



## بررسی تجربی موتور استرلینگ نوع گاما برای تولید سرمایش با استفاده از گازهای مختلف

عزت اله حسنزاده<sup>۱</sup>، مهدی علی احمایی<sup>۲\*</sup>، سعید جعفری مهرآبادی<sup>۳</sup>، آرش محمدی دیزگویی<sup>۴</sup>، حسین مظاهری<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران، [E.Hassanzadeh94@iau-arak.ac.ir](mailto:E.Hassanzadeh94@iau-arak.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، تهران، ایران، [aliehyaei@pardisiau.ac.ir](mailto:aliehyaei@pardisiau.ac.ir)

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران، [s-jafari@iau-arak.ac.ir](mailto:s-jafari@iau-arak.ac.ir)

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران، [amohammadi@sru.ac.ir](mailto:amohammadi@sru.ac.ir)

<sup>۵</sup> استادیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران، [h-mazaheri@iau-arak.ac.ir](mailto:h-mazaheri@iau-arak.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۸ خرداد ۱۳۹۹

پذیرش: ۱۹ شهریور ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

موتور استرلینگ گاما

سرمایش

گاز هوا و هلیوم

منبع تغذیه

### چکیده

چرخه استرلینگ یکی از چرخه‌های ترمودینامیکی هست که از لحاظ نظری به چرخه کارنو نزدیک بوده و همین مزیت‌ها باعث شده تا امروزه موتورهای استرلینگ به‌طور وسیعی در صنایع مختلف استفاده شوند. هدف اصلی از این تحقیق بررسی تجربی موتور استرلینگ گاما با استفاده از گازهای هوا و هلیوم برای سرمایش است. در این تحقیق اثر سیال عامل هوا و هلیوم، فشار سیال و توان مولد برق روی تولید سرمایش بررسی شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از سیال عامل هوا در توان ۵۲۰٫۸ وات و فشار کاری ۳ بار و در زمان ۱۰ دقیقه می‌توان به دمای حدود ۲۳- درجه سانتی‌گراد و با گاز هلیوم در توان ۴۲۰ وات و فشار کاری ۶ بار و در زمان ۱۰ دقیقه به دمای حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد رسید. در انجام آزمایش‌ها سعی شده است تا مقدار خطاها در قسمت‌های مختلف موتور از قبیل عایق کاری، نشتی سیال، لقی تسمه و دستگاه‌های اندازه‌گیری به حدود ۱۰ درصد برسد. 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.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

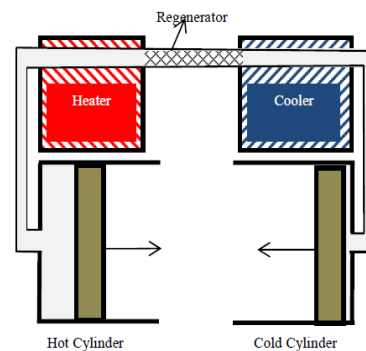
موتور استرلینگ یکی از انواع موتورهای هوا گرم است که مانند انواع موتورهای گرمایی با استفاده از تبادل حرارت میان دو منبع گرم و سرد، می تواند کار مکانیکی یا برقی تولید کند. حرارت در دمای گرم به موتور وارد شده، بخشی از آن به کار مکانیکی یا برقی تبدیل شده و مابقی آن در دمای خنک تر از موتور خارج می شود. موتور استرلینگ از نظر عملکرد ساده و دارای گشتاور مناسب بوده و چنانچه به صورت معکوس به کار گرفته شود می تواند جایگزین خوبی برای چرخه های تبرید باشد [۱]. امروزه مطرح شدن همبسته های جدید و مواد آب بندی و نیز استفاده از نرم افزارها و رایانه های پیشرفته که انجام محاسبات دقیق و پیچیده را آسان نموده، تکامل این موتور را سریع خواهد کرد. چنانچه بهینه سازی موتورهای فعلی به منظور کاهش مقدار سوخت و مقدار گازهای آلاینده و صدا در حد استانداردهای بین المللی سازمان های محیط زیست میسر نشود، یقیناً باید به سراغ موتورهای استرلینگ رفت.

### ۱-۱- انواع موتور استرلینگ

موتورهای استرلینگ در طی سالیان متمادی پیشرفت کرده اند و طرح های مختلفی از این نوع موتور توسعه داده شده است. انواع مختلف موتور استرلینگ بانام های آلفا، بتا، گاما و سمبه آزاد شناخته شده است. اصول ترمودینامیکی برای همه آنها یکسان بوده و تفاوت اساسی آنها از نظر نحوه قرار گرفتن اجزای مختلف موتور، در کنار یکدیگر است. تمامی موتورهای استرلینگ دارای پنج حجم مهاری اند که به ترتیب محفظه تراکم، خنک کن، بازیاب، گرم کن و محفظه انبساط است.

### ۱-۱-۲- موتور نوع آلفا

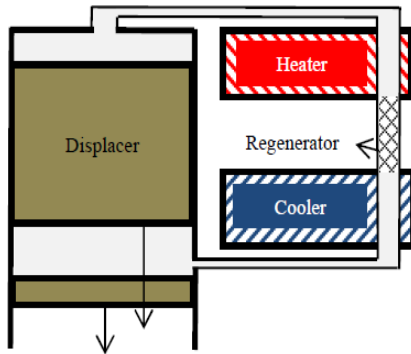
موتورهای نوع آلفا دارای دو استوانه مجزا برای فضاهای تراکم و انبساط بوده و در هر استوانه یک سمبه قرار دارد. دو استوانه مجزا به واسطه بازیاب گرمایی و لوله رابط، به هم متصل شده اند. استوانه گرم در کنار منبع گرم و استوانه سرد در کنار منبع سرد قرار می گیرد. این نوع از موتورها، از لحاظ مفهومی، ساده ترین ترکیب را در میان انواع موتورهای استرلینگ دارند. گرچه احتیاج به آب بندی هر دو سمبه از معایب آن به شمار می رود و مسئله آب بندی سمبه گرم به دلیل تماس با منبع گرم از مشکلات فنی آن هست [۲]. در شکل ۱ طرحواره موتور استرلینگ نوع آلفا مشاهده می شود.



شکل ۱: طرحواره موتور استرلینگ نوع آلفا [۳]

### ۱-۱-۳- موتور نوع بتا

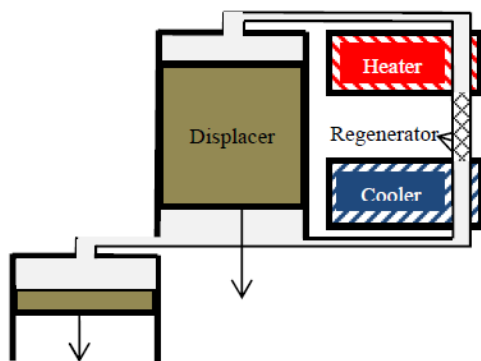
در شکل ۲ موتور استرلینگ نوع بتا، قدیمی ترین ساختمان موتورهای استرلینگ هست. اختراع رابرت استرلینگ به عنوان اولین موتور استرلینگ دارای ساختار بتا بوده است. موتورهای نوع بتا از ترکیب سمبه قدرت و جابه جا کننده استفاده می کنند. ساختمان موتور به این گونه است که هر دو سمبه در یک استوانه به طور خطی قرار گرفته اند [۴].



شکل ۲: طرحواره موتور استرلینگ نوع بتا [۳]

### ۱-۱-۴- موتور نوع گاما

موتور استرلینگ نوع گاما همانند موتور نوع بتا دارای ترکیب سمبه جابه جا کننده هست. در این نوع موتور سمبه و جابه جا کننده در دو استوانه مجزا قرار دارند. موتور استرلینگ گاما نسبت به نمونه های آلفا و بتا، دارای نسبت تراکم کمتری هست اما به دلیل این که تنها سمبه قدرت نیاز به آب بندی دارد و همچنین استوانه ها مجزا هستند از لحاظ مکانیکی ساده ترین آرایش را در میان سایر انواع موتورهای استرلینگ را دارد [۴]. در شکل ۳ طرحواره موتور استرلینگ نوع گاما مشاهده می شود.



شکل ۳: طرحواره موتور استرلینگ نوع گاما [۳]

در زمینه تحلیل و شبیه سازی موتور استرلینگ اولین تحلیل ترمودینامیکی توسط اشمیت [۵] انجام شده است، در این الگو، دمای محفظه تراکم با سردکن و دمای محفظه انبساط با گرم کن برابر و ثابت در نظر گرفته شده و تحلیل هم دما ارائه شده است. فینکلشتاین [۶] محفظه های تراکم و انبساط را به صورت کاملاً آدیباتیک و گرم کن و خنک کن را به صورت هم دما در نظر گرفته است.

گاز عامل و استفاده از گاز هیدروژن به جای گاز هلیوم، مقدار حرارت خروجی و توان خروجی موتور کاهش می‌یابد درحالی‌که بازده موتور افزایش پیدا می‌کند. در صورتی‌که توان گرمایی وارد شده به موتور زیاد باشد هلیوم گزینه مناسبی خواهد بود. از دیگر نتایج این تحقیق این است که جریان انرژی در بازایب موتور استرلینگ، تقریباً ۵ برابر بیشتر از گرم‌کن و ۶ برابر بیشتر از خنک‌کن محاسبه شده است. همچنین با افزایش قطر سمبه موتور استرلینگ، توان کاهش می‌یابد در حالی‌که بازده موتور استرلینگ افزایش پیدا کرده است.

ال برین و همکاران [۱۴] عملکرد کلی یخچال را برای موتور گرمایی جفت استرلینگ را بررسی کرده و مقدار کار مربوط به خنک‌کننده نهایی را با توجه به اثرات ساختمانی و متغیرهایی مثل نسبت دما برای موتور و تراکم آن را بررسی شده است.

انصاری نصب و همکاران [۱۵] ترکیب موتور استرلینگ با پیل سوختی کربنات مذاب، توربین گاز را به منظور تولید هم‌زمان برق و گرمایش و سرما مطالعه کرد و متغیرهای اساسی و تأثیرگذار بر روی سامانه از نظر اقتصادی-انرژی و همچنین بر روی هزینه‌های سامانه از طریق تحلیل حساسیت بررسی شده است و در نهایت نیز سه راهبرد برای حذف هزینه‌های زائد پیشنهاد شده که موجب بهبود عملکرد سامانه شده است.

دمیرچی و همکاران [۱۶] 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.

کتولی و همکاران [۱۷] به شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی یک واحد یخچال استرلینگ برای تبدیل انرژی برقی-مکانیکی به انرژی سرمایشی را به صورت تجربی انجام و اثرات فشار سیال و توان مولد برق برای سرمایش بررسی شده است.

آمارلو و همکاران [۱۸] تحلیل ترمودینامیکی متغیرهای عملکردی ساختار جدید سه استوانه موتور استرلینگ و شبیه‌سازی آن را در نرم افزار تحلیلی-صنعتی جی تی-سوویت انجام دادند. نتایج تحلیل نشان داد که افزایش سرعت دورانی برای افزایش عملکرد موتور مناسب نبوده و بازده موتور را کاهش داده است.

در این تحقیق به صورت تجربی تبدیل انرژی برقی و انرژی مکانیکی برای سرمایش با استفاده از موتور استرلینگ نوع گاما ST500 و سیال‌های عامل هوا و هلیوم در توان‌ها و فشارهای متفاوت انجام گرفته است. با افزایش توان ورودی موتور با استفاده از تغییر ولتاژ، جریان منبع تغذیه مولد برق و فشار تغذیه سیال عامل موتور استرلینگ به سرمایش زیر صفر درجه سانتی‌گراد دست‌یافته می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام شده روش فوق جدید بوده و تا به حال انجام نشده و با خطای کمتر و دقت بیشتری نتایج دقیق‌تری به دست آمده و در یک نمونه آزمایشگاهی موتور استرلینگ ST500

اوریلی و برکوویچ [۷] نظریه آدیباتیک را کامل‌تر کردند، در این الگو معادلات دیفرانسیل حاکم بر محفظه‌ها به صورت عددی با روش رانج کوتاه حل و به منظور پیش‌بینی حل عددی، اثرات افت فشار اصطکاکی جریان گاز در بازایب، اثر بازایبی غیر ایده‌آل در بازایب و تصحیح دمای گاز داخل گرم‌کن و سردکن‌ها در نظر گرفته شده و روشی به نام سیمپل ارائه شده است.

جهانی کلدھی و همکاران [۸] یک موتور استرلینگ برای تولید هم‌زمان برق و گرمایش و سرما در منطقه مسکونی با آب‌وهوای متفاوت طراحی کردند. موتور از نوع آلفا بوده و شبیه‌سازی سامانه در نرم‌افزار جی تی سوویت انجام شده است. با توجه به نتایج، بازدهی ماکزیمم بین محدوده ۷۹ تا ۸۸ درصد در شرایط مختلف آب و هوایی بوده و سامانه طراحی شده منجر به کاهش آلودگی هوا از طریق کاهش CO، CO<sub>2</sub> و NO<sub>x</sub> شده و نشتی این سامانه در فشارهای ضعیف مقدار کمتری را نشان داد.

پراکش و همکاران [۹] اثر افزایش بازده ناشی از استفاده از موتور استرلینگ در سیکل ترکیبی اتو و استرلینگ را بررسی نموده‌اند. موتور استرلینگ بار برقی مورد نیاز خودروی مورد بررسی را با استفاده از اختلاف دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد بین منابع گرم و سرد را تامین می‌نماید، این اختلاف دما از انرژی هدر رفته توسط سامانه خنک‌کن خودرو تامین می‌شود و مقدار آن ۹۵۰ وات است. در این طرح موتور استرلینگ به جای تسمه موتور، مولد برق خودرو را به چرخش در می‌آورد.

هوشنگ و همکاران [۱۰ و ۱۱] در تحقیق خود به بهبود متغیرهای مهار جابه‌جا کننده گاز در موتور استرلینگ خورشیدی برای افزایش بازده و همچنین بهبود متغیرهای مهار جابه‌جا کننده گاز شامل دامنه، حالت و بسامد موتور استرلینگ پرداخته شده است به گونه‌ای که بازده گرمایی و توان تولیدی موتور افزایش می‌یابد.

به منظور حصول اطمینان از محاسبات الگوی ریاضی، آزمایشی بر روی موتور استرلینگ نوع گاما با استفاده از برنامه تحلیل ترمودینامیکی مرتبه سوم طراحی و انجام گرفته است و طی آن فشار مطلق سیال، زاویه میل‌لنگ و سرعت آن به صورت لحظه‌ای قرائت و ثبت گردیده است. همچنین توان تولیدی موتور با استفاده از یک ژنراتور اندازه‌گیری و نتایج الگوی ریاضی در همان شرایط آزمایش با مقادیر اندازه‌گیری شده، مقایسه و از عملکرد آن اطمینان حاصل شده و میانگین خطای شبیه‌سازی ریاضی و آزمایشی در حدود ۱۰٪ نشان داده شد.

دی دای و همکاران [۱۲] فرایند موتور استرلینگ را با استفاده از زمان محدود ترمودینامیک و با استفاده از فرضیه توزیع یکنواخت دما تحلیل کرده و اثر متغیرهای مختلف و محدودیت‌های آن را بررسی نمودند.

ضیاء بشر حق و محمودی [۱۳] مطالعاتی در زمینه موتور استرلینگ نوع بتا، انجام و بر اساس نتایج به دست آمده نشان دادند که با تغییر

۱۰٪ بوده و بنابراین می توان گفت که تسمه موجود از انتقال قدرت خوبی برخوردار است.

### ۳-۱- سیال عامل

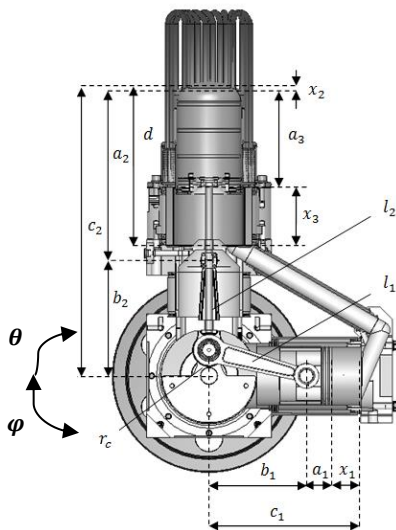
به طور کلی بهترین سیال عامل آن سیالی است که علاوه بر دارا بودن خصوصیات انتقال فیزیکی، دارای بازه انتقال حرارت قوی به همراه پایین بودن افت حاصل از کشیدن آیرودینامیکی باشد. برای دستیابی به چنین سیال عاملی، سیال عامل باید حداقل دارای خصوصیات زیر باشد:

- (۱) ضریب انتقال حرارت هدایت قوی
- (۲) ظرفیت گرمائی مخصوص قوی
- (۳) گرانیوی ضعیف
- (۴) چگالی ضعیف
- (۵) قابلیت انتقال حرارت قوی

### ۲- معادلات دینامیکی حاکم بر الگو

در این مقاله از یک الگوی دینامیکی، ترمودینامیکی که در گذشته برای حالت گرمایش موتور استرلینگ نوشته و اعتبارسنجی شده استفاده شده است [۱۰]. یکی از مزیت های استفاده از موتور استرلینگ قابلیت معکوس شدن چرخه کاری است. بنابراین می توان با تغییر الگوی برنامه از آن برای تولید سرمایه استفاده نمود. همچنین برای اعتبارسنجی برنامه سرمایه سازی، بهینه سازی و تولید سرمایه به صورت آزمایشگاهی با استفاده از موتور استرلینگ ST500 نوع گاما که در مرکز تحقیق و توسعه ایران خودرو (شرکت آپکو) برای اولین بار انجام شده نتایج تحلیل و بررسی شده است.

متغیرهای سینماتیک موتور مورد نظر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: متغیرهای سینماتیک موتور ST500 [۱۰]

نوع گاما، برای کاربرد سرمایه سازی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی پیشنهاد شده است.

### ۲-۱- دقت، نحوه تنظیم کردن و روش اعتبارسنجی

در این پژوهش از یک برنامه که در گذشته توسط نرم افزار متلب برای موتور ST500 توسط نویسندگان نوشته شده برای اعتبارسنجی استفاده شده است. این برنامه در گذشته آزمایش و اعتبارسنجی شده و نتایج آن در مقالات معتبر چاپ شده است [۱۰ و ۱۱]. برنامه Nlog توسط برنامه متلب نوشته شده است و برای تحلیل ترمودینامیکی موتور استرلینگ استفاده می شود. این برنامه یک برنامه تحلیل چرخه موتور استرلینگ است که از معادلات درجه سوم در آن استفاده شده است. این برنامه گرمای خروجی و توان تولیدی موتور استرلینگ را محاسبه می کند. مقدار خطاها در قسمت های مختلف موتور از قبیل عایق کاری، نشتی سیال، لقی تسمه و دستگاه های اندازه گیری موتور به حدود ۱۰ درصد رسیده تا نتایج خروجی تا حد امکان دقیق شده باشد.

### ۱-۲-۱- متغیرهای تأثیرگذار موتور در برنامه Nlog

- (۱) مشخصات هندسی تمام کانال های انتقال گاز، لوله ها و محفظه های انبساط و تراکم
- (۲) هندسه اتصالات بین بخش های متحرک موتور
- (۳) فشار اولیه موتور و دماهای اولیه در هر نقطه
- (۴) دمای دیواره مبدل گرمائی (باگذشت زمان ثابت در نظر گرفته می شود)

کد Nlog تمامی کانال ها و لوله های انتقال گاز در موتور را به حجم مهارهایی تقسیم می کند و متغیرهای دینامیکی و ترمودینامیکی برای هر کدام از حجم مهارها را به وسیله حل کردن معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی تعیین می کند. در ابتدا و قبل از انجام آزمایش های گوناگون سعی شده است تا مقدار خطاها در بخش های مختلف به حداقل رسیده و نتایج خروجی تا حد امکان دقیق بررسی شده است.

### ۱-۲-۲- منابع خطا

- (۱) عایق کاری موتور خنک کننده
  - (۲) محکم نبودن تسمه انتقال قدرت
  - (۳) دفع حرارت از لوله های انتقال آب و عایق کاری آن ها
  - (۴) نشتی سیال عامل موجود در موتور استرلینگ
  - (۵) خطاهای دستگاه های اندازه گیری
- با توجه به دوران مولد برق و چرخ طیار موتور استرلینگ و محاسبه نسبت انتقال تسمه و اختلاف دوران ها درصد خطای تسمه کمتر از

## ۲-۱- معادلات سینتیک الگو

در این بخش به دنبال آن هستیم تا معادله دیفرانسیلی بیابیم که با حل آن، سرعت و زاویه لحظه‌ای میل لنگ به دست آید و به این منظور از روش دینامیک لاگرانژ استفاده می‌شود. فرم کلی معادلات لاگرانژ در معادلات ۱۴-۱۷ نشان داده شده است. مجموع انرژی‌های جنبشی تمامی اجزای متحرک موتور در متغیر  $T_\theta$  و مجموع انرژی‌های پتانسیل اجزا در متغیر  $V_\theta$  قرار خواهد گرفت. لاگرانژین با تفاضل انرژی جنبشی کل از انرژی پتانسیل کل به دست می‌آید و نهایتاً با قرار دادن لاگرانژین در معادله اصلی لاگرانژ (معادله ۱۷) و انجام مشتق‌گیری‌های لازم، معادله دیفرانسیل دینامیکی موتور استرلینگ حاصل می‌شود. متغیر  $I$  در معادله لاگرانژ نشان‌دهنده مقدار گشتاور معادل وارد شده به میل لنگ موتور خواهد بود در حالی که  $\theta$  نشان‌دهنده زاویه میل لنگ است.

$$T_\theta = \sum_{i=n_1}^1 \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_r}^1 \frac{1}{2} J_i \dot{\theta}_i^2 \quad (14)$$

$$V_\theta = \sum_{i=n_s}^1 \frac{1}{2} k_i x_i^2 \quad (15)$$

$$L_\theta = T_\theta - V_\theta = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=n_1} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_r} J_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=n_s} k_i x_i^2 \right) \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_\theta}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_\theta}{\partial \theta} = I_c \quad (17)$$

با توجه به تعداد متغیرهای در نظر گرفته شده، لاگرانژین به صورت معادله (۱۸) به دست می‌آید.

$$L_\theta = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} J_c \dot{\theta}^2 \quad (18)$$

با جایگذاری معادلات (۱۰) و (۱۱) در معادله (۱۸)، نهایتاً معادله (۱۹) حاصل می‌شود.

$$L_\theta = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \left[ m_1 \left( \frac{dx_1}{d\theta} \right)^2 + m_2 \left( \frac{dx_2}{d\theta} \right)^2 + J_c \right] \quad (19)$$

مشتقات محاسبه شده در معادلات (۸) و (۹) در معادله (۱۹) قرار داده شده و لاگرانژین برحسب زاویه میل لنگ و سرعت زاویه‌ای میل لنگ مطابق معادله (۲۰) حاصل می‌شود.

$$L_\theta = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \left\{ m_1 \left[ \frac{r_c^2 \sin^2 2\theta}{2\sqrt{l_1^2 - r_c^2 \sin^2 \theta}} - r_c \sin \theta \right]^2 + m_2 \left[ \frac{r_c^2 \sin(2\varphi + 2\theta)}{2\sqrt{\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2}}} - r_c \sin(\varphi + \theta) \right]^2 + J \right\} \quad (20)$$

متغیرهای  $a_3$  تا  $a_1$  و  $\varphi, r_c, l_2, l_1, d, c_2, c_1$  متغیرهای ساختاری موتور هستند و مقدار ثابتی دارند. معادلات (۱) و (۲) این متغیرها را به  $b_1$  و  $b_2$  (فاصله عمودی محور سیمه در هر لحظه تا راستای میل لنگ) مربوط می‌سازند.

$$l_1^2 = r_c^2 + b_1^2 + 2r_c b_1 \cos(\theta) \quad (1)$$

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

با حل معادلات قبل برای  $b_1$  و  $b_2$  آن‌ها به عنوان توابعی از زاویه لنگ بیان می‌شوند که در معادلات (۳) و (۴) نشان داده شده است.

$$b_1 = (r_c^2 \cos^2 \theta + l_1^2 - r_c^2)^{\frac{1}{2}} - r_c \cos \theta \quad (3)$$

$$b_2 = \left[ \frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} + r_c \cos(\varphi + \theta) \quad (4)$$

به این ترتیب  $x_1$  (طول محفظه تراکم)،  $x_2$  (طول محفظه گرم) و  $x_3$  (طول محفظه سرد) برحسب زاویه میل لنگ به دست می‌آیند که در معادلات (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

$$x_1 = c_1 - a_1 - b_1 \quad (5)$$

$$x_2 = c_2 - a_2 - b_2 \quad (6)$$

$$x_3 = d - a_3 - x_2 \quad (7)$$

مشتقات  $x_1$  و  $x_2$  نسبت به زاویه میل لنگ نیز در معادلات (۸) و (۹) نشان داده شده است. این معادلات در بخش محاسبه معادلات دینامیک استفاده خواهند شد.

$$\frac{dx_1}{d\theta} = \frac{r_c^2 \sin(2\theta)}{2(l_1^2 - r_c^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\theta) \quad (8)$$

$$\frac{dx_2}{d\theta} = \frac{r_c^2 \sin(2\varphi + 2\theta)}{2\left(\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\varphi + \theta) \quad (9)$$

مشتقات زمانی اول  $x_1$  و  $x_2$  نیز که نشان دهنده سرعت حرکت اجزای متحرک موتور است با استفاده از معادلات (۱۰) و (۱۱) و مشتقات دوم آن‌ها که نشان‌دهنده شتاب آن‌ها است از معادلات (۱۲) و (۱۳) مطابق قوانین مشتق زنجیری محاسبه می‌شوند.

$$\dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_1}{d\theta} \quad (10)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_2}{d\theta} \quad (11)$$

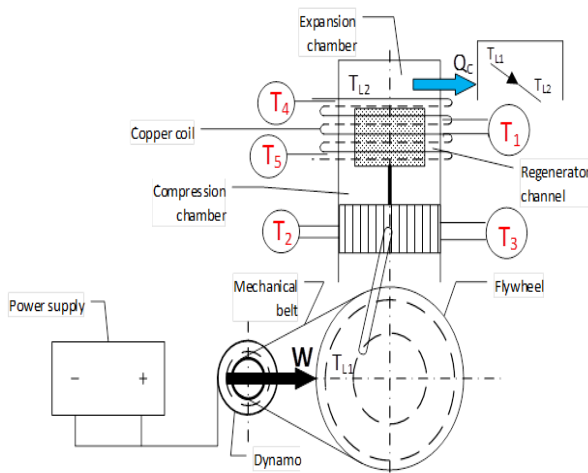
$$\ddot{x}_1 = \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_1}{d\theta} \quad (12)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{d^2 x_2}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_2}{d\theta} \quad (13)$$

#### ۴- آزمایش برای موتور خنک کننده با استفاده از گاز هوا

شکل ۶ طرحواره موتور استرلینگ گاما برای تولید سرمایش است. در شکل ۷ مولد برق به یک منبع تغذیه متصل بوده و برای شروع اولیه موتور، استفاده شده است. مولد برق نیز با استفاده از یک تسمه به چرخ طیار متصل است. وقتی منبع تغذیه روشن می شود، مولد برق به چرخش در می آید و توان به وسیله تسمه به چرخ طیار انتقال می یابد. در این حالت با توجه به چرخه استرلینگ، بخش گرم کن دستگاه سرد می شود و دما به پس از چند دقیقه کوتاه به زیر صفر درجه رسیده است. برای اندازه گیری مقدار انتقال حرارت بخش سرد از لوله های مسی استفاده شده است. برای اندازه گیری مقدار انتقال حرارت، ابتدا آب توسط یک تلمبه در داخل لوله های مسی جریان یافته سپس آب خروجی در داخل یک محفظه عایق جمع آوری شده است. با اندازه گیری شار آب خروجی از لوله های مسی و همچنین اندازه گیری دمای آب ورودی و خروجی لوله های مسی، مقدار انتقال حرارت در بخش گرم کن دستگاه مطابق معادله (۲۲) به دست آمده است.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (22)$$



شکل ۶: طرحواره موتور استرلینگ نوع گاما ST500



شکل ۷: ژنراتور برای تولید توان مولد برقی

جدول ۲ و ۳ نشان دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف صورت گرفته روی موتور استرلینگ جهت تولید سرمایش با استفاده از گاز هوا است. در این آزمایش ها فشار سیال عامل هوا ۳ بار، توان مولد

بنابراین چنانچه مشتقات معادله لاگرانژ بر روی لاگرانژین اعمال گردد، یک واحد به درجه مشتق در معادلات اضافه شده و بخش سمت چپ معادله لاگرانژ به فرم تابعی از زاویه، سرعت و شتاب میل لنگ به فرم معادله (۲۱) خواهد شد.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_{\theta}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_{\theta}}{\partial \theta} = f(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta) \quad (21)$$

#### ۳- موتور استرلینگ مورد استفاده در این تحقیق

در این تحقیق فرآیند بهینه سازی بر روی موتور استرلینگ ST500 نوع گاما ساخت شرکت ایپکو در شکل ۵ جهت تولید سرمایش انجام گرفته است. مشخصات فنی این موتور نیز در جدول ۱ ذکر شده است [۱۰].

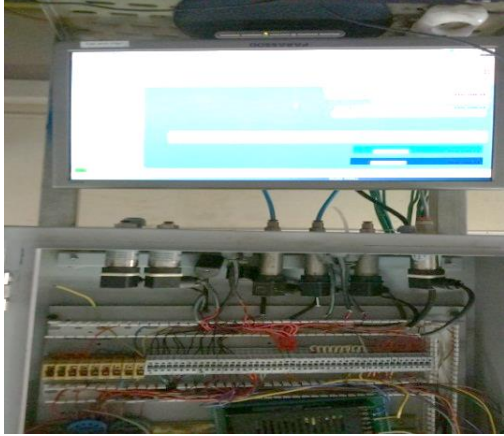


شکل ۵: نمای خارجی موتور استرلینگ ST500 [۱۰]

جدول ۱: مشخصات موتور استرلینگ ST500

مشخصه فنی	مقادیر (واحد)
توان خروجی	۵۰۰ (وات)
بازده گرمائی	۸٫۵٪
فشار شارژ استاندارد	۸ (بار)
سیال عامل	هوا، هلیوم
بسامد کاری	۱۴ (هرتز)
ماده خنک کننده	آب
دامنه حرکت سببه	۰٫۷۵ (متر)
دامنه حرکت جابه جا کننده گاز	۰٫۷۵ (متر)
زاویه حالت	۹۰ (درجه)
نوع گرم کن	لوله ای ۲۰ × ۶ (میلیمتر)
نوع خنک کن	لوله ای ۱۴۴ × ۱۳ (میلیمتر مربع)
جنس بازویاب	فولاد ضد زنگ
دمای جذب حرارت	۳۵۰-۴۲۰ (درجه سانتی گراد)
دمای دفع حرارت	۳۰-۵۰ (درجه سانتی گراد)
حجم بیشینه	$۱٫۷۹ \times ۱۰^{-۳}$ (مترمکعب)
حجم کمینه	$۱٫۳۷ \times ۱۰^{-۳}$ (مترمکعب)
نسبت تراکم	۱٫۳:۱

ولتاژ و جریان منبع تغذیه به ترتیب برابر ۲۰ ولت و ۱۰ آمپر بوده و دمای محیط در هر چهار آزمایش ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتیگراد بوده است. با توجه به شکل ۶ دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین ( $T_4, T_5$ ) و دمای سرمایش تولیدی ( $T_1$ ) توسط خوانشگر دما در شکل ۸ اندازه‌گیری شده است.



شکل ۸: خروجی دستگاه خوانشگر دما با نرم‌افزار آدام

حسگر دما به خوانشگر دما وصل شده و با استفاده از نرم‌افزار آدام (ADAM) قابلیت اندازه‌گیری دماهای نقاط مختلف مورد آزمایش را داشته و در نهایت دماها را در زمان‌های مختلف به صورت خروجی اکسل به ما داده است. آزمایش برای چند بازه زمانی انجام و در هر مرحله فشار داخلی دستگاه اندازه‌گیری و توان و بازده تجربی نیز محاسبه شده است. در نهایت با افزایش توان مولد برق و فشار گاز سیال شاهد تولید کار یخچال و سرمایش شده و دمای  $T_1$  به حدود ۷- درجه سانتیگراد رسیده است.

جدول ۴ نشان دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف صورت گرفته روی موتور استرلینگ به منظور تولید سرمایش با استفاده از گاز هوا بررسی شده است.

جدول ۴: شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش

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 خنک‌کن (درجه سانتیگراد)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
دمای نهایی بخش خنک‌کن (درجه سانتیگراد)	۵	-۱۳	-۲۰	-۲۳
سیال عامل	هوا	هوا	هوا	هوا

برق به طور ثابت ۲۰۰ و ۴۳۰٫۸ وات در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در مدت زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه انجام و برای هر چهار آزمایش شار تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت شده است.

جدول ۲: شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش

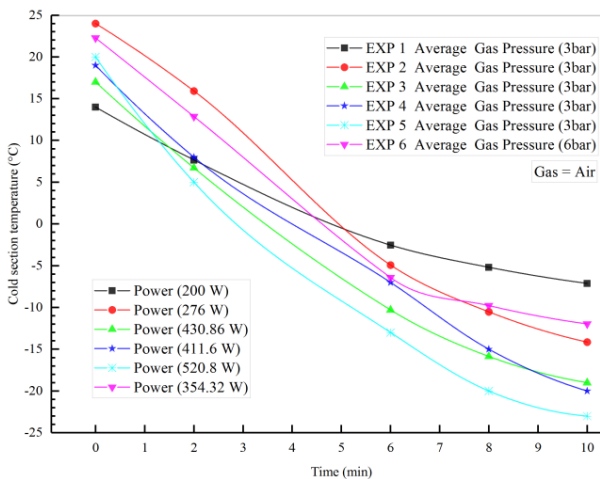
آزمایش	۱	۲	۳	۴
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۲	۶	۸	۱۰
فشار متوسط گاز (بار)	۳	۳	۳	۳
ولتاژ مصرفی (ولت)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
جریان مصرفی (آمپر)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
توان مصرفی (وات)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
دمای اولیه بخش خنک‌کن (درجه سانتیگراد)	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
دمای نهایی بخش خنک‌کن (درجه سانتیگراد)	۷٫۶۷	-۲٫۵۲	-۵٫۱۸	-۷٫۱۱
سیال عامل	هوا	هوا	هوا	هوا

جدول ۳: شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش

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)	۲۵٫۸	۲۵٫۸	۲۵٫۸	۲۵٫۸
جریان مصرفی (آمپر)	۱۶٫۷	۱۶٫۷	۱۶٫۷	۱۶٫۷
توان مصرفی (وات)	۴۳۰٫۸	۴۳۰٫۸	۴۳۰٫۸	۴۳۰٫۸
دمای اولیه بخش خنک‌کن (درجه سانتیگراد)	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
دمای نهایی بخش خنک‌کن (درجه سانتیگراد)	۶٫۷	-۱۰٫۲۹	-۱۵٫۸۵	-۱۹
سیال عامل	هوا	هوا	هوا	هوا

در ابتدا راه‌اندازی موتور استرلینگ با استفاده از یک منبع تغذیه در شرایط آزمایشگاهی در توان، فشار و دماهای مختلفی انجام و برای دقت در آزمایش‌ها دمای محیط، شار تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شده است. برای بررسی و مقایسه دقیق‌تر، آزمایش‌ها برای چند بازه زمانی در فشار، توان و گازهای مختلف انجام و در هر مرحله دمای سرمایش محاسبه شده است.

شکل ۱۱ نشان دهنده نمودار دما-زمان برای شش آزمایش انجام شده در فشارهای ۳ و ۶ بار و توان‌های مختلف 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 مدت زمان مشخص و افزایش توان مولد برق و فشار گاز، دمای بخش سرد موتور استرلینگ به صورت شکل ۱۱ خواهد شد و دمای قسمت سرد  $T_1$  به حدود  $-23$  درجه سانتی‌گراد رسیده است.



شکل ۱۱: نمودار دما-زمان برای آزمایش‌های انجام شده با گاز هوا در فشارهای مختلف برای موتور استرلینگ در حالت سرمایش

#### ۴-۱- آزمایش برای موتور خنک‌کننده با استفاده از گاز هلیوم

جدول ۵ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف روی موتور استرلینگ به منظور تولید سرمایش با استفاده از گاز هلیوم بوده است.

جدول ۵: شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش

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)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
جریان مصرفی (آمپر)	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
توان مصرفی (وات)	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰
دمای اولیه بخش خنک‌کن (درجه سانتی‌گراد)	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
دمای نهایی بخش خنک‌کن (درجه سانتی‌گراد)	۱۰,۱۲	-۳,۲۲	-۷,۱۱	-۹,۷۸
سیال عامل	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم

در این آزمایش‌ها فشار سیال عامل هوا ۳ بار، توان مولد برق به طور ثابت  $520.8$  وات در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در مدت زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه صورت گرفته است. برای هر چهار آزمایش شار تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت بوده است. ولتاژ و جریان منبع تغذیه به ترتیب برابر ۳۱ ولت و ۱۷ آمپر بوده و دمای محیط در هر چهار آزمایش ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. برای تعیین نقاط آزمایش و مقایسه مقدار انتقال حرارت در بخش گرم‌کن موتور استرلینگ، دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین ( $T_4, T_5$ ) و دمای سرمایش تولیدی ( $T_1$ ) توسط خوانشگر دما اندازه‌گیری شده است. در نهایت با افزایش توان مولد برق و فشار گاز، دمای  $T_1$  به حدود  $-23$  درجه سانتی‌گراد رسیده است. در شکل ۹ و ۱۰ خروجی تولید سرمایش با استفاده از موتور استرلینگ تکی گاما از نوع ST500 مشاهده می‌شود.



شکل ۹: خروجی تولید سرمایش با استفاده از موتور استرلینگ تکی گاما از نوع ST500



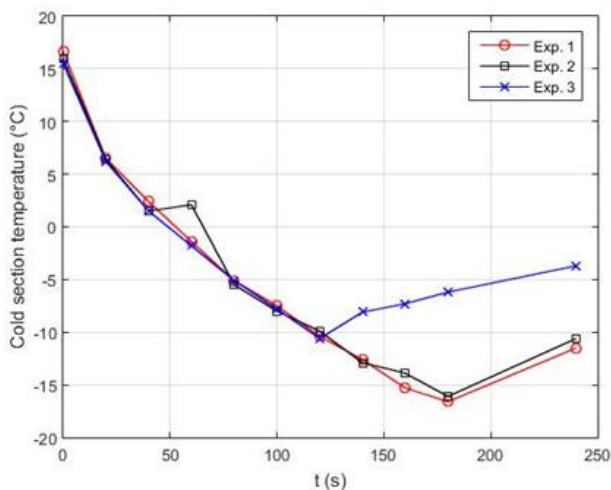
شکل ۱۰: نمایش تولید سرمایش در خروجی موتور استرلینگ تکی گاما

در جدول ۷ 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 ۷: متغیرهای گرانیوی قانون ساترلند برای گازها در دمای ۲۷۳ درجه کلوین [۱۹]

نوع گاز	گرانیوی (نیوتن ثانیه بر مترمربع)
هوا	$۱,۷۱۶ \times ۱۰^{-۵}$
آرگون	$۲,۱۲۵ \times ۱۰^{-۵}$
نیتروژن	$۱,۶۶۴ \times ۱۰^{-۵}$
هیدروژن	$۸,۴۱۱ \times ۱۰^{-۶}$
هلیوم	$۱,۸۶۴ \times ۱۰^{-۴}$

شکل ۱۲ آزمایش در فشار ۳ بار و توان ۴۴۱,۱۴ تا ۴۷۶ وات و با استفاده از موتور استرلینگ گاما و سیال عامل هلیوم به سرمایه‌گذاری دست یافته است.



شکل ۱۲: نمودار دما-زمان برای آزمایش‌های انجام‌شده با گاز هلیوم [۱۷]

شکل ۱۳ نشان‌دهنده نمودار دما-زمان برای چهار آزمایش انجام‌شده است.

در این آزمایش‌ها فشار سیال عامل هوا ۳ بار و توان مولد برق به‌طور ثابت ۲۴۰ وات در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در مدت زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه صورت گرفته است. برای هر چهار آزمایش شار تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت شده است. ولتاژ و جریان منبع تغذیه به ترتیب برابر ۲۰ ولت و ۱۲ آمپر بوده و دمای محیط در هر چهار آزمایش ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به شکل ۶، دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین (T<sub>4</sub> و T<sub>5</sub>) و دمای سرمایه‌گذاری تولیدی (T<sub>1</sub>) توسط خوانشگر دما اندازه‌گیری شده و در نهایت دمای T<sub>1</sub> به حدود ۱۰- درجه سانتی‌گراد رسیده است.

جدول ۶ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف صورت گرفته روی موتور استرلینگ به صورت تولید سرمایه‌گذاری با استفاده از گاز هلیوم است. در این آزمایش‌ها فشار سیال عامل هوا ۶ بار، توان مولد برق به‌طور ثابت ۴۲۰ وات در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در مدت زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه صورت گرفته‌اند. برای هر چهار آزمایش شار تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت است. ولتاژ و جریان منبع تغذیه به ترتیب برابر با ۲۰ ولت و ۲۱ آمپر بوده و دمای محیط در هر چهار آزمایش ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد شده است. با توجه به شکل ۶ دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین (T<sub>4</sub> و T<sub>5</sub>) و دمای سرمایه‌گذاری تولیدی (T<sub>1</sub>) توسط خوانشگر دما اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت دمای T<sub>1</sub> به حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد رسیده است.

جدول ۶: شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایه‌گذاری

آزمایش	۴	۳	۲	۱
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۱۰	۸	۶	۲
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 خنک‌کن (درجه سانتی‌گراد)	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
دمای نهایی بخش خنک‌کن (درجه سانتی‌گراد)	-۲۰,۹۶	-۱۷,۳۳	-۱۱,۷۴	۶,۲۳
سیال عامل	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم

دست آمده است. نتایج این تحقیق می‌تواند برای تولید سرمایه‌های به صورت کاربردی در صنایع مختلف استفاده شود.

در موتورهای استرلینگ می‌توان گازهای سنگین‌تر را نیز مورد استفاده قرارداد اما این گازها به دلیل خاصیتی که دارند نسبت به گازهای سبک‌تری چون هلیوم و هیدروژن از بازده کمتری برخوردارند. گاز هیدروژن به دلیل ظرفیت گرمایی قویتر و داشتن لزجت کمتر نسبت به گاز هلیوم، در شرایط عملکردی مشابه، دارای توان خروجی بیشتر، خطای تخمین کمتر و بازده گرمایی بیشتری بوده و در موتورهای الگوی کوچک‌تر هم از هوا استفاده شده است.

از لحاظ نظری، استفاده از یک گاز سبک مانند هیدروژن، هوا یا هلیوم به عنوان سیال عامل به علت گرانبوی ضعیف، ضریب انتقال حرارت قوی، ضریب لزجت ضعیف، امکان نشت کم و نداشتن خواص اکسید کنندگی توصیه می‌شود. محققان علاوه بر گازهای یاد شده به عنوان سیال عامل، از گازهایی همچون دی‌اکسید کربن، بخار آب و مواد

مرکب شیمیایی نیز استفاده شده است.

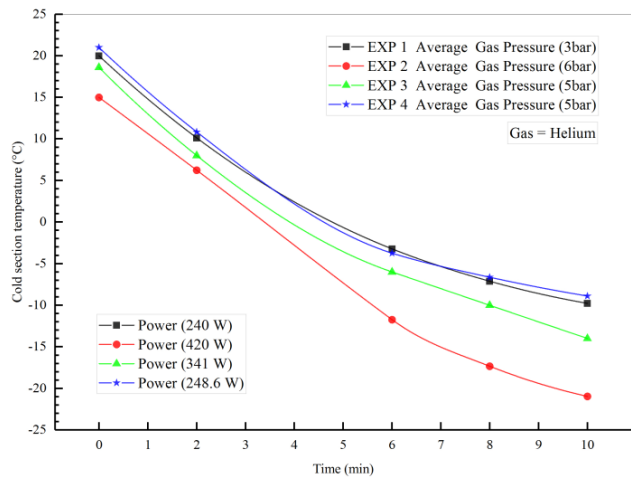
اگرچه وزن مولکولی کم به مفهوم افزایش نرخ نشتی سیال از موتور بوده و در نتیجه افت فشار، کاهش بازده و افزایش هزینه‌های (پرکردن مجدد سیال) را به همراه خواهد داشت، دمای گرم مبدل گرمایی می‌تواند موجب اکسید شدن و خوردگی قطعات گردد. باید به این موضوع توجه کرد که یکی از عوامل بسیار مؤثر بر بازده نیز دمای منبع گرم است، ضمناً با افزایش توان ورودی منبع تغذیه، افزایش فشار تغذیه اولیه موتور و انتخاب سیال مناسب موجب افزایش سرمایه‌های خروجی بیشتری در منبع سرد موتور استرلینگ خواهد شد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند. همچنین کمال تشکر از آقایان مهندس مسعود علیزاده، مهندس سیامک علیزاده نیا، مهندس حامد بصیر و مهندس مهرعلیزاده که در انجام آزمایش‌ها و تجهیزات همکاری کرده و اطلاعات ارزشمندی را در اختیارمان قرار دادند کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

### فهرست علائم و اختصارات

$a_1$	فاصله محور سمبه و سطح سمبه، $m$
$a_2$	فاصله محور سمبه و سطح جابه‌جا کننده، $m$
$a_3$	ارتفاع جابه‌جا کننده، $m$
$b_1$	فاصله محور سمبه سمبه و محور میل‌لنگ، $m$
$b_2$	فاصله محور سمبه جابه‌جا کننده و محور میل‌لنگ، $m$
$c_1$	فاصله بستار سمبه و محور میل‌لنگ، $m$
$c_2$	فاصله بستار جابه‌جا کننده و محور میل‌لنگ، $m$



شکل ۱۳: نمودار دما-زمان برای آزمایش‌های انجام شده با گاز هلیوم در فشارهای مختلف و حالت موتور خنک‌کننده

همان‌طور که نشان داده شده، هنگامی که منبع تغذیه روشن می‌شود، دمای بخش گرم‌کن دستگاه کاهش یافته تا زمانی که موتور منبع تغذیه خاموش شود. در نهایت پس از گذشت مدت‌زمان مشخص، افزایش توان مولد برق و فشار گاز، دمای بخش سرد موتور استرلینگ به صورت شکل ۱۳ خواهد شد و دمای قسمت سرد ( $T_1$ ) به حدود  $-21$  درجه سانتی‌گراد رسید که با مقاله [۱۷] اعتبار سنجی شده و با توجه آزمایش‌های بیشتر، نتایج و نمودارهای دقیق‌تری هم به دست آمده است.

### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک موتور استرلینگ گاما برای تولید سرمایه‌های استفاده از یک منبع تغذیه و با استفاده از گازهای مختلف در توان‌ها و فشارهای مختلف راه‌اندازی و تولید سرمایه‌های انجام گرفته است. برای افزایش دقت دمای محیط و شار تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شده و برای مقایسه بهتر نتایج با تحقیقات دیگران، توان ورودی نیز توسط منبع تغذیه ثابت شده است. با یک طراحی دقیق، انتخاب و افزایش فشار سیال عامل موتور استرلینگ و توان مصرفی مولد برق شاهد کاهش دما در طرف سرد موتور استرلینگ بوده و به یک یخچال تبدیل می‌شود.

در این پژوهش آزمایش برای چند بازه زمانی انجام و در هر مرحله فشار داخلی دستگاه اندازه‌گیری و توان و بازده تجربی نیز محاسبه شده‌اند. در نهایت با استفاده از یک ساختار جدید و با اتصال یک موتور استرلینگ نوع گاما با یک منبع تغذیه و با افزایش دور موتور و توان ورودی، دمای خروجی در قسمت سرد موتور کاهش یافته که در نهایت با گاز هوا به دمای  $-23$  درجه سانتی‌گراد و با گاز هلیوم به دمای  $-21$  درجه سانتی‌گراد رسیده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های موتور استرلینگ ST-500 با نتایج تجربی سایر مراجع مقایسه شده که دارای سازگاری مناسبی بوده و نتایج دقیق‌تری هم به

- design parameters using neural networks. *Renewable Energy* 2015; 74:855-66
- [11] M. Hooshang, R. A. Moghadam, and S. AlizadehNia, "Dynamic response simulation and experiment for gamma-type Stirling engine, *Renewable energy*, vol. 86, pp. 192-205, 2016.
- [12] D.D. Dai, F. Yuan, R. Long, Z.C. Liu, W. Liu, Imperfect regeneration analysis of Stirling engine caused by temperature differences in regenerator, *Energy Conversion and Management* Volume 158, 15 February 2018, Pages 60-69
- [13] M. Zia Bashar Hagh, M. Mahmoodi, Numerical solution of beta type stirling engine by thermal receiver application for increasing efficiency and output power, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 1395-1406, 2012
- [14] L. Berrin Erbay a, M. Mete Ozturk b, Bahadır Dogan Overall performance of the duplex Stirling refrigerator, *Energy Conversion and Management* Volume 133, 1 February 2017, Pages 196-203
- [15] Hojat Ansarinasa, Mehdi Mehrpooya, 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*, 2018, Pages 291-303
- [16] Damirchi H. Najafi G. Alizadehnia S. Mamat R. Azmi W.H. and 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, pp 1460-1469.
- [17] Mohammad Hadi Katooli, Reza Askari Moghadam, Ahmad Hajinezhad, Simulation and experimental evaluation of Stirling refrigerator for converting electrical/mechanical energy to cold energy, *Energy Conversion and Management*, Volume 184, 15 March 2019, Pages 83-90
- [18] A. Amarloo, A. Keshavarz Valian, A. Batooei, S. Alizadeh Nia, Thermodynamic analysis of performance parameter of a novel 3 cylinder Stirling engine configuration, *Modares Mechanical Engineering*, 16 (10) (2016) 448-458
- [19] F. M. White, *Viscous Fluid Flow*, 2nd ed. McGraw-Hill, (1991).

$l_1$	طول دسته سمبه، m
$l_2$	طول دسته سمبه جابه‌جاکننده گاز، m
L	طول دسته سمبه، m
$r_c$	شعاع میل‌لنگ، m
$L_\theta$	متغیر لاگرانژین
J	تعداد ورودی‌های شبکه
$J_c$	گشتاور دورانی چرخ، $m^2kg$
X	طول حجم-مهار، m
m	جرم قطعات با حرکت رفت و برگشتی، kg

### علائم یونانی

$\theta$	زاویه میل‌لنگ، Radian
$\dot{\theta}$	سرعت دورانی میل‌لنگ، Radian/s
$\ddot{\theta}$	شتاب دورانی میل‌لنگ، Radian/s <sup>2</sup>
$\Phi$	حالت حرکت سمبه و جابه‌جاکننده گاز، R

### مراجع و منابع

- [1] Applications of the Stirling engine. Available [https://en.wikipedia.org/wiki/Applications\\_of\\_the\\_Stirling\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_the_Stirling_engine). 2018.
- [2] I. Urieli and D. M. Berchowitz, *Stirling cycle engine analysis: Taylor & Francis*, 1984
- [3] B. Kongtragool, S. Wongwises, A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, *Renewable and Sustainable energy reviews*, Vol. 7, No. 2, pp. 131- 154, 2003
- [4] G. Walker, *Stirling-cycle machines: Oxford University Press*, 1973
- [5] G. Schmidt, The theory of Lehmann's calorimetric machine, *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 15, No. 1, 1871
- [6] T. Finkelstein, Insights into the thermodynamics of Stirling cycle machines, proceeding of 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Monterey, California, pp. 1829-1834, August 7-11, 1994.
- [7] I. Urieli, D. M. Berchowitz, *Stirling Cycle Engine Analysis*, pp. 86-124, Bristol: Adam Hilger LTD, 1984.
- [8] B. Jahani Kaldehi, A. Keshavarz, A. Safaei Pirooz, A. Batooei, M. Ebrahimi, Designing a micro Stirling engine for cleaner production of combined cooling heating and power in residential sector of different climates, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 154, No. 1, pp. 502-516, 2017.
- [9] S. Prakash, A. Guruvayurappan, Using Stirling Engine to Increase the Efficiency of an IC Engine, in *The World Congress on Engineering* 2011, London, U.K., 2011
- [10] Hooshang M, Askari Moghadam R, Nia SA, Masouleh MT. Optimization of Stirling engine



# The Journal of Engine Research

Journal Homepage: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



## Experimental investigation on the gamma model Stirling engine for cooling production using various gases

E. Hassanzadeh<sup>1</sup>, M. aliehyaei<sup>2\*</sup>, S. Jafari Mehrabadi<sup>3</sup>, A. Mohammadi<sup>4</sup>, H. Mazaheri<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Islamic Azad University, Arak, Iran, [E.Hassanzadeh94@iau-arak.ac.ir](mailto:E.Hassanzadeh94@iau-arak.ac.ir)

<sup>2</sup> Pardis Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran, [aliehyaei@pardisiau.ac.ir](mailto:aliehyaei@pardisiau.ac.ir)

<sup>3</sup> Islamic Azad University, Arak, Iran, [s-jafari@iau-arak.ac.ir](mailto:s-jafari@iau-arak.ac.ir)

<sup>4</sup> Shahid Rajaee University of Tehran, Tehran, Iran, [amohammadi@sru.ac.ir](mailto:amohammadi@sru.ac.ir)

<sup>5</sup> Islamic Azad University, Arak, Iran, [h-mazaheri@iau-arak.ac.ir](mailto:h-mazaheri@iau-arak.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 07 June 2020

Accepted: 09 September 2020

#### Keywords:

Gamma Stirling Engine

Cooling

Air and Helium Gas

Power Supply

### ABSTRACT

The Stirling Cycle is one of the thermodynamic cycles that is close to Carnot cycle in term of theory, and these advantages cause to using Stirling engines in wide industries. The main objective of this research is experimental investigation of Stirling Gamma engine for refrigeration. In this investigation, effect of working fluid air and helium, operating pressure of working fluid and dynamo power on refrigeration generation have been investigated. Results show that with using air fluid with power 520.8 W and operating pressure 3 bar and in 10 minutes could reach to temperature  $-23^{\circ}\text{C}$  and with using Helium fluid in power 420 W and operating pressure 6 bar and in 10 minutes could reach to temperature  $-21^{\circ}\text{C}$ . In experimental implement has been tried to reach lower than 10 percent error results in various part of engine like, insulation, leaking, belt lash and measurement devise. Results show that increasing power of power supply mean gas pressure, time of turning on power supply and using fluid such as air, helium are effective in refrigeration.

