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

پوريا سيدمتين

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

ميثم نجفي ارشادي

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

بهزاد عباسزاده
دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران

چکیدہ	
•	تاریخ دریافت:
در این پژوهش، یک سـ_یکل جدید خنک کن بازیابی باز چند مرحلهای	۱۴۰۱/۳/۵
ا سکرمجت به همراه تولید توان و هیدروژن، که در آن سوخت ا سکرمجت	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳
همان مبرد سیستم خنک کن میباشد، ارائه شده است. تحلیل جامع	
ترمودینامیکی و اگزرژی به منظور ارزیابی عملکرد سیستم، محاسبه میزان	کلمات کلیدی:
تولید توان و هیدروژن و همچنین مطالعه اثرات انبساط چند مرحلهای بر	تحلیل ترمودینامیکی اسکرمجت
روی سیستم پیشنهادی پیاده سازی شد. برای دبی جرمی سوخت	انبساط چند مرحلهای
۰/۴کیلوگرم برثانیه، ظرفیت خنک کاری سیستم جدید ارائه شـده ۹/۱۶	خنک کن بازیابی چند مرحله- اء
مگاوات، خالص توان تولیدی ۳/۳۸ مگاوات و میزان هیدروژن تولیدی	ای PEM الکترولایزر
۴۲/۲ کیلوگرم بر ساعت محا سبه 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 دارا ست. بازده انرژی و اگزرژی	
سیستم ارائه شده به ترتیب ۱۳/۰۱ در صد و ۲۲/۱۲ در صد به د ست آمده	
است.	

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 عملیاتی تر با قابلیت های بهتر همچون توانایی حمل بار با سرعت و ارتفاع پروازی بالا و یا انجام ماموریتهای فضایی، موتورهای اسکرمجت مطرح شده و مورد مطالعه قرار گرفتند [۱-۴].

به دلیل بار حرارتی بسیار بالای محفظه احتراق ا سکرمجت مدیریت حرارتی یکی از چالشهای کلیدی این تکنولوژی به شمار می آید [۵]. اهمیت مدیریت حرارتی ا سکرمجت و اثرات آن بر عملکرد این و سیله 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 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 امده توسط مدل کوپلینگ سیستم مدیریت حرارتي مبتني بر خنک کننده غیر مستقیم سـوخت نشـان داد که این سـیسـتم مدیریت حرارتي عملکرد بسـیار خوبي 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 سـوخت هيدروژن ارائه دادند تا ويژگي هاي عملكردي سـيسـتم خنک كن بازياب را مورد تحليل و بررسـي قرار دهند. نتايج حاصـل از تحقيق أنها نشان داد كه براي پرواز در اعداد ماخ بالا دبي جرمي سوخت مورد نياز براي خنك كاري مورد نياز در شرايط عملكردي 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 ا سکرمجت را با یک مطالعه صرفا پارامتری مطرح کردند [۱۰, ۱۱]. کین و همکاران [۱۲] در یک مطالعه کاملتر یک سیکل خنک کن بازیاب باز^۲دو مرحلهای برای اسکرمجت ارائه و عملکرد آن را تحلیل نمودند. پارامترهای مهم مورد مطالعه أنها در تحقيق ضريب افزايش ظرفيت خنك كنندگي، ضريب كاهش دبي جرمي سوخت و همچنين توان خالص توليدي بودند. نتايج حا صل از تحليل أنها نشان داد كه سيكل باز خنك كن بازيابي عملكرد خوبي را براي كار در ا سكرمجت ها از خود نشان ميدهد و دارای قابلیت پیشرفت و تو سعه بسیاری ا ست. 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 اسـکرمجت با واکنش های شـیمیایی گرمازا را به صـورت تجربی و عددی مورد بررسـی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشـان 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.

Scramjet

^v Open Cooling Cycle

امروزه با توجه به لزوم ا ستفاده هرچه موثرتر از منابع محدود انرژی موجود، موضوع بازیابی انرژی هدررفت به خصوص که در و سایل 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 ه ستند که ضرورت ا ستفاده از سیستم های بازیاب به همراه تولید توان را هرچه بیشتر آ شکار می کند 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 ۶/۰ 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 ا سکرمجت هیدروژن به دلیل اینکه به عنوان سوخت نیز کاربرد دارد، به طور ویژه اهمیت دارد. در بین سوخت های مورد سرحتهای هیدروکربنی برتری دارد [۲۶–۱۸].

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 ا ست. سه نوع مختلف الکترولیز آب وجود دارد: الکترولیز آلکالاین، اکسید جامد و PEM۳ 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 خطراک بودن [۲۰] اشاره کرد. استفاده از Mem 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 [۲۲, ۲۲]. از این رو مطالعات زیادی نیز بر روی آنها صورت گرفته است.

لوئنگ و همکاران[۳۳] 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 [۴۳] یک مدل برای مطالعه تئوری PEM ار که دادند. که در آن از الگوی اتلاف اهمی پیچیدهای در شده با سیکل خور شیدی و همکاران [۴۲] یک مدل برای مطالعه تئوری PEM ار که دادند. که در آن از الگوی اتلاف اهمی پیچیدهای در شده با سیکل خور شیدی و مبدل انرژی حرارتی اقیانوسی (OTEC) ، انجام داده اند. در مدل اراکه شده تو سط آنها توان الکتریکی ورودی PEM به و سیله توربین سیکل رانکین آلی (ORC) تامین می شود. در نتایج حا صل از تحلیل آنها بازده انرژی ۶/۶ در صد و بازده اگزرژی مصارف خانگی تو سط سیستم هایی با منابع انرژی تجدید پذیر عنوان پژوهش دیگری است که سورگولو و دینسر [۲۶] انجام داده اند. در میارف خانگی تو سط سیستم هایی با منابع انرژی تجدید پذیر عنوان پژوهش دیگری است که سورگولو و دینسر [۲۶] انجام داده اند. در سرمایف مراف خانگی تو سط سیستم هایی با منابع انرژی تجدید پذیر عنوان پژوهش دیگری است که سورگولو و دینسر [۲۶] انجام داده اند. در سرمایش، گرمایش و هیدروژن برای مصارف خانگی تلفیق شده است. نتایج این تحقیق نشان میدهد که سیستم های حاضر در این مطالعه پتان سیل لازم و عملکرد منا سب برای استفاده در بخش م صارف خانگی و سازگاری منا سب با محیط را دارند. نامی و همکاران [۲۷] یک

^r Protone Exchange Membrain

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 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 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 MEM از طریق توان تولید شده در زیر سیکل توان تامین می شود. این در حالی است که گرمای هدر رفت ا سکرمجت به عنوان منبع گرمایی اصلی سیکل در نظر گرفته شده است.

۲. توصيف سيکل

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 می گیرد. هیدروژن، که در این سیستم به عنوان مبرد- سوخت مورد استفاده قرار گرفته است، در همان حال که به صورت پیو سته 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 ا ستفاده کرد. هیدروژن خنک شده با جریان یافتن در مسیر خنک کن دوم (فرأیند ۴–۵) دوباره تا شــرایط فوق بحرانی گرم میشــود 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 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 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 ر سیدن به دمای محفظه PEM با عبور از یک مبدل حرارتی پیش گرم میشود (فرأیند ۱۲–۱۳). در فرأیند الکترولایزینگ گاز هیدروژن H_r 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 أنجا 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 ا ضافی باقی مانده از واكنش، در مخزن مخصوص خود ذخيره مي شود (نقطه۱۴). أب اضافي باقيمانده از واكنش به محفظه الكترولايزر، به منظور استفاده دوباره در فرآیند های بعدی، بازگردانده میشود و بدین شکل سیکل تولید هیدروژن را تکمیل میکند.

⁴ Molten Carbone Fuel Cell



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

۳. فرضیات و روابط حاکم بر مساله

1,۳. فرضيات

- 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 می شود. •
 - 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]:

(١)

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

[°] Nernst equation

یک توربین در نظر می گیریم که در طی یک فرآیند آیزنتروپیک بین دو حالت b و c کار می کند، مطابق شــکل (۲). و با فرض اینکه هیچگونه اتلافی از لحاظ ا صطکاک مکانیکی در سیستم توربین وجود ندا شته با شد، با ا ستفاده از روابط ترمودینامیک برای دمای خروجی توربین داریم [۲۸]:

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

با استفاده از معادله بالا برای توان مخصوص توربین نیز داریم:
(۱۶)
در روابط بالا
$$\eta_t$$
 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:
(۱۷۷)

$$=\frac{P_b}{P_c}$$
 (14)



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

π

معادلات	پارامترها
$\dot{Q}_i = \dot{m}_i c_p (T_{YI+Y} - T_{YI})$	بار حرارتی مسیر خنک کن <i>i</i> ام
$w_{ti} = \eta_t c_p T_{YD+Y} [Y - \pi_i^{(Y-\gamma)/\gamma}]$	کار مخصوص توربین i ام
$w_p = \frac{P_r - P_s}{\eta_p \rho_s}$	کار مخصوص پمپ
$w_{net} = \sum_{i=1}^{r} w_{ti} + w_p$	توان خالص مخصوص
$\dot{W}_{net} = \dot{m}_{.} w_{net}$	توليد الكتريسيته خالص
$\dot{Q}_{HE}=\dot{m}_w(h_{ m vr}-h_{ m vr})$	بار حرارتی مبدل حرارتی
$\dot{Q}_{total} = \sum_{l=1}^{*} \dot{Q}_l + \dot{Q}_{HE}$	ظرفیت خنک کاری کل

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

$$\dot{Ex}_{F}^{i} = \dot{Ex}_{P}^{i} + \dot{Ex}_{D}^{i}$$
(۱۸)
(۱۸)
 $\dot{Ex}_{F}^{i} = \dot{Ex}_{P}^{i} + \dot{Ex}_{D}^{i}$
 \dot{Ex}_{C}^{i} موخت و محصول هستند.
 \dot{Ex}_{C}^{i} عضو i ام و و به ترتیب نرخ های اگزرژی سوخت و محصول هستند.
 \dot{Ex}_{F}^{i}
 (19)
 \dot{Ex}_{F}^{i}
 \dot{Ex}_{F}^{i}
 \dot{Ex}_{P}^{i}
 \dot{Ex}_{P}^{i}
 \dot{Ex}_{D}^{i}
 $\dot{$

نسبت تخریب اگزرژی	بازده اگزرژی	تخریب اگزرژی	اگزرژی محصول	اگزرژی سوخت	اجزا
$Y_{D,CPi} = \frac{\vec{E}x_{D,CPi}}{\vec{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,CPi} = \frac{\vec{E}x_{P,CPi}}{\vec{E}x_{F,CPi}}$	$\vec{E}x_{D,CPi} = \vec{E}x_{F,CPi} - \vec{E}x_{P,CPi}$	$ \vec{E} x_{P,CPi} \\ = \vec{E} x_{\forall \Box + 1} \\ - \vec{E} x_{\forall \Box} $		مسیر خنک کن i ام

جدول ۲- معادلات اگزرژی اجزای تشکیل دهنده سیکل ارائه شده

$Y_{D,ti} = \frac{\vec{E}x_{D,ti}}{\vec{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,ti} = \frac{Ex_{P,ti}}{Ex_{F,ti}}$	$\vec{E} x_{D,ti} \\ = \vec{E} x_{F,ti} - \vec{E} x_{P,ti}$	$\vec{Ex}_{P,ti} = \dot{m}_i w_{ti}$		توربين أام
$Y_{D,p} = \frac{\vec{E}x_{D,p}}{\vec{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,p} = \frac{Ex_{P,p}}{Ex_{F,p}}$	$ \vec{E}x_{D,p} \\ = \vec{E}x_{F,p} - \vec{E}x_{P,p} $		$Ex_{F,p} = \dot{m}_1 w_p$	پمپ
$Y_{D,PEM} = \frac{\vec{E}x_{D,PEM}}{\vec{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,PEM} = \frac{\vec{E}x_{P,PEM}}{\vec{E}x_{F,PEM}}$	$\vec{E}x_{D,PEM}$ = $\vec{E}x_{F,PEM}$ - $\vec{E}x_{P,PEM}$	$ \vec{E} x_{P,PEM} \\ = \vec{E} x_{1:} + \vec{E} x_{1:} $		PEM
$Y_{D,HE} = \frac{\vec{E}x_{D,HE}}{\vec{E}x_{D,total}}$	$\eta_{ex,HE} = \frac{\vec{E}x_{P,HE}}{\vec{E}x_{F,HE}}$	$ \vec{E}x_{D,HE} \\ = \vec{E}x_{F,HE} - \vec{E}x_{P,HE} $	$\vec{E}x_{P,HE} = \vec{E}x_{1r} - \vec{E}x_{1r}$	$\vec{E}x_{F,HE} = \dot{Q}_{HE} \left(\gamma - \frac{T}{T_{ref-scr}}\right)$	مبدل حرارتی

٤. نتايج

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 می شود.

مقادير	یکا	پارامتر	رديف
77	МРа	فشار پشت پمپ، P _۲	١
۱۰۰۰	K	دمای میانگین بدنه اسکرمجت، T _{av}	٢
١	МРа	P_{11} فشار محفظه احتراق اسکرمجت، P_{11}	٣
۲۵	K	دمای مخزن سوخت، <i>T</i> ر	۴
۰,۲۴	МРа	فشار مخزن سوخت، ۲٫	۵
۰,۴	kg/s	نرخ دبی جرمی جریان، . <i>m</i>	۶
۰,۲	kg/s	نرخ دبی جرمی آب ورودی به <i>ṁ</i> ۱۲٬PEM	۷
۲۹۸	K	دمای آب ورودی به اسکرم <i>جت، T_{۱۲} ,</i>	٨
۳۵۳	K	دمای T _{PEM} ، PEM دمای	٩
۸, ۰		بازده توربین، η_t	١.

جدول ۳- برخی داده های ورودی مورد نیاز شبیه سازی

۰,۷	η_p بازده پمپ، η_p))
۵۶٫۰	η_{G} بازده توان ژنراتور،	١٢

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

مقادير	یکا	پارامتر	رديف
٠,١	МРа	P _{Or}	١
٠,١	МРа	P _{H_Y}	٢
۳۵۳	K	T _{PEM}	٣
٧۶	kJ/mol	E _{act,a}	۴
۱۸	kJ/mol	E _{act,c}	۵
14	$\Omega^{-\gamma}$	λ_a	۶
١.	$\Omega^{-\gamma}$	λ_c	۷
١	μm	D	٨
۱.۷ × ۱۰ ^۵	A/m^{r}	J _c ^{ref}	٩
4.9 × 1."	A/m^{r}	J _a ^{ref}	١.
9,547,5	C/mol	F))

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.

<i>Ex</i> (<i>kW</i>)	s (kJ/kg.K)	h (kJ/kg)	т (kg/s)	P (MPa)	Т (К)	شـــ ماره نقطه
2010	۲۰,۲۵	479,4	۰,۴	•,74	۲۵	١
۲۵۵۱	20,70	۵۷۹٫۸	۰,۴	77	۵۴,۹	٢
۴۷۵۸	۴ ۸,۸۳	ነኖፕለγ	۰,۴	77	۱۰۰۰	٣
7848	۵۰,۲۲	1	۰,۴	4,59	٧١۴,۴	۴
۳۹۵۹	۵۵٫۱۹	۱۴۲۳۵	۰,۴	4,59	۱۰۰۰	۵
7985	١٨۵۵	۱۱۸۵۶	۰,۴	7,188	۸۴۱,۵	۶

جدول ۵- پارامترهای ترمودینامیکی جریان در هر نقطه از سیکل

۳۵۸۱	۵۸,۳۸	14717	۰,۴	7,188	۱۰۰۰	٧
3.40	۵۸,۶۲	١٢٩۵٩	۰,۴	1,447	918,4	٨
٣٣٩٣	۵۹,۹۲	142.1	۰,۴	1,471	۱۰۰۰	٩
7709	۶۰,۲۶	18906	۰,۴	١	918,4	١.
7707	۶۱,۵۲	147.7	۰,۴	١	۱۰۰۰	١١
۷۷,۵۱	•,7۵۱	۷۰,۷۵	• ,• ٣٢١	•,1•1	79.	١٢
۲۸٫۳۱	١,٠٧٣	ምም ዩ,ም	• ,• ٣٢١	•,1•1	۳۵۳	١٣
۱۲,۰۴	۰,۱۵۶	۵۰,۳۶	٠,٠٩٢٩	•,1•1	۳۵۳	14
٢,٣٧٩	۵۵۸۱	442.	۰,۰۱۱۷۱	•,1•1	۳۵۳	۱۵

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]

	فشار پشت پمپ،											
	P ₂ (MPa)											پارامتر های مقایسه ای
`	٣	l	2	١	•	١	۵	٢	•	71	f	
Prese nt	Qin et al	Prese nt	Qin et al	Prese nt	Qin et al	Prese nt	Qin et al	Prese nt	Qin et al	Presen t study	Qin et al	
۲۷,۶۳	77,98	۳۷٫۸۱	۳۷٫۸۱	49,44	49,44	۵۵,۲۵	۵۵,۲۵	۵۸,۹۹	۵۸,۹۹	۶۱٫۲	۶۱,۲	δ (%)
51,80	51,80	77,47	77,47	۳۳,۰۸	۳۳,۰۸	۳۵,۵۹	۳۵,۵۹	۳۷,۱	۳۷,۱	٣٧,٩۶	87,98	φ (%)
٣,٩۴٧	٣,٨٩١	۵,۴۰۰	۵,۳۰۵	۷,۰۶۲	२,८२२	٧,٨٩٢	۷,۵۹۶	۸,۴۲۵	۸,۰۳۰	٨,٧۴١	۸,7۶۶	$w_{net}\left(\frac{MJ}{kg}\right)$

همانطور که در جدول (۶) مشاهده می کنید، نتایج اعتبار سنجی سیکل خنک کن بازیابی اسکرمجت حاکی از این است که کد محا سباتی 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 می شود.



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

شکل (۳) به خوبی نشان میدهد که مدلسازی الکتروشیمایی 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 می شود. با توجه به شکل (۱) و روابط ترمودینامیکی بیان شده در بخش۳، مهم ترین نتایج حاصل از تحلیل انرژی در قالب جدول (۲) بیان گردیده اند.

مقدار	یکا	پارامتر	رديف
۵۵۲۳	kW	$\dot{Q}_{\scriptscriptstyle \Lambda}$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن اول،	١
189.	kW	$\dot{Q}_{ ext{r}}$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن دوم،	٢
۹۴۲,۵	kW	$\dot{Q}_{ au}$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن سوم،	٣
499,7	kW	\dot{Q}_{*} ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن چهار،	۴
499,7	kW	$\dot{Q}_{{}_{{}_{0}}}$ ظرفیت خنک کاری مسیر خنک کن پنجم	۵
• ,۴۳۵۳	$\frac{MJ}{kg}$	توان پمپ، W _{t1}	۶
4,101	$\frac{MJ}{kg}$	توان توربین ۱۰ w _{t1}	۷

جدول ۷- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

۲,۳۰۸	$\frac{MJ}{kg}$	توان توربین ۲، w _{t2}	٨
1,717	$\frac{MJ}{kg}$	توان توربین ۳، w _{t3}	٩
1,717	$\frac{MJ}{kg}$	توان توربین ۴، w _{t4}	١.
8778	kW	\dot{W}_{net} توان خالص خروجی،))
7701	kW	\dot{W}_{G} ، PEM توان ورودی قرار فران ورودی	17
47,14	kg/h	$\dot{m}_{H_{ ext{tr}}}$ تولید هیدروژن،	١٣
۵۲,۷۲	kW	\dot{Q}_{HE} ، PEM بار حرارتی مبدل	١۴
97.5,75	kW	ظرفیت خنک کاری کل، <i>Q</i> _{total}	۱۵
۱۳,۰۱	%	بازدہ انرژی کل سیستم، <i>η</i> en	۱۶

طبق نتایج فوق، مشاهده می شود که بیشترین خنک کاری تو سط 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، توربین ۱ 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 ۲۰٫۱۲ 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

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 در صد است. همانطور که در جدول بالا مشاهده می شود PEM با بیش از ۴۴ در صد 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 در صد 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 ا صلی 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 و 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.



۳,٤. مطالعه پارامتری

در این بخش اثر چندین پارامتر مهم بر روی ا صلی ترین مح صولات و اهداف سیستم 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 شـكل (۵) اثرات نرخ دبی جرمی سـوخت بر روی توان خالص تولیدی، ظرفیت خنک كاری كل، تولید هیدروژن و همچنین بازده انرژی واگزرژی نشان داده شده است. هر سه محصول اصلی سیكل ارائه شده یعنی تولید توان، خنک كاری ا سكرمجت و تولید هیدروژن با افزایش دبی جرمی سـوخت افزایش مییابند (شـكل ۵–الف). و میزان توان تولیدی و خنک كاری اسـكرمجت رابطه مسـتقیم با نرخ دبی جرمی سـوخت افزایش مییابند (شـكل ۵–الف). و میزان توان تولیدی و خنک كاری اسـكرمجت رابطه مسـتقیم با نرخ دبی جرمی سـوخت اسـكرمجت دارند. از طرفی تفاضـل انرژی جریان در ورودی و خروجی هر یک از تجهیزات تولید توان و خنک كاری اسـكرمجت رابطه مسـتقیم با نرخ دبی مرمی سـوخت اسكرمجت دارند. از طرفی تفاضـل انرژی جریان در ورودی و خروجی هر یک از تجهیزات تولید توان و خنک كاری ثابت باقی مانده ا ست. بنابراین افزایش دبی جرمی به معنای افزایش تولید توان و خنک كاری خواهد بود. علاوه بر این، افزایش توان تولیدی که باقی مانده ا ست. بنابراین افزایش دبی جرمی به معنای افزایش تولید توان و خنک كاری خواهد بود. علاوه بر این، افزایش توان تولیدی که بخشی از آن به عنوان ورودی توان الكتریكی PEM است، موجب افزایش چگالی جریان الکترولایزر میشـود(طبق معادله ۳). و افزایش بخشـی از آن به عنوان ورودی توان الكتریكی PEM است، موجب افزایش چگالی جریان الکترولایزر می مود(طبق معادله ۳). و افزایش بخگالی جریان الکترولایزر می مود(طبق معادله ۳). و افزایش بخگالی جریان الکترولایزر می مود(طبق معادله ۳). و افزایش بخگیلی جریان الکترولایزر می مود(طبق معادله ۳). و افزایش بخگیلی جریان الکترولایزر می مود بول اوری تولید تقریبا به یک چگالی جریان الکترولایزر می مود باین می سوخت تقریبا به یک پخشت هاین افزایش مییابند. و بازده انرژی و اگزرژی هر دو مقیاسی هستند حاصله از تقسیم این دو بخش تولید و مصرف انرژی است. موسو انرژی است. موسو می مود و را نشان می دو بخش تولید 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. سر پس در نتیجه ثابت میمانند. شکل ۵– این موضوع را نشان میده.



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 و d 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 م سیرهای خنک کن. پس با افزایش ف شار پشت پمپ در دبی جرمی ثابت میزان خنک کاری م سیر های خنک کن و در نتیجه ظرفیت خنک کاری کل سیکل خنک افزایش میابد. همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد، افزایش تولید توان منجر به افزایش تولید هادوژن می شود. قسمت (ب) شکل (۶) تاثیر تغییرات فشار پشت پمپ بر بازده انرژی و اگزرژی را نشان میدهد. روند افزایش انرژی های تولیدی توسید سیستم است. به روند افزایش جریم میابد. همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد، افزایش تولید میدهد. روند افزایش انرژی های تولیدی توسط سیستم نسبت به روند افزایش جذب گرما در مسیر های خنک کن که به عنوان منبع توان منجر به افزایش انرژی های تولیدی توسط سیستم نسبت به روند افزایش جذب گرما در مسیر های خنک کن که به عنوان منبع



شکل ۶- تاثیر فشار پشت پمپ بر عملکرد سیستم

٥. نتيجه گيري

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 می کند. بخشی از توان تولید شده در سیکل برای تامین نیاز توان PEM الکترولایزر به کار گرفته می شود 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 می باشند:

- 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

Ė _x	نرخ اگزرژی (<i>kW</i>)	Ŵ	نرخ توان (<i>kW</i>)
h	آنتالپی (<i>'kJ. kg</i> ')	J	(A. m^{-2}) چگالی جریان
Ņ	دبی جرمی مولار (^{*Mol.s})	F	ثابت فارادی (C/mol)
ṁ	دبی جرمی (<i>kg.s</i> ⁻¹)	V	پتانسیل الکتریکی (V)
Р	فشار (MPa)	Е	انرژی الکتریکی (KJ/mol)
Ż	نرخ تبادل حرارتی (<i>kW</i>)	$\lambda(x$	رسانایی اهمی مکانی
s	أنتروپی مخصوص (`kJ. kg' . K ['])	D	ضخامت عضو میانی (m)
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت (^{(۱} -kJ.K)	G	انرژی آزاد گیبس (kJ)

علايم يونانى

منابع

- [1] 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]," 1977.
- [⁷] R. Barthélémy, "Recent progress in the National Aerospace Plane program," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. ², no. ^o, pp. ^r-¹^r, ¹9^A⁹.
- [٤] S. Beckel, J. Garrett, and C. Gettinger, "Technologies for robust and affordable scramjet propulsion," in \\$th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, \`.`, p. \9A.
- [°] N. Gascoin, P. Gillard, E. Dufour, and Y. Touré, "Validation of transient cooling modeling for hypersonic application," Journal of thermophysics and heat transfer, vol. Y1, no. 1, pp. A3-95, Y...Y.
- [7] 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 17th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference, 7...o, p. 75.7.
- [V] T. Kanda, G. Masuya, and Y. Wakamatsu, "Propellant feed system of a regeneratively cooled scramjet," Journal of Propulsion and Power, vol. V, no. Y, pp. Y99-T. 1991.
- [^] X. Li, J. Cao, and J. Du. "Performance analysis of an ethylene-fueled scramjet with adjustable finite-rate chemistry." Aerospace Science and Technology, vol. 179, pp. 1.997, 7.977.
- [9] T. Edwards, "Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 19. T. Y. T. Journal of propulsion and power, vol. 19, no. 7, pp. 1. A9-11. Y, T. T.
- [1.]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. ^r¹, no. ¹V, pp. ^V^r¹, ^v¹.
- [1] W. Bao, J. Qin, W. Zhou, and D. Yu, "Performance limit analysis of Recooled Cycle for regenerative cooling systems," Energy Conversion and Management, vol. o., no. A, pp. 19.4-1912, Yought.
- [17] 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. YY", no. 7, pp. °99-7.V, Y..9.
- [1^r]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. °[£], no. [£], pp. ^{9°o-91}, ⁷, ¹).
- [12] H. Cho, A. D. Smith, and P. Mago, "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization," Applied Energy, vol. 177, pp. 17A-1A0, 7.15.
- [1°]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. 77, pp. 17-19, 7.19.
- [17]A. R. Choudhuri and S. Gollahalli, "Combustion characteristics of hydrogen-hydrocarbon hybrid fuels," International journal of hydrogen energy, vol. ^{Yo}, no. ^o, pp. ^{٤ο}1-^٤^Y, ^Y···.
- [1V] 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. rq, DD. A, DD. rq1r-rqra, r-1r.
- [1^]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. ^{Y1}, no. ¹, pp. ^{Y £-T·, Y·1Y}

- [19] 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. $\forall \cdot$, no. \forall , pp. $\forall 90.4 \cdot 7, 7 \cdot \cdot 0$.
- [⁷•]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. ٤, no. ٣٩, pp. ١٣٢٤٣-١٣٢٥٧, ٢, ١٥.
- [¹]M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," International journal of hydrogen energy, vol. ⁿA, no. ¹⁷, pp. ^{٤٩}•¹-^{٤٩٣٤}, ¹•¹^π.
- [^{YY}]R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina, "Simple PEM water electrolyser model and experimental validation," international journal of hydrogen energy, vol. ^{WV}, no. ^Y, pp. 1977-1987, ^Y, 197.
- [^ү^γ]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. ^٤9, no. ¹, pp. ^γ^γ⁶Λ-^γ^γ⁰δ, ^γ··Λ.
- [^{Y ±}]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. ^w[±], no. ^w, pp. 11±7-110A, ^Y···9.
- [Yo]P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Energy and exergy analyses of hydrogen production via solarboosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis," International Journal of Hydrogen Energy, vol. ^r^A, no. [£], pp. ¹Y⁹0-¹A·0, ^r·1^r.
- [^γ⁷]F. Sorgulu and I. Dincer, "A renewable source based hydrogen energy system for residential applications," International Journal of Hydrogen Energy, vol. ^ε^γ, no. ¹), pp. ^οΛε^γ-^οΛο¹, ^γ·¹Λ.
- [^{YV}]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. 115, pp. 371-376, 3019.
- [[↑]A]Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Thermodynamics: an engineering approach," Sea, vol. ¹..., p. ^{AATY}, [†]..[†].
- [^Y⁹]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. ^w, no. ⁹, pp. ^{vwvv}, ^v·^v</sup>.
- [۳۰] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, "Thermal Design and Optimization John Wiley and Sons," Inc. New York, ۱۹۹٦.
- [^{YY}]W. Yu, W. Zhou, Z. Jia, and Z. Han. "Characteristics of scramjet regenerative cooling with endothermic chemical reactions." Acta Astronautica, vol. 190, pp. 1-11, 7.77.