ستاد ملی هفته پژوهش و فناوری

دانشگاه بوعلی سینا
دانشکده مهندسی

تحلیل ترمودینامیکی چرخه توربین گاز مایسوتسنکو (M-Cycle) با کمپرسور دو مرحله ای و تزریق آب اضافه

گروه آموزشی مکانیک
دانشکده مهندسی
دانشگاه بوعلی‌سینا
همدان

- ارائه دهنده: مهدی باخدا دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی دانشگاه بوعلی سینا
- استاد راهنما: جناب آقای دکتر گودرزی دانشیار دانشگاه بوعلی سینا

Mehdi.bakhoda43@gmail.com

چکیده

به دلیل اهمیت بالای انرژی الکتریکی وتقاضای بالا برای برق و همچنین رشد هزینه های تولید توان و سوخت، باعث شده است که برای توسعه و پیشرفت سیکل های تولید توان تحقیقات بیشتری صورت بگیرد. با معرفی توربین گازی گام مهمی در تولید توان برداشته شد که در مراحل اولیه، بازده آن به طور قابل توجهی پایین تر از توربین بخار بود. با گذشت زمان با ارائه روش های مختلف، بازده سیکل توربین گازی بیشتر شد.

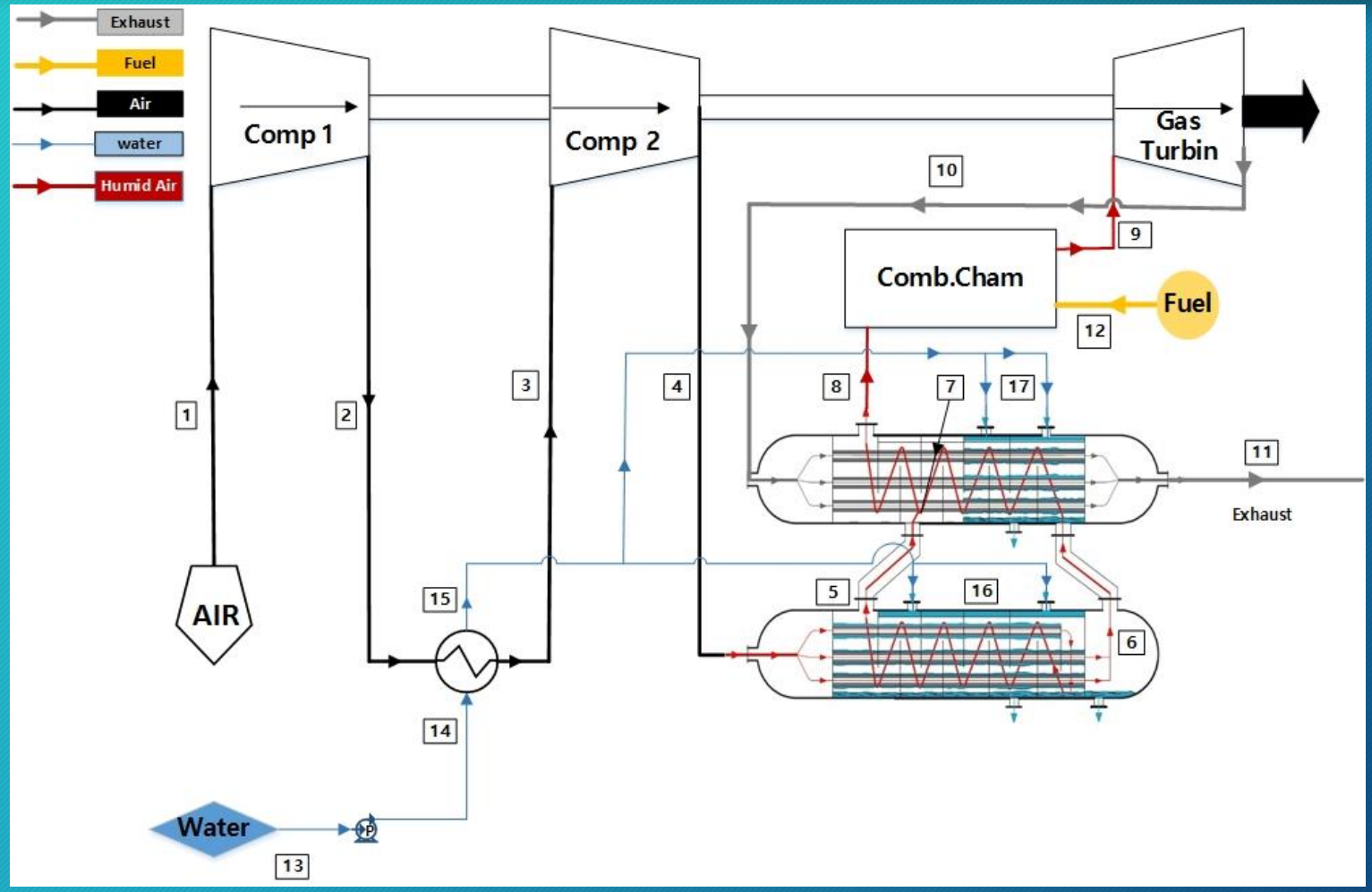
سیکل توربین گاز مایسوتسنکو (M-Cycle) با تکیه بر اصول سیکل برایتون و اضافه کردن یک مبدل جرم و حرارت خاص به آن توانسته است در راستای افزایش بازده سیکل توربین های گاز، موفق عمل کند. در این سیکل با اضافه شدن بخار آب به جریان هوای فشرده بعد از کمپرسور، آنتالپی جریان به علت بالا بودن ظرفیت گرمایی آب افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل تزریق بخار آب به جریان، انتشار آلاینده های NOx کمتر می‌شود. در سیکل توربین گاز مایسوتسنکو برای تزریق بخار آب به جریان از گرمای زائد اگزوز توربین استفاده شده که همین مورد یکی از علل افزایش بازده در این سیکل است. در این پژوهش، سیکل توربین گاز مایسوتسنکو (M-Cycle) به عنوان یک سیکل با بازدهی بیشتر نسبت به سیکل ساده برایتون و سازگار با محیط زیست مورد بررسی قرار می گیرد. از طرفی سعی بر این است که با ترکیب سیکل ساده برایتون و مبدل جرم و حرارت مایسوتسنکو و استفاده مجدد از گرمای خروجی اگزوز و تزریق بخار آب اضافه به جریان و همچنین استفاده از کمپرسور دو مرحله ای با سرد کن میانی، مصرف سوخت و آلاینده های زیست محیطی را کاهش و بازده کلی سیستم را افزایش دهیم که با در نظر گرفتن مزایای برشمرده میتواند بسیار جالب توجه باشد.

کلمات کلیدی: چرخه توربین گاز مایسوتسنکو، سیکل برایتون، کمپرسور دو مرحله ای، تزریق آب.

مقدمه

- در این پژوهش سیکل جدید توربین گاز مایسوتسنکو به منظور استفاده از گرمای خروجی توربین ارائه و با آنالیز انرژی و اگزرژی مورد بررسی قرار گرفته شده است. اگزرژی حداکثر مقدار کار مفیدی است که در تئوری می توان از یک سیستم استخراج کرد، تا زمانی که با محیط خود به تعادل رسید. همچنین بر خلاف انرژی، اگزرژی نه تنها به وضعیت سیستم، بلکه به وضعیت محیط خارجی نیز بستگی دارد. از این رو سعی بر این است با آنالیز انرژی و اگزرژی، نقاط بهینه و تاثیر گذار سیکل را بدست آوریم. اساس کار این سیکل بر پایه سیکل ترمودینامیکی برایتون است که یک مبدل جرم و حرارت مایسوتسنکو بین کمپرسور و محفظه احتراق قرار گرفته و به منظور افزایش رطوبت هوای کاری تنها از گرمای برگشتی اگزوز توربین استفاده می کند. مزیت برشمرده سیکل توربین گاز مایسوتسنکو M-cycle نسبت به سیکل توربین های هوا مرطوب (HAT)، کاهش تجهیزات رطوبت زنی است. در سیکل HAT علاوه بر اشباع کننده جهت رطوبت زنی و افزایش هوای کاری نیاز به یک بویلر است که سبب افزایش هزینه و افت فشار میشود. همین امر سبب شد که شرکت آیدلس با طراحی سیکل M-cycle محدودیت های سیکل HAT را رفع و آن را تجاری سازی کند. این سیکل با وجود پتانسیل بالا در افزایش راندمان و کاهش هزینه های راه اندازی در مرحله مقدماتی هست اما همچنان محققان زیادی به تجزیه و تحلیل این سیکل میپردازند. اقای دکتر مایرون تریباس محقق انجمن علمی و تکنولوژی امریکا در ابتدا بر این باور بود که این سیکل نقض کننده قانون دوم ترمودینامیک است. به عبارتی بر اساس این اصل هیچ سیستمی نمیتواند این فرایند را بدون اتلاف انرژی کاری انجام دهد. درصورتیکه دریافت سیکل M-cycle این اتلاف حرارت را به حداقل میرساند و میتواند به افزایش راندمان کلی سیکل و کاهش آلاینده های هوا کمک کند.

شرح مختصر سیکل



شرح مختصر سیکل

سیکل توربین گاز مایسوتسنکو به شکل زیر عمل میکند:

(۲-۱): سیال هوا با رطوبت نسبی ۶۰٪ وارد سیکل شده و پس از مرحله اول فشرده سازی در کمپرسور اول، دما و فشار آن افزایش میابد.

(۳-۲): هوای گرم وارد اینترکولر شده و ضمن تبادل حرارتی با آب بدون افزایش رطوبت خنک و به کمپرسور دوم وارد میشود.

(۴-۳): هوای خنک شده وارد کمپرسور دوم شده و پس از عملیات فشرده سازی با دما و فشار بالاتر وارد مبدل جرم و حرارت مایسوتسنکو میشود.

(۵-۴): در قسمت پایینی مبدل هوا به سه بخش تقسیم شده و از کانال های خشک مبدل عبور میکند و دمای آن با افت فشار جزئی تا نزدیکی دمای نقطه شبنم هوای ورودی مبدل کاهش میابد. یکی از جریان ها (۱/۳ جریان) در یک مسیر جریان معکوس وارد کانال مرطوب شده و ضمن جذب حرارت از طریق تبخیر نهان آب به بخار، رطوبت آن افزایش و از قسمت پایینی به سمت قسمت بالایی مبدل حرکت میکند.

(۶-۴): اساس کار مبدل مایسوتسنکو خنک کردن هوای گرم خروجی کمپرسور بدون رطوبت زنی تا نزدیکی دمای نقطه شبنم است. دما هوای گرم خروجی از کمپرسور توسط تبادل حرارتی بین کانال خشک و مرطوب در قسمت پایینی مبدل کاهش یافته و وارد قسمت بالایی مبدل میشود.

(۷_۶) و(۷-۵): هوا پس از ورود به قسمت بالایی مبدل در یک جریان معکوس به صورت غیر مستقیم پس از تبادل حرارت با گاز های خروجی اگزوز توربین، دما گاز های خروجی را تا حد ممکن (تا نزدیکی دمای حباب تر در نقطه ۶) پایین اورده و تبخیر شده و به رطوبت آن افزوده میشود.

شرح مختصر سیکل

(۸-۷): هر دو جریان خروجی از قسمت پایینی که با افزایش رطوبت همراه هستند با هم ترکیب و به سمت محفظه احتراق سرازیر میشوند.

(۹-۸): دما و آنتالپی تنبخیر هوای سیال کاری خروجی از مبدل مایسوتسنکو با جذب حرارت از اگزور توربین نسبت به خروجی کمپرسور دوم افزایش میابد. و همین دلیل افزایش بازده توربین گاز میشود. دمای هوای کاری با دریافت مقدار کمتر انرژی نسبت به سیکل ساده توربین گاز افزایش یافته و وارد توربین گاز میشود.

(۱۰-۹): گاز ورودی به توربین با دمای بالا منبسط شده و پس از انجام کاراز توربین خارج و به قسمت بالایی مبدل وارد میشود.

(۱۱-۱۰): همانطور که گفته شد در این قسمت گاز خروجی با دما بالا و فشار محیط وارد مبدل میشود و پس از تبادل حرارت با هوای سیال کاری دمای ان تا نزدیکی دمای حباب تر در نقطه ۶ کاهش میابد. مبدل جرم و حرارت مایسوتسنکو علاوه براستفاده مفید از گرمای خروجی توربین و کاهش دمای گاز اگزوز، آلاینده ها NOx خروجی سیکل را کاهش میدهد.

نقطه ۱۲: سوخت ورودی با ارزش حرارتی و دبی جرمی مشخص جهت افزایش دمای سیال کاری به سیکل وارد میشود.

نقاط ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷: مراحل تزریق آب توسط پمپ از نقطه ۱۳ شروع شده و پس از عبور از اینتر کولر و تبادل حرارتی با سیال کاری، وارد مبدل شده و عملیات تزریق انجام میگیرد.

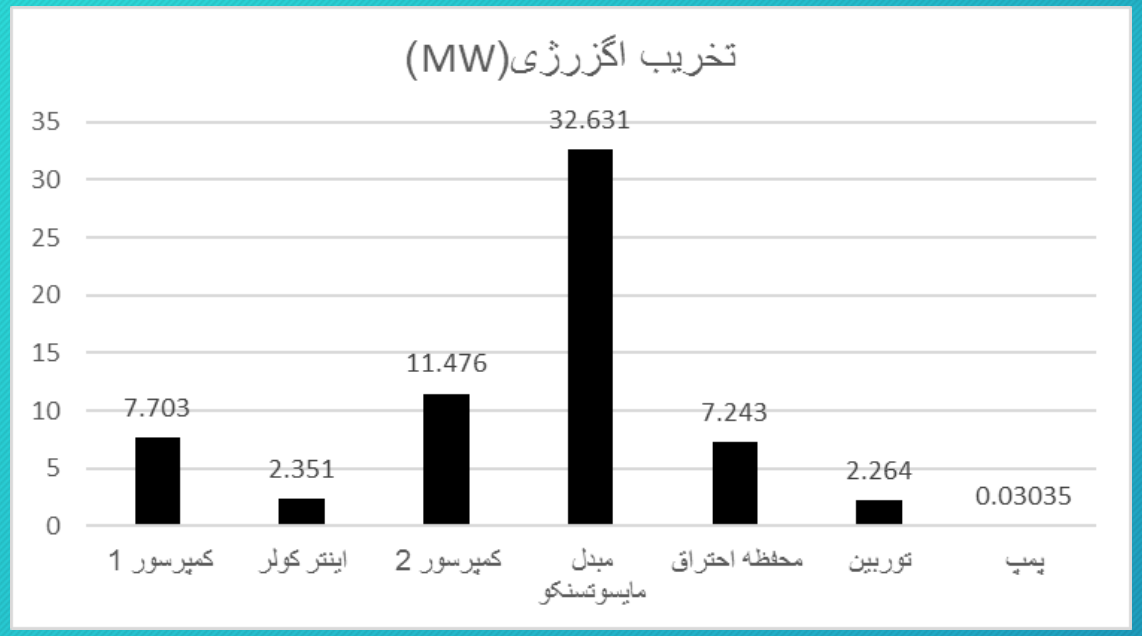
روش انجام تحقیق

- مرور پژوهش های گذشته
- مطالعه سیکل توربین گاز برایتون
- مطالعه مبدل جرم و حرارت مایسوتسنکو
- مطالعه اسا و عملکرد کمپرسور های چند مرحله ای
- تحلیل ترمودینامیکی سیکل مورد نظر در چند حالت مختلف
- بررسی پارامترهای موثر بر راندمان سیستم
- تجزیه و تحلیل نتایج
- مستند سازی پروژ ه

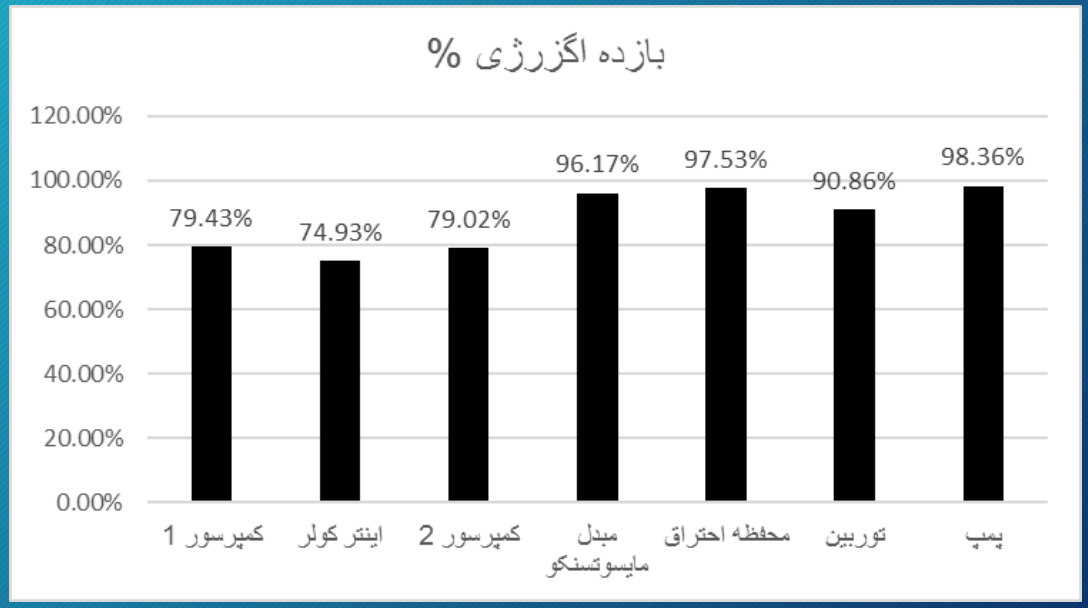
فرضیه‌ها

- جریان پایا و ثابت با زمان است.
- . لوله های رابط و اتصالات آدیاباتیک فرض می شود .
- از افت فشار در لوله ها و قسمت پایین مبدل مایسوتسنک و صرف نظر می شود.
- دما و فشار هوا سیال کاری و اب ورودی سیکل ، دما و فشار محیط و رطوبت نسبی ۶۰٪ در نظر گرفته شده است.
- افت فشار در هر مرحله از کمپرسور ، قسمت بالایی مبدل مایسوتسنکو و توربین ۵٪ میباشد.
- دمای خروجی محفظه احتراق ۱۷۴۶ کلوین است.
- دبی جرمی هوای سیال کاری و آب ورودی به ترتیب ۱۴۲ و ۶ کیلوگرم بر ثانیه فرض شده است.
- مجموع نسبت تراکم در کمپرسور ها ۱۰ میباشد.
- ارزش حرارتی پایین سوخت ۴۷۵۰۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم است.

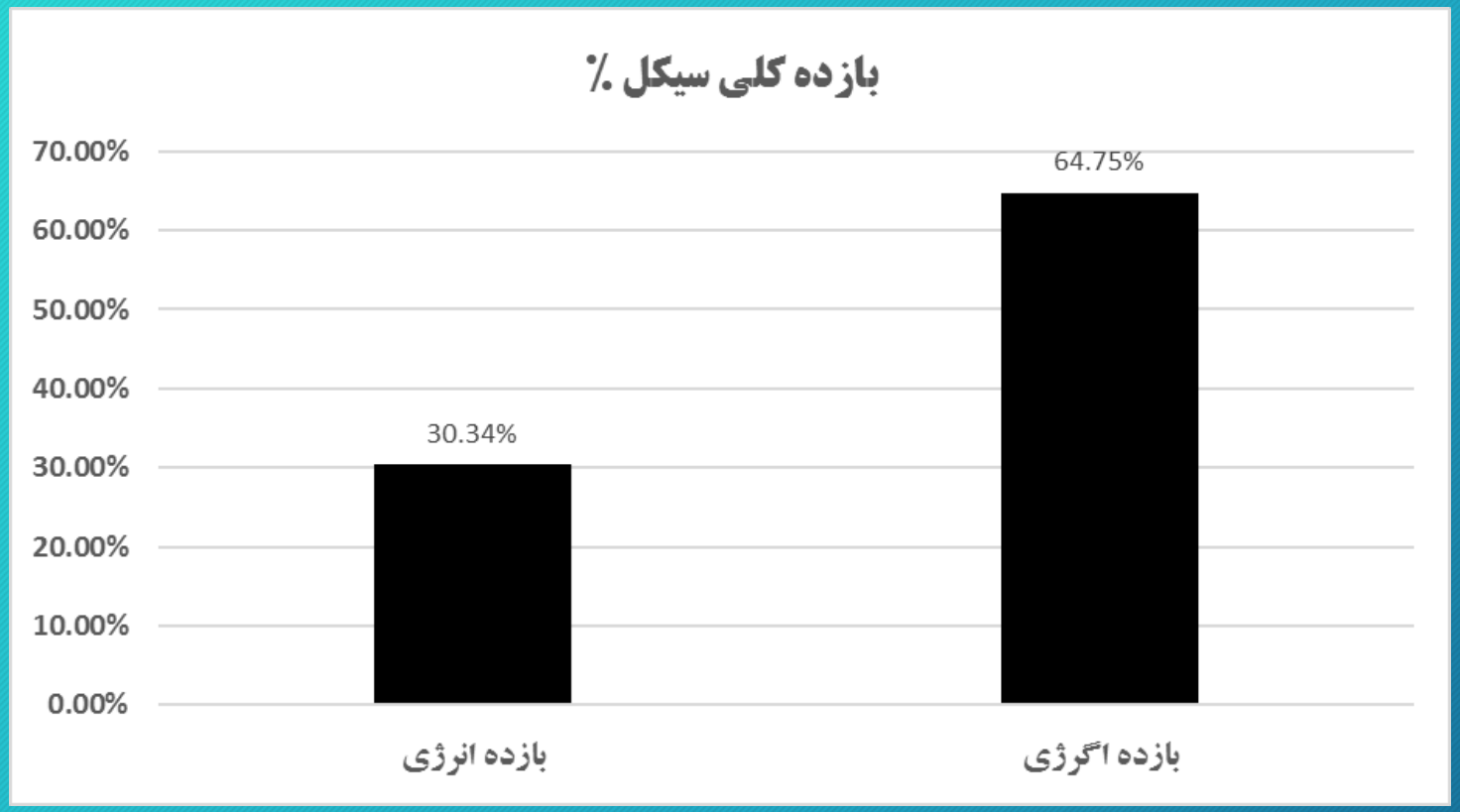
نتایج و عملکرد سیکل



- بیشترین تخریب اگزرژی مربوط به مبدل مایسوتسنکو ۲۲.۷۱۶ مگاوات و کمترین تخریب اگزرژی در پمپ ۰.۰۳۰۳۵ مگاوات است.
- همچنین حداکثر بازده اگزرژی در پمپ ۹۸.۳۶ ٪ و حداقل بازده اگزرژی در اینتر کولر ۷۴.۹۳ ٪ بدست آمده است.

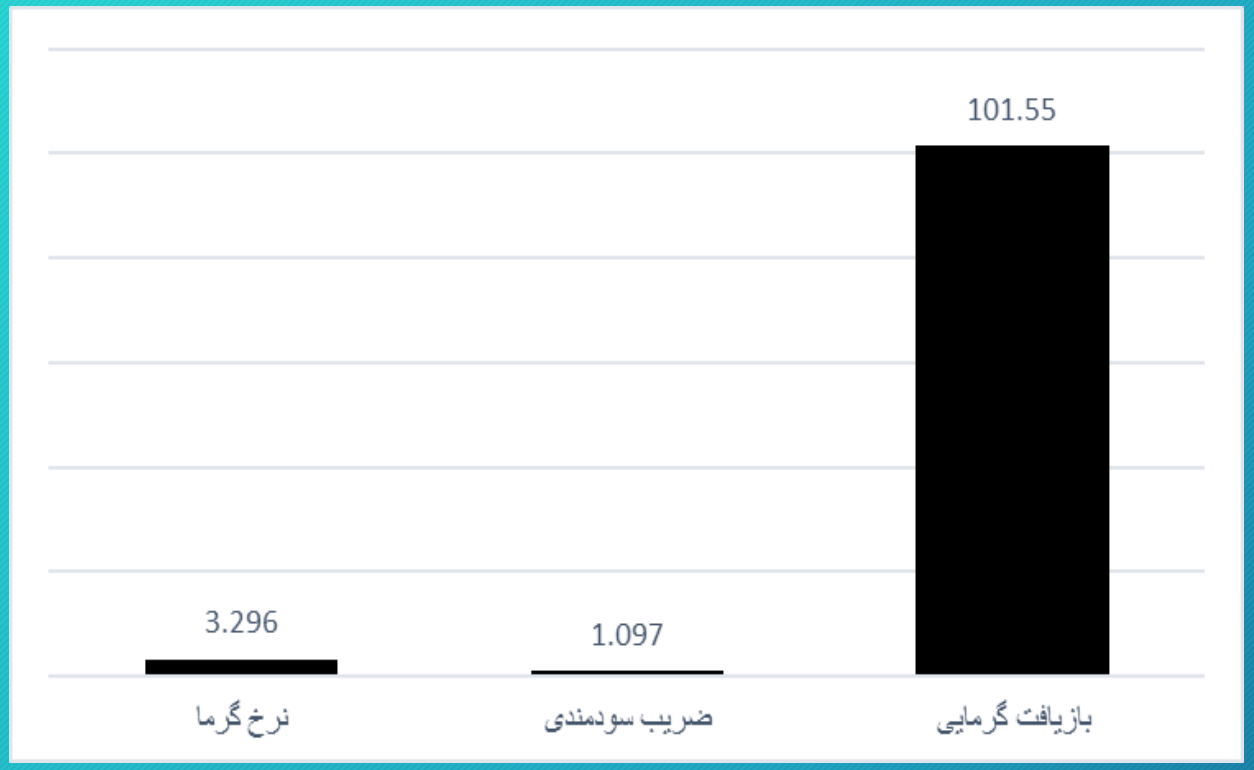


نتایج و عملکرد سیکل



- در این پژوهش بازده کلی انرژی و اگزرژی سیکل به ترتیب ۳۰.۳۴٪ و ۶۴.۷۵٪ میباشد.
- کار خالص خروجی این سیکل با فرضیات موجود ۴۰ مگاوات میباشد.

نتایج و عملکرد سیکل



- در توربین های گازی نرخ گرما مبنایی برای برآورد کارایی سیستم میباشد که مقدار آن ۳.۲۹۶ است.
- ضریب سودمندی یا همان استفاده مفید و هدفمند از گرمای دود خروجی توربین گازی یک معیار تاثیر گذار در سیکل توربین گاز است و برای مشخص کردن کارایی سیکل بیان می شود و مقدار ان در این پژوهش ۱.۰۹۷ بدست آمده است.
- بازیافت گرمایی در مبدل مایسوتسنکو ۱۰۱.۵۵ مگاوات برآورد شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت افزایش بازده کلی سیکل و کاهش آلاینده های زیست محیطی تغییراتی در سیکل توربین گاز ساده صورت گرفته است. با اضافه شدن مبدل جرم و حرارت توربین گاز مایسوتسنکو بعد از کمپرسور علاوه بر بازیافت گرمایی در مبدل با تبادل حرارت گاز خروجی اگزوز و هوای کاری که سبب افزایش دما وآنتالپی بخار هوا قبل از محفظه احتراق میشود، انرژی کمتری جهت بالا بردن دمای گاز در محفظه شده و نتیجه این امر بالا رفتن راندمان را در پیش دارد. از طرفی با استفاده از کمپرسور دو مرحله ای و اضافه کردن کولر تبخیری غیر مستقیم در سیکل میتوان به افزایش راندمان سیکل کمک کرد. تحلیل‌های ترمودینامیکی نشان داده‌اند افزایش دمای هوای خروجی از کمپرسور باعث افزایش هوای خنک‌کننده پره‌های توربین و تأثیر منفی روی بازده سیکل می گذارد. در سیکل ایده‌آل توربین گاز افزودن یک خنک‌کن میانی می‌تواند افزایش کار ویژه را به همراه داشته باشد. چراکه مرحله دوم تراکم در دمای پایین‌تری شروع شده و کار کمتری مصرف می‌شود همچنین با افزایش تعداد خنک‌کن‌های میانی، فرایند تراکم به فرایند هم‌دما نزدیک شده و باعث افزایش کار ویژه سیکل می‌شود. به ازای توان خروجی معین، افزایش تعداد خنک‌کن‌های میانی باعث کاهش اندازه کمپرسور، هزینه‌های جاری و سرمایه‌گذاری آن خواهد شد. در این روش افزایش بازده، متناسب با نسبت فشار کمپرسور می‌باشد ولی برای یک دمای ورودی معین نسبت فشار بهینه‌ای وجود دارد که در آن بازده سیکل حداکثر می‌شود. بنابراین افزایش نسبت فشار با محدودیت ترمودینامیکی همراه است که قرار دادن خنک‌کن میانی در بسیاری از موارد باعث افزایش راندمان سیکل می‌شود.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات و تلاش های بی دریغ استاد محترم جناب آقای دکتر محسن گودرزی که در مسیر این پژوهش با اینجانب همکاری داشته اند، تشکر و مراتب سپاس قلبی خود را اعلام نموده و موفقیت ایشان را ازخداوند متعال خواهانم.

منابع

- 1. Gillan, L., & Maisotsenko, V. (2003, January). Maisotsenko open cycle used for gas turbine power generation. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 3686, pp. 75-84).
- 2. Saghafifar, M., & Gadalla, M. (2015). Analysis of Maisotsenko open gas turbine bottoming cycle. Applied Thermal Engineering, 82, 351-359.
- 3. Najjar, Y. S., Abubaker, A. M., & El-Khalil, A. F. (2015). Novel inlet air cooling with gas turbine engines using cascaded waste-heat recovery for green sustainable energy. Energy, 93, 770-785.
- 4. Guangya, Z., Chow, T. T., Fong, K. F., & Lee, C. K. (2019). Investigation on humidified gas turbine cycles with Maisotsenko-cycle-based air saturator. Energy Procedia, 158, 5195-5200.
- 5. Saghafifar, M., & Gadalla, M. (2015). Analysis of Maisotsenko open gas turbine power cycle with a detailed air saturator model. Applied Energy, 149, 338-353.
- ۶. Haouam A, Derbal C, Mzad H, editors. Thermal performance of a gas turbine based on an exergy analysis. E3S Web of Conferences; 2019: EDP Sciences.
- ۷. Caliskan H, Dincer I, Hepbasli A. Assessment of maisotsenko combustion turbine cycle with compressor inlet cooler. Progress in Clean Energy, Volume 1: Springer; 2015. p. 41-55.
- ۸. Zhu G, Chow T, Fong K, Lee C. Comparative study on humidified gas turbine cycles with different air saturator designs. Applied Energy. 2019;254:113592.
- ۹. Horlock J, Bathie WW. Advanced gas turbine cycles. 2004.