



An Experimental Investigation into the Coupling of Gamma-Type Stirling Engine to Convert Thermal Energy to Cooling Energy in Different Laboratory Conditions

Ezatollah Hassanzadeh¹, Mehdi Aliehyaei^{2*}, Saeed Jafari Mehrabadi³, Arash Mohammadi⁴, Hossein Mazaheri⁵

¹PhD, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Karaj (Shahid Beheshti), Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Alborz, Iran.

²Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Pardis Branch, Islamic Azad University, Pardis, Iran.

^{3,5}Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

⁴Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.05.2020

Revised: 11.01.2020

Accepted: 23.01.2021

Keyword:

Gamma Stirling

Couple

Cooling

Power supply

Biomass

*Corresponding Author:

Mehdi Aliehyaei

Email: aliehyaei@pardisiau.ac.ir

ABSTRACT

The main aim of this research was to experimentally investigate the two coupled identical ST500 gamma-type Stirling engines and convert thermal energy to cooling energy. Using a new structure and two coupled Stirling engines at different temperatures and pressures and use of biomass fuel within the 4 -8 bar average pressure range of the first engine hot source, the 1-4 bar average pressure range of the second engine cold source, and Stirling hot engine temperature range of 480-580 °C, the effective cooling is obtained in the cold engine. In doing tests, attempts were made to reach lower than 9 percent error results in different parts of engine, including insulation, fluid leakage, belt loosening, and measurement devices. According to the obtained results, a 8 bar increase in the average pressure range of the gas in the first engine hot source, a 1 bar reduction in the average pressure range of the gas in the second engine cold source, the increased temperature of the hot source up to 580 °C, and the use of the light operating fluid such as helium will affect the generation of cooling up to -16°C.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تخصصی مهندسی

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

زمستان ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ۲۱۳-۱۸۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.128403

20.1001.1.23829796.1399.17.4.11.9



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی تجربی کوپلینگ موتور استرلینگ گاما برای تبدیل انرژی حرارتی به سرمایشی در شرایط مختلف آزمایشگاهی

عزت‌اله حسن‌زاده^۱، مهدی علی‌احیایی^{۲*}، سعید جعفری مهرآبادی^۳، آرش محمدی^۴، حسین مظاهری^۵

- ۱- دانش‌آموخته دکتری، دپارتمان مهندسی مکانیک، آموزشکده فنی‌وحرفه‌ای شهید بهشتی کرج، دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای استان البرز، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- ۳ و ۵- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.
- ۴- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران.

چکیده

هدف اصلی از این تحقیق، بررسی تجربی اتصال دو موتور استرلینگ مشابه ST500 از نوع گاما و تبدیل انرژی حرارتی به سرمایشی است. در این تحقیق با استفاده از یک ساختار جدید و با استفاده از دو موتور استرلینگ به صورت کوپل در دما و فشارهای مختلف و استفاده از سوخت زیست‌توده در محدوده فشار متوسط منبع گرم موتور اول ۴ تا ۸ بار، محدوده فشار متوسط منبع سرد موتور دوم ۱ تا ۴ بار و محدوده دمایی موتور گرم استرلینگ ۴۸۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان به سرمایش مؤثری در موتور سرد رسید. در انجام آزمایش‌ها سعی شد تا میزان خطاها در قسمت‌های مختلف موتور از قبیل عایق کاری، نشستی سیال، لقی تسمه و دستگاه‌های اندازه‌گیری به کمتر از ۹ درصد برسد. نتایج نشان داد که افزایش فشار متوسط گاز در منبع گرم موتور اول تا ۸ بار و کاهش فشار متوسط گاز در منبع سرد موتور دوم تا ۱ بار، بالا بودن درجه حرارت منبع گرم تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و استفاده از سیال عامل سبک مانند هلیوم در تولید سرمایش تا ۱۶- درجه سانتی‌گراد مؤثر خواهد بود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴

کلید واژگان:

استرلینگ گاما
کوپل
سرمایش
منبع تغذیه
زیست‌توده

*نویسنده مسئول: مهدی علی‌احیایی

پست الکترونیکی:

aliehyaei@pardisiau.ac.ir



© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

موتور استرلینگ

موتور استرلینگ، یکی از انواع موتورهای هواگرم است که گاز در اثر گرم شدن، تمایل به افزایش حجم و در اثر سرد شدن، تمایل به کاهش حجم دارد و گرمایش و سرمایش متوالی موتور موجب به حرکت درآمدن پیستون‌ها و مکانیزم لنگ می‌شود. امروزه فناوری‌های مختلفی در زمینه توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این فناوری‌ها که امروزه مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته است استفاده از یک موتور حرارتی با نام موتور استرلینگ است. موتور استرلینگ، یک موتور احتراق خارجی است و انعطاف‌پذیری بالایی در استفاده از منابع انرژی مختلف دارد و می‌تواند انرژی حرارتی موجود در منابع تجدیدپذیر را به انرژی مکانیکی و الکتریکی تبدیل کند [۱].

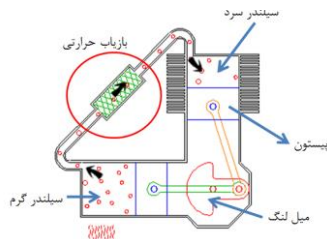
موتور استرلینگ، یکی از انواع موتورهای هوا گرم است که مانند انواع موتورهای حرارتی با استفاده از تبادل حرارت میان دو منبع گرم و سرد می‌تواند کار مکانیکی یا الکتریکی تولید کند. حرارت در دمای بالا به موتور وارد می‌شود، بخشی از آن به کار مکانیکی یا الکتریکی تبدیل می‌گردد و مابقی آن در دمای پایین‌تر، از موتور خارج می‌شود. موتور استرلینگ از نظر عملکرد، ساده و دارای گشتاور مناسب است و چنانچه به‌صورت معکوس به کار گرفته شود می‌تواند جایگزین خوبی برای سیکل‌های تبرید باشد. امروزه مطرح‌شدن آلیاژهای جدید و مواد آب‌بندی و نیز استفاده از نرم‌افزارها و کامپیوترهای پیشرفته که انجام محاسبات دقیق و پیچیده را آسان کرده، تکامل این موتور را سریع خواهد کرد. چنانچه بهینه‌سازی موتورهای فعلی به‌منظور کاهش میزان سوخت و میزان گازهای آلاینده و صدا در حد استانداردهای بین‌المللی سازمان‌های محیط‌زیست میسر نشود، بدون شک باید به سراغ موتورهای استرلینگ رفت [۲].

انواع موتور استرلینگ

موتورهای استرلینگ، طی سالیان متمادی، پیشرفت کرده‌اند و طرح‌های مختلفی از این نوع موتور توسعه داده شده است. انواع مختلف موتور استرلینگ با نام‌های آلفا، بتا، گاما و پیستون آزاد، شناخته شده است. اصول ترمودینامیکی برای همه آن‌ها یکسان می‌باشد و تفاوت اساسی آن‌ها از نظر نحوه قرار گرفتن اجزای مختلف موتور، در کنار یکدیگر است. تمامی موتورهای استرلینگ دارای پنج حجم کنترلی هستند که به ترتیب محفظه تراکم، کولر، بازیاب، گرم‌کن و محفظه انبساط است [۳].

موتور نوع آلفا

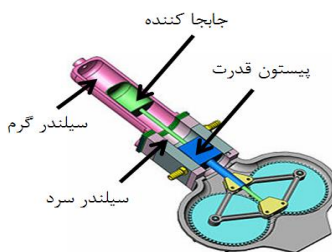
موتور نوع آلفا دارای دو سیلندر مجزا برای فضاهای تراکم و انبساط است و در هر سیلندر، یک پیستون قرار دارد. دو سیلندر مجزا به‌واسطه بازیاب حرارتی و لوله رابط، به هم متصل شده‌اند. سیلندر گرم در کنار منبع گرم و سیلندر سرد در کنار منبع سرد قرار می‌گیرد. این نوع از موتورها، از لحاظ مفهومی، ساده‌ترین ترکیب را در میان انواع موتورهای استرلینگ دارند. در موتور نوع آلفا حجم هریک از محفظه‌های گرم و سرد موتور به ترتیب با استفاده از پیستون‌های گرم و سرد که حرکت آن تحت کنترل است، تعیین می‌شود. در شکل ۱ طرح‌واره موتور استرلینگ با ساختار آلفا به‌همراه منبع ورود حرارت و مدفن حرارتی آن نشان داده شده است که در آن، حرکت پیستون‌ها توسط چرخش میل‌لنگ کنترل می‌شود و چهار فرایند بیان‌شده در هر ۹۰ درجه از چرخش میل‌لنگ ایجاد می‌شوند. در این روش نیاز است تا هر دو پیستون گرم و سرد، درزبندی شده باشد؛ این امر ممکن است برای پیستون سمت سرد، مشکلی ایجاد نکند اما درزبندی کامل پیستون سمت گرم با توجه به ضریب انبساط حرارتی متفاوت پیستون و جداره سیلندر، کار مشکلی خواهد بود که یکی از پیچیدگی‌های طراحی این ساختار محسوب می‌گردد [۳].



شکل ۱. شماتیک موتور استرلینگ نوع آلفا [۳]

موتور نوع بتا

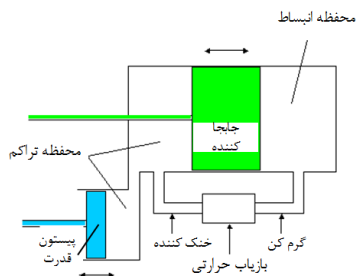
اختراع رابرت استرلینگ به‌عنوان اولین و قدیمی‌ترین موتور استرلینگ دارای ساختار بتا بوده است. در موتور نوع بتا، پیستون سمت گرم، حذف می‌شود و به‌جای آن، قطعه‌ای استوانه‌ای به نام جابه‌جاکننده در میان دو محفظه گرم و سرد قرار خواهد گرفت. در این حالت با توجه به حذف پیستون گرم، مشکل درزبندی اطراف پیستون از بین می‌رود [۴].



شکل ۲. شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا [۴]

موتور نوع گاما

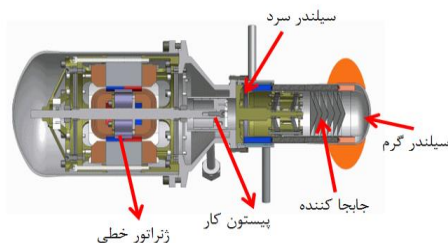
موتور استرلینگ نوع گاما از لحاظ ساختاری شبیه به موتور بتا است؛ با این تفاوت که پیستون در سیلندری جدا نسبت به جابه‌جاکننده قرار دارد. موتور استرلینگ گاما نسبت به نمونه‌های آلفا و بتا، نسبت تراکم کمتری دارد اما به دلیل این‌که تنها پیستون قدرت آن نیاز به آب‌بندی دارد و سیلندرها مجزا هستند، از لحاظ مکانیکی، ساده‌ترین آرایش را در میان سایر انواع موتورهای استرلینگ دارد [۴].



شکل ۳. شماتیک موتور استرلینگ نوع گاما [۴]

موتور نوع پیستون آزاد

این نوع از موتورها از حرکت رفت و برگشتی پیستون، تولید توان می‌کنند و در واقع نیازی به چرخ طیار و میل‌لنگ ندارند؛ به همین دلیل، مشکلات مربوط به بالانس و خرابی بلبرینگ یا پاتاقان را نیز ندارند. علاوه بر این، به دلیل حجم و وزن کمترشان نسبت به انواع دیگر، قابلیت نصب آن‌ها در مکان‌های مختلف مانند دیش خورشیدی، آسان‌تر است. به دلیل نبود چرخ طیار در موتورهای پیستون آزاد، به‌منظور برگشت پیستون، از یک فنر صفحه‌ای یا تیر نوسانی استفاده می‌کنند یا این‌که چند موتور پیستون آزاد را مطابق شکل ۴ به یکدیگر متصل می‌کنند [۵].



شکل ۴. شماتیک موتور استرلینگ نوع پیستون آزاد [۵]

در زمینه تحلیل و مدل‌سازی موتور استرلینگ، اشمیت [۶] اولین تحلیل ترمودینامیکی را انجام داد. در این مدل، دمای محفظه تراکم با سردکن و دمای محفظه انبساط با گرم‌کن برابر و ثابت در نظر گرفته و تحلیل هم‌دما ارائه شده است. اوریلی و برکوویچ [۳] نظریه آدیاباتیکی را کامل‌تر کردند. در این مدل، معادلات دیفرانسیل حاکم بر محفظه‌ها به‌صورت عددی با روش رانج کوتاه حل شده و به‌منظور پیش‌بینی حل عددی، تأثیرات افت فشار اصطکاکی جریان گاز در بازیاب، تأثیر بازیابی غیرآدیاباتیکی در بازیاب و تصحیح دمای گاز داخل گرم‌کن و سردکن‌ها در نظر گرفته و روشی به نام سیمپل ارائه شده است. فینکلشتاین [۷] محفظه‌های تراکم و انبساط را به‌صورت آدیاباتیکی در نظر گرفت. در این تحلیل، دمای گاز طی فرایند تراکم و انبساط، تغییر می‌کند و گرم‌کن و سردکن به‌صورت هم‌دما در نظر گرفته شد. پراکاش و همکاران [۸] تأثیر افزایش راندمان ناشی از استفاده از موتور استرلینگ در سیکل ترکیبی اتو و استرلینگ را بررسی کردند. موتور استرلینگ بار الکتریکی موردنیاز خودرویی موردبررسی را با استفاده از اختلاف دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد بین منابع گرم و سرد را تأمین می‌کند. این اختلاف دما از انرژی هدررفته توسط سیستم خنک‌کاری خودرو تأمین می‌شود و میزان آن ۹۵۰ وات است. در این طرح، موتور استرلینگ به‌جای تسمه موتور، دینام خودرو را به چرخش درمی‌آورد.

ضیاء بشر حق و محمودی [۹] مطالعاتی در زمینه موتور استرلینگ نوع بتا، انجام و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که با تغییر گاز عامل و استفاده از گاز هیدروژن به‌جای گاز هلیوم، میزان حرارت خروجی و توان خروجی موتور کاهش می‌یابد درحالی‌که راندمان موتور، افزایش پیدا می‌کند. در صورتی‌که توان حرارتی وارد شده به موتور زیاد باشد هلیوم، گزینه مناسبی خواهد بود. از دیگر نتایج این تحقیق این‌که جریان انرژی در بازیاب موتور استرلینگ، تقریباً ۵ برابر بیشتر از گرم‌کن و ۶ برابر بیشتر از خنک‌کن شده است. همچنین با افزایش قطر پیستون موتور استرلینگ، توان کاهش‌یافته درحالی‌که راندمان موتور استرلینگ افزایش پیدا کرده است.

والنتی و همکاران [۱۰] یک واحد تولید هم‌زمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ برای تولید توان الکتریکی در فشارهای کاری مختلف موتور به‌صورت آزمایشگاهی و عددی را ارزیابی کردند.

کرمی و صیادی [۱۱] به بهینه‌سازی ظرفیت سیستم تولید هم‌زمان سه‌گانه با موتور استرلینگ برای چهار اقلیم آب‌وهوایی مختلف ایران به کمک سه هدف، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش تولید آلاینده‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌های کل سالانه پرداخته‌اند.

هوشنگ و همکاران [۱۲؛ ۱۳] در تحقیق خود به بهبود پارامترهای کنترل جابه‌جاکننده گاز در موتور استرلینگ خورشیدی به‌منظور افزایش راندمان و همچنین بهبود پارامترهای کنترل جابه‌جاکننده گاز شامل دامنه، فاز و فرکانس موتور استرلینگ پرداخته‌اند؛ به‌گونه‌ای که بازده حرارتی و توان تولیدی موتور افزایش می‌یابد. به‌منظور حصول اطمینان از محاسبات مدل ریاضی، آزمایشی بر موتور استرلینگ نوع گاما با استفاده از کد تحلیل ترمودینامیکی مرتبه سوم، طراحی و انجام گرفت و طی آن فشار مطلق سیال، زاویه میل‌لنگ و سرعت آن به‌صورت لحظه‌ای خوانش و ثبت گردیده است. همچنین توان تولیدی موتور با استفاده از یک ژنراتور اندازه‌گیری و نتایج مدل ریاضی در همان شرایط آزمایش با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقایسه و از عملکرد آن، اطمینان حاصل شد. میانگین خطای مدل‌سازی ریاضی و آزمایشی در حدود ۱۰ درصد نشان داده شد.

آمارلو و همکاران [۱۴] تحلیل ترمودینامیکی پارامترهای عملکردی ساختار جدید سه سیلندر موتور استرلینگ و مدل‌سازی آن را در نرم‌افزار تحلیلی صنعتی جی‌تی‌سوویت انجام دادند. نتایج تحلیل نشان داد که افزایش سرعت دورانی برای افزایش عملکرد موتور مناسب نبوده و بازده موتور را کاهش داده است.

دمیرچی و همکاران [۱۵] از یک موتور استرلینگ نوع گاما برای تولید هم‌زمان گرما و برق در مقیاس کوچک استفاده کرده و در فشارهای کمتر از ۱ مگا پاسکال توان خروجی موتور به روش آزمایشگاهی و با تحلیل اشمیت، مقایسه شده است.

چهارطاقی و شیخی [۱۶] مدل‌سازی هم‌زمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ بتا از دیدگاه مصرف سوخت را با تحلیل آدیاباتیک غیرایده‌آل بررسی کردند.

جهانی کلدی و همکاران [۱۷] یک موتور استرلینگ برای تولید هم‌زمان برق و گرمایش و سرما در منطقه مسکونی با آب‌وهوای متفاوت طراحی کردند. موتور مورد استفاده از نوع آلفا بوده و شبیه‌سازی سیستم در نرم‌افزار جی‌تی‌سوویت انجام شده است. با توجه به نتایج، بازدهی ماکزیمم، بین محدوده ۷۹ تا ۸۸ درصد در شرایط مختلف آب و هوایی بود. سیستم طراحی‌شده منجر به کاهش آلودگی هوا از طریق کاهش CO_2 ، CO و NO_x شده و نشستی این سیستم در فشارهای پایین، مقدار کمتری را نشان داد. فرانسیسکو کالیس و همکاران [۱۸] استراتژی بهینه‌سازی از یک سیستم خنک‌کننده، حرارت و برق ترکیبی را برای یک موتور به‌صورت تحلیل عددی دقیق انجام دادند و متوجه شدند که ظرفیت بهینه سیستم، کمتر از طراحی واقعی شده است.

اربابی و همکاران [۱۹] عملکرد کلی یخچال را برای موتور حرارتی جفت استرلینگ را بررسی کرده و میزان کار مربوط به خنک‌کننده نهایی را با توجه به تأثیرات ساختمانی و پارامترهایی مثل نسبت دما برای موتور و تراکم آن بررسی کردند.

انصاری‌نصب و همکاران [۲۰] ترکیب موتور استرلینگ با پیل سوختی کربنات مذاب، توربین گاز را به‌منظور تولید هم‌زمان برق و گرمایش و سرما مطالعه و پارامترهای اساسی و تأثیرگذار بر سیستم از نظر اقتصادی-انرژی و همچنین بر هزینه‌های سیستم از طریق آنالیز حساسیت بررسی کرده و در نهایت، سه استراتژی برای حذف هزینه‌های زائد پیشنهاد داده که موجب بهبود عملکرد سیستم شده است.

دی دای و همکاران [۲۱] فرایند موتور استرلینگ را با استفاده از زمان محدود ترمودینامیک و با استفاده از فرضیه توزیع یکنواخت دما، تحلیل و تأثیر پارامترهای مختلف و محدودیت‌های آن را بررسی کردند.

کتولی و همکاران [۲۲] به شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی یک واحد یخچال استرلینگ برای تبدیل انرژی الکتریکی-مکانیکی به انرژی سرمایشی را به‌صورت تجربی و تأثیرات فشار سیال و توان دینام برای سرمایش پرداختند.

حسن‌زاده و همکاران [۲۳] به بررسی تجربی موتور استرلینگ تکی نوع گاما برای تولید سرمایش با استفاده از گازهای مختلف پرداخته‌اند. نتایج آن با استفاده از سیال عامل هوا به دمای حدود ۲۳- درجه سانتی‌گراد و با گاز هلیوم به دمای حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد رسید. نتایج نشان داد که افزایش توان منبع تغذیه، فشار متوسط گاز، زمان روشن شدن منبع تغذیه و استفاده از سیال عامل سبک مانند هوا، هلیوم در تولید سرمایش مؤثر خواهد بود.

این تحقیق در ادامه کار مقاله [۲۳] که از موتور استرلینگ تکی نوع گاما و استفاده از منبع تغذیه به‌منظور تولید سرمایش نگارش شده است که در یک ساختار جدید به‌صورت تجربی و با استفاده از کوپل دو موتور استرلینگ نوع گاما ST500 و تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی برای تولید سرمایش توسط سیال عامل هلیوم در محدوده فشار متوسط منبع گرم موتور اول ۴ تا ۸ بار و محدوده فشار متوسط منبع سرد موتور دوم ۱ تا ۴ بار و محدوده دمایی موتور گرم استرلینگ ۴۸۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان به سرمایش مؤثری در موتور سرد رسید. راه‌اندازی موتور استرلینگ اول با استفاده از احتراق منابع زیست‌توده به‌صورت آزمایشگاهی انجام و گرمای ناشی از احتراق مواد و ضایعات کشاورزی به موتور استرلینگ اول منتقل شد و موتور، شروع به کار کرد و موتور استرلینگ دوم را به حرکت درآورد و تولید سرمایش کرد. با افزایش انرژی حرارتی تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش فشار تغذیه سیال عامل موتور استرلینگ گرم تا ۸ بار و کاهش فشار تغذیه سیال موتور سرد تا ۱ بار می‌توان به سرمایش زیر صفر درجه سانتی‌گراد دست یافت. تولید سرمایش از منابع تجدیدپذیر علاوه بر تأثیرات زیست‌محیطی، آینده انرژی را نیز امن‌تر می‌سازد. تولید سرمایش با توجه به تحقیقات انجام‌شده روش فوق جدید بود و تابه‌حال انجام نشده و با خطای کمتر و دقت بیشتری، نتایج دقیق‌تری به‌دست آمد و در یک نمونه آزمایشگاهی موتور استرلینگ ST500 نوع گاما، برای کاربرد سرمایشی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی پیشنهاد می‌گردد.

به‌طور خلاصه، اهداف این تحقیق، طراحی و ساخت یک محفظه گرمایی با سوخت زیست‌توده برای منبع دمای بالا و تولید توان مکانیکی توسط موتور استرلینگ اول و در نهایت تولید سرمایش توسط موتور استرلینگ دوم بوده است. در انجام آزمایش‌ها مقادیر دما، بازده، توان، فشار در اثر دماهای مختلف در گرمایش و سرمایش موتور استرلینگ گاما ST500 با استفاده از دستگاه خوانشگر موتور آزما و نرم‌افزار آدام اندازه‌گیری شد و نتایج با تحقیقات قبلی، مقایسه و اعتبارسنجی براساس کد Nlog انجام شد.

کد Nlog

کد Nlog توسط برنامه متلب نوشته‌شده است و برای آنالیز ترمودینامیکی موتور استرلینگ استفاده می‌شود و یک کد آنالیز سیکل موتور استرلینگ است که از معادلات مرتبه سوم در آن استفاده شده است. این کد، گرمای خروجی و توان تولیدی موتور استرلینگ را محاسبه می‌کند.

مشخصات هندسی تمام کانال‌های انتقال گاز، لوله‌ها و محفظه‌های انبساط و تراکم هندسه اتصالات بین بخش‌های متحرک موتور فشار اولیه موتور و دماهای اولیه در هر نقطه دمای دیواره مبدل حرارتی که با گذشت زمان، ثابت در نظر گرفته می‌شود. کد Nlog تمامی کانال‌ها و لوله‌های انتقال گاز در موتور را به حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌کند و پارامترهای دینامیکی و ترمودینامیکی برای هر کدام از حجم کنترل‌ها را به‌وسیله حل کردن معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی تعیین می‌کند. با استفاده از این ساختار می‌توان به‌طور مستقیم از گرمای ناشی از منابع تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر، سرمایش تولید کرد. نتایج به‌دست‌آمده برای تولید سرمایش با استفاده از کد Nlog که پیش‌تر توسط نویسندگان در مقالات معتبر اعتبارسنجی‌شده، مقایسه شد [۱۲؛ ۱۳].

مدل‌سازی

در این تحقیق، از یک مدل دینامیکی ترمودینامیکی رده سوم استفاده می‌شود که به‌وسیله آن بتوان با تخمین متغیرهای حالت سیال عملکردی موتور، سرعت لحظه‌ای موتور را برحسب زمان پیش‌بینی کرد و نهایتاً بازده و توان

تولیدی موتور را تخمین زد. در این مدل دینامیکی - ترمودینامیکی، ابتدا محفظه‌های مختلف موتور استرلینگ، شامل گرم‌کن، خنک‌کن، بازیاب و ... به صورت حجم - کنترل‌هایی همراه با تبادل حرارت، کار و جرم با محیط خود و نیز با حجم - کنترل‌های مجاور خود در نظر گرفته می‌شود.

سطح انتقال حرارت، ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایت حرارتی در دو فرایند دریافت و دفع حرارت مؤثر هستند. ضریب هدایت حرارتی نسبت به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، بسیار بزرگ‌تر هستند و در نتیجه از مقاومت حرارتی ناشی از هدایت صرف‌نظر شد و تنها انتقال حرارت جابه‌جایی به‌عنوان عامل محدودکننده برای جذب و دفع حرارت در نظر گرفته شد. در خصوص بازیاب نیز از بررسی محدودیت هدایت حرارتی بازیاب صرف‌نظر می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر افت فشار ناشی از حرکت سیال، فشار سیال در تمامی نقاط هر حجم - کنترل به صورت یکسان و متفاوت از بخش‌های مجاور در نظر گرفته می‌شود. با در اختیار داشتن هندسه، مشخصات دینامیکی و دمای دیواره‌های منابع حرارتی گرم و سرد برای موتور موردنظر، ضریب افت فشار سیال و ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی از طریق روابط تجربی محاسبه می‌شوند.

روابط ترمودینامیکی

اصول ترمودینامیکی برای همه ساختارهای موتور استرلینگ، یکسان است و تفاوت اساسی در نحوه قرارگیری اجزای مختلف آن‌ها در کنار یکدیگر است [۱].

$$q_{in} = RT_h \ln r = P_1 V_1 \ln r$$

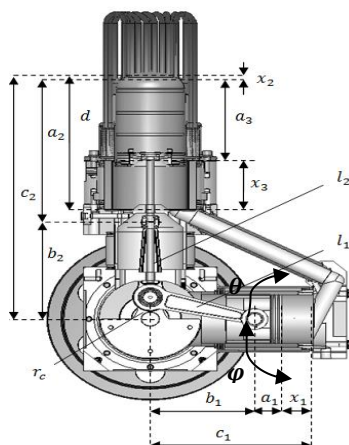
$$w = R(T_h - T_c) \ln r \quad (۱)$$

$$\eta = \frac{w}{q_{in}} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)$$

در روابط بالا q_{in} میزان حرارت دریافتی و w کار تولیدی برحسب ژول (J)، در یک چرخه ایدآل استرلینگ است. R ثابت گاز برحسب ژول بر کیلوگرم درجه کلوین ($J/Kg^\circ K$) است. T_h دمای منبع گرم و T_c دمای منبع سرد برحسب کلوین (K) است. r نسبت تراکم موتور است که عبارت است از نسبت بیشترین حجم سیستم به کمترین حجم آن، P_1 و V_1 به ترتیب فشار و حجم برحسب پاسکال و مترمکعب هستند [۲۴].

روابط دینامیکی حاکم بر مدل

در این تحقیق از یک الگوی دینامیکی ترمودینامیکی که در گذشته برای حالت گرمایش موتور استرلینگ نوشته و اعتبارسنجی شده بود استفاده شد [۱۲]. یکی از مزیت‌های استفاده از موتور استرلینگ، قابلیت معکوس شدن سیکل کاری است؛ بنابراین می‌توان با تغییر الگوی کد، از آن برای تولید سرمایه‌گذاری استفاده کرد. اعتبارسنجی کد سرمایه‌گذاری و تولید سرمایه‌گذاری به صورت آزمایشگاهی با استفاده از دو موتور استرلینگ ST500 از نوع گاما در شرکت تحقیق و توسعه ایران خودرو (شرکت ایپکو) برای اولین بار به صورت تجربی انجام و نتایج تحلیل و بررسی شد. پارامترهای سینماتیک موتور موردنظر در شکل ۵ نشان داده شده است:



شکل ۵. پارامترهای سینماتیک موتور ST500 [۱۲]

پارامترهای φ , c_1 , c_2 , d , l_1 , l_2 , r_c و a_1 تا a_3 پارامترهای ساختاری موتور هستند و مقدار ثابتی دارند. معادلات ۲ و ۳ این پارامترها را به b_1 و b_2 (فاصله عمودی گزن بین در هر لحظه تا راستای میل‌لنگ) مربوط می‌سازند.

$$l_1^2 = r_c^2 + b_1^2 + 2r_c b_1 \cos(\theta) \quad (2)$$

$$l_2^2 = r_c^2 + b_2^2 + 2r_c b_2 \cos(\theta + \varphi) \quad (3)$$

با حل معادلات بالا برای b_1 و b_2 آن‌ها به‌عنوان توابعی از زاویه لنگ بیان می‌شوند که در معادلات ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$$b_1 = (r_c^2 \cos^2 \theta + l_1^2 - r_c^2)^{\frac{1}{2}} - r_c \cos \theta \quad (4)$$

$$b_2 = \left(\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} + r_c \cos(\varphi + \theta) \quad (5)$$

به این ترتیب x_1 (طول محفظه تراکم)، x_2 (طول محفظه گرم) و x_3 (طول محفظه سرد) برحسب زاویه میل‌لنگ به‌دست می‌آیند که در معادلات ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

$$x_1 = c_1 - a_1 - b_1 \quad (6)$$

$$x_2 = c_2 - a_2 - b_2 \quad (7)$$

$$x_3 = d - a_3 - x_2 \quad (8)$$

مشتقات x_1 و x_2 نسبت به زاویه میل‌لنگ نیز در روابط ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این روابط در بخش محاسبه روابط دینامیک مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

$$\frac{dx_1}{d\theta} = \frac{r_c^2 \sin(2\theta)}{2(l_1^2 - r_c^2 \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\theta) \quad (9)$$

$$\frac{dx_2}{d\theta} = \frac{r_c^2 \sin(2\varphi + 2\theta)}{2\left(\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\varphi + \theta) \quad (10)$$

مشتقات زمانی اول x_1 و x_2 نیز که نشان‌دهنده سرعت حرکت اجزای متحرک موتور است با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ و مشتقات دوم آن‌ها که نشان‌دهنده شتاب آن‌ها است از روابط ۱۳ و ۱۴ مطابق قوانین مشتق زنجیری محاسبه می‌شوند.

$$\dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_1}{d\theta} \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_2}{d\theta} \quad (12)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{d^2x_1}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_1}{d\theta} \quad (13)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{d^2x_2}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_2}{d\theta} \quad (14)$$

روابط سینتیک مدل

ابتدا باید معادله دیفرانسیلی بیابیم که با حل آن، سرعت و زاویه لحظه‌ای میل‌لنگ به دست آید و به این منظور از روش دینامیک لاگرانژ استفاده می‌شود. فرم کلی معادلات لاگرانژ در معادلات ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده است. مجموع انرژی‌های جنبشی تمامی اجزای متحرک موتور در متغیر T_θ و مجموع انرژی‌های پتانسیل اجزا در متغیر V_θ قرار خواهد گرفت. لاگرانژین با تفاضل انرژی جنبشی کل از انرژی پتانسیل کل به دست می‌آید و در نهایت با قرار دادن لاگرانژین در معادله اصلی لاگرانژ (معادله ۱۸) و مشتق‌گیری‌های لازم، معادله دیفرانسیل دینامیکی موتور استرلینگ حاصل می‌شود. متغیر I در معادله لاگرانژ نشان‌دهنده مقدار گشتاور معادل وارد شده به میل‌لنگ موتور خواهد بود درحالی‌که θ نشان‌دهنده زاویه میل‌لنگ است.

$$T_\theta = \sum_{i=n_1} \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_r} \frac{1}{2} J_i \dot{\theta}_i^2 \quad (15)$$

$$V_{\theta} = \sum_{i=n_s} \frac{1}{2} k_i x_i^2 \quad (16)$$

$$L_{\theta} = T_{\theta} - V_{\theta} = \sum_{i=n_1} \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_r} \frac{1}{2} J_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=n_s} \frac{1}{2} k_i x_i^2 \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\theta}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_{\theta}}{\partial \theta} = I_c \quad (18)$$

با توجه به تعداد متغیرهای در نظر گرفته‌شده، لاگرانژین به‌صورت معادله ۱۹ به‌دست می‌آید.

$$L_{\theta} = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} J_c \dot{\theta}^2 \quad (19)$$

با جای‌گذاری روابط ۱۱ و ۱۲ در معادله ۱۹، معادله ۲۰ حاصل می‌شود.

$$L_{\theta} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 (m_1 \left(\frac{dx_1}{d\theta} \right)^2 + m_2 \left(\frac{dx_2}{d\theta} \right)^2 + J_c) \quad (20)$$

مشتقات محاسبه‌شده در معادلات ۹ و ۱۰ در معادله ۲۰ قرار داده شد و لاگرانژین برحسب زاویه میل‌لنگ و سرعت زاویه‌ای میل‌لنگ مطابق معادله ۲۱ حاصل می‌شود.

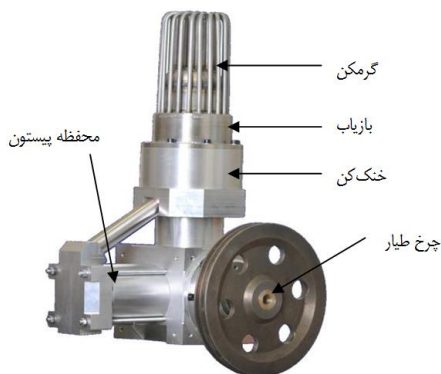
$$L_{\theta} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \left(m_1 \left(\frac{r_c^2 \sin(2\theta)}{2(l_1^2 - r_c^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\theta) \right)^2 + m_2 \left(\frac{r_c^2 \sin(2\varphi + 2\theta)}{2 \left(\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\varphi + \theta) \right)^2 + J \right) \quad (21)$$

بنابراین چنانچه مشتقات معادله لاگرانژ روی لاگرانژین اعمال گردد، یک واحد به درجه مشتق در معادلات اضافه‌شده و بخش سمت چپ معادله لاگرانژ به فرم تابعی از زاویه، سرعت و شتاب میل‌لنگ به فرم معادله ۲۲ خواهد شد.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\theta}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_{\theta}}{\partial \theta} = f(\dot{\theta}, \theta, \theta) \quad (22)$$

موتور استرلینگ مورد استفاده در این تحقیق

مطالعات انجام شده در این تحقیق، بر موتور ST-500 موجود در مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو) انجام شده است که مشخصات فنی این موتور در جدول ۱ بیان شده است. نمای خارجی موتور در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل بخش‌های اصلی موتور شامل گرم‌کن، خنک‌کن، بازیاب، چرخ طیار و محفظه پیستون نام‌گذاری شده‌اند [۱۲].



شکل ۶. نمای خارجی موتور استرلینگ ST500 [۱۲]

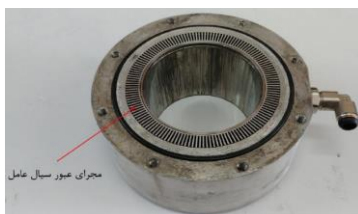
جدول ۱. مشخصات موتور استرلینگ ST500

مشخصه فنی	مقادیر (واحد)
توان خروجی	۵۰۰ (وات)
بازده حرارتی	۸.۵ (درصد)
فشار شارژ استاندارد	۸ (بار)
سیال عامل	هوا، هلیوم
فرکانس کاری	۱۴ (هرتز)
ماده خنک کننده	آب
سوخت	گاز طبیعی، بایومس، انرژی خورشیدی
دامنه حرکت پیستون	۰.۷۵ (متر)
دامنه حرکت چاب‌جاکننده گاز	۰.۷۵ (متر)
زاویه فاز	۹۰ (درجه)
نوع گرم کن	لوله‌ای ۲۰* (۶ میلی‌متر)
نوع خنک کن	کانالی ۱۴۴* (۱۳ میلی‌متر مربع)
جنس بازیاب	فولاد ضدزنگ متخلخل ۰.۹۶
دمای جذب حرارت	۳۵۰-۴۲۰ (درجه سانتی‌گراد)
دمای دفع حرارت	۳۰-۵۰ (درجه سانتی‌گراد)
حجم بیشینه	۱۰*۳*۱.۷۹ (مترمکعب)
حجم کمینه	۱۰*۳*۱.۳۷ (مترمکعب)
نسبت تراکم	۱.۳:۱

برخی از قطعات موتور استرلینگ مثل گرم کن، بازیاب و خنک کن را می‌توان در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده کرد.



شکل ۷. گرمکن موتور استرلینگ به همراه بازیاب



شکل ۸. خنک کن موتور استرلینگ و مجرای عبور سیال

پارامترهای تأثیرگذار در آزمایش

- ۱- مشخصات هندسی کانال‌های انتقال گاز، لوله‌ها و محفظه‌های انبساط و تراکم
- ۲- هندسه اتصالات بین بخش‌های متحرک موتور
- ۳- فشار اولیه موتور و دماهای اولیه در هر نقطه از موتور
- ۴- دمای دیواره مبدل حرارتی
- ۵- گاز مورد استفاده در منبع گرم و سرد
- ۶- جنس بازیاب.

جدول ۲. مشخصات بازیاب مورد استفاده در موتور استرلینگ [۲۵]

مشخصات	مس	آهن خالص	کربن استیل	آلومینیوم T6-۲۰۲۴
چگالی (kgm^{-3})	۸۹۲۰	۷۸۷۰	۷۸۵۴	۲۷۷۰
ظرفیت گرمایی ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۳۸۵	۴۴۷	۴۳۴	۸۷۵
ضریب انتقال حرارت هدایتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۳۹۰	۸۰.۲	۶۰.۵	۱۷۷

اندازه‌گیری میزان تلفات تسمه قبل از انجام آزمایش

بهمنظور دقت در آزمایش‌ها باید میزان تلفات موجود در تسمه اندازه‌گیری شود. تسمه برای انتقال توان از موتور گرم به موتور خنک‌کننده استفاده شده است و اگر میزان تلفات آن از یک حدی بیشتر باشد خطای آزمایش زیاد می‌شود و نتایج قابل استناد نیستند. به همین دلیل تلفات موجود در تسمه نباید از حد مشخص بیشتر باشد. مشخصات چرخ طیار موتور گرم، دینام و موتور استرلینگ به همراه دوران آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مشخصات دینام و دو موتور استرلینگ

مشخصات دینام		مشخصات موتور خنک‌کننده		مشخصات موتور گرمکن	
۵۰.۵	(d)	۲۵۸	(d ₂)	۲۸۰	(d ₁)
mm		Mm		mm	
۱۳۵۰	rpm(n)	۲۸۶	(n ₂)	۲۵۰	(n ₁)
		rpm		rpm	
۶۸۱۷۵	nd	۷۳۷۸۸	n ₂ d ₂	۷۰۰۰	n ₁ d ₁

همان‌طور که از نتایج تجربی در جدول ۳ مشخص است درصد خطای تسمه کمتر از ۹ درصد می‌باشد و بنابراین می‌توان گفت که تسمه موجود، از انتقال قدرت خوبی برخوردار است [۲۳].

مراحل آزمایش

آزمایش‌ها در سه مرحله زیر صورت گرفت:

- ۱- بررسی نتایج موتور استرلینگ تکی برای تولید سرمایش با استفاده از منبع تغذیه سیال عامل هوا در توان ۵۲۰ وات و فشار کاری ۳ بار و در زمان ۱۰ دقیقه
- ۲- بررسی نتایج موتور استرلینگ تکی برای تولید سرمایش با استفاده از منبع تغذیه با گاز هلیوم در توان ۴۲۰ وات و فشار کاری ۶ بار و در زمان ۱۰ دقیقه و اعتبارسنجی با تحقیقات قبلی
- ۳- بررسی تجربی موتور استرلینگ کوپل برای تولید سرمایش با دریافت انرژی گرمایی از منبع حرارتی برای توان موتور استرلینگ اول و تولید سرمایش با موتور استرلینگ دوم با استفاده از سیال عامل هلیوم و اعتبارسنجی با تحقیقات قبلی.

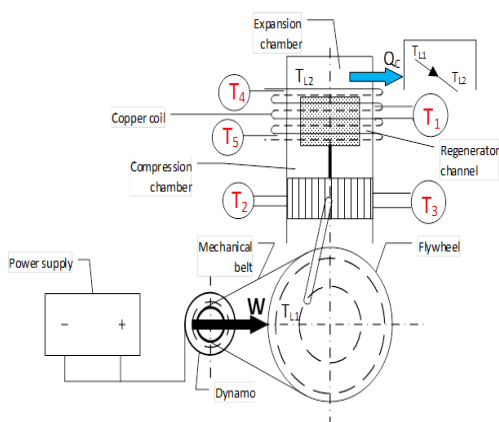
آزمایش برای موتور خنک‌کننده با استفاده از گاز هوا

شکل ۹ طرح‌واره موتور استرلینگ گاما برای تولید سرمایش است. در شکل ۱۰ دینام به یک منبع تغذیه (ژنراتور) متصل شد و برای راه‌اندازی اولیه موتور به کار رفت. دینام نیز با استفاده از یک تسمه به چرخ طیار متصل گردید. وقتی منبع تغذیه روشن می‌شود، دینام به چرخش درمی‌آید و توان به وسیله تسمه به چرخ طیار انتقال می‌یابد. در این حالت با توجه به سیکل استرلینگ، بخش گرم‌کن دستگاه سرد می‌شود و دما به پس از چند دقیقه کوتاه به زیر صفر درجه می‌رسد. برای اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت بخش سرد، از لوله‌های مسی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت، ابتدا آب در داخل لوله‌های مسی توسط یک پمپ جریان می‌یابد. آب خروجی، سپس در داخل یک محفظه عایق جمع‌آوری شد. با اندازه‌گیری دبی آب خروجی از لوله‌های مسی و همچنین اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی لوله‌های مسی، میزان انتقال حرارت در بخش گرم‌کن دستگاه مطابق فرمول ۲۳ به دست آمد.

$$Q = m_i c_p \Delta T$$

(۲۳)

$$\Delta T = T_{c,in} - T_{c,out} \quad (24)$$



شکل ۹. طرح‌واره موتور استرلینگ نوع گاما ST500



شکل ۱۰. منبع تغذیه برای تولید توان

نمای واقعی موتور استرلینگ گاما با عایق ایجاد شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. موتور استرلینگ گاما نوع ST500 با عایق جهت تولید سرمایش

در ابتدا راه‌اندازی موتور استرلینگ با استفاده از یک منبع تغذیه در شرایط آزمایشگاهی در توان، فشار و دماهای مختلفی انجام شد. برای دقت در آزمایش‌ها دمای محیط، دبی تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شد و برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه دینام در هر آزمایش ثابت شد. به‌منظور بررسی و مقایسه دقیق‌تر آزمایش‌ها برای چند بازه زمانی در فشار، توان و گازهای مختلف انجام و در هر مرحله دمای سرمایش تولیدی محاسبه شد.

جدول ۴ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف صورت‌گرفته روی موتور استرلینگ به‌منظور تولید سرمایش با استفاده از گاز هوا است. در این آزمایش‌ها فشار سیال عامل هوا ۳ بار، توان دینام به‌طور ثابت ۵۲۰/۸ وات در نظر گرفته شد. آزمایش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در مدت‌زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه صورت گرفته‌اند. برای هر چهار آزمایش دبی تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی، ثابت و برابر در نظر گرفته شد. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت شد. ولتاژ و جریان منبع تغذیه به‌ترتیب برابر ۳۱ ولت و ۱۷ آمپر بود و دمای محیط در هر چهار آزمایش ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود. دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین (T_4, T_5) و دمای سرمایش تولیدی (T_1) خوانش‌گر دما اندازه‌گیری شد. در نهایت با افزایش توان دینام و فشار گاز، دمای T_1 قسمت سرد به حدود ۲۳- درجه سانتی‌گراد رسید. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ خروجی تولید سرمایش با استفاده از موتور استرلینگ تکی گاما از نوع ST500 مشاهده می‌شود.

جدول ۴. شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش [۲۳]

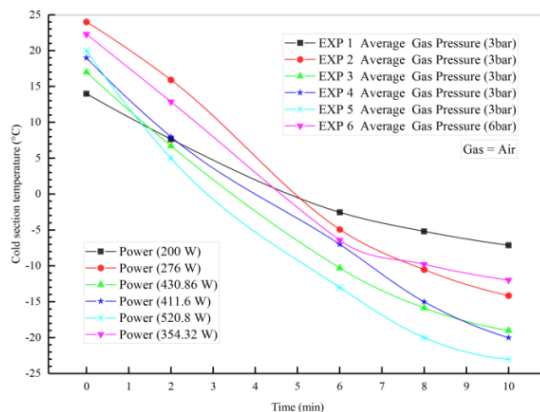
شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۲	۶	۸	۱۰
فشار متوسط گاز (بار)	۳	۳	۳	۳
ولتاژ مصرفی (ولت)	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱
جریان مصرفی (آمپر)	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
توان مصرفی (وات)	۵۲۰.۸	۵۲۰.۸	۵۲۰.۸	۵۲۰.۸
دمای اولیه بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
دمای نهایی بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۵	-۱۳	-۲۰	-۲۳
سیال عامل	هوا	هوا	هوا	هوا



شکل ۱۲. خروجی تولید سرمایش با استفاده از موتور استرلینگ گاما از نوع ST500



شکل ۱۳. نمایش تولید سرمایش در خروجی موتور استرلینگ گاما با عایق



شکل ۱۴. دیاگرام دما- زمان برای آزمایش‌های انجام‌شده با گاز هوا در فشارهای مختلف برای موتور استرلینگ در حالت سرمایش [۲۳]

شکل ۱۴ نشان‌دهنده نمودار دما- زمان برای شش آزمایش انجام‌شده در فشارهای ۳ و ۶ بار و توان‌های ۲۰۰ تا ۵۲۰.۸ وات است. همان‌طور که نشان داده شده است هنگامی که منبع تغذیه روشن می‌شود دمای بخش گرم‌کن دستگاه کاهش می‌یابد و در نهایت پس از گذشت مدت‌زمان مشخص و افزایش توان دینام و فشار گاز، دمای بخش سرد موتور استرلینگ به صورت شکل ۱۲ خواهد شد و دمای قسمت سرد T_1 به حدود ۲۳- درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

آزمایش برای موتور خنک‌کننده با استفاده از گاز هلیوم

جدول ۵ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف صورت‌گرفته روی موتور استرلینگ به صورت تولید سرمایش با استفاده از گاز هلیوم است. در این آزمایش‌ها فشار سیال عامل هوا ۶ بار، توان دینام به‌طور ثابت ۴۲۰ وات در نظر گرفته شد. آزمایش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در مدت‌زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه صورت گرفت. برای هر چهار آزمایش دبی، تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی، ثابت و برابر در نظر گرفته شد. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت شد. ولتاژ و جریان منبع تغذیه به ترتیب برابر با ۲۰ ولت و ۲۱ آمپر بود و دمای محیط در هر چهار آزمایش، ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود. با توجه به شکل ۹ دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین (T_4 و T_5) و دمای سرمایش تولیدی (T_1) توسط خوانشگر دما اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت، دمای T_1 به حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

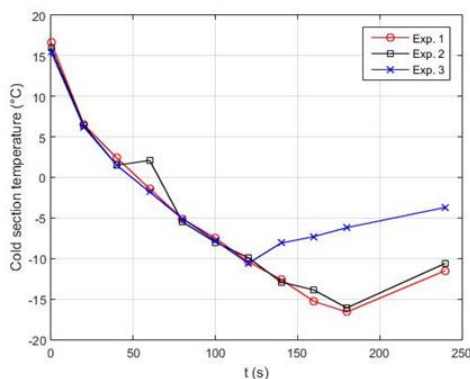
جدول ۵. شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش [۲۳]

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۲	۶	۸	۱۰
فشار متوسط گاز (بار)	۶	۶	۶	۶
ولتاژ مصرفی (ولت)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
جریان مصرفی (آمپر)	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
توان مصرفی (وات)	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰
دمای اولیه بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
دمای نهایی بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۶.۲۳	-۱۱.۷۴	-۱۷.۳۳	-۲۰.۹۶
سیال عامل	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم

در جدول ۶ خصوصیات سیال‌های عامل مورد استفاده در شرایط دمایی صفر درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. گازهایی که لزجت کمتری دارند در شرایط عملکردی مشابه، دارای توان خروجی بیشتری خواهند بود.

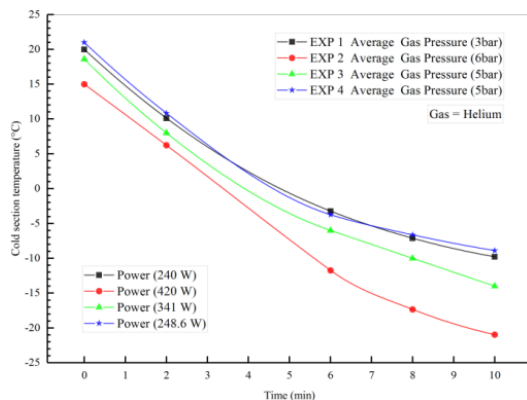
جدول ۶. پارامترهای ویسکوزیته قانون ساترلند برای گازها [۲۶]

نوع گاز	دما (کلوین)	ویسکوزیته (نیوتن ثانیه بر مترمربع)
هوا		1.716×10^{-5}
آرگون		2.125×10^{-5}
نیتروژن	۲۷۳	1.664×10^{-5}
هیدروژن		8.411×10^{-6}
هلیوم		1.864×10^{-6}



شکل ۱۵. دباگرام دما-زمان برای آزمایش‌های انجام شده با گاز هلیوم [۲۲]

شکل ۱۵ آزمایش در فشار ۳ بار و توان ۴۴۱.۱۴ تا ۴۷۶ وات و با استفاده از موتور استرلینگ گاما و سیال عامل هلیوم به سرمایش دست یافته است و در این تحقیق، هدف، بررسی و تکرارپذیری آزمایش‌ها و اعتبارسنجی آنها می‌باشد.



شکل ۱۶. دیاگرام دما- زمان برای آزمایش‌های انجام‌شده با گاز هلیوم در فشارهای مختلف و حالت موتور خنک‌کننده [۲۳]

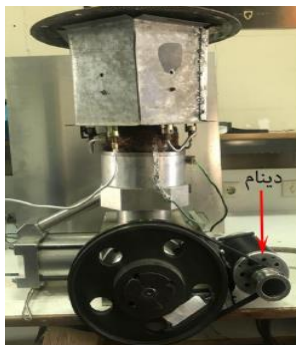
شکل ۱۶ نشان‌دهنده نمودار دما- زمان برای چهار آزمایش انجام‌شده است. همان‌طور که نشان داده شده هنگامی که منبع تغذیه روشن می‌شود، دمای بخش گرم‌کن دستگاه کاهش می‌یابد تا زمانی که موتور منبع تغذیه، خاموش شود. در نهایت، پس از گذشت مدت‌زمان مشخص، افزایش توان دینام و فشار گاز، دمای بخش سرد موتور استرلینگ به‌صورت شکل ۱۱ خواهد شد و دمای قسمت سرد (T_1) به حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد رسیده است که با مقاله [۲۲] اعتبارسنجی شد و با توجه به آزمایش‌های بیشتر، نتایج و نمودارهای دقیق‌تری نیز به‌دست آمد.



شکل ۱۷. مخزن هلیوم برای فشار منبع سیال عامل

اندازه‌گیری میزان توان مصرفی موتور گرم به‌صورت تکی با استفاده از مشعل گرمایی ابتدا موتور گرم به‌صورت تکی راه‌اندازی شد تا میزان توان مصرفی آن هنگامی که از شعله گرمایی استفاده می‌شود اندازه‌گیری شود. راه‌اندازی این موتور به این صورت است که ابتدا با استفاده از منبع تغذیه موتور، راه‌اندازی اولیه شد و پس از آن، موتور استرلینگ شروع به دوران کرد و با گذشت زمان، دوران آن بیشتر می‌شود. در این حالت، میزان جریان و ولتاژ مصرفی موتور به‌ترتیب ۴۶ آمپر و ۳۱ ولت بود؛ بنابراین توان مصرفی موتور گرم تکی را می‌توان به‌صورت زیر به دست آورد:

$$P_{\text{Hot motor}} = VI = 31 \text{ (V)} \times 4.6 \text{ (A)} = 142.6 \text{ W} \quad (25)$$



شکل ۱۸. دینام در موتور استرلینگ و محفظه حرارتی

توان ورودی سیستم هنگام استفاده از مشعل بایوگاز

جدول ۷. اجزای بایوگاز مورد استفاده در این پژوهش

نام ماده تشکیل دهنده	درصد ماده تشکیل دهنده بایوگاز (%)
CH ₄	۹۸.۲
H ₂ S	۰/۲
O ₃	۰/۷
N ₂	۰/۸
سایر گازهای مخلوط	۰/۱

همان طور که از جدول ۷ مشخص است قسمت عمده بایوگاز مورد استفاده از گاز متان تشکیل شده و تا دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد می رسد و در این دما دو گاز CH₄ و H₂S به دمای اشتعال خود می رسند و حرارت موجود در آن ها آزاد می شود. شایان ذکر است که دمای اشتعال ۱ هیدروژن سولفید برابر ۲۳۲ درجه سانتی گراد است [۲۷]. دمای اشتعال سایر گازهای موجود در بایوگاز، بالاتر از دمای عملکردی در این پژوهش است و معادله واکنش سوختن متان به صورت معادله ۲۶ می باشد [۲۸].



ارزش حرارتی سوختن متان برابر ۳۴.۸۳ مگاژول بر مترمکعب است. دبی گاز شهری مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از دبی سنج برابر ۲۵ لیتر بر دقیقه به دست آمده است؛ بنابراین طبق محاسبات می توان توان ورودی به سیستم را با استفاده از کل گرمای حاصل از احتراق گاز شهری به دست آورد.

$$Q = m * C_v = 25 \text{ lit/min} * 34.83 \text{ MJ/m}^3 = 14.5 \text{ KJ/s} = 14.5 \text{ KW} \quad (27)$$



شکل ۱۹. دستگاه (دبی‌سنج) اندازه‌گیری دبی گاز شهری

معادله واکنش سوختن هیدروژن سولفید نیز به صورت رابطه ۲۸ می‌باشد.

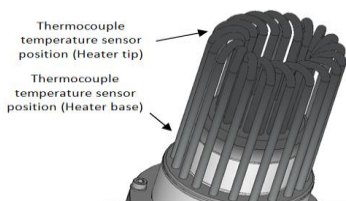


ارزش حرارتی سوختن هیدروژن سولفید برابر $36/503$ مگاژول بر مترمکعب است. با توجه به این که این گاز حدود $0/2$ درصد از بایوگاز را تشکیل می‌دهد؛ می‌توان گفت توان ورودی ناشی از سوختن این گاز به شرح رابطه ۲۹ است.

$$25 \text{ l/min} \times 1 \text{ min } 60 \text{ s} \times 1 \text{ m}^3 1000 \text{ l} \times 36.503 \text{ MJ m}^3 \times 0.002 = 3.04 \times 10^{-5} \text{ KW} = 0.0304 \text{ W} \quad (29)$$

لذا می‌توان گفت که مقدار ورودی ناشی از سوختن گاز هیدروژن سولفید در مقایسه با سوختن گاز متان، بسیار ناچیز است. دلیل آن نیز عمدتاً به دلیل کم بودن مقدار این گاز در بایوگاز است؛ لذا می‌توان با تقریب بسیار خوبی بایوگاز را برابر متان در نظر گرفت.

مشعل گازی، وظیفه حفظ دمای بخش گرم موتور و آب با دمای تثبیت شده وظیفه حفظ دمای بخش سرد موتور را بر عهده دارد. دبی گاز و آب به صورت دستی تنظیم شده تا شرایط لازم برای عملکرد موتور در حالت پایدار فراهم شود. به دلیل ثبات کافی متغیرها در این حالت، استفاده از کنترل کننده خودکار جهت تنظیم دبی گاز و آب لازم به نظر نمی‌رسد. حس گرهای دمای از نوع ترموکوپل به منظور قرائت دمای آب خنک کننده ورودی و خروجی از موتور در شکل ۲۰ و دمای دو نقطه از لوله‌های گرم کن موتور استفاده شده است.



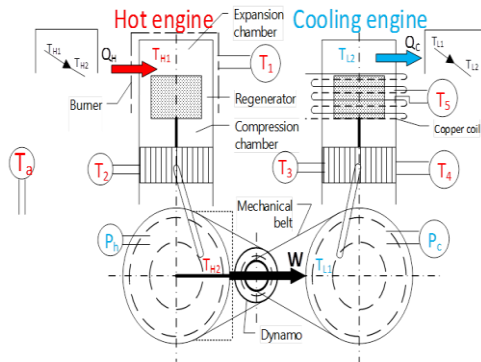
شکل ۲۰. محل نصب حس گرهای دما بر پایه و نوک گرم کن موتور [۱۲]

مرحله سوم شرایط آزمایش کولپینگ موتور استرلینگ برای تولید سرمایش با استفاده از منبع تغذیه و گاز هلیوم

در شکل ۲۱ نمای کولپینگ موتور استرلینگ نشان داده شده است. سمت چپ، موتور گرم نام گذاری شده که با دریافت انرژی گرمایی از منبع حرارتی مثل زیست توده، کار می‌کند، در سمت راست نیز موتور استرلینگ دیگری مشاهده می‌شود که موتور سرد نام گذاری شده است. موتور سرد با استفاده از کار دریافتی موتور گرم، تولید سرمایش می‌کند. این

سیستم از دو موتور استرلینگ تشکیل شده است که موتور اول برای راهاندازی اولیه، از یک منبع تغذیه و دینام استفاده می‌کند و به چرخ طیار موتور اول متصل است و پس از چند ثانیه از راهاندازی سیستم می‌توان منبع تغذیه را قطع کرد تا سیستم، به کار خود ادامه دهد. پس از راهاندازی موتور اول، موتور دوم نیز توسط تسمه به حرکت درمی‌آید. با چرخش موتور دوم، طبق سیکل موتور استرلینگ، تولید سرمایش می‌کند. موتور استرلینگ اول، موتور استرلینگ گرم و موتور استرلینگ دوم، موتور استرلینگ خنک‌کننده نام‌گذاری شده‌اند.

روش انجام کار نیز بدین‌صورت است که دو موتور به یکدیگر کوپل می‌شوند و مطابق شکل از یک عایق مخصوص برای عایق‌کاری و جلوگیری از هدررفت انرژی سرمایشی در قسمت گرم‌کن موتور خنک‌کننده استفاده می‌شود. هرکدام از دو موتور با گاز هلیوم پر می‌شوند. در این مرحله دقت می‌شود که فشار گاز موتور گرم از فشار گاز موتور خنک‌کننده، بیشتر باشد تا راهاندازی سیستم، راحت‌تر صورت بگیرد چون فشار متوسط گاز منبع گرم و منبع سرد، از عوامل مهم آزمایش است. یکی از ویژگی‌های موتور استرلینگ، نیاز به پیش‌گرم کردن آن است؛ لذا در این تحقیق، از گاز شهری برای گرم کردن موتور استفاده می‌شود و با استفاده از یک مشعل آن را گرم می‌کنند تا موتور گرم استرلینگ به مدت حدود ۵ دقیقه پیش‌گرم شود.



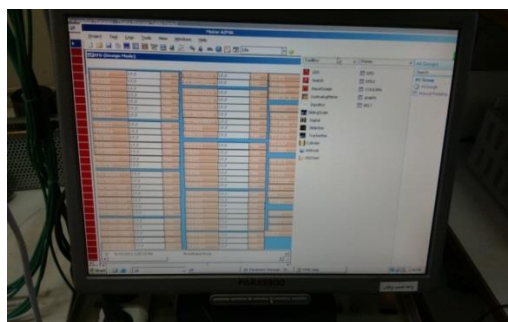
شکل ۲۱. نمای کوپلینگ موتور استرلینگ (گرم و سرد) ST500 برای تولید سرمایش



شکل ۲۲. نمای واقعی کوپلینگ موتور استرلینگ ST500 (گرم و سرد) برای تولید سرمایش



شکل ۲۳. مشعل گرمایی موتور استرلینگ و سنسور اندازه‌گیری دمای موتور گرم



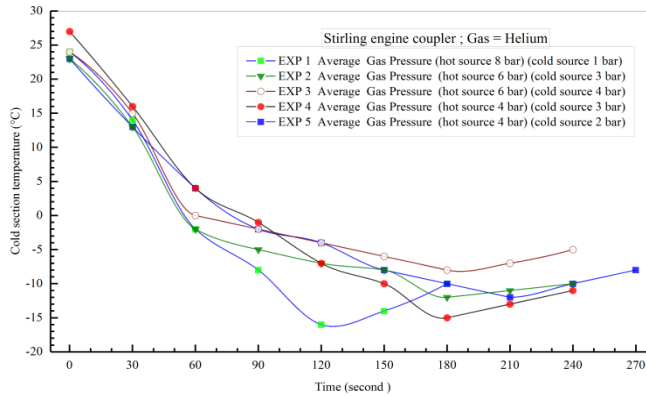
شکل ۲۴. دستگاه خوانش گر خروجی موتور و نرم‌افزار آدام

نتایج مربوط به آزمایش حالت کوپلینگ دو موتور برای تولید سرمایش

جدول ۸ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای پنج آزمایش مختلف صورت‌گرفته روی موتور کوپل استرلینگ به‌منظور تولید سرمایش با استفاده از گاز هلیوم است. در این آزمایش‌ها در بهترین حالت، فشار سیال عامل هلیوم منبع گرم ۸ بار و فشار متوسط منبع سرد ۱ بار است. آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در مدت‌زمان ۲ تا ۴ دقیقه صورت گرفته‌اند. برای هر پنج آزمایش دبی، تخلیه آب خروجی از کوپل‌های مسی، ثابت و برابر در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت است. دمای محیط در هر پنج آزمایش، ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. دمای سرمایش تولیدی (T_5) توسط خوانش گر دما اندازه‌گیری شده است.

جدول ۸. شرایط مختلف آزمایشگاهی موتور استرلینگ کوپل برای تولید سرمایش

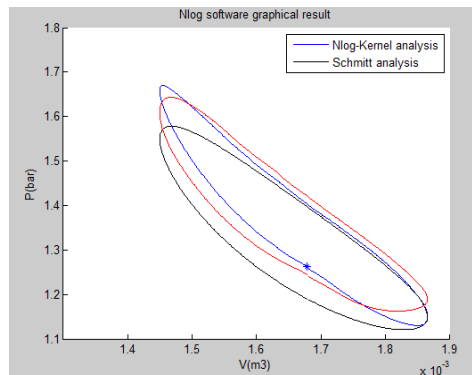
شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۲	۳	۳	۳	۴
فشار متوسط گاز منبع گرم (بار)	۸	۶	۶	۴	۴
فشار متوسط گاز منبع سرد (بار)	۱	۳	۴	۳	۲
دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)	۲۸	۲۶	۲۷	۳۰	۲۵
دمای نهایی موتور گرم (درجه سانتی‌گراد)	۵۸۰	۵۲۰	۴۹۰	۵۱۰	۴۸۰
دمای اولیه موتور سرد (درجه سانتی‌گراد)	۲۴	۲۳	۲۴	۲۷	۲۳
دمای نهایی موتور سرد (درجه سانتی‌گراد)	-۱۶	-۱۲	-۸	-۱۵	-۱۲
سیال عامل	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم



شکل ۲۵. دیاگرام دما- زمان برای پنج آزمایش انجام شده با گاز هلیوم در فشارهای مختلف و حالت کوپل موتور استرلینگ برای تولید سرمایه

شکل ۲۵ نشان دهنده نمودار دما- زمان برای پنج آزمایش انجام شده است. همان طور که نشان داده شده، هنگامی که فشار منبع گرم و سرد تغییر کند؛ دمای بخش گرم کن، افزایش و دمای بخش سرد دستگاه، کاهش می یابد و سرمایه، تولید می شود. در نهایت با استفاده از یک ساختار جدید تجربی و با استفاده از دو موتور استرلینگ در دما و فشارهای مختلف با استفاده از سوخت بایومس در افزایش فشار متوسط منبع گرم تا ۸ بار و کاهش فشار متوسط منبع سرد تا ۱ بار دمای قسمت سرد (T_5) به حدود ۱۶- درجه سانتی گراد رسیده است.

نتایج مربوط به آزمایش حالت کوپلینگ دو موتور برای تولید سرمایه با استفاده از کد Nlog همان طور که بیان شد کد Nlog توسط برنامه متلب نوشته شده است و برای آنالیز ترمودینامیکی موتور استرلینگ استفاده می شود. این کد، یک کد آنالیز سیکل موتور استرلینگ است که از معادلات درجه سوم در آن استفاده شده است. این کد، گرمای خروجی و توان تولیدی موتور استرلینگ را محاسبه می کند. با استفاده از این ساختار می توان به طور مستقیم از گرمای ناشی از منابع تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر، سرمایه تولید کرد. نتایج به دست آمده برای تولید سرمایه با استفاده از کد Nlog که پیش تر توسط نویسندگان در مقالات معتبر اعتبارسنجی شده، مقایسه شده اند [۱۲].



شکل ۲۶. نمودار P-V

همان‌طور که در نمودار P-V مشاهده می‌شود با توجه به خروجی Nlog نمودار مشکی‌رنگ نمودار برای حالت اشمیت و نمودار آبی‌رنگ نمودار کولر (موتور استرلینگ دوم) و نمودار قرمز رنگ نمودار گرم‌کن (موتور استرلینگ اول) است و انطباق بسیار خوبی دارد. استفاده از دو موتور استرلینگ به‌صورت جفت، بازده بسیار خوبی چه به‌صورت حرارتی و چه به‌صورت الکتریکی دارد؛ بنابراین استفاده از موتور استرلینگ برای تولید سرمایه‌های می‌تواند گزینه بسیار مناسبی باشد. برای مثال می‌توان از موتور استرلینگ برای تولید سرما در بخش خانگی و صنعتی استفاده کرد. از مزیت‌های موتورهای استرلینگ در حالت سرمایه‌های می‌توان به بی‌سروصدا بودن، بدون لرزش بودن، توانایی ساخت در مقیاس‌های پایین، قابلیت اطمینان بالا و نیاز به تعمیر و نگهداری پایین اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دو موتور استرلینگ و کوپل بررسی شدند و از یک منبع حرارتی برای منبع دما بالای موتور استرلینگ اول استفاده شد. کار خروجی موتور استرلینگ اول، موتور استرلینگ دوم را به حرکت درآورد تا موتور استرلینگ دوم، سرما را ایجاد کند. بهینه‌سازی و تولید سرمایه با استفاده از سوخت زیست‌توده به‌صورت آزمایشگاهی با استفاده از دو موتور استرلینگ ST500 از نوع گاما در مرکز تحقیق و توسعه ایران خودرو (شرکت ایپکو) برای اولین بار انجام و نتایج، تحلیل و بررسی شد. از نتایج این تحقیق می‌توان برای توسعه موتورهای استرلینگ در دنیا و توسعه پایدار که از مسائل مهم امروزه بوده استفاده کرد تا با استفاده از روش آزمایشگاهی و کوپلینگ موتور استرلینگ و همچنین استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر پرداخته شده تا در نهایت از موتورهای استرلینگ برای کاربرد سرمایه‌های در فشارها، دماها و دوره‌های مختلف استفاده شود. در این تحقیق با استفاده از یک ساختار جدید کوپلینگ موتور استرلینگ گاما و با طراحی و ساخت یک محفظه گرمایی که با سوخت زیست‌توده کار کرده می‌توان مکانیکی توسط موتور استرلینگ اول را تولید کرد تا در فشار متوسط، گاز موتور گرم ۸ بار، فشار متوسط موتور سرد ۱ بار و دمای نهایی موتور گرم استرلینگ اول در ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد به سرمایه‌های در موتور سرد استرلینگ دوم در دمای ۱۶- درجه سانتی‌گراد رسید. با یک طراحی دقیق، انتخاب و افزایش فشار سیال عامل در موتور استرلینگ گرم و کاهش فشار متوسط گاز در منبع سرد و بالا بودن توان حرارتی موتور استرلینگ گرم، شاهد کاهش دما در موتور استرلینگ سرد بوده و به یک یخچال تبدیل می‌شود. در موتورهای استرلینگ می‌توان گازهای سنگین‌تر را نیز مورد استفاده قرار داد اما این گازها به دلیل مواردی نسبت به گازهای سبک‌تری چون هلیوم و هیدروژن، از راندمان کمتری برخوردارند. در موتورهای مدل کوچک‌تر هم از هوا استفاده می‌شود ولی هیچ نوع گاز دیگری تا این سطح، جز در موارد آزمایشی، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

از لحاظ تئوری، استفاده از یک گاز سبک مانند هیدروژن یا هلیوم به‌عنوان سیال عامل به علت ویسکوزیته کم و ضریب انتقال حرارت بالا توصیه می‌شود. اگرچه وزن مولکولی پایین، به مفهوم بالا رفتن نرخ نشتی سیال از موتور است و در نتیجه افت فشار، کاهش بازده افزایش هزینه‌های (شارژ مجدد سیال) را خواهد داشت؛ دمای بالای مبدل حرارتی می‌تواند موجب اکسید شدن و خوردگی قطعات گردد. به‌طور خلاصه می‌توان گازی را به‌عنوان سیال عامل مطلوب انتخاب کرد که علاوه بر سبک بودن، ضریب انتقال حرارت بالا، ضریب لزجت پایین، امکان نشت کم و نداشتن خواص اکسیدکنندگی است. محققان علاوه بر گازهای یادشده به‌عنوان سیال عامل، از گازهایی همچون دی‌اکسید کربن، بخار آب و مواد مرکب شیمیایی استفاده کرده‌اند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند. همچنین از آقایان مهندس مسعود علیزاده، مهندس سیامک علیزاده‌نیا، مهندس حامد بصیر و مهندس

مهرعلیزاده که در انجام آزمایش‌ها و تجهیزات همکاری کردند و اطلاعات ارزشمندی را در اختیارمان قرار دادند کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- [1] Kongtragool, B., & Wongwiset, S. (2003). A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(2), 131-154. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00053-9)
- [2] Wikipedia. (2017, December 31). Application. <https://en.wikipedia.org/wiki/Application>
- [3] Urieli, I., & Berchowitz, D. M. (1984). *Stirling Cycle Engine Analysis*. Taylor & Francis. <https://books.google.com/books?id=d9pSAAAAMAAJ>
- [4] Walker, G. (1973). *Stirling-cycle Machines*. Clarendon Press. <https://books.google.com/books?id=eNpSAAAAMAAJ>
- [5] Thimsen, D. (2002, October). *Stirling engine assessment*. E. I. Electric Power Research Institute, Inc. <https://www.engr.colostate.edu/~marchese/mech337-10/epri.pdf>
- [6] Schmidt, G. (1871). The theory of Lehmann's calorimetric machine. *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, 15(1), 98-112.
- [7] Finkelstein, T. (1994, August 7-12). *Insights into the thermodynamics of Stirling cycle machines* International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), Monterey, CA, USA, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1994-3951>
- [8] Prakash, S., & Guruvayurappan, A. (2011, July 6-8). Using stirling engine to increase the efficiency of an IC engine. The World Congress on Engineering 2011, London, UK,
- [9] Ziabasharhagh, M., & Mahmoodi, M. (2012). Numerical solution of beta-type Stirling engine by optimizing heat regenerator for increasing output power and efficiency. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(2), 1395-1406. [https://www.textroad.com/pdf/JBASR/J.%20Basic.%20Appl.%20Sci.%20Res.,%202\(2\)1395-1406,%202012.pdf](https://www.textroad.com/pdf/JBASR/J.%20Basic.%20Appl.%20Sci.%20Res.,%202(2)1395-1406,%202012.pdf)
- [10] Valenti, G., Silva, P., Fergnani, N., Campanari, S., Ravida, A., Di Marcoberardino, G., & Macchi, E. (2015). Experimental and numerical study of a micro-cogeneration Stirling unit under diverse conditions of the working fluid. *Applied Energy*, 160, 920-929. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.112>
- [11] Karami, R., & Sayyaadi, H. (2015). Optimal sizing of Stirling-CCHP systems for residential buildings at diverse climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*, 89, 377-393. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.022>
- [12] Hooshang, M., Askari Moghadam, R., Alizadeh Nia, S., & Masouleh, M. T. (2015). Optimization of Stirling engine design parameters using neural networks. *Renewable Energy*, 74, 855-866. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.012>
- [13] Hooshang, M., Askari Moghadam, R., & AlizadehNia, S. (2016). Dynamic response simulation and experiment for gamma-type Stirling engine. *Renewable Energy*, 86, 192-205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.018>
- [14] Amarloo, A., Keshavarz, A., Batooei, A., & Alizadeh Nia, S. A. N. (2017). Thermodynamic analysis of performance parameter of a novel 3 cylinder Stirling engine configuration. *Modares Mechanical Engineering*, 16(10), 448-458. <http://me.modares.ac.ir/article-15-3190-en.html>
- [15] Damirchi, H., Najafi, G., Alizadehnia, S., Mamat, R., Nor Azwadi, C. S., Azmi, W. H., & Noor, M. M. (2016). Micro Combined Heat and Power to provide heat and electrical

- power using biomass and Gamma-type Stirling engine. *Applied Thermal Engineering*, 103, 1460-1469. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.118>
- [16] Chahartaghi, M., & Sheykhi, M. (2018). Modeling of combined heating and power system driven by Stirling engine from the perspective of the fuel consumption and pollution emission. *Modares Mechanical Engineering*, 17(10), 301-311. <http://mm.e.modares.ac.ir/article-15-3349-en.html>
- [17] Jahani Kaldehi, B. J., Keshavarz, A., Safaei Pirooz, A. A., Batooei, A., & Ebrahimi, M. (2017). Designing a micro Stirling engine for cleaner production of combined cooling heating and power in residential sector of different climates. *Journal of Cleaner Production*, 154, 502-516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.006>
- [18] Calise, F., d Accadia, M. D., Libertini, L., Quiriti, E., Vanoli, R., & Vicidomini, M. (2017). Optimal operating strategies of combined cooling, heating and power systems: A case study for an engine manufacturing facility. *Energy Conversion and Management*, 149, 1066-1084. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.06.028>
- [19] Erbay, L. B., Ozturk, M. M., & Doğan, B. (2017). Overall performance of the duplex Stirling refrigerator. *Energy Conversion and Management*, 133, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.003>
- [20] Ansarinasab, H., & Mehrpooya, M. (2018). Investigation of a combined molten carbonate fuel cell, gas turbine and Stirling engine combined cooling heating and power (CCHP) process by exergy cost sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management*, 165, 291-303. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.067>
- [21] Dai, D. D., Yuan, F., Long, R., Liu, Z. C., & Liu, W. (2018). Imperfect regeneration analysis of Stirling engine caused by temperature differences in regenerator. *Energy Conversion and Management*, 158, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.032>
- [22] Katooli, M. H., Askari Moghadam, R., & Hajinezhad, A. (2019). Simulation and experimental evaluation of Stirling refrigerator for converting electrical/mechanical energy to cold energy. *Energy Conversion and Management*, 184, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.014>
- [23] Hassanzadeh, E., aliehyaei, M., Jafari Mehrabadi, S., Mohammadi, A., & Mazaheri, H. (2020). Experimental investigation on the gamma model Stirling engine for cooling production using various gases. *The Journal of Engine Research*, 59(59), 17-28. <http://engineresearch.ir/article-1-734-en.html>
- [24] Boles, M. A., & Cengel, Y. A. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.com/books?id=Ao95NgEACAAJ>
- [25] Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=vvyIoXEywMoC>
- [26] White, F. M. (2006). *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill. <https://books.google.com/books?id=fl6wPwAACAAJ>
- [27] Wikipedia. (2022, February 19). Hydrogen sulfide. https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_sulfide
- [28] Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2014). *Fundamentals of Thermodynamics*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=VGVlrgEACAAJ>