	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن اول، $\dot{Q}_1$	$kW$	۵۵۲۳
۲	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن دوم، $\dot{Q}_2$	$kW$	۱۶۹۰
۳	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن سوم، $\dot{Q}_3$	$kW$	۹۴۲,۵
۴	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن چهارم، $\dot{Q}_4$	$kW$	۴۹۹,۲
۵	ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن پنجم، $\dot{Q}_5$	$kW$	۴۹۹,۲
۶	توان پمپ، $w_{t1}$	$\frac{MJ}{kg}$	۰,۴۳۵۳
۷	توان توربین ۱، $w_{t1}$	$\frac{MJ}{kg}$	۴,۱۵۸

۲,۳۰۸	$\frac{MJ}{kg}$	توان توربین ۲، $w_{t2}$	۸
۱,۲۱۷	$\frac{MJ}{kg}$	توان توربین ۳، $w_{t3}$	۹
۱,۲۱۷	$\frac{MJ}{kg}$	توان توربین ۴، $w_{t4}$	۱۰
۳۳۸۶	$kW$	توان خالص خروجی، $W_{net}$	۱۱
۲۲۰۱	$kW$	توان ورودی PEM، $W_G$	۱۲
۴۲,۱۴	$kg/h$	تولید هیدروژن، $\dot{m}_{H_2}$	۱۳
۵۲,۷۲	$kW$	بار حرارتی مبدل PEM، $\dot{Q}_{HE}$	۱۴
۹۲۰۶,۲۶	$kW$	ظرفیت خنک کاری کل، $\dot{Q}_{total}$	۱۵
۱۳,۰۱	%	بازده انرژی کل سیستم، $\eta_{en}$	۱۶

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 می باشد. 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، توربین ۱ بیشترین نرخ تولید توان را در بین توربین ها دارد. این موضوع از نسبت فشار کاری بالای توربین ناشی می شود. چون طبق روابط 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 معمولاً بازده های پایینی دارند، می توان ارزیابی بازده خوب را به بازده آن نسبت داد.

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از تحلیل انرژی برای عملکرد سیستم در قالب جداول و نمودارها ارائه خواهند شد. جدول (۸) نتایج حاصل از تحلیل انرژی برای سیکل ارائه شده در تحقیق را نشان می دهد. ستون های جدول از راست به چپ به ترتیب مربوط به اجزای تشکیل دهنده سیکل، انرژی سوخت هر جز، انرژی محصول هر جز، تخریب انرژی هر جز، بازده انرژی هر جز و درصد تخریب انرژی هر جز هستند.

نتایج حاصل از تحلیل انرژی بیانگر این موضوع است که بازده انرژی کل سیکل برابر ۲۲,۱۲ درصد است. همانطور که در جدول بالا مشاهده می شود PEM با بیش از ۴۴ درصد تخریب انرژی بالاترین میزان تخریب انرژی را در بین اجزای سیکل ارائه شده داراست و دلیل این امر وقوع واکنش شیمیایی است. واکنش های شیمیایی یکی از منابع اصلی تخریب انرژی در یک سیستم ترمودینامیک هستند. بعد از PEM مسیر خنک کن اول، با نزدیک به ۴۰ درصد تخریب انرژی در جایگاه دوم قرار دارد. تخریب انرژی 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 انرژی در سیستم های ترمودینامیکی است. پس می توان این طور نتیجه گرفت که هرگونه تلاش در جهت بهبود عملکرد سیستم از نظر انرژی باید در جهت کاهش اتلاف انرژی در دو جز PEM و مسیر خنک کن اول صورت گیرد. به منظور نمایش هرچه بهتر منابع اصلی تخریب انرژی در سیستم، نمودار پای درصد تخریب انرژی سیستم نیز مطابق شکل (۴) ارائه شده است.



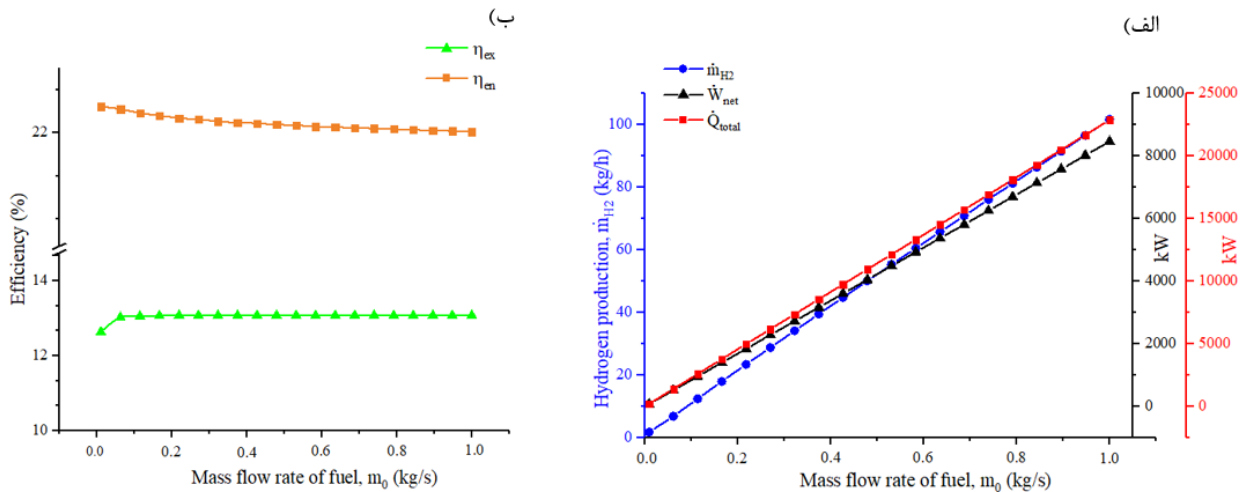
شکل ۴- نمودار دایروی توزیع تخریب انرژی

### ۳,۴. مطالعه پارامتری

در این بخش اثر چندین پارامتر مهم بر روی اصلی ترین محصولات و اهداف سیستم ارائه شده مورد مطالعه قرار گرفته است. نرخ دبی جرمی سوخت، فشار پشت پمپ، دمای متوسط بدنه اسکرمجت و بازده توان ژنراتور از جمله پارامترهای انتخابی به منظور مطالعه هستند.

#### ۱,۳,۴. تاثیر نرخ دبی جرمی سوخت بر روی سیستم

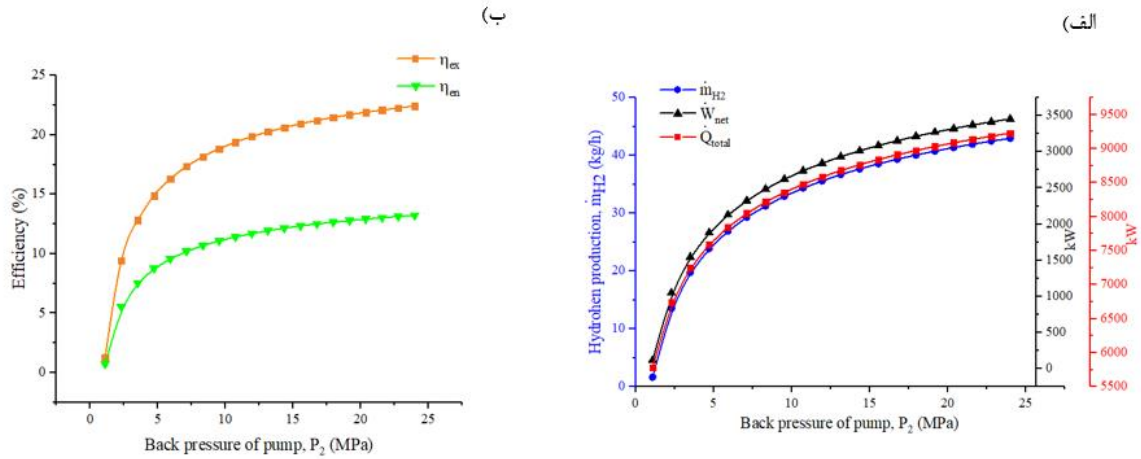
در شکل (۵) اثرات نرخ دبی جرمی سوخت بر روی توان خالص تولیدی، ظرفیت خنک کاری کل، تولید هیدروژن و همچنین بازده انرژی واگرژی نشان داده شده است. هر سه محصول اصلی سیکل ارائه شده یعنی تولید توان، خنک کاری اسکرمجت و تولید هیدروژن با افزایش دبی جرمی سوخت افزایش می یابند (شکل ۵-الف). و میزان توان تولیدی و خنک 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 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 می شود (طبق معادله ۳). و افزایش چگالی جریان الکترولایزر سبب افزایش تولید هیدروژن می شود. بازده انرژی و واگرژی سیستم با تغییرات نرخ دبی جرمی سوخت تقریباً ثابت هستند. اینطور می توان استدلال کرد که با تغییر نرخ دبی جرمی هر دو پارامتر انرژی تولیدی و مصرفی برای تولید تقریباً به یک نسبت یکسان افزایش می یابند. و بازده انرژی و واگرژی هر دو مقیاسی هستند حاصله از تقسیم این دو بخش تولید و مصرف انرژی است. پس در نتیجه ثابت می ماند. شکل ۵-ب این موضوع را نشان می دهد.



شکل ۵- اثر تغییرات نرخ دبی جرمی سوخت بر سیستم

#### ۲،۳،۴. اثر فشار پشت پمپ بر سیستم

اثر تغییرات فشار پشت پمپ بر سیستم در قالب دو قسمت a و b 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 اگرژی 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 اگرژی که تناسبی از حاصل تقسیم این دو پارامتر تولیدی و مصرفی است، روند افزایشی خواهند داشت .



شکل ۶- تاثیر فشار پشت پمپ بر عملکرد سیستم

## ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق یک سیکل جدید خنک کن بازیاب باز چند مرحله‌ای اسکرمت به منظور تولید توان و هیدروژن ارائه شده است. که در آن، زیر بخش تولید توان از گرمای هدر رفت در فرآیند خنک کاری اسکرمت 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 هر چه 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.

## ۶. نماد ها

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



## علایم یونانی

$\eta$	بازده (%)
$\rho$	چگالی ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\gamma$	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]," ۱۹۷۶.
- [۲] R. Barthélémy, "Recent progress in the National Aerospace Plane program," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. ۴, no. ۵, pp. ۳-۱۲, ۱۹۸۹.
- [۳] R. Baurle and D. Eklund, "Analysis of dual-mode hydrocarbon scramjet operation at Mach ۴-۶.۵," Journal of Propulsion and Power, vol. ۱۸, no. ۵, pp. ۹۹۰-۱۰۰۲, ۲۰۰۲.
- [۴] S. Beckel, J. Garrett, and C. Gettinger, "Technologies for robust and affordable scramjet propulsion," in ۱۴th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, ۲۰۰۶, p. ۷۹۸۰.
- [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. ۲۱, no. ۱, pp. ۸۶-۹۴, ۲۰۰۷.
- [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 ۱۳th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference, ۲۰۰۵, p. ۳۴۰۳.
- [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. ۶, 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. ۳۴, no. ۱۷, pp. ۷۳۳۴-۷۳۴۱, ۲۰۰۹.
- [۱۱] W. Bao, J. Qin, W. Zhou, and D. Yu, "Performance limit analysis of Re-cooled Cycle for regenerative cooling systems," Energy Conversion and Management, vol. ۵۰, no. ۸, pp. ۱۹۰۸-۱۹۱۴, 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. ۶, pp. ۵۹۹-۶۰۷, ۲۰۰۹.
- [۱۳] W. Bao, J. Qin, W. Zhou, D. Zhang, and D. Yu, "Power generation and heat sink improvement characteristics of re-cooling cycle for thermal cracked hydrocarbon fueled scramjet," Science China Technological Sciences, vol. ۵۴, no. ۴, pp. ۹۵۵-۹۶۳, ۲۰۱۱.
- [۱۴] H. Cho, A. D. Smith, and P. Mago, "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization," Applied Energy, vol. ۱۳۶, pp. ۱۶۸-۱۸۵, ۲۰۱۴.
- [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. ۶۶, pp. ۱۲-۱۹, ۲۰۱۷.
- [۱۶] A. R. Choudhuri and S. Gollahalli, "Combustion characteristics of hydrogen-hydrocarbon hybrid fuels," International journal of hydrogen energy, vol. ۲۵, no. ۵, pp. ۴۵۱-۴۶۲, 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, pp. ۳۹۱۴-۳۹۲۵, 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. ۲۴-۳۰, ۲۰۱۲.

- [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. Abidin, C. Webb, and E. M. Gray, "Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell," *international journal of hydrogen energy*, vol. ۴۰, no. ۳۹, pp. ۱۳۲۴۳-۱۳۲۵۷, 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. ۴۹۰۱-۴۹۳۴, 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. ۴۹, no. ۱۰, pp. ۲۷۴۸-۲۷۵۶, ۲۰۰۸.
- [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. ۳۴, no. ۳, pp. ۱۱۴۳-۱۱۵۸, ۲۰۰۹.
- [۲۵] P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boostered ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. ۳۸, no. ۴, pp. ۱۷۹۵-۱۸۰۵, ۲۰۱۳.
- [۲۶] F. Sorgulu and I. Dincer, "A renewable source based hydrogen energy system for residential applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. ۴۳, no. ۱۱, pp. ۵۸۴۲-۵۸۵۱, 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. ۱۱۴, pp. ۶۳۱-۶۳۸, ۲۰۱۷.
- [۲۸] Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Thermodynamics: an engineering approach," *Sea*, vol. ۱۰۰۰, p. ۸۸۶۲, 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. ۷۳۶۵-۷۳۷۲, ۲۰۱۲.
- [۳۰] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, "Thermal Design and Optimization John Wiley and Sons," Inc. New York, ۱۹۹۶.
- [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. ۲۶۰, pp. ۱۲۵۰-۱۲۵۸, 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.