



بررسی راندمان و توان خروجی موتور استرلینگ بر اساس تغییر در برخی از پارامترهای موثر در بازیاب حرارتی (طول، قطر، ضریب تخلخل و حجم مرده)

علیرضا احمدپور^{۱*}، بهرام جلیلی^۲، پیام جلیلی^۳، رضا آرادمهر^۴

۱- دانشجوی دکتری مکانیک، گروه مهندسی مکانیک واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Ahmadpour.a.۵۶@gmail.com

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Bh.jalili@gmail.com

۳- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Payamjalili@yahoo.com

۴- دانشجوی دکتری مکانیک، گروه مهندسی مکانیک واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Rezaaradmehr@gmail.com

چکیده

مهم ترین قسمت موتور استرلینگ نوع بتا که نقش اساسی در افزایش راندمان آن دارد، بازیاب حرارتی است. بازیاب حرارتی یکی از قسمت های مهم سیکل استرلینگ می باشد که مدل سازی آن به دلیل تأثیر پذیری از پارامترهای مختلف بسیار پیچیده است و نیز استفاده از بازیاب در موتور استرلینگ باعث کم شدن اتلاف حرارتی و در نهایت افزایش راندمان موتور می شود. در این مقاله تغییرات راندمان و توان خروجی موتور استرلینگ، ناشی از طول، قطر، تغییر ضریب تخلخل و حجم مرده در محدوده بازیاب حرارتی برای موتور استرلینگ نوع بتا، مورد بررسی قرار گرفته است. این مهم، توانایی پیش بینی و بهینه سازی توان خروجی موتور استرلینگ را بر اساس شرایط فیزیکی و هندسی بازیاب، دارا می باشد. برای این منظور، در ابتدا حل عددی موتور استرلینگ نوع بتا با استفاده از مدل ایزوترم و آدیاباتیک صورت گرفته است. برای صحت گذاری نتایج به دست آمده، از مشخصات هندسی و عملکردی موتور استرلینگ ساخت شرکت جنرال موتورز استفاده شده و نتایج به دست آمده با مقادیر منتشر شده مقایسه شده است. نتایج حاصله حاکی از این می باشد که با افزایش طول و قطر بازیاب توان خروجی موتور کاهش یافته درحالی که راندمان افزایش پیدا می کند و نیز با کاهش میزان تخلخل بازیاب، توان افزایش و راندمان موتور کاهش می یابد.

کلید واژه ها

موتور استرلینگ، بازیاب حرارتی، ایزوترم، مدل سازی عددی

Evaluation of efficiency and output power of Stirling engine based on changes in some parameters effective in heat recovery (length, diameter, porosity and dead volume)

Alireza Ahmadpour^{1*}, Bahram Jalili², Payam Jalili³, Reza Aradmehr⁴

۱- PhD Student in Mechanics, Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Ahmadpour.a.۵۶@gmail.com

۲- Faculty member of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Bh.jalili@gmail.com

۳- Faculty member of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Payamjalili@yahoo.com

۴- PhD Student in Mechanics, Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Rezaaradmehr@gmail.com

Abstract

The most important part of a beta-type Stirling engine, which plays a key role in increasing its efficiency, is the heat recovery. Heat recovery is one of the important parts of the Stirling cycle, the modeling of which is very complex due to the influence of various parameters, and the use of the recovery in the Stirling engine reduces heat loss and ultimately increases engine efficiency. In this paper, changes in the efficiency and output power of the Stirling engine due to length, diameter, change in porosity coefficient and dead volume in the heat recovery range for the beta Stirling engine are investigated. This has the ability to predict and optimize the output power of the Stirling engine based on the physical and geometric conditions of the retrieval. For this purpose, initially, the numerical solution of the beta-type Stirling engine was performed using the isotherm and adiabatic model. To validate the obtained results, the geometric and functional characteristics of the Stirling engine manufactured by General Motors Company were used and the obtained results were compared with the published values. The results show that with increasing the length and diameter of the retrieval, the output power of the motor decreases while the efficiency increases and also with



decreasing the porosity of the retrieval, the power increases and the efficiency of the motor decreases.

Keywords: Sterling engine, heat recovery, isotherm, numerical modeling

۱- مقدمه

در سرتاسر جهان تلاش‌های زیادی برای ساخت موتورهای مولدی که با داشتن راندمان مناسب بتوانند از منابع انرژی تجدید پذیر و منابع اتلاف حرارتی به خوبی سوخت‌های فسیلی استفاده کنند، صورت گرفته است. افزایش قیمت انرژی و آلودگی‌های محیطی و صوتی در جهان باعث شده است تا تحقیقات بر روی موتورهای جدید تولید توان، با جدیت بیشتری صورت گیرد. مصرف منابع انرژی‌های تجدید ناپذیر زمین شامل نفت، گاز و زغال سنگ علاوه بر از بین بردن ثروت‌های عمومی جوامع، باعث تولید سه چهارم از کل دی‌اکسید کربن موجود در جهان می‌شود. موتور استرلینگ از جمله ایده‌هایی است که در سال‌های اخیر علاقه‌مندان زیادی را به خود جلب کرده است. به لحاظ فیزیکی، موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی است و می‌تواند از هر نوع منبع حرارتی خارجی (انرژی احتراقی، خورشیدی و پسماند حرارتی ماشین‌آلات صنعتی) برای تولید انرژی مکانیکی استفاده کند. در سال‌های اخیر، محققان در طراحی و استفاده از موتورهای استرلینگ به نتایج بسیار خوبی دست یافته‌اند.

از جمله مهم‌ترین دستاوردهای به‌دست‌آمده، پیشبرد فناوری استرلینگ در زمینه ساخت موتورهای خورشیدی با تولید قدرت محوری ۱۰ KW است. با توجه به سهم قابل ملاحظه انرژی خورشیدی در کشورهایمانند ایران، تولید انرژی با استفاده از این فناوری، بسیار قابل ملاحظه است. طرح تولید هم زمان برق و حرارت (CHP) نیز یکی از ایده‌های جدیدی است که توسط شرکت‌های تولیدکننده این فناوری تجاری شده و در پایگاه‌های تولید برق از آن استفاده می‌شود. در حال حاضر روش‌های نوینی در به کارگیری موتورهای استرلینگ در دست اقدام است که از آن جمله می‌توان به کاربرد موتورهای استرلینگ برای تأمین برق مورد نیاز ماهواره‌ها و استفاده از موتورهای استرلینگ به عنوان جایگزین توربین‌های بخار نیروگاه‌های هسته‌ای اشاره کرد. از زمان اختراع موتور استرلینگ توسط رابرت استرلینگ تاکنون تحقیقات زیادی در مورد آن صورت گرفته است. نخستین تحلیل ریاضی قابل قبول برای تحلیل سیکل استرلینگ پنجاه سال پس از اختراع آن، توسط اشمیت ارائه شد [۱]. تحلیل اشمیت بر مبنای تئوری محفظه تراکم و محفظه انبساط ایزوترم ارائه شده است. با استفاده از فرض اشمیت، معادلات ترمودینامیکی خطی شده و محاسبات اولیه برای اندازه‌گیری توان و راندمان خروجی موتور، به راحتی صورت می‌گیرد. تحلیل اشمیت امروزه نیز به طور وسیعی در تحلیل‌های اولیه موتورهای استرلینگ بکار می‌رود. چرخه اشمیت، فرایندهای تراکم و انبساط را هم فرض می‌کند. در صورتی که در عمل برای موتورهایی با دور موتور ۱۰۰۰ rpm یا بیشتر، این فرض درست نیست. زیرا همان‌گونه که رانکین ثابت کرده است، حرارت دهی و یا خنک‌کنندگی، دقیقاً در حجم ثابت یا دمای ثابت اتفاق

نمی‌افتد و فرایندهای تراکم و انبساط در سیلندرهای موتور استرلینگ بیشتر به آدیباتیک نزدیک هستند. بنابراین می‌بایست از فرضیات مناسب‌تر برای مدل‌سازی ترمودینامیکی استفاده شود تا بتوان با استفاده از این مدل‌ها به راندمان حقیقی موتور نزدیک شد. هر کوششی برای مدل‌سازی موتور استرلینگ از حل ایزوترم خارج شود، معادلات به صورت صریح در نمی‌آیند و تنها به صورت دیفرانسیلی و با استفاده از روش‌های عددی قابل حل خواهند بود. در چرخه آدیباتیک راندمان حرارتی به یک تابع تبدیل خواهد شد که نه تنها به دما بستگی دارد بلکه علاوه بر آن به نسبت حجم جاروب شده، زاویه فاز و نسبت حجم مرده نیز بستگی خواهد داشت. البته توان خروجی، چه در چرخه ایزوترم و چه در چرخه آدیباتیک تابعی از همه پارامترهای ذکر شده خواهد بود. در سال ۱۹۷۵، فینکن اشتاین [۲] تحلیل ترمودینامیکی اشمیت را ارتقا داد و تحلیل‌های اولیه آدیباتیک را ارائه کرد. در حل معادلات به صورت آدیباتیک، محفظه تراکم و محفظه انبساط، آدیباتیک در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن فرض آدیباتیک معادلات از حالت خطی خارج می‌شوند و برای حل آن‌ها می‌بایست از روش‌های عددی استفاده شود. از زمان ارائه مدل فینکن اشتاین تاکنون، تحلیل‌های انجام‌شده بر مبنای مدل‌های متفاوت ترمودینامیکی (ایزوترم و آدیباتیک)، استفاده از منابع حرارتی متنوع (احتراقی، خورشیدی و پسماند حرارتی) و شکل‌های مختلف از موتور استرلینگ (موتور نوع آلفا، بتا و گاما) انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط ایزرایل یوریلی و برجویستس [۳] با استفاده از مدل ترمودینامیکی آدیباتیک، برای به دست آوردن توان و راندمان خروجی موتور استرلینگ، اشاره کرد. کونگترگول و وانگ وایز [۴] مدل‌سازی و بهینه‌سازی موتور استرلینگ را با استفاده از مدل ایزوترم انجام داده‌اند و یوسف تیمومی و همکاران [۵، ۶، ۷، ۸] با مدل‌سازی آدیباتیک موتور استرلینگ، افت‌ها و بازگشت‌ناپذیری‌ها را در آن، بررسی کرد. در تحقیقات اخیر انجام شده توسط اسکندر تلیلی و همکاران [۹]، موتور استرلینگ با استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع حرارتی، مدل‌سازی شده است. در تحقیقات انجام شده توسط تومبارو و ورما [۱۰]، تکنولوژی‌های موجود و پیشرفت‌های حاصل شده در خصوص تحلیل موتورهای استرلینگ گردآوری شده و در نهایت در خصوص استفاده از آن‌ها، پیشنهادهای ارائه شده است. علیرضا توکلپور و همکاران [۱۱] نیز با استفاده از تئوری اشمیت، حل معادلات بصورت ایزوترم و استفاده از صفحات تخت در جذب دمای خورشید به عنوان منبع دمایی گرم، آنالیز موتور استرلینگ نوع گاما را انجام داده است. گستانته و اینورنیزی [۱۲] پس از مدل‌سازی موتور استرلینگ، اثر استفاده از گازهای مختلف را بر روی راندمان و توان خروجی موتور بررسی کرده است. فرموسا و دسپسه [۱۳] مدل‌سازی را با استفاده از مدل ایزوترم برای بررسی اثرات حجم‌های مرده بر روی راندمان و توان خروجی موتور، انجام داده است.

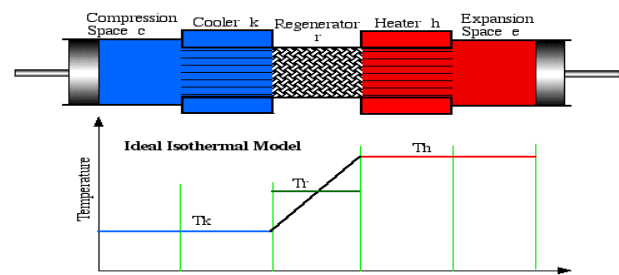
۲- معادلات

در این بخش مدل سازی ترمودینامیکی موتور به روش ایزوترم و آدیاباتیک انجام می پذیرد.

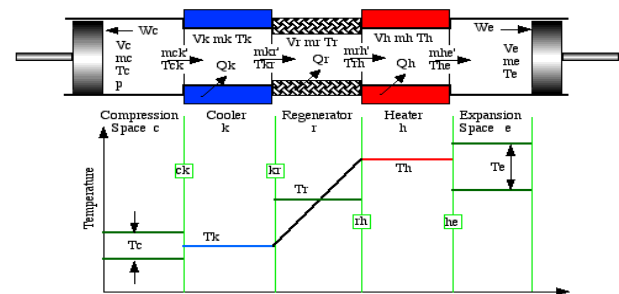
۳- مدل سازی ترمودینامیکی

موتور استرلینگ در یک سیکل بسته ترمودینامیکی کار کرده و انرژی گرمایی را به حرکت مکانیکی تبدیل می کند. موتور استرلینگ به لحاظ ساختار فیزیکی شامل پنج زیرسیستم اصلی است که در مدل سازی، هر زیرسیستم به صورت یک حجم کنترل در نظر گرفته می شود. دو فضا با حجم متغیر به نام های فضای انبساط و فضای تراکم و سه مبدل حرارتی با حجم ثابت، به نام های گرم کن، خنک کن و بازیاب در موتور وجود دارد.

موتور همچنین دارای یک مکانیزم رانش است که در طول سیکل کاری تغییرات حجم را کنترل کرده و حرکت متناوب خطی پیستون ها را به شکل حرکت زاویه ای به محور محرکه منتقل می کند. انواع مختلف موتور استرلینگ با نام های آلفا، بتا و گاما شناخته می شوند. همه آن ها به لحاظ سیکل ترمودینامیکی مشابه اند ولی تفاوت های اساسی در نوع مکانیزم های مکانیکی دارند. در تحقیق حاضر، با اعمال روابط ترمودینامیکی بررسی منحنی تغییرات توان راندمان در بازیاب حرارتی (با تغییرات ضریب تخلخل و حجم مرده) با استفاده از کد عددی مشخص می گردد و نیز در این بخش شبیه سازی با استفاده از مدل ترمودینامیکی ایزوترم شکل ۱ و آدیاباتیک (شکل ۲)، انجام خواهد شد. در پایان نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در خصوص بازیاب حرارتی (با ضریب تخلخل و حجم مرده) در موتور ساخته شده توسط شرکت جنرال موتورز GPU^۳ که مشخصات هندسی و عملکردی آن موجود است، مقایسه می شود. جدول ۱، ۲، ۳.



شکل ۱ مدل ایزوترم موتور استرلینگ



شکل ۲ مدل آدیاباتیک موتور استرلینگ

۱-۳- آنالیز موتور استرلینگ در حالت ایزوترم

نخستین تحلیل به دست آمده برای موتور استرلینگ، تحلیل چرخه ایده آل ایزوترمال استرلینگ می باشد. هدف از آنالیز ایزوترمال، به دست آوردن کار انجام شده در اثر تغییرات فشار و دمای گاز عامل با استفاده از انتقال حرارت به داخل موتور است. جاذبه اصلی آنالیز ایزوترمال، روش حل بسته ای است که در معادلات آن ظاهر می شود. فرض اساسی در این آنالیز این است که گاز در محفظه انبساط و گرم کن، در درجه حرارت گرم کن، و گاز در محفظه تراکم و خنک کن، در درجه حرارت خنک کن نگه داشته می شود. چرخه ترمودینامیکی ایزوترمال از دو فرایند هم دما و دو فرایند حجم ثابت تشکیل شده است. همچنین فرض می شود که فرایندهای انبساط و تراکم هم دما هستند و تأثیرات ایده آل نبودن بازیاب و افت فشار نیز در نظر گرفته نمی شود. نقطه شروع آنالیز، ثابت گرفتن جرم کل در تمام حجم های اشغال شده توسط گاز است. ابتدا جرم در کل سیستم ثابت در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از معادلات انرژی و معادله گاز کامل، معادلات مورد نیاز برای اندازه گیری میزان انتقال حرارت به موتور و کار انجام شده در نهایت راندمان موتور بدست می آید.

$$M = mc + mk + mr + mh + me \quad (1)$$

$$m = p V / R T \quad (2)$$

$$M = p (V_c / T_k + V_k / T_k + V_r / T_r + V_h / T_h + V_e / T_h) / R \quad (3)$$

$$Tr = (Th - T_k) / \ln(Th / T_k) \quad (4)$$

۲-۳- آنالیز موتور استرلینگ در حالت آدیاباتیک

برای حل در حالت آدیاباتیک ایده آل، ابتدا جرم در کل سیستم ثابت در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از معادلات انرژی و حالت گاز کامل، معادلات مورد نیاز برای اندازه گیری میزان انتقال حرارت به موتور و کار انجام شده توسط آن و در نهایت راندمان موتور به دست می آید. در تحلیل موتور استرلینگ با استفاده از مدل آدیاباتیک، می توان جزئیات رفتار تک تک قسمت های موتور را به دست آورد. با استفاده از این مدل اهمیت بازیاب و نمودارهای مربوط به توان و راندمان، در زوایای مختلف لنگ قابل محاسبه است.

$$dm_c = (pdV_c + V_c dp / \gamma) / (RT_{ck}) \quad (5)$$

$$m_c + m_k + m_r + m_h + m_e = M \quad (6)$$

$$m_e = M - (m_c + m_k + m_r + m_h) \quad (7)$$

$$m_k = pV_k / (RT_k) \quad (8)$$

$$m_h = pV_h / (RT_h) \quad (9)$$

$$dm_k = m_k dp / p \quad (10)$$

$$m_{rh} = m_{rh} - dm_r \quad (11)$$

$$m_{he} = m_{rh} - dm_h \quad (12)$$

$$m_{ck} = -dm_c \quad (13)$$

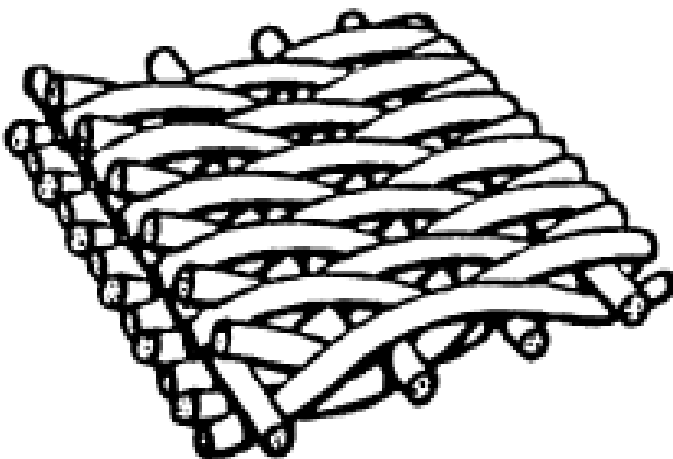
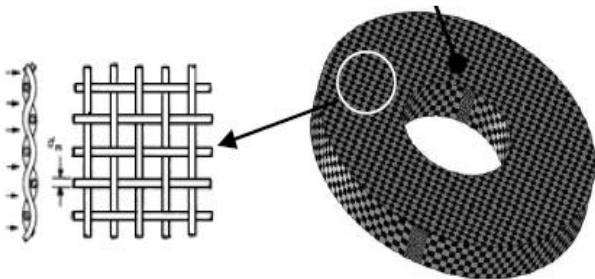
$$m_{kr} = m_{ck} - dm_k \quad (14)$$

$$dm_r = m_r dp / p \quad (15)$$

مدل، توانایی پیش بینی و بهینه سازی توان خروجی و پارامترهای عملکردی موتور استرلینگ را بر اساس شرایط فیزیکی و هندسی کلیه اجزا آن، دارا می باشد. بر این اساس پارامترهای هندسی و عملکردی موتور (GPU^۳) تغییر داده شده است تا بالاترین توان خروجی، بر مبنای توان حرارتی ورودی، در بازیاب حرارتی بدست آید.

۴- بازیاب حرارتی

مهمترین قسمت موتور استرلینگ که نقش اساسی در افزایش راندمان آن دارد، بازیاب حرارتی است. به لحاظ ساختار فیزیکی، بازیاب حرارتی از لایه های همگن پی دی پی سیم های مربعی از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شده است که بر اساس تعداد مورد نیاز برای عملکرد مطلوب موتور، در حجم طراحی شده برای آن، بر روی هم قرار داده می شود. در طی نیمی از سیکل کاری موتور، بازیاب حرارتی مانند اسفنج حرارتی باعث جذب گرما از گاز عامل می شود. در نیمه دیگر سیکل، بازیاب، حرارت را به گاز عامل پس می دهد، بنابراین گرمای کمتری برای دفع در منطقه سرد موتور، وجود خواهد داشت و بدین صورت باعث افزایش راندمان موتور می شود. شکل ۳.



$$m_r = pV_r / (RT_r) \quad (16)$$

$$dm_h = m_h dp/p \quad (17)$$

$$T_e = pV_e / (Rm_e) \quad (18)$$

$$T_c = pV_c / (Rm_c) \quad (19)$$

و در نهایت معادلات حاصل شده برای مقادیر کار و گرمای داده شده در گرم کن و گرمای گرفته شده در خنک کن و در نهایت گرمای مبادله شده در بازیاب حرارتی با استفاده از روابط زیر به دست می آید.

$$dQ_k = V_k dp c_v / R - cp (T_{ck} m_{ck}' - T_{kr} m_{kr}') \quad (20)$$

$$dQ_r = V_r dp c_v / R - cp (T_{kr} m_{kr}' - T_{rh} m_{rh}') \quad (21)$$

$$dQ_h = V_h dp c_v / R - cp (T_{rh} m_{rh}' - T_{he} m_{he}') \quad (22)$$

$$dWe = p dVe \quad (23)$$

$$dWc = p dVc \quad (24)$$

برای حل عددی معادلات به دست آمده از مدل آدیاباتیک، می بایست معادلات فشار و تغییرات جرم در ناحیه تراکم به همراه معادلات انرژی به صورت هم زمان حل شوند. بهترین روش برای حل عددی استفاده از روش مقادیر اولیه است. در این روش، مقادیر اولیه تمام متغیرها در نقطه شروع، مشخص است و برای به دست آوردن مقادیر نهایی حل معادلات با استفاده از این مقادیر اولیه انجام می شود. به صورتی که توابع به دست آمده شامل تمام متغیرهای موجود به همراه توابع مربوط به تغییرات حجم موتور در زوایای مختلف لنگ می باشد. در نهایت کد عددی قادر است تا تغییرات مورد نظر در قسمت های مختلف را به لحاظ هندسی و فیزیکی وارد کند و تغییرات مقادیر توان عملکردی و راندمان موتور را با اعمال شرایط جدید نشان دهد. این



شکل ۳ بازیاب حرارتی به شکل حلقوی با شبکه سیم های بافته



جدول ۱ پارامترهای هندسی موتور GPU^۳

بازویاب		پیستون	
فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم	$28/26 \text{ cm}^3$	بدنه بازویاب لوله‌ای شکل است که در آن سیم های فلزی بر روی هم انباشته شده است.	
حجم جاروب شده محفظه انبساط	$120/82 \text{ cm}^3$	قطر سیم	$40 \mu\text{m}$
طول میله اتصال دهنده (L)	46 mm	تخلخل	0/697
خروج از مرکز (e)	20/8 mm	تعداد در هر سیلندر	8
قطر پیستون توان (dp)	69/9 mm	ضریب هدایت حرارتی بازویاب	15 w/mk
قطر جابجایی (dd)	69/ mm	ضریب هدایت حرارتی بازویاب	50/55 cm^2
هدایت حرارتی پیستون	15 w/mk		
کورس حرکتی پیستون	46/ mm		
گرم کن		خنک کن	
تعداد لوله ها	40 عدد	مجموعه‌ای از لوله‌های همگن و صاف	
قطر داخلی لوله	3/20 mm	تعداد لوله‌ها برای هر سیلندر	312
طول لوله	24/53 mm	قطر لوله‌ها	46/1 mm
حجم مرده	70/88 cm^3	طول لوله	46/1 mm
		حجم مرده	13/6 cm^3

جدول ۲ پارامترهای هندسی موتور GPU^۳

گاز عامل	هلیوم
دمای منبع سرد (خنک کن) Tc	288 k
فشار متوسط گاز عامل	4130 kpa
جرم گاز عامل	1/03 گرم
فرکانس عملکردی موتور	417 هرتز

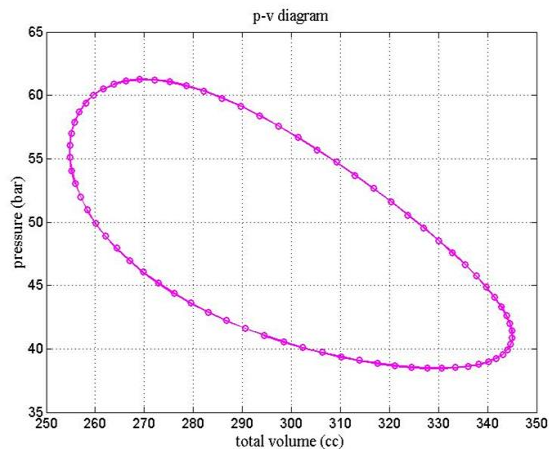
جدول ۳ سلول بازویاب با تخلخل و قطر متفاوت سیم

ضریب تخلخل بازویاب	قطر سیم (mm)
0/9122	M1 0/035
0/7508	M3 0/007
0/7221	M4 0/007
0/6970	M5 0/004
0/6655	M6 0/008
0/6112	M7 0/008



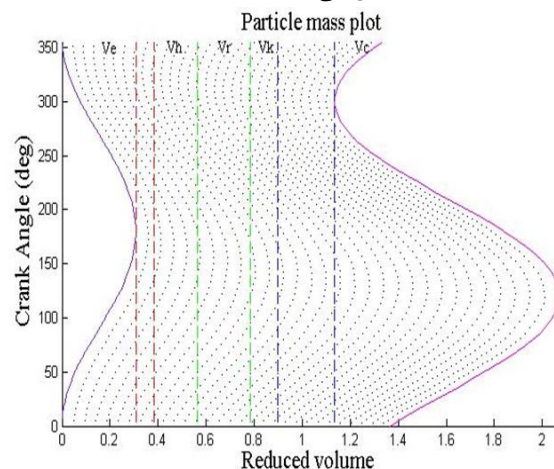
۵ - نتایج

تغییرات فشار نسبت به حجم موتور در شکل ۴ نشان داده شده است. سطح به دست آمده، میزان کار انجام شده توسط موتور در طی هر سیکل را نشان می دهد. نتایج به دست آمده با نمودار سیکل کارنو که از دو فرآیند حجم ثابت و دو فرآیند دما ثابت تشکیل شده است، تفاوت قابل توجهی دارد که ناشی از اعمال شرایط واقعی در کد عددی نسبت به نمودار ایده آل کارنو است.



شکل ۴ مقادیر فشار - حجم برای سیکل موتور

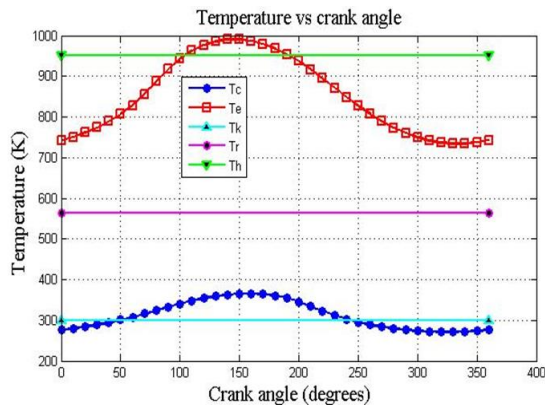
شکل ۵ تغییرات جرم گاز عامل را در داخل موتور، در طی سیکل، نشان می دهد. با استفاده از معادله جرم و انرژی برای پنج سلول موتور و با استفاده از روابط گاز ایده آل، تجمع جرم در داخل هر کدام از سلول ها در طی سیکل موتور بدست آمده است. نتایج بدست آمده، تغییرات جرم در محفظه تراکم را با شدت بیشتری نسبت به محفظه انبساط نشان می دهد.



شکل ۵ تغییرات جریان عبوری در سلول های موتور

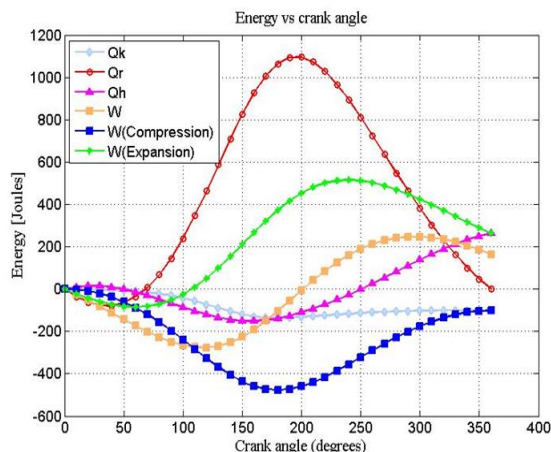
نوسانات دما در طی سیکل کاری موتور در محفظه انبساط و تراکم، در شکل ۶ نشان داده شده است. درجه حرارت های ورودی

برنامه در جدول شماره ۵ آورده شده است که شامل دمای گاز در سمت گرم و سرد موتور است. دمای گاز در مبدل های حرارتی ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل ۶ تغییرات انرژی در سلول های موتور

جریان انرژی بعلاوه کل کار انجام شده در هر سیکل کاری موتور در شکل ۷ نشان داده شده است. مقادیر برای حرارت دفع شده با استفاده از خنک کن و حرارت اضافه شده توسط گرم کن بعلاوه کل کار انجام شده در این شکل نشان داده شده است. اختلاف دامنه انرژی میان بازیاب، گرم کن و خنک کن کاملاً مشهود است. همچنین در این شکل نشان داده شده است که کل انرژی سیکلی عبور کننده در یک مدل ایده آل از میان بازیاب در پایان سیکل، برابر صفر است.



شکل ۷: تغییرات انرژی در سلول های موتور

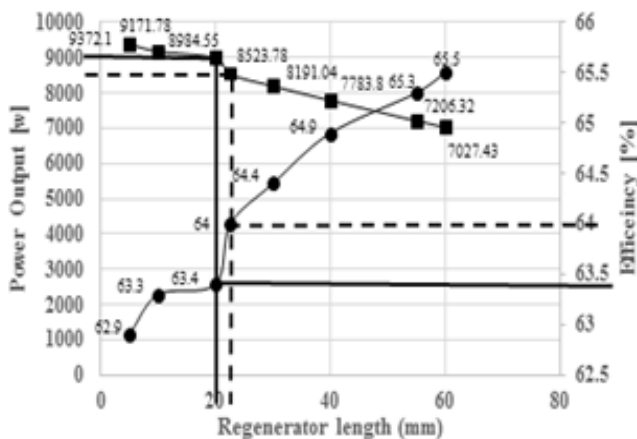
با مشخص شدن دقت کد عددی در پیش بینی راندمان و توان خروجی موتور GPU-۳ در مقایسه با نتایج منتشر شده، می توان با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترهای جداول هندسی موتور GPU۳ تغییرات به وجود آمده در حرارت منتقل



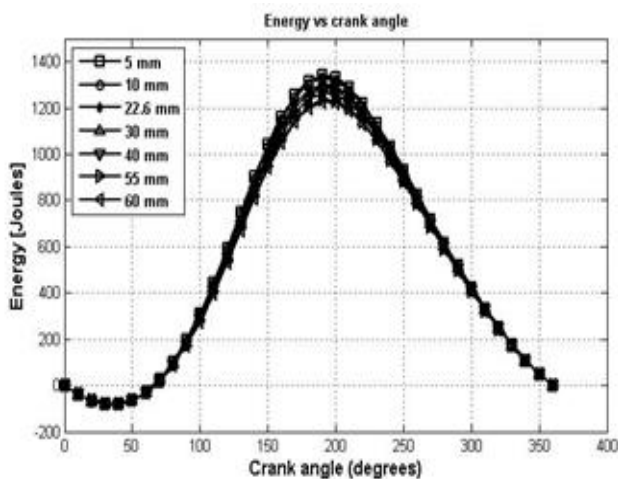
نسبت به افزایش قطر بازیاب، بسیار شدید است شکل ۱۰، به صورتی که از مقدار قطر ۳۰ میلی‌متر، با افزایش هر ۱۰ میلی‌متر قطر بازیاب، تقریباً یک کیلو وات توان موتور کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده، هر چه قطر بازیاب افزایش یابد میزان حرارت ورودی برای تولید توان کاهش می‌یابد در نتیجه حرارت بازیابی شده در بازیاب حرارتی نیز کاهش پیدا می‌کند شکل ۱۱.

جدول ۴ نتایج به دست آمده از تغییر طول بازیاب بر راندمان و توان خروجی موتور

Regenerator length(mm)	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
۰	۱۴۶۶۵/۳۶	- ۵۶۲۳/۲۶	۹۳۷۲/۱	۶۲/۹
۱۰	۱۴۴۸۹/۳۷	- ۵۳۱۷/۵۹	۹۱۷۱/۷۸	۶۳/۳
۲۰ (Prototype)	۱۴۲۶۱/۱۸	- ۵۲۷۶/۶۳	۸۹۸۴/۵۵	۶۳/۴
۲۲/۶ (GPU۳)	۱۳۳۱۸/۴	- ۴۷۹۴/۶۲	۸۵۲۳/۷۸	۶۴
۳۰	۱۲۷۱۹	- ۴۵۲۷/۹۶	۸۱۹۱/۰۴	۶۴/۴
۴۰	۱۱۹۹۳/۵۲	- ۴۲۰۹/۷۲	۷۷۸۳/۸	۶۴/۹
۵۰	۱۱۰۳۵/۷	- ۳۸۲۹/۳۸	۷۲۰۶/۳۲	۶۵/۳
۶۰	۱۰۷۲۸/۹	- ۳۷۰۱/۴۷	۷۰۲۷/۴۳	۶۵/۵



شکل ۸ تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر طول بازیاب



شکل ۹ تغییرات انرژی دریافتی ناشی از تغییر طول بازیاب

شده به گرم‌کن (حرارت ورودی)، گرمای منتقل شده توسط خنک‌کن (گرمای خروجی)، راندمان و توان خروجی موتور را به دست آورد تا بر اساس آن، با توجه به انرژی حرارتی در دسترس برای تولید توان حرارتی مورد نیاز موتور (محفظه احتراق خارجی، انرژی خورشیدی، پسماند انرژی حرارتی تولیدی توسط سیستم‌های تولید توان) و... و ابعاد هندسی مورد نظر طراح، بهترین پارامترهای طراحی برای موتور پیشنهاد شود. در مورد موتور GPU۳ توان حرارتی ورودی ۱۳ کیلو وات است که با توجه به مشخصات هندسی و عملکردی موتور در حدود ۷/۹ کیلو وات توان خروجی تولید می‌کند. حال با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی، پارامترهای هندسی و عملکردی موتور GPU-۳ در بخش ضریب تخلخل و حجم مرده بازیاب مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اینکه مقادیر بهینه برای آنها استخراج شود.

۵-۱ - طول بازیاب

بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش طول بازیاب میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان کاهش می‌یابد در حالی که راندمان موتور افزایش می‌یابد (جدول ۴). این امر باعث می‌شود که طراح بر اساس میزان فضای در اختیار و نیز مقدار توان حرارتی ورودی برای گرم‌کن، در خصوص طول بازیاب، تصمیم‌گیری کند. با توجه به اینکه افزایش طول بازیاب باعث کم شدن میزان حرارت ورودی موتور می‌شود می‌توان در طراحی موتورهایی که توان حرارتی ورودی کمتری دارند، از بازیاب حرارتی با طول زیاد استفاده کرد. منحنی تغییرات توان و راندمان بر اساس طول بازیاب در شکل ۸ نشان داده شده است. نقاط مربوط به موتور GPU-۳ بر روی منحنی علامت‌گذاری شده است. بر این اساس با افزایش طول بازیاب، راندمان موتور GPU-۳ افزایش می‌یابد ولیکن توان خروجی کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۹ اثر طول بازیاب بر روی میزان حرارت بازیابی شده در آن، نشان داده شده است. بر این اساس هرچه طول بازیاب افزایش یابد، مقدار حرارت ورودی به موتور کاهش یافته و در نتیجه حرارت کمتری وارد بازیاب حرارتی می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی موتور GPU-۳، برای افزایش توان خروجی موتور، می‌بایست طول بازیاب از مقدار ۲۲/۶۶ میلی‌متر به مقدار ۲۰ میلی‌متر کاهش یابد.

۵-۲ - قطر بازیاب

با توجه به نتایج، با افزایش قطر بازیاب، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی کاهش می‌یابد، در حالی که راندمان موتور افزایش پیدا می‌کند جدول ۵. شیب افت توان



بر اساس نتایج به دست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، می‌بایست قطر بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلی‌متر به مقدار ۲۱ میلی‌متر کاهش یابد.

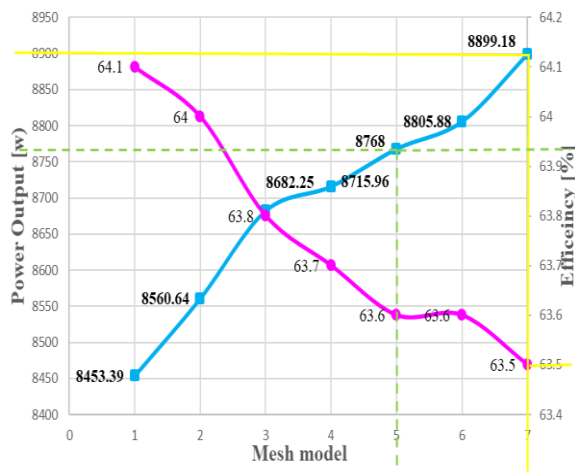
جدول ۵ نتایج به دست آمده از تغییر قطر بازیاب بر راندمان و توان خروجی موتور

Regenerator diameter (mm)	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
۱۰	۱۵۶۱۲/۴۸	- ۵۸۷۰/۲۹	۹۷۴۲/۱۹	۶۲/۴
۲۰	۱۴۲۲۰/۶۲	- ۵۲۰۴/۷۴	۹۰۱۵/۸۸	۶۳/۴
۲۱ (Prototype)	۱۴۰۶۸/۳۲	- ۵۱۲۰/۸۶	۸۹۴۷/۴۶	۶۳/۶
۲۲/۶ (GPU۳)	۱۳۷۸۷/۱۸	- ۴۹۹۰/۹۵	۸۷۹۶/۲۳	۶۳/۸
۳۰	۱۲۳۶۴/۴۴	- ۴۳۷۷/۰۱	۷۹۸۷/۴۳	۶۴/۶
۴۰	۱۰۴۱۰/۷۲	- ۳۵۸۱/۲۸	۶۸۲۸/۷۲	۶۵/۶
۵۰	۸۶۳۸/۶۴	- ۲۸۱۶/۱۹	۵۸۲۲/۴۵	۶۶/۴
۶۰	۷۱۴۲/۲	- ۲۳۵۶/۹۲	۴۷۸۵/۲۸	۶۷

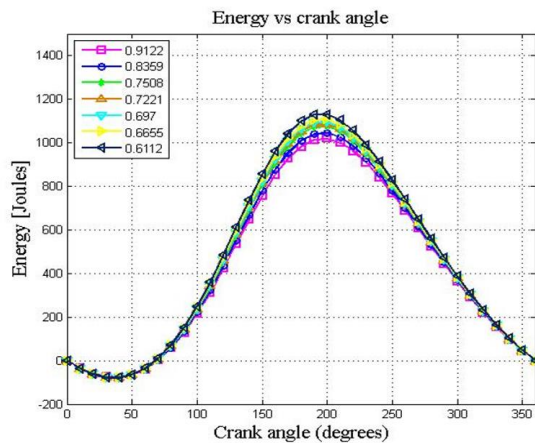
۳-۵- ضریب تخلخل بازیاب

نتایج حاصل از اثر استفاده از انواع مختلف شکل بازیاب به لحاظ قطر سیم ها و تخلخل در جدول ۳ آورده شده است بر اساس نتایج بدست آمده با کاهش میزان تخلخل بازیاب، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی موتور افزایش می یابد در حالیکه راندمان موتور کاهش می یابد شکل ۱۲. در واقع با کاهش تخلخل بازیاب، حرکت سیال درون بازیاب راحت تر شده و موتور توانسته است توان زیادی تولید کند. در عوض با کاهش سطح موثر بازیاب، توان ذخیره سازی انرژی حرارتی در آن کاهش یافته، حرارت زیادتری را مصرف کرده است. شکل ۱۳. رنگ زرد نتایج بدست آمده (نقطه بهینه) در موتور و رنگ سبز نتایج موتور

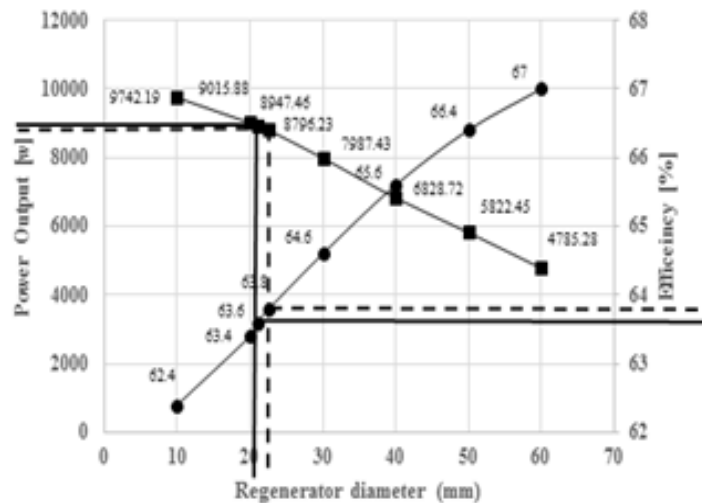
GPU۳



شکل ۱۲ تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر ضریب تخلخل بازیاب

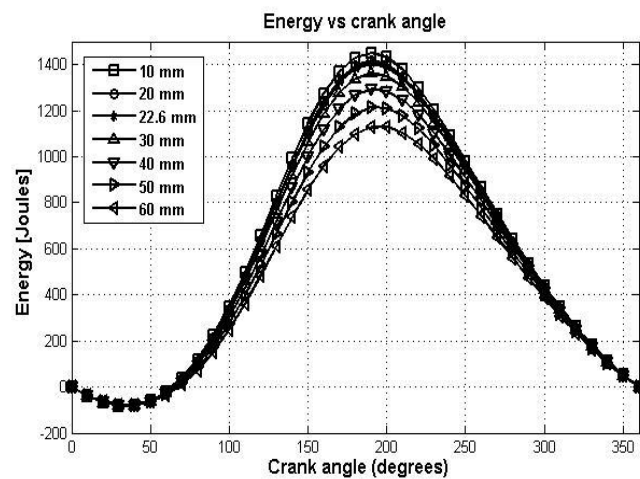


شکل ۱۳ تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر ضریب تخلخل بازیاب



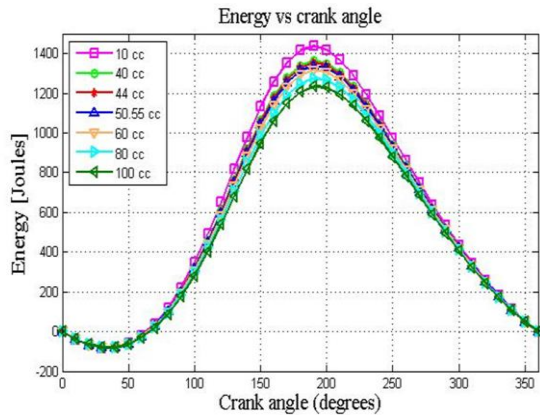
شکل ۱۰ تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر قطر بازیاب

شکل ۱۱ تغییرات انرژی دریافتی ناشی از تغییر طول بازیاب





۴-۵- حجم مرده بازیاب



شکل ۱۵: تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر حجم مرده

- با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی، می بایست طول بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلی متر به مقدار ۲۰ میلی متر و قطر بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلی متر به مقدار ۲۱ میلی متر کاهش یابد.

- با کاهش میزان تخلخل بازیاب، توان افزایش می یابد در حالیکه راندمان موتور کاهش می یابد. با توجه به توان محفظه احتراق خارجی موتور در تامین توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست تخلخل بازیاب از مقدار ۰/۶۹۷ به مقدار ۰/۶۱۱۲، کاهش می یابد.

۷- فهرست علائم

e : خروج از مرکز (m)

m : جرم گاز (kg)

r : شعاع لنگ (m)

p : فشار (pa)

cp : گرمای فشار گاز در فشار ثابت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)

cv : گرمای ویژه گاز در حجم ثابت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)

T : دمای گاز (K)

V : حجم (m^3)

w : کار انجام شده توسط سیال از (J)

c : فضای تراکم

ck : تداخل تراکم و خنک کن

clc : فضای خالی تراکم

cle : فضای خالی انبساط

he : تداخل گرم کن و انبساط

rh : تداخل گرم کن و بازیاب

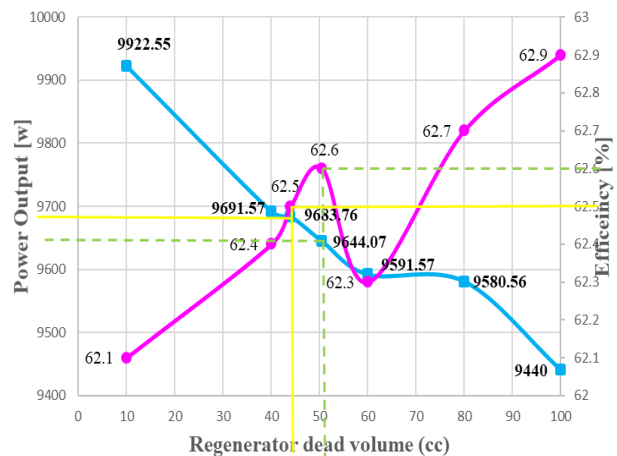
d : جایجا کننده

θ : زاویه لنگ

η : راندمان حرارتی

حجم مرده بازیاب، فضای باقیمانده میان شبکه بازیاب و حجم کل بازیاب است. در موتور استرلینگ از عوامل مختلفی در کاهش توان نام برده شده که یکی از آن حجم مرده بازیاب حرارتی است. بر اساس نتایج بدست آمده، هرچه میزان حجم مرده بازیاب افزایش یابد، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی موتور، کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند. افزایش حجم مرده بازیاب، باعث کم شدن فشار موتور و در نتیجه کاهش توان خروجی موتور می شود شکل ۱۴. با توجه به نتایج بدست آمده، افزایش حجم مرده باعث کم شدن حرارت ورودی به موتور می شود در نتیجه مقادیر حرارت بازیابی شده در بازیاب موتور نیز کاهش می یابد شکل ۱۵. رنگ زرد نتایج بدست آمده (نقطه بهینه) در موتور و رنگ سبز نتایج موتور

GPU^۳



شکل ۱۴: تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر حجم مرده بازیاب

نتیجه گیری:

مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- با افزایش طول و قطر بازیاب توان خروجی موتور کاهش می یابد درحالی که راندمان افزایش پیدا می کند.
 - با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی، می بایست طول بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلی متر به مقدار ۲۰ میلی متر و قطر بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلی متر به مقدار ۲۱ میلی متر کاهش یابد.



۸- مراجع

- [۱] Thombare D.G, Verma S.K, “Technological development in the Stirling cycle engines” . Renewable and sustainable Energy Reviews Vol ۱۲ , pp ۱-۳۸ , ۲۰۰۸ .
- [۲] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., Tlili ,I “Numerical Simulation and Losses Analysis in a Stirling Engine “ , Heat and Thechnology , Vol ۲۴ , No .۱, ۲۰۰۶
- [۳] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., “Reduction of Energy Losses in a Stirling Engine” Heat and Thechnology , Vol ۲۵ , No.۱, ۲۰۰۷ .
- [۴] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., Tlili , I.”Thermodynamic Analysis of The Stirling Heat Engine with Regenerative Losses and Internal Irreversibilities “” Int .J.Engine Res.Vol .۹, ۲۰۰۷ .
- [۵] stirling engine cycle image
- [۶] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., Tlili , I.”Thermodynamic Analysis of The Stirling Heat Engine with Regenerative Losses and Internal Irreversibilities “” Int .J.Engine Res.Vol .۹, ۲۰۰۷ .
- [۷] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., “Design and performance Optimiazation of GPU- ۳ Stirling Engines , Energy , Vol ۳۳ , pp.۱۱۰۰ -۱۱۱۴ , ۲۰۰۸ .
- [۸] Kongtragool B., Wongwisew S., “Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space , cold space and regenerator “ , Renewable Energy , Vol ۳۱ , pp ۳۴۵-۳۵۹ , ۲۰۰۶.
- [۹] Tavakolpour A., Zomorodian A., Golneshan A.A., “Simulation , construction and testing of a two cylinder solar Stirling engine powered by a flat plate solar collector without regenerator “ , Renewable Energy , Vol ۳۳ , pp ۸۷ -۷۷ , ۲۰۰۸ .
- [۱۰] Tlili ., I “ Thermodynamic Study on Optimal Solar Stirling Engine Cycle Taking Into Account the Irreversibilities Effects” , Energy Procedia , Volume ۱۴ , Pages ۵۸۴ -۵۹۱, ۲۰۱۲.
- [۱۱] Formosa.F, Despesse .G., "Analytical model for Stirling cycle machine desing", Energy Conversion and Management , Vol ۵۱ , pp ۱۸۵۵-۱۸۶۳ , ۲۰۱۰ .
- [۱۲] Li , T., Tang , DW ., Li, Z., Du, J., Zhou, T., Jia , Y., "Development and test of a Stirling engine driven by waste gases for the micro –CHP system " , Applied Thermal Engineering Volumes ۳۳-۳۴ , Pages ۱۱۹-۱۲۳ , February ۲۰۱۲.
- [۱۳] Rogdakis , D., Antonakos , G.D., Koronaki, I.P. "Thermodynamic analysis and experimental investigation of a Solo ۱۱۱ Stirling cogeneration unit " , energy , volume ۴۵, Issue ۱ , Pages ۵۰۳-۵۱۱ , September ۲۰۱۲.
- [۱۴] Finkellstein , T., Organ A., “Air Engines “, United Kingdom by Professional Engineering Publishing Limited, ۲۰۰۱
- [۱۵] Thombare D.G, Verma S.K, “Technological development in the Stirling cycle engines” . Renewable and sustainable Energy Reviews Vol ۱۲ , pp ۱-۳۸ , ۲۰۰۸ .
- [۱۶] Schmidt , G., “The theory of Lehmann’s Calorimetric Machine”. Z.ver.Dtsch.ing ۱۵, part ۱ , ۱۸۷۱
- [۱۷] Finkellstein , T. “analogue simulation of Stirling engine”. Simulation, No.۲, March ۱۹۶۳
- [۱۸] Urieli , I., “A Computer simulation of Stirling cycle machines “ , ph.D thesis , University of Witwatersrand . Jonansburg , South A South Africa , February, ۱۹۹۷.
- [۱۹] Martini , W.R , “A simple method of calculating Stirling engines for optimization” , IECEC Record . pp ۱۷۵۳ - ۱۷۶۲ , ۱۹۷۸.
- [۲۰] Gedeon , D.R, “ Optimization of Stirling cycle machines “ , IECEC Record .pp ۱۷۴۸-۱۷۹۰, ۱۹۷۸ .
- [۲۱] A ., “Nodal analysis of Stirling cycle devices “ , Preliminary Draft , ۱۹۷۸
- [۲۲] Kaushik SC ., Kumar S.: “Finite time thermodynamic analysis of endoreversible heat engine with regenerative losses “ Journal of Energy , No .۲۵ , pp ۹۸۹ -۱۰۰۳, ۲۰۰۰
- [۲۳] Cun –quan Z., Yi – nong W., and Guo –lin J.: “Dynamec simulation of one stage Oxford spilt – Stirling cryocooler and comparison with experiment “ Cryogenics , No. ۴۲ , pp ۳۷۷ – ۵۸۶ , ۲۰۰۲
- [۲۴] Wu F., Chen L., Wu C ., Sun F.; “Optimum performace of irreversible Stirling imperfect regeneration” Energy Conversion Manage , No.۳۹, PP۷۲۷ -۳۲ , ۱۹۹۸.
- [۲۵] stirling engine cycle image