



Performance study of helium-air hybrid Stirling engine under parameters effect of temperature, pressure, rotational speed and working fluid composition

Bahram Vaziri¹, Mohammad Azadi^{2*}, Mojtaba Biglari³, Seyed Navid Madani⁴

¹ Engineerin Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

² Engineerin Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

³ Engineerin Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

³ Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran.

* P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, m_azadi@semnan.ac.ir

Article info

Article history:

Received: 26 Sep 2021

Revised: 2 Nov 2021

Accepted: 7 Nov 2021

Available online:

Keywords:

Stirling engine

Hybrid Stirling

Working fluid

Gas composition

Sensitivity analysis

<https://doi.org/10.22077/AEC.2021.4711.1007>

AEC.2021.4711.1007

Abstract

The Stirling engine is an external combustion engine that works with different thermal energies such as solar energy, biomass, fossil fuels, etc. The purpose of this study is to investigate various parameters to increase the performance of the helium-air hybrid Stirling engine. In this study, by three thermodynamics models, including isothermal, ideal adiabatic, and non-ideal adiabatic, a simulation was done for the Gama-type Stirling engine and their results were compared to experimental data. After determining the superior model, the effect of combining two helium and air gases at different percentages, the speed, the temperature, and the pressure was investigated and the sensitivity analysis of these parameters was performed, using the MINITAB software and the regression analysis. Obtained results of the sensitivity analysis showed when the percentage of helium from 0% to 35%, the power increases, and then by increasing the percentage of helium from 35% to 75%, the power is constant and from 75% to 100% the power starts to increase again. In total, by increasing the percentage of helium from zero to 100%, the power will increase by 42%. It was also found that by increasing the percentage of helium from zero to 100%, the efficiency will increase by 95%, and by increasing the percentage of helium from 0 to 100%, heat loss will be reduced by 35%.

مطالعه عملکردی موتور استرلینگ هیبریدی هلیوم-هوا تحت تاثیر پارامترهای دما، فشار، سرعت دورانی و ترکیب سیال عامل

بهرام وزیری^۱، مجد آزادی^{۲*}، مجتبی بیگری^۳، سید نوید مدنی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۴ کارشناسی ارشد، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران

* ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱، سمنان، ایران، m_azadi@semnan.ac.ir

چکیده

موتور استرلینگ یک موتور برون سوز است که می تواند با انرژی های حرارتی مختلفی مانند انرژی خورشیدی، بیومس، سوخت های فسیلی و غیره کار کند. هدف از این پژوهش بررسی پارامترهای مختلف جهت افزایش عملکرد موتور استرلینگ هیبرید هلیوم-هوا است. در این تحقیق، با استفاده از سه مدل ترمودینامیکی هم دما، آدیاباتیکی ایده آل و آدیاباتیکی غیر ایده آل، برای موتور استرلینگ نوع گاما مدل سازی صورت گرفته است و نتایج حاصل از آن با داده های تجربی مقایسه شده است. پس از تعیین بهترین مدل، تاثیر ترکیب دو گاز هوا و هلیوم در درصد های مختلف، سرعت، دما و فشار مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از نرم افزار مینی تب و روش رگرسیون به تحلیل حساسیت این پارامترها پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد با افزایش درصد هلیوم حدودا 35 درصد، توان افزایش یافته و سپس با میزان افزایش درصد هلیوم از 35 تا 75 درصد، توان ثابت است و از 75 درصد به بالاتر دوباره توان شروع به افزایش می یابد در مجموع با افزایش درصد هلیوم از صفر تا 100 درصد توان 42 درصد افزایش خواهد یافت. همچنین مشخص شد که با افزایش درصد هلیوم از صفر تا 100 درصد بازدهی 95 درصد افزایش خواهد یافت و با افزایش درصد هلیوم از 0 تا 100 درصد اتلاف حرارتی به مقدار 35 درصد کاهش خواهد یافت.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۰/۰۷/۰۴

بازنگری: ۰۰/۰۸/۱۱

پذیرش: ۰۰/۰۸/۱۶

نشر برخط:

کلمات کلیدی:

موتور استرلینگ

استرلینگ هیبرید

سیال عامل

ترکیب گاز

تحلیل حساسیت

موتور استرلینگ یک موتور برونسوز است که در سال 1816 توسط یک کشیش اسکاتلندی به نام رابرت استرلینگ اختراع شده است. موتور استرلینگ براساس اختلاف دما بین منبع گرم و سرد کار می‌کند. از نظر ساختاری موتور استرلینگ به چهار دسته بتا، گاما، آلفا و بیستون آزاد تقسیم می‌شوند [۱]. درون موتور استرلینگ از یک گاز به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود این گاز می‌تواند هوا، هلیوم، هیدروژن، نیتروژن و غیره باشد [۲]. از زمان اختراع موتور استرلینگ تاکنون تحقیقات فراوانی بر روی آن انجام شده است که حاصل این تحقیقات ارائه مدل‌های مختلف ترمودینامیکی مانند مدل هم‌دما، آدیاباتیک ایده‌آل و آدیاباتیک غیرایده‌آل (سیمپل) و غیره بوده است. تفاوت موجود در این مدل‌ها در فرضیات و تلفات لحاظ شده در آن‌ها است که با استفاده از آن‌ها سعی شده است تا جواب شبهه‌سازی به آزمایش تجربی نزدیک‌تر شود [۳].

سازلی و همکاران [۴]، با استفاده از مدل ریاضی در نرم‌افزار متلب به شبیه‌سازی، و بررسی آنالیز حرارتی در موتور استرلینگ خورشیدی پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که عملکرد موتور استرلینگ با شدت تابش نور خورشید رابطه مستقیم دارد به گونه‌ای که با افزایش شدت تابش نور خورشید دمای منبع گرم افزایش می‌یابد و در نتیجه قدرت خروجی از شفت موتور نیز افزایش خواهد یافت. فوتوناتو و همکاران [۵]، سه پارامتر فشار موتور، ترکیبات سوخت و نسبت هوا به سوخت را به صورت عددی و تجربی مقایسه کرده‌اند. در نهایت دریافته‌اند که در تمامی ترکیبات، موتور رفتار مناسبی در صدور، پایداری و بازدهی داشته است. همچنین مشخص شده که با تغییر فشار موتور عملکرد موتور تقریباً ثابت بوده است و با افزایش نسبت هوا به سوخت عملکرد موتور افزایش یافته است. چنگ و یانگ [۶]، با کمک مدل‌سازی به بررسی تاثیر سرعت کاری بر توان شفت در موتور استرلینگ پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هرچه سرعت افزایش یابد اختلاف دما بین منبع گرم و سرد کاهش می‌یابد که باعث کاهش کار خروجی شفت می‌شود هرچند که توان خروجی از شفت تابعی از سرعت کاری است. کارابالت و همکاران [۷]، به بررسی توان و گشتاور موتور استرلینگ نوع گاما با سیال عامل هلیوم پرداخته‌اند. در این پژوهش دمای منبع سرد در 27 درجه سانتیگراد ثابت بوده است در حالی که دمای منبع گرم در سه حالت 180، 220 و 260 درجه سانتیگراد بوده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بیشینه گشتاور ایجاد شده در موتور 3.99 نیوتن متر و توان 183 وات در فشار 4 بار و دمای منبع گرم 260 درجه سانتیگراد بوده است همچنین مشخص شد که ماکزیمم توان در سرعت 600 دور بر دقیقه بوده است. ژیا و همکاران [۸]، به بررسی تجربی انتقال حرارت در لوله‌های گرمکن پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش فشار گاز دمای دیواره کاهش می‌یابد و انتقال حرارت بهتر خواهد شد، این کاهش به گونه‌ای است که با افزایش فشار از 0.1 تا 0.4 مگاپاسکال دمای دیواره 17 درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد و توان موتور 10 وات افزایش می‌یابد. نی و همکاران [۹]، به بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت گازه‌ای مختلف در لوله یو شکل پرداخته‌اند. در این تحقیق گازه‌ای هلیوم، نیتروژن، کربن دی اکسید مورد بررسی قرار گرفته‌اند در انتها دریافته‌اند که با افزایش فشار و سرعت دورانی ضریب انتقال حرارت افزایش خواهد یافت، همچنین مشخص شده که هلیوم دارای بیشترین میزان انتقال حرارت است. هاجم و همکاران [۱۰]، به بررسی رابطه بین پارامترهای موجود در موتور استرلینگ نوع گاما پرداخته‌اند. در این تحقیق سه پارامتر فشار، دمای منبع گرم و سرعت مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نتایج نشان داد که توان ترمزی در فشارهای بالا به سرعت و دمای منبع گرم موتور حساس‌تر است و همچنین مشخص شد که عملکرد موتور نسبت به بازدهی موتور حساس‌تر است. دوگان و همکاران [۱۱]، به بررسی تاثیر سیال عامل بر عملکرد موتور استرلینگ نوع گاما پرداخته‌اند. در این پژوهش دو موتور استرلینگ به یکدیگر متصل شده‌اند به گونه‌ای که یک موتور با دریافت گرما از منبع گرم برق تولید می‌کند و موتور دیگر برق تولید شده توسط موتور اول را دریافت می‌کند و سرما تولید می‌کند. سیال عامل‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق هلیوم، هیدروژن و کربن دی اکسید بوده است که دو به دو در دو موتور تزریق شده است (در حالت کلی 9 زوج سیال وجود خواهد داشت). در نهایت دریافته‌اند که در حالی که در هر دو طرف یک نوع سیال عامل وجود داشت باشد عملکرد موتور بهتر خواهد بود مخصوصاً اگر سیال عامل استفاده شده هلیوم باشد. همچنین مشخص شد که سیال‌های کوپل شده هیدروژن به عنوان سیال

یخچال و هلیوم به عنوان سیال مقابل، دی‌اکسید کربن به عنوان سیال یخچال و هلیوم به عنوان سیال مقابل و دی‌اکسید کربن به عنوان سیال یخچال و هیدروژن به عنوان سیال مقابل دارای بازدهی حرارتی بالایی نسبت به حالت معکوس است. وانگ و همکاران [۱۲]، به بررسی ارتقا یک مدل عددی گذرای مرتبه سه به صورت شبیه‌سازی برای موتور استرلینگ پرداختند. در تست‌های انجام شده از دو سیال عامل هلیوم و هیدروژن استفاده شده است. نتایج نشان داد که نمودار فشار-حجم، توان اندیکاتور، توان ترمزی و بازدهی اندیکاتور و مکانیکی مدل ارتقا یافته نسبت به مدل اولیه دارای نتایج بهتری است. همچنین مشخص شد که می‌توان از هیدروژن در سرعت‌های بالاتر استفاده کرد. شافت و همکاران [۱۳]، به بررسی و مقایسه میزان تولید برق موتور استرلینگ با گازه‌ای هوا و هلیوم در فشارهای مختلف پرداخته‌اند. در نهایت دریافته‌اند که در شرایط یکسان هلیوم 35 برابر نسبت به هوا توان الکتریکی بیشتری تولید می‌کند. احمدی و همکاران [۱۴]، به مقایسه دوازده روش مختلف ترمودینامیکی با یکدیگر پرداختند. در نهایت مشخص شده که درصد خطای توان ارائه شده با نتایج آزمایش تجربی، در مدل‌های مختلف از 1 تا 177 درصد و درصد خطای بازدهی از 4 تا 41 درصد بوده است. لی و همکاران [۱۵]، به بررسی یک مدل جدید با عنوان مدل پلی‌تروپیک همراه با تلفات پرداخته‌اند. در نهایت دریافته‌اند که مدل ارائه شده نسبت به مدل‌های گذشته، توان و بازدهی موتور استرلینگ را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند همچنین در این پژوهش دو سیال عامل هلیوم و هیدروژن را با یکدیگر مقایسه کردند و دریافته‌اند که بهتر است از هلیوم در سرعت‌های پایین 2500 دور بر دقیقه استفاده شود و از هیدروژن برای سرعت‌های بالا 2500 دور بر دقیقه استفاده شود. بابالهی و همکاران [۱۶]، به بررسی یک روش جدید با عنوان سیمپل 2 که براساس مدل سیمپل است پرداخته‌اند. در این پژوهش نتایج مدل سیمپل 2 با مدل‌های دیگر مقایسه شده است، که نتایج نشان داده است که مدل جدید ارائه شده دارای سازگاری بهتری با آزمایش تجربی است به گونه‌ای که در مدل جدید درصد خطای توان و بازدهی حرارتی به ترتیب 21.6 و 10.1 درصد کاهش یافته است. الفاروای و همکاران [۱۷]، به بررسی بهبود مدل ترمودینامیکی موتور استرلینگ نوع گاما پرداخته‌اند. آنها دریافته‌اند که هنگامی که دمای منبع سرد 50 درجه سانتیگراد و دمای منبع گرم 650 درجه سانتیگراد باشد میزان قدرت شفت برای گازه‌ای هلیوم و نیتروژن به ترتیب 49 و 35 درصد افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که حداکثر خطای ایجاد شده بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی 15 درصد بوده است. بابالهی و صیادی [۱۸]، با استفاده از مدل ترمودینامیک پلی‌تروپیک همراه با تلفات به بررسی تغییرات دمای منبع گرم، فرکانس کاری و فشار متوسط و تاثیر آن بر بازدهی و توان خروجی پرداختند. در نهایت دریافته‌اند که نتایج ارائه شده توسط روش پلی‌تروپیک به نتایج آزمایش تجربی نزدیک‌تر است به گونه‌ای که درصد خطای توان و بازدهی ارائه شده به ترتیب 14.34 و 3.14 درصد بوده است. همچنین در ادامه این پژوهش به بررسی تاثیر تغییرات سیال عامل در شرایط کاری مختلف پرداخته شده است. احدی و همکاران [۱۹]، به بررسی پوشش دهی در بازیاب موتور استرلینگ نوع گاما با استفاده از مدل آدیاباتیک غیر ایده‌آل پرداختند در نهایت دریافته‌اند که فشار موثرترین پارامتر بر روی موتور توان موتور استرلینگ چه در حالت با پوشش و چه در حالت بدون پوشش بوده است همچنین دریافته‌اند که ضخامت لایه پوشش داده داده موثرترین پارامتر بر روی حرارت اتلافی موتور بوده است. طقینی و همکاران [۲۰]، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی (نسخه دوم) به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه، در روش آدیاباتیک غیر ایده‌آل پرداخته‌اند. در این تحقیق نمودار پرتو ترسیم شده و با استفاده از دو روش تصمیم‌گیری لینمپ و تاپسیس نقاط بهینه استخراج شده است در نهایت با مقایسه نقاط بهینه دریافته‌اند که میزان افت توان بهینه در محدوده 365 تا 425 وات متغیر است و میزان بازدهی بهینه 0.475 تا 0.52 است. قیس و همکاران [۲۱]، به بررسی تجربی و تئوری گرمکن موتور استرلینگ با استفاده از بهینه‌سازی پرداختند. در نهایت دریافته‌اند که در فرکانس‌های بالا انرژی گرمکن به نظر ثابت می‌شود و روند مبادله بسیار سریع خواهد بود به همین دلیل سیال عامل زمان کافی برای جذب تمام گرمای تولید شده توسط منبع گرم را ندارد. همچنین مشخص شد که بیشترین میزان توانایی گرمکن در فرکانس 6.1 هرتز و فشار اولیه 7 بار و درجه حرارت 500 درجه سانتیگراد بوده است.

همانگونه که مشخص است مطالعات بسیاری بر روی موتور استرلینگ انجام شده است که نشان می‌دهند به ندرت تحقیقات بر روی موتور گاما انجام شده است و بیشتر تحقیقات بر روی موتور بتا بوده است زیرا در موتور بتا پیستون و جابه‌جا کننده

$$V_c = V_{dc} + \frac{V_{se}}{2} \left[1 + \cos\theta - \frac{1}{\lambda_e} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_e^2 \sin^2\theta} \right) \right] + \frac{V_{ce}}{2} \left[1 - \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{\lambda_c} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_c^2 \sin^2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)} \right) \right] \quad (7)$$

برای محاسبه کار در یک سیکل کامل از رابطه (۸) استفاده می‌شود [۳].

$$W = W_e + W_c = \oint p dV_c + \oint p dV_e = \oint p \left(\frac{dV_c}{d\theta} + \frac{dV_e}{d\theta} \right) d\theta \quad (8)$$

حجم کل سیستم و معادله انرژی از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند [۳].

$$V_t = V_c + V_k + V_r + V_h + V_e \quad (9)$$

$$dQ = dW - RTdm \quad (10)$$

سرانجام با توجه به فرضیات انجام شده و معادلات به دست آمده رابطه انرژی برای هر پنج محفظه موتور به دست می‌آید [۳].

$$Q_c = W_c \quad (11)$$

$$Q_e = W_e \quad (12)$$

$$Q_k = Q_h = Q_r = 0 \quad (13)$$

الگوریتم حل مدل هم‌دما در شکل (۲) آمده است.

۳ - مدل ترمودینامیکی آدیاباتیک ایده‌آل

تمام فرضیات در نظر گرفته شده در مدل هم‌دما، به غیر از فرض ایده‌آل گرفتن مبدل‌های حرارتی، در مدل آدیاباتیک ایده‌آل صادق است [۳]. همچنین در این مدل عدد پرانتل سیال نیز ثابت در نظر گرفته شده است. شکل (۳) نمودار دمایی مدل آدیاباتیک ایده‌آل را نشان می‌دهد.

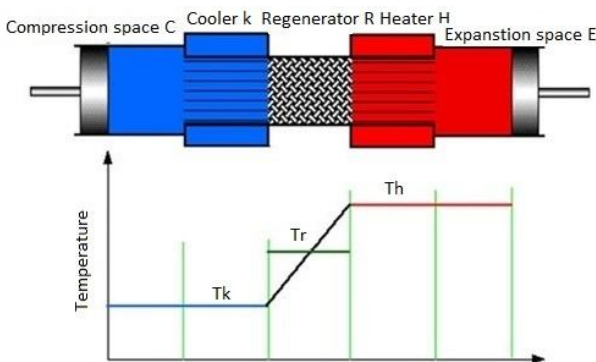


Fig. 1. The distribution of the temperature in the isothermal model [3].
شکل ۱. نحوه توزیع دما در مدل هم‌دما [۳].

در یک محفظه قرار گرفته‌اند و ساخت و آب‌بندی راحت تری دارد ولی در موتورهای آلفا و گاما هرکدام از محفظه‌های پیستون و جابه‌جا کننده به صورت جداگانه قرار دارند و برای ساخت نیاز به تکنولوژی ساخت بالاتری است. از طرفی مشخص شده است که سیال عامل یکی از مهمترین قسمت‌های موتور استرلینگ است که تأثیر به سزایی در توان و بازدهی خروجی موتور دارد. در این تحقیق، قصد بر آن است که در ابتدا سه مدل ترمودینامیکی هم‌دما، آدیاباتیک ایده‌آل و آدیاباتیک غیر ایده‌آل (سیمیل) با آزمایش تجربی موتور استرلینگ نوع گاما اعتبارسنجی شوند و در نهایت با استفاده از بهترین مدل ترمودینامیکی از بین این سه مدل، به بررسی اثر ترکیب دو سیال عامل هوا و هلیوم در موتور استرلینگ نوع گاما پرداخته خواهد شد و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تَب به تحلیل حساسیت توان، بازدهی و اتلاف حرارتی با تغییر پارامترهایی مانند دما، فشار، سرعت موتور و درصد هلیوم پرداخته خواهد شد.

۲ - مدل ترمودینامیکی هم‌دما

همانگونه که از اسم این مدل مشخص است، در این مدل دمای سیال عامل در محفظه تراکم و همچنین محفظه انبساط ثابت در نظر گرفته می‌شود. فرضیات اساسی موجود در این مدل عبارتند از: ۱- در تمام پنج محفظه موتور استرلینگ، فشار در هر زاویه لنگ از میل‌لنگ ثابت در نظر گرفته شده است. ۲- دو محفظه تراکم و انبساط دارای دمای ثابتی هستند. ۳- موتور مورد بررسی بدون هیچ‌گونه نشتی گاز است (جرم سیال عامل درون موتور ثابت است). ۴- سیال عامل مورد استفاده گاز ایده‌آل است. ۵- سرعت موتور ثابت است. ۶- مبدل‌های حرارتی ایده‌آل هستند. ۷- از انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی صرفه نظر شده است [۳].

شکل (۱) نحوه توزیع دما در مدل هم‌دما را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود که دمای محفظه گرم و سرد ثابت و برابر دمای هیتر و کولر است.

با توجه به فرضیات موجود برای محاسبه جرم گاز از رابطه (۳) استفاده خواهد شد [۳].

$$M = m_c + m_k + m_r + m_h + m_e \quad (1)$$

$$m = \frac{pV}{RT} \quad (2)$$

$$M = \frac{p}{R} \left(\frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_h} \right) \quad (3)$$

همانگونه که شکل (۱) نمایش می‌دهد دمای بازیاب به صورت لگاریتمی و با توجه به دمای هیتر و کولر قابل محاسبه است [۳].

$$T_r = \frac{(T_h - T_k)}{\ln(T_h/T_k)} \quad (4)$$

رابطه فشار با توجه به تغییرات حجم در دو محفظه تراکم و انبساط محاسبه می‌شود [۳].

$$p = \frac{MR}{\left(\frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_h} \right)} \quad (5)$$

حجم محفظه‌های تراکم و انبساط موتور استرلینگ در زاویه لنگ‌های مختلف از روابط (۶) و (۷) محاسبه خواهند شد. لازم به ذکر است که موتور استفاده شده از نوع گاما است [۱۷].

$$V_e = V_{de} + \frac{V_{se}}{2} \times \left[1 - \cos\theta + \frac{1}{\lambda_e} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_e^2 \sin^2\theta} \right) \right] \quad (6)$$

$$dm_c + dm_e + dp \left(\frac{m_k}{p} + \frac{m_r}{p} + \frac{m_h}{p} \right) = 0 \quad (16)$$

با توجه به این که محفظه تراکم در این مدل آدیباتیک در نظر گرفته شده است می توان به این نتیجه دست یافت که $dQ_c = 0$ و از طرفی کار انجام شده برابر است با $dW_c = pdV_c$. رابطه (۱۷)، معادله انرژی برای محفظه تراکم را نشان می دهد [۲۰].

$$c_p T_{ck} dm_c = pdV_c + c_v d(m_c T_c) \quad (17)$$

$$dm_c = \frac{pdV_c + \frac{V_c dp}{\gamma}}{RT_{ck}} \quad (18)$$

با روندی مشابه برای محفظه انبساط رابطه (۱۹) استخراج خواهد شد [۲۰].

$$dm_e = \frac{pdV_e + \frac{V_e dp}{\gamma}}{RT_{he}} \quad (19)$$

اختلاف فشار از رابطه (۲۰) محاسبه خواهد شد [۲۰].

$$dp = \frac{-\gamma p \left[\left(\frac{dV_c}{T_{ck}} \right) + \left(\frac{dV_e}{T_{he}} \right) \right]}{\frac{V_c}{T_{ck}} + \gamma \left(\frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} \right) + \frac{V_e}{T_{he}}} \quad (20)$$

شکل (۴) نمودار آدیباتیک محفظه تراکم و کولر را نشان می دهد که با استفاده از آن می توان روابط بقا جرم را برای هر محفظه استخراج کرد [۳].

$$\dot{m}_{ck} = -dm_c \quad (21)$$

$$\dot{m}_{kr} = \dot{m}_{ck} - dm_k \quad (22)$$

$$\dot{m}_{rh} = \dot{m}_{kr} - dm_r \quad (23)$$

$$\dot{m}_{he} = \dot{m}_{rh} - dm_h \quad (24)$$

اگر $\dot{m}_{ck} > 0$ باشد، $T_{ck} = T_c$ می شود، در غیر این صورت $T_{ck} = T_k$ می شود، و اگر $\dot{m}_{he} > 0$ باشد، $T_{he} = T_h$ می شود، در غیر این صورت $T_{he} = T_e$ می شود [۱۸]. روابط (۲۵) و (۲۶) تغییرات دمایی محفظه های تراکم و انبساط نسبت به زاویه میل لنگ را نشان می دهد [۱۸].

$$dT_e = T_e \left(\frac{dp}{p} + \frac{dV_e}{V_e} - \frac{dm_e}{m_e} \right) \quad (25)$$

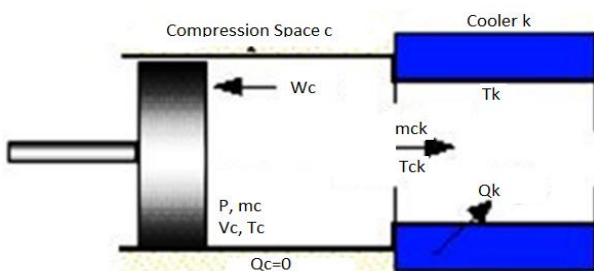


Fig. 4. The adiabatic diagram of compression chamber and cooler [3].
شکل ۴. نمودار آدیباتیک محفظه تراکم و کولر [۳].

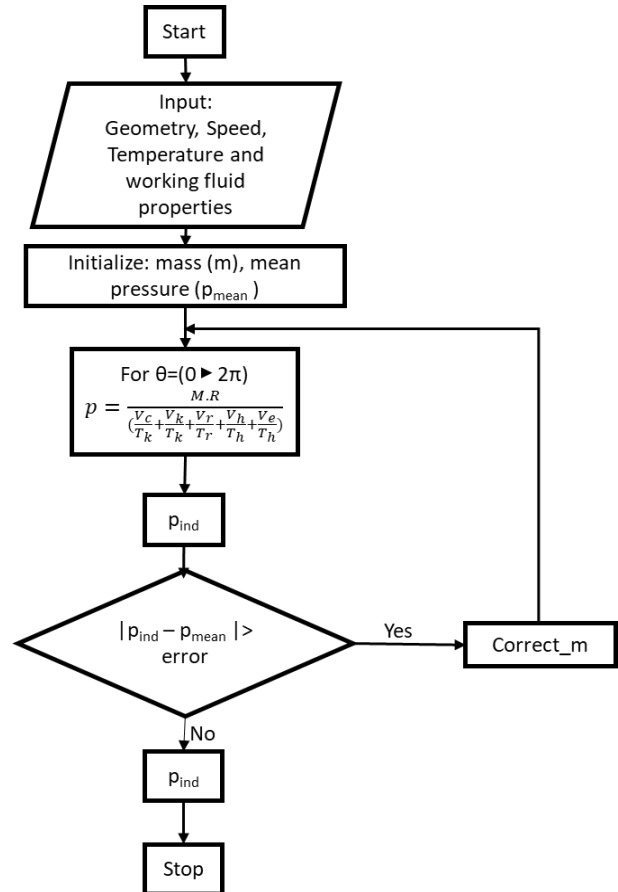


Fig. 2. The solving algorithm of the isothermal model.
شکل ۲. الگوریتم حل مدل هم دما.

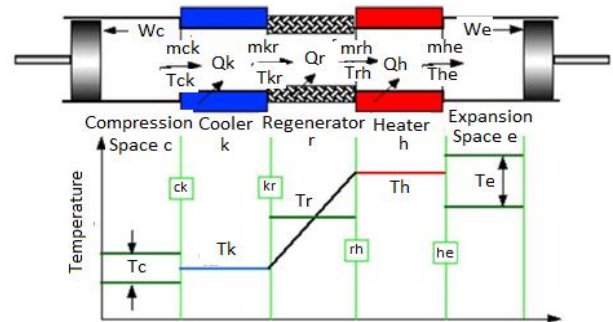


Fig. 3. The temperature diagram of the ideal adiabatic model [3].
شکل ۳. نمودار دمایی مدل آدیباتیک ایده آل [۳].

رابطه (۱۴) بقای جرم را نشان می دهد [۲۰].

$$dm_c + dm_k + dm_r + dm_h + dm_e = 0 \quad (14)$$

باتوجه به ثابت بودن دما در محفظه های کولر، بازیاپ و هیتر، و با استفاده از رابطه گاز ایده آل رابطه (۱۵) استخراج می شود [۲۰].

$$\frac{dp}{p} = \frac{dm}{m} \quad (15)$$

با جایگذاری رابطه (۱۵) در رابطه (۱۴) قانون بقا جرم به شکل رابطه (۱۶) نوشته خواهد شد [۲۰].

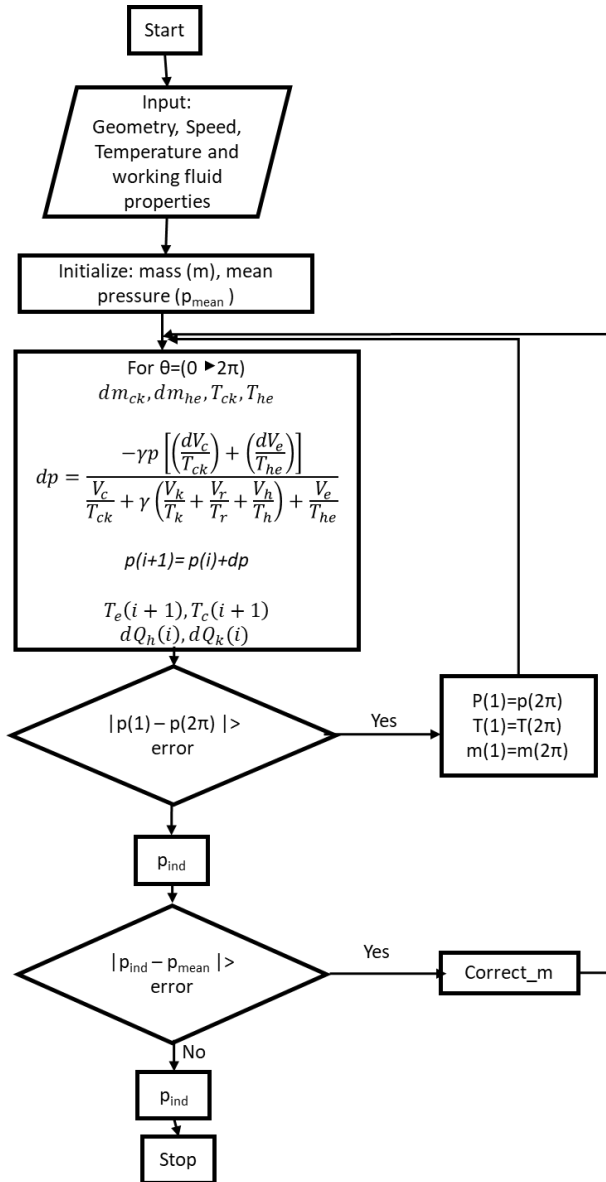


Fig. 5. The solving algorithm of the ideal adiabatic model. شکل ۵. الگوریتم حل مدل آدیاباتیک ایده‌آل.

در بازتاب علاوه بر افت فشار، تلفات انرژی نیز وجود دارد، زیرا هنگامی که سیال عامل از بازتاب عبور می‌کند، مقداری انرژی را از انرژی خود از دست می‌دهد این تلفات از رابطه (۳۷) محاسبه خواهد شد [۲۰].

$$Q_{r,loss} = (1 - \varepsilon)(Q_{r,max} - Q_{r,min}) \quad (37)$$

$$\varepsilon = \frac{NTU}{NTU + 1} \quad (38)$$

$$NTU = \frac{St \times A_{wg}}{2A} \quad (39)$$

انرژی حرارتی واقعی در هیتر و کولر از روابط (۴۰) و (۴۱) محاسبه خواهند شد [۲۰].

$$Q_H = Q_h + Q_{r,loss} \quad (40)$$

$$dT_c = T_c \left(\frac{dp}{p} + \frac{dV_c}{V_c} - \frac{dm_c}{m_c} \right) \quad (26)$$

کار انجام شده در کولر، هیتر و بازتاب صفر است. برای محاسبه شار حرارتی برای این سه محفظه از روابط (۲۷) تا (۲۹) استفاده می‌شود [۲۰].

$$dQ_k = \frac{C_v V_k dp}{R} - C_p (T_{ck} m_{ck} - T_{kr} m_{kr}) \quad (27)$$

$$dQ_k = \frac{C_v V_k dp}{R} - C_p (T_{ck} m_{ck} - T_{kr} m_{kr}) \quad (28)$$

$$dQ_h = \frac{C_v V_h dp}{R} - C_p (T_{rh} m_{rh} - T_{he} m_{he}) \quad (29)$$

شکل (۵) الگوریتم حل مدل آدیاباتیک ایده‌آل را نشان می‌دهد.

۴ - مدل ترمودینامیکی آدیاباتیک غیرایده‌آل

مدل آدیاباتیک غیرایده‌آل بر پایه مدل آدیاباتیک ایده‌آل است که در آن تلفات فشار و انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای محاسبه افت فشار باید ضریب اصطکاک که خود به عدد رینولدز جریان مربوط می‌شود را محاسبه کرد [۲۰].

$$dP_R = \frac{2f\mu V_r G l_r}{m_r d_r^2} \quad (30)$$

ضریب اصطکاک برای بازتاب از رابطه (۳۱) محاسبه خواهد شد [۲۰].

$$f = 54 + 1.43Re^{0.78} \quad (31)$$

افت فشار و ضریب اصطکاک در هیتر و کولر از روابط (۳۲) تا (۳۴) محاسبه خواهد شد لازم به ذکر است که ضریب اصطکاک کولر و هیتر از یک رابطه محاسبه می‌شود [۲۰].

$$dP_H = \frac{2f\mu V_h G l_h}{m_h d_h^2} \quad (32)$$

$$dP_K = \frac{2f\mu V_k G l_k}{m_k d_k^2} \quad (33)$$

$$f = 0.0791Re^{0.75} \quad (34)$$

افت فشار کلی در موتور برابر است با مجموع افت فشارهای موجود در مبدل‌های حرارتی و بازتاب [۲۰].

$$dP = dP_R + dP_H + dP_K \quad (35)$$

میزان قدرت از دست رفته در مبدل‌های حرارتی و بازتاب از رابطه (۳۶) محاسبه خواهد شد [۲۰].

$$W_{loss} = f_r \int (dP dV) \quad (36)$$

$$x_i = \frac{c_i/M_i}{\sum_{j=1}^n (c_j/M_j)} \quad (54)$$

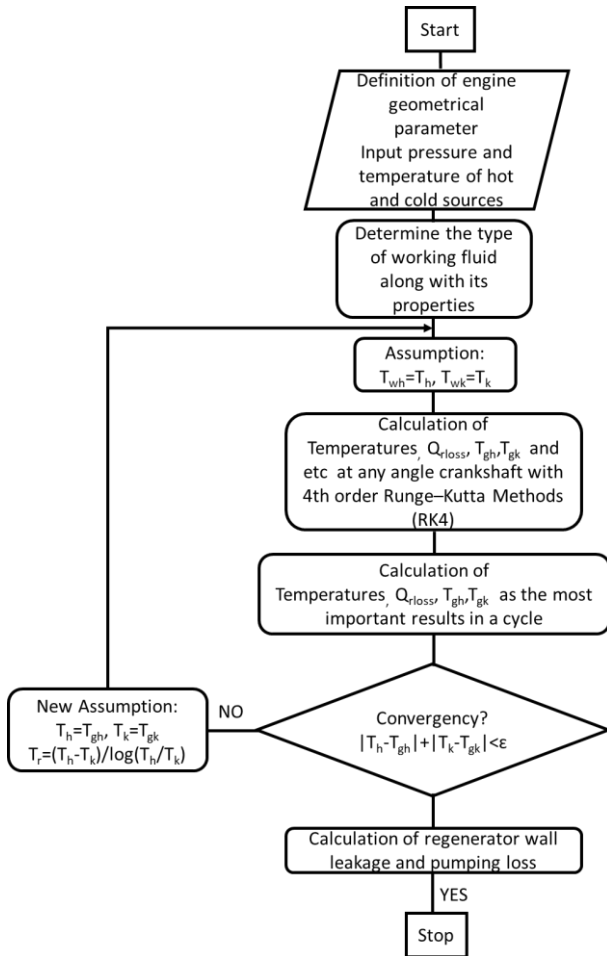


Fig. 6. The solving algorithm of the non-ideal adiabatic model.

شکل ۶. الگوریتم حل مدل آدیاباتیک غیرایده‌آل.

۵ - تحلیل حساسیت

در این پژوهش، وابستگی بین متغیرها به وسیله مدل ریاضی، که رابطه رگرسیون نام دارد مشخص خواهد شد. در تحلیل حساسیت، نیاز است یک سطح اطمینان تعریف شود. سطح اطمینان از رابطه (۵۵) محاسبه خواهد شد [۲۴، ۲۵].

$$P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha \quad (55)$$

بازه $L \leq \theta \leq U$ را بازه اطمینان با مقدار $100(1 - \alpha)$ درصد برای پارامتر θ گفته می‌شود و α به عنوان سطح ریسک است [۲۴، ۲۵]. معنای این بازه به این صورت بیان می‌شود که اگر در تکرار نمونه‌گیری تصادفی، تعداد زیادی از این بازه‌ها ساخته شود، $100(1 - \alpha)$ درصد آن‌ها شامل مقدار واقعی پارامتر θ خواهند بود. $1 - \alpha$ را ضریب اطمینان می‌نامند [۲۴، ۲۵]. در نرم‌افزار مینی‌تپ برای تصمیم‌گیری راحت نسبت به نتایج آزمون، شاخصی به نام مقدار احتمال P-Value ارائه می‌شود، با توجه به رابطه ارائه شده مقادیری که دارای P-Value کمتر 0.05 باشند، حائز اهمیت است [۲۴، ۲۵]. جدول (۱) جزئیات ورودی‌های مسئله در این پژوهش را نشان می‌دهد. بر این اساس، تعداد اجرای کد 1260 خواهد بود.

$$Q_K = Q_k - Q_{r,loss} \quad (41)$$

دمای گاز و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در محفظه گرم و سرد از روابط (۴۲) تا (۴۴) محاسبه می‌شود [۱۸].

$$T_{gh} = T_{wh} - \frac{Q_h f_r}{h_h A_{wh}} \quad (42)$$

$$T_{gk} = T_{wk} - \frac{Q_k f_r}{h_k A_{wk}} \quad (43)$$

$$h_i = \frac{0.0791 \mu C_p Re_m^{0.75}}{2 D_i Pr} \quad i = h, k \quad (44)$$

در نهایت بازدهی موتور استرلینگ از رابطه (۴۵) محاسبه خواهد شد [۲۰].

$$\eta = \frac{W - W_{loss}}{Q_H} \quad (45)$$

شکل (۶) الگوریتم حل مدل آدیاباتیک غیرایده‌آل را نشان می‌دهد. همانگونه که ذکر شد یکی از اهداف این مقاله بررسی ترکیب دو سیال عامل در موتور استرلینگ است. به همین منظور، در روابط ارائه شده برای خصوصیات سیال باید خصوصیات ترکیب دو سیال را قرار داد. بنابراین با استفاده از روابط ترمودینامیکی (۴۶) تا (۵۱) می‌توان خصوصیات مخلوط گازها را محاسبه کرد [۲۲].

$$c_i = \frac{m_i}{m_{mix}} \quad (46)$$

$$c_{pmix} = \sum c_i c_{p_i} \quad (47)$$

$$c_{vmix} = \sum c_i c_{v_i} \quad (48)$$

$$m_{mix} = m_1 + m_2 \quad (49)$$

$$R_{mix} = c_{pmix} - c_{vmix} \quad (50)$$

$$\gamma_{mix} = \frac{c_{pmix}}{c_{vmix}} \quad (51)$$

برای حالت ترکیب دو سیال، ویسکوزیته از روابط (۵۲) تا (۵۴) استفاده خواهد شد [۲۳].

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n x_j \varphi_{ij}} \quad (52)$$

$$[1 + (\mu_i / \mu_j)^{\frac{1}{2}} (M_j / M_i)^{\frac{1}{4}}]^2$$

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{(8 + 8 M_i / M_j)^{\frac{1}{2}}} \quad (53)$$

۶ - اعتبار سنجی

برای اعتبار سنجی، از موتور استرلینگ نوع گاما استفاده شده است و نمودار فشار-حجم و میزان توان پیش‌بینی شده در کد نوشته شده با نتایج آزمایش تجربی مرجع [۲۶] مقایسه شده‌اند. این مقایسه در سه حالت مختلف انجام شده است که جدول (۲) شرایط کاری موتور را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نیز نمودارهای فشار-حجم در سه حالت مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که در سه شکل (۷) تا (۹) مشاهده می‌شود نمودارهای فشار-حجم ترسیم شده در حالت مدل آدیاباتیک غیر ایده‌آل در فرآیند انبساط کمی بالاتر از مدل تجربی قرار گرفته است که علت آن نزدیک بودن هیتر به منبع انبساط و عدم در نظر گرفتن برخی تلفات مانند تشعشع است، که باعث می‌شود در حالت شبیه‌سازی دمای محفظه انبساط بالاتر از مدل تجربی باشد و باتوجه به تاثیر دما بر روی فشار، باعث می‌شود نمودار فشار-حجم بالاتر شبیه‌سازی بالاتر از مدل تجربی باشد.

جدول ۱. جزئیات ورودی‌های مسئله در این پژوهش.

Table 1. Details of problem inputs in this study.

Parameters	Number of levels	Input levels	Running number of the MATLAB code
Hot source temperature (°C)	6	350, 450, 550, 650, 750, 850	
Pressure (bar)	5	4, 6, 8, 10, 12	1260
Speed (rpm)	7	600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200	
Helium percentage (%)	6	0, 20, 40, 60, 80, 100	

جدول ۲. شرایط کاری موتور استرلینگ نوع گاما با سیال عامل هلیوم [۲۷].

Table 2. Operating conditions of gamma type Stirling engine with helium working fluid [27].

Conditions	Case A	Case B	Case C
Pressure (Pa)	810000	620000	460000
Cooling temperature (°C)	33.5	40	35
Heater temperature (°C)	353	350	355
Speed (rpm)	970	950	800
Indicated power (W)	465	364	238

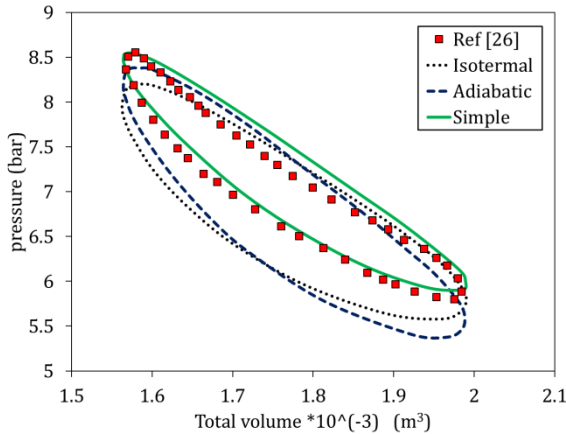


Fig. 8. The comparison of experimental test results with three models of isothermal, ideal adiabatic and non-ideal adiabatic in the second case.

شکل ۸. مقایسه نتایج آزمون تجربی با سه مدل هم‌دما، آدیاباتیک ایده‌آل و آدیاباتیک غیرایده‌آل در حالت دوم.

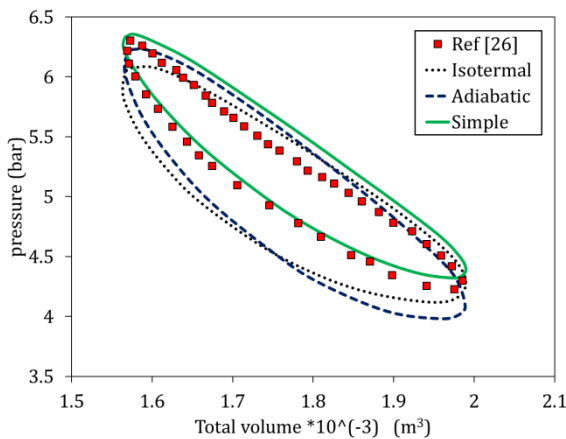


Fig. 9. The comparison of experimental test results with three models of isothermal, ideal adiabatic and non-ideal adiabatic in the third case.

شکل ۹. مقایسه نتایج آزمون تجربی با سه مدل هم‌دما، آدیاباتیک ایده‌آل و آدیاباتیک غیرایده‌آل در حالت سوم.

جدول (۳) به مقایسه میزان توان خروجی از آزمایش تجربی با میزان توان پیش‌بینی شده در مدل‌های ترمودینامیکی پرداخته است. با مقایسه بین توان حاصل از آزمایش تجربی و مدل‌های ارائه شده در جدول (۲) مشخص می‌شود که در مدل‌های هم‌دما و آدیاباتیک ایده‌آل، مقادیر توان بسیار به یکدیگر نزدیک است به گونه‌ای که در سه حالت، بیشترین تفاوت بین این دو مدل ۴.۹ درصد در حالت اول بوده است.

جدول ۳. مقایسه میزان توان خروجی از آزمایش تجربی با میزان توان (برحسب وات) پیش‌بینی شده در مدل‌های ترمودینامیکی.

Table 3. The comparison of the output power from the experiment with the power (W), predicted in thermodynamic models.

Test conditions	Case A	Case B	Case C
Experiment [26]	465.11	363.70	238.00
Isothermal model	969.19	711.92	458.50
Ideal adiabatic model	1016.91	739.40	478.56
Non-ideal adiabatic model	551.00	418.00	308.00
Percentage of relative error of isothermal model	108.37	95.74	92.64
Percentage of relative error of the ideal adiabatic model	118.63	103.30	101.10
Percentage of relative error of non-ideal adiabatic model	16.00	13.00	23.00

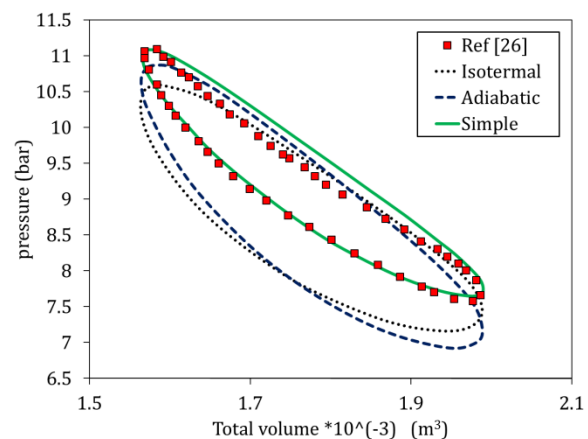


Fig. 7. The comparison of experimental test results with three models of isothermal, ideal adiabatic and non-ideal adiabatic in the first case.

شکل ۷. مقایسه نتایج آزمون تجربی با سه مدل هم‌دما، آدیاباتیک ایده‌آل و آدیاباتیک غیرایده‌آل در حالت اول.

برابر 0.62 می‌شود. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت میزان تأثیری که سرعت در توان دارد بیشتر از تأثیر فشار در توان است که با نتایج به دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد. لازم به ذکر است همانگونه که قبلاً توضیح داده شد، در شکل (۱۰) فقط پنج جمله مهم اول ذکر شده است که سرعت و فشار جز پنج جمله مهم اول برای توان نیستند. به همین دلیل در شکل (۱۰) حضور ندارند اما در صورتی که حضور می‌داشتند و نمودار کامل ترسیم می‌شد مشخص می‌شد که تأثیر سرعت بیشتر از تأثیر فشار است.

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که به ترتیب توان اول تا توان سوم درصد هلیم، توان اول و دوم دما دارای بیشترین تأثیر در بازدهی هستند. لی و همکاران [۱۵]، نشان داده‌اند که با افزایش سرعت از 3000 به 3500 دور بر دقیقه بازدهی از 35.5 درصد به 33 درصد کاهش یافته است که دارای میزان نرمال شده 1.9 است. همچنین مشخص شد که با افزایش فشار از 4.14 به 2.76 مگاپاسکال بازدهی از 45 درصد به 41 درصد کاهش یافته است که نرمال شده آن 3.43 است. با مقایسه این نتایج مشخص می‌شود که میزان تأثیری که فشار در بازدهی دارد، بیشتر از میزان تأثیری است که سرعت در بازدهی دارد که با نتایج به دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد. لازم به ذکر است که در شکل (۱۱) فقط پنج جمله مهم اول ذکر شده است که فشار و سرعت جز پنج جمله مهم اول برای توان نیستند به همین دلیل در شکل (۱۱) حضور ندارند. اما در صورتی که حضور می‌داشتند نمودار به صورت کامل ترسیم می‌شد مشخص می‌شد که تأثیر فشار بیشتر از تأثیر سرعت است. شکل (۱۲) نیز مشخص می‌کند که فقط حاصل ضرب سرعت در فشار، در مدل رگرسیون ارائه شده برای اتلاف حرارتی، بیشترین میزان تأثیر را دارند.

در شکل (۱۳) میزان تأثیر پارامترهای دما، فشار، سرعت و درصد هلیم بر روی توان باهم مقایسه شده است. همانگونه که مشخص شده است با افزایش فشار، دما و سرعت، توان نیز افزایش می‌یابد که با نتایج مراجع [۱۵]، [۳۱]، [۳۲] مطابقت دارد. البته لازم به ذکر است که طبق نتایج ارائه شده توسط مراجع مذکور با افزایش سرعت در ابتدا توان افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد که در بیشتر مراجع برای سیال عامل هلیم، از سرعت بالای 1500 دور بر دقیقه کاهش مشاهده می‌شود. همچنین مشخص شده است که با افزایش درصد هلیم تا محدود 35 درصد توان افزایش می‌یابد و سپس تا محدود 75 درصد ثابت خواهد بود و دوباره با افزایش درصد هلیم، توان افزایش خواهد یافت، و در مجموع از صفر تا 100 درصد افزایش هلیم توان به میزان 42 درصد افزایش یافته است که از نتایج به دست آمده و نوآوری این پژوهش است و علت آن می‌تواند تأثیر پارامترهای مربوط به خواص سیال بر روابط ارائه شده و همچنین نحوه برآزش منحنی بر روی نقاط استخراج شده باشد [۳۳].

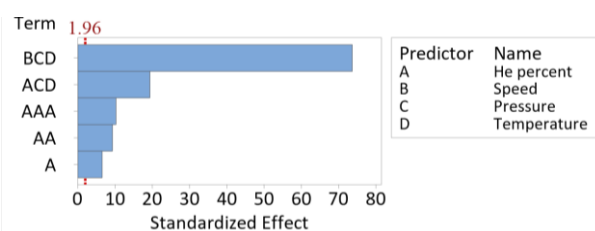


Fig. 10. The Pareto chart for the power.

شکل ۱۰. نمودار پرتو برای توان.

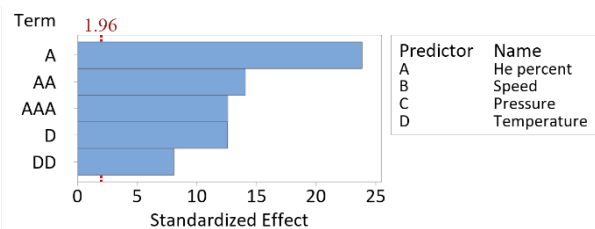


Fig. 11. The Pareto chart for the efficiency.

شکل ۱۱. نمودار پرتو برای بازدهی.

در بین هر سه حالت ارائه شده همواره میزان توان مدل هم‌دما کمتر از مدل آدیباتیک ایده‌آل بوده است و به نتایج آزمایش تجربی نیز نزدیکتر است. این روند در مرجع [۲۸] مشاهده می‌شود. همچنین مشخص شده است که مدل آدیباتیک غیر ایده‌آل به علت در نظر گرفتن تلفات، به آزمایش تجربی نزدیکتر هستند [۳]. احمدی و همکاران [۱۴]، حسینی زاده و همکاران [۲۸]، بابالهی و همکاران [۲۹]، صیادی و همکاران [۳۰]، بابالهی و همکاران [۳۱] به بررسی تئوری و تجربی موتور استرلینگ بتا با روش آدیباتیک غیر ایده‌آل (سیمپل) در شرایط کاری دمای منبع گرم 704 درجه سانتیگراد، دمای منبع سرد 15 درجه سانتیگراد، فشار شارژ 4.13 مگاپاسکال و فرکانس 41.7 هرتز پرداختند و برای توان به ترتیب 123.30، 99.00، 152.83، 176.86، 69.25 درصد خطا به دست آوردند. با بررسی نتایج ارائه شده، مشخص می‌شود که وجود درصد خطای بین 13 تا 23 درصد در این پژوهش، برای مدل آدیباتیک غیر ایده‌آل، عددی مناسب است؛ که نشان دهنده تطبیق مناسب کد تهیه شده در این پژوهش است. بنابراین با توجه به این که مدل آدیباتیک غیر ایده‌آل دارای نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر است این مدل به عنوان مدل مرجع قرار خواهد گرفت. البته مدل‌های ترمودینامیکی دیگری نیز هستند که درصد خطای پایین‌تری دارند اما هدف این پژوهش دستیابی به درصد خطای کمتر نیست بلکه بررسی نحوه تغییر رفتار موتور با ترکیب دوسیال عامل هوا و هلیم است.

۷ - نتایج و بحث

با توجه به شرایط تعیین شده در جدول (۱)، برای این پژوهش نیاز است تا 1260 بار کد اجرا شود تا خروجی‌های مورد نیاز تهیه شود. برای تعیین میزان حساسیت هر یک از پارامترها به متغیرها از مدل رگرسیون و تحلیل حساسیت در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. همچنین مدل‌های مختلفی از تحلیل حساسیت، در این پژوهش استفاده شده است که بهترین آن در این مقاله، گزارش شده است. مدل رگرسیون در نظر گرفته شده در این پژوهش به پارامترهای دما، فشار سرعت و درصد هلیم با توان سوم آن‌ها وابسته است.

جدول (۴) میزان دقت مدل رگرسیون و معنادار بودن آن را مشخص می‌کند زیرا در این پژوهش سطح اطمینان 0.05 در نظر گرفته شده است و تمامی مقادیر P-Value توابع هدف کمتر 0.05 است [۲۴]، [۲۵]. لازم به ذکر است که مقادیر R2 ارائه شده در جدول (۴) براساس بهترین حالت مدل شده است.

شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) نمودار پرتو برای توان، بازدهی و اتلاف حرارتی را نشان می‌دهند، لازم به ذکر است که هر کدام از جمله‌هایی که در هر نمودار از خطوط قرمز رنگ بالاتر باشند به معنای آن است که آن جمله معنادار است و هرچه طول میله‌ها بیشتر باشد به آن معنی است که تأثیر آن جمله نسبت به جمله دیگر بیشتر است. لازم به ذکر است که تمامی این تحلیل‌ها از روابط آماری حاصل می‌شود [۲۴]، [۲۵].

جدول ۴. میزان دقت مدل رگرسیون برای توابع هدف مختلف.

Table 4. The accuracy of the regression model for different objective functions.

Objective functions	R ² (%)	P-Value (-)
Power	97.41	0.000
Thermal efficiency	96.75	0.000
Heat loss	73.54	0.000

شکل (۱۰) بیانگر آن است که به ترتیب حاصل ضرب سرعت در فشار در دما، حاصل ضرب درصد هلیم در فشار در دما، توان سوم درصد هلیم، توان دوم درصد هلیم و توان اول درصد هلیم دارای بیشترین تأثیر در توان هستند، به عنوان مثال و به بیان ساده می‌توان گفت تغییر پارامترهای سرعت و فشار و دما هم‌زمان باهم، نسبت به حالت‌های دیگر بیشترین تأثیر را بر توان خواهد داشت. لازم به ذکر است که در تمام نمودارهای پرتو جمله‌های غیر موثر حذف شده‌اند و فقط پنج جمله مهم اول ذکر شده است. لی و همکاران [۱۵]، نشان داده‌اند که با افزایش سرعت از 1500 به 2000 دور بر دقیقه، توان موتور از 2500 وات به 3600 وات افزایش یافته است که نرمال شده آن حدود 0.81 می‌شود، و با افزایش فشار از 4.14 به 2.76 مگاپاسکال، توان از 1750 وات به 3800 وات افزایش می‌یابد که میزان نرمال شده آن

¹ Pareto

موجب کاهش بازدهی موتور می‌شود [۳۵]. همچنین مشاهده شده است که با افزایش فشار شارژ، بازدهی کاهش خواهد یافت که با نتایج لی و همکاران [۱۵] مطابقت دارد. زیرا با افزایش فشار، میزان جرم بیشتری به موتور وارد می‌شود در نتیجه هم باعث افزایش اصطکاک می‌شود و هم باعث می‌شود موتور نیاز به حرارت بیشتری داشته باشد، در نتیجه بازدهی کاهش می‌یابد [۳۵] همچنین از نمودارهای ارائه شده می‌توان دریافت که با افزایش دما بازدهی افزایش یافته است که این نتایج با نتایج لی و همکاران [۱۵] مطابقت دارد. در ادامه مشخص شده است که با افزایش درصد هلیوم از صفر تا ۱۰۰ درصد بازدهی به میزان ۹۵ درصد افزایش می‌یابد که علت آن ضریب گرمای ویژه بالا و وزن کم هلیوم نسبت به هوا است. شکل‌های (۱۵) نشان می‌دهند که با افزایش سرعت، فشار و دما، اتلاف حرارتی افزایش پیدا می‌کند و با افزایش درصد هلیوم از صفر تا ۱۰۰ درصد اتلاف حرارتی به میزان ۳۵ درصد کاهش پیدا می‌کند، زیرا ظرفیت گرمای ویژه هلیوم نسبت به هوا بالاتر است در نتیجه باعث می‌شود که گاز گرمای بیشتری را جذب کند.

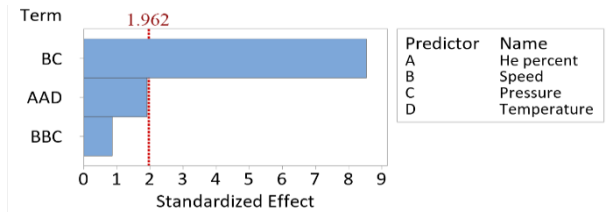


Fig. 12. The Pareto chart for the heat loss.

شکل ۱۲. نمودار پرتو برای اتلاف حرارت.

در شکل‌های (۱۴) میزان تاثیر پارامترهای دما، فشار، سرعت و درصد هلیوم بر روی بازدهی باهم مقایسه شده است. همانگونه که نمودارها نشان می‌دهند با افزایش سرعت بازدهی کاهش می‌یابد که این نتایج با نتایج احمدی و همکاران [۳۴] مطابقت دارد. زیرا با افزایش سرعت، موتور یک سیکل کامل را در زمان کمتری طی می‌کند بنابراین موتور برای رسیدن به این حالت به میزان حرارت بیشتری نیاز دارد که این امر

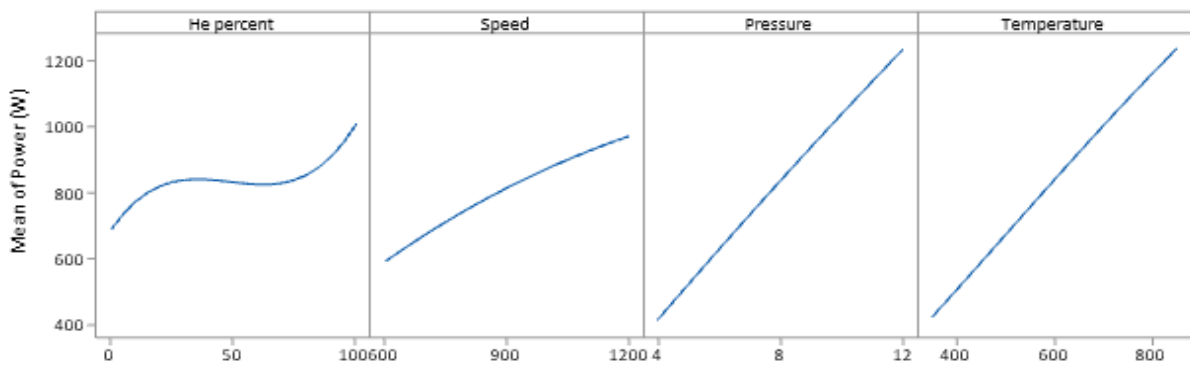


Fig. 13. The effect of Helium percentage, speed, pressure, and temperature parameters on the power of the Gamma-type Stirling engine.

شکل ۱۳. اثر پارامترهای درصد هلیوم، سرعت، فشار و دما بر روی توان موتور استرلینگ نوع گاما.

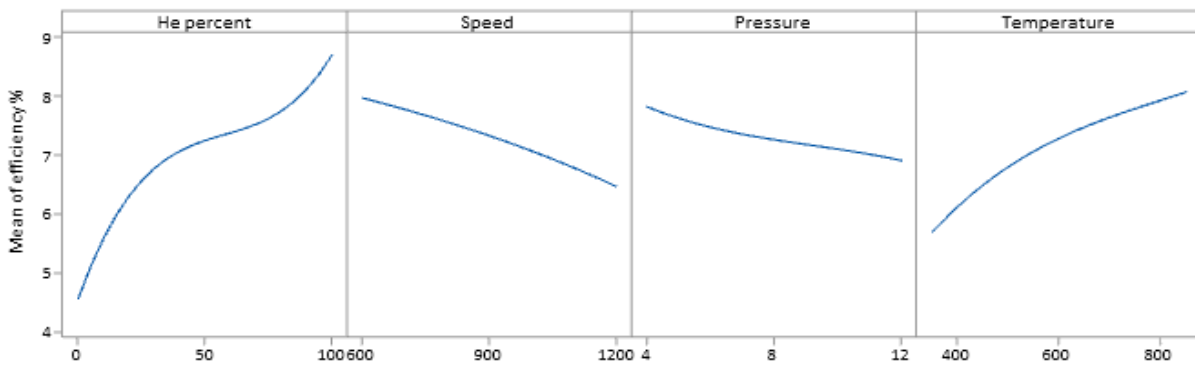


Fig. 14. The effect of Helium percentage, speed, pressure, and temperature parameters on the efficiency of the Gamma-type Sterling Engine.

شکل ۱۴. اثر پارامترهای درصد هلیوم، سرعت، فشار و دما بر روی بازدهی موتور استرلینگ نوع گاما.

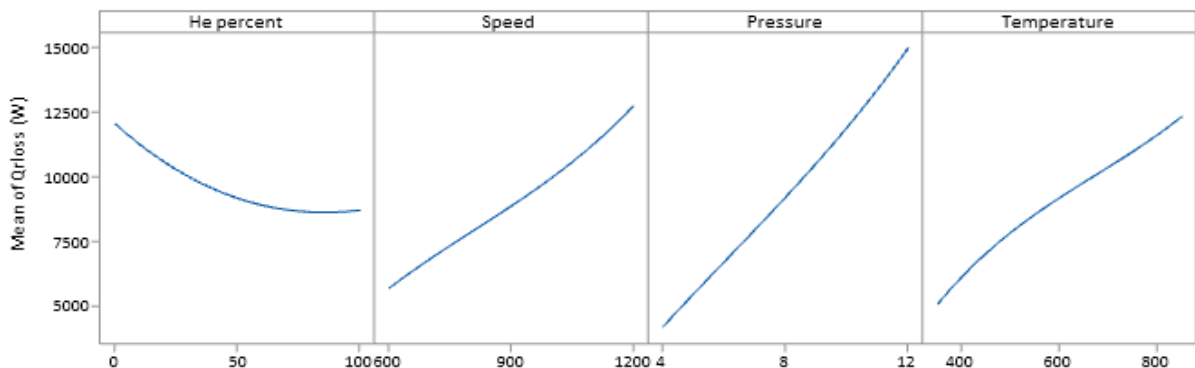


Fig. 15. The effect of Helium percentage, speed, pressure, and temperature parameters on the heat loss of the Gamma-type Sterling engine.

شکل ۱۵. اثر پارامترهای درصد هلیوم، سرعت، فشار و دما بر روی حرارت اتلافی موتور استرلینگ نوع گاما.

۸ - نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد موتور استرلینگ هیبرید هلیوم-هوا (نوع گاما) با ترکیب دو سیال عامل هوا و هلیوم و تاثیر پارامترهای ورودی مانند درصد هلیوم، سرعت، فشار و دمای منبع گرم بر روی توان، بازدهی و اتلاف حرارتی پرداخته شد. در این بخش نتایج کلی به دست آمده از این پژوهش ارائه خواهد شد.

- ❖ با افزایش درصد هلیوم همواره توان و بازدهی تا حدی افزایش می یابد سپس تا محدوده ای ثابت خواهد بود و دوباره افزایش می یابد.
- ❖ با افزایش درصد هلیوم تا حدودی اتلاف حرارتی کاهش خواهد یافت و سپس ثابت خواهد شد.
- ❖ با افزایش فشار، اتلاف حرارتی و توان افزایش می یابد و بازدهی کاهش می یابد.
- ❖ با افزایش دمای منبع گرم، اتلاف حرارتی، بازدهی و توان افزایش می یابد.
- ❖ مشخص شد که هرچه سرعت، دما و فشار گاز بیشتر شود نرخ تغییرات توان بیشتر می شود.

۹ - فهرست علائم

A	سطح مؤثر انتقال حرارت (m^2)
A_{wg}	محیط تر شده شبکه فلزی بازتاب (m^2)
C_p	حرارت مخصوص در فشار ثابت (kJ/kgK)
C_v	حرارت مخصوص در حجم ثابت (kJ/kgK)
ci	کسر جرمی جز آ ام
d	تغییرات نسبت به زاویه میل لنگ
d_h	قطر هیدرولیکی گرم کن (m)
d_k	قطر هیدرولیکی کولر (m)
d_r	قطر هیدرولیکی بازتاب (m)
f	ضریب اصطکاک
f_r	فرکانس موتور (rps)
G	دبی جرمی سیال عامل (kg/s)
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی (W/m^2K)
k	هدایت حرارتی (W/mK)
L	ضخامت (m)
l_h	طول گرم کن (m)
l_k	طول کولر (m)
l_r	طول بازتاب (m)
M	جرم کل سیال عامل (kg)
m	جرم سیال عامل قسمت های مختلف موتور (kg)
p	فشار متوسط (Pa)
Pr	عدد پرانتل
Q	انتقال حرارت (J)
R	ثابت جهانی گازها (kJ/kgK)
r	شعاع (m)
Re	عدد رینولدز
S	کورس (m)
St	عدد استنتون
T	دمای منبع (K)
V_{ce}	حجم جاروب شده محفظه تراکم (m^3)
V_{dc}	حجم مرده محفظه تراکم (m^3)
V_{de}	حجم مرده محفظه انبساط (m^3)
V	حجم محفظه ها (m^3)
V_{se}	حجم جاروب شده (m^3)
W_c	کار محفظه تراکم (J)

علائم یونانی

γ	نرخ حرارت مخصوص
ε	اثر بازتاب
λ	نسبت شعاع میل لنگ به طول شاتون
η	بازده
μ	ویسکوزیته دینامیکی ($Pa.s$)

۱۰ - تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، مراتب قدردانی خود از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) و از آقای مهندس علیزاده نیا، اعلام می دارند.

۱۱ - مراجع

- [1] M. Hooshang, "Improving gas transfer control parameters in solar Stirling engine to increase efficiency", Faculty of New Science and Technology, University of Tehran, Tehran, August 2013, [in Persian].
- [2] C. Toro, N. Lior, "Analysis and comparison of solar-heat driven Stirling, Brayton and Rankine cycles for space power generation", Energy, Vol. 120, pp. 549–564, 2017.
- [3] M. T. Garcia, E. C. Trujillo, J. A. V. Godino, D. S. Martinez, "Thermodynamic model for performance analysis of a Stirling engine prototype", Energies, Vol. 11, No. 10, 2655, 2018.
- [4] J. H. Shazly, A. Z. Hafez, E. T. El Shenawy, M. B. Eteiba, "Simulation, design and thermal analysis of a solar Stirling engine using MATLAB", Energy Conversion and Management, Vol. 79, pp. 626–639, 2014.
- [5] V. Fortunato, A. Abou-Taouk, A. Parente, "Experimental and numerical investigation of a MILD-based Stirling engine fed with landfill gas", Energy Procedia, Vol. 120, pp. 230–237, 2017.
- [6] C.H. Cheng, H.S. Yang, "Analytical model for predicting the effect of operating speed on shaft power output of Stirling engines", Energy, Vol. 36, pp. 5899–5908, 2011.
- [7] H. Karabulut, C. Cinar, E. Ozturk, H.S. Yucesu, "Torque and power characteristics of a helium charged Stirling engine with a lever-controlled displacer driving mechanism", Renewable Energy, Vol. 35, pp. 138–143, 2010.
- [8] G. Xiao, C. Chen, B. Shi, K. Cen, M. Ni, "Experimental study on heat transfer of oscillating flow of a tubular Stirling engine heater", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 71, pp. 1–7, 2014.
- [9] M. Ni, B. Shi, G. Xiao, Z. Luo, K. Cen, "Heat transfer characteristics of the oscillating flows of different working gases in U-shaped tubes of a Stirling engine", Applied Thermal Engineering, Vol. 89, pp. 569–577, 2015.
- [10] H. Hachem, R. Gheith, F. Aloui, S. Ben Nasrallah, "Numerical characterization of a γ -Stirling engine considering losses and interaction between functioning parameters, Energy Conversion and Management", Vol. 96, pp. 532–543, 2015.
- [11] B. Dogan, M. M. Ozturk, L. B. Erbay, "Effect of working fluid on the performance of the duplex Stirling refrigerator", Journal of Cleaner Production, Vol. 189, pp. 98–107, 2018.
- [12] K. Wang, S. Dubey, F. H. Choo, F. Duan, "A transient one-dimensional numerical model for kinetic Stirling engine", Applied Energy, Vol. 183, pp. 775–790, 2016.
- [13] S. A. Shufat, E. Kurt, C. Cinar, F. Aksoy, A. Hancerliogullari, H. Solmaz, "Exploration of a Stirling engine and generator combination for air and helium media", Applied Thermal Engineering, Vol. 150, pp. 738–749, 2019.
- [14] M. H. Ahmadi, M. A. Ahmadi, F. Pourfayaz, "Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A

- spaces", Applied Thermal Engineering, Vol. 85, pp. 340–355, 2015.
- [32] C. H. Cheng, H. S. Yang, L. Keong, "Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine", Energy, Vol. 59, pp. 590–599, 2013.
- [33] B. Vaziri, M. Azadi, M. Biglari, N. Madani, "Sensitivity analysis of dependency of working fluid thermo-dynamics properties to temperature on performance of Gama-type Stirling engine", The Journal of Engine Research, Vol. 54, pp.3–12, Spring, 2019, [in Persian فارسی].
- [34] M. H. Ahmadi, M. H. Ahmadi, F. Pourfayaz, M. Bidi, H. Hosseinzade, M. Feidt, "Optimization of powered Stirling heat engine with finite speed thermodynamics", Energy Conversion and Management, Vol. 108, pp. 96–105, 2016.
- [35] F. Ahadi, "Optimization of thermal barrier coating type and thickness in order to improve power and efficiency of Gamma Stirling Engine", Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, 2019, [in Persian فارسی].
- review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 68, pp. 168–184, 2017.
- [15] R. Li, L. Grosu, W. Li, "New polytropic model to predict the performance of beta and gamma type Stirling engine", Energy, Vol. 128, pp. 62–76, 2017.
- [16] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, "Simple-II, A new numerical thermal model for predicting thermal performance of Stirling engines", Energy, Vol. 69, pp. 873–890, 2014.
- [17] S. Alfarawi, R. Al-Dadah, S. "Mahmoud, "Enhanced thermodynamic modelling of a gamma-type Stirling engine", Applied Thermal Engineering, Vol. 106, pp. 1380–1390, 2016.
- [18] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, "A new thermal model based on polytropic numerical simulation of Stirling engines", Applied Energy, Vol. 141, pp. 143–159, 2015.
- [19] F. Ahadi, M. Azadi, M. Biglari, and S. N. Madani, "Study of coating effects on the performance of Stirling engine by non-ideal adiabatic thermodynamics modeling", Energy Reports, vol. 7, pp. 3688–3702, 2021.
- [20] S. Toghiani, A. Kasaeian, M. H. Ahmadi, "Multi-objective optimization of Stirling engine using non-ideal adiabatic method", Energy Conversion and Management, Vol. 80, pp. 54–62, 2014.
- [21] H. Gheith, R. Hachem, F. Aloui, S. Ben Nasrallah, "Experimental and theoretical investigation of Stirling engine heater: Parametrical optimization", Energy Conversion and Management, Vol. 105, pp. 285–293, 2015.
- [22] R. E. Sonntag, C. Borgnakke, G. J. Van Wylen, S. Van Wyk, "Fundamentals of thermodynamics", Wiley, 1998.
- [23] F. M. White, "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill, (2006).
- [24] M. Azadi, "Presenting a model for predicting the thermomechanical fatigue life of aluminum alloy (A356.0) with heat retaining coating", PhD Thesis, Sharif university technology, Tehran, Iran, 2013, [in Persian فارسی].
- [25] D. C. Montgomery, "Design and analysis of experiments", Wiley, 2001.
- [26] M. Hooshang, R. Askari Moghadam, S. Alizadeh Nia, M. T. Masouleh, "Optimization of Stirling engine design parameters using neural networks, Renewable Energy", Vol. 74, pp. 855–866, 2015.
- [27] M. Hooshang, R. Askari Moghadam, S. Alizadeh Nia, "Dynamic response simulation and experiment for gamma-type Stirling engine", Renewable Energy, Vol. 86, pp. 192–205, 2016.
- [28] H. Hosseinzade, H. Sayyaadi, M. Babaelahi, "A new closed-form analytical thermal model for simulating Stirling engines based on polytropic-finite speed thermodynamics", Energy Conversion and Management, Vol. 90, pp. 395–408, 2015.
- [29] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, "Analytical closed-form model for predicting the power and efficiency of Stirling engines based on a comprehensive numerical model and the genetic programming", Energy, Vol. 98, pp. 324–339, 2016.
- [30] H. Sayyaad, H. Ghasemi, "A novel second-order thermal model of Stirling engines with consideration of losses due to the speed of the crack system", Energy Conversion and Management, Vol. 168, pp. 505–521, 2018.
- [31] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, "Modified PSVL, A second order model for thermal simulation of Stirling engines based on convective-polytropic heat transfer of working