

بررسی منحنی تغییرات توان و راندمان بر اساس طول و قطر بازیاب به روش حل عددی در موتور استرلینگ نوع بتا

علیرضا احمدپور¹، نادر رهبر^{2*}، هادی کارگر²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، گروه مهندسی مکانیک واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
2- مرکز تحقیقات پیشرفته انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان ایران
* سمنان، صندوق پستی: 35141-179، پست الکترونیکی: Rahbar@semnaniau.ac.ir

چکیده

مهم ترین قسمت موتور استرلینگ 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. به لحاظ ساختار فیزیکی، بازیاب حرارتی از فولاد ضد زنگ به صورت ورقه های توری و یا میله های ضد زنگ فولادی روی هم چیده شده، ساخته می شوند. 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. بنابراین استفاده از بازیاب در موتور استرلینگ باعث کم شدن اتلاف حرارتی و در نهایت افزایش راندمان موتور می شود. در این مقاله توسعه یک مدل مناسب ترمودینامیکی برای موتور استرلینگ نوع بتا، در محدوده بازیاب صورت گرفته است. این مدل، توانایی پیش بینی و بهینه سازی توان خروجی و پارامترهای عملکردی موتور استرلینگ را بر اساس شرایط فیزیکی و هندسی بازیاب، دارا می باشد. برای این منظور، 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.

کلید واژگان

موتور استرلینگ، بازیاب حرارتی، ایزوترم، مدل سازی عددی

Numerical Solution and Evaluation of Variation Power and Efficiency Based on the Degenerator Length and Diameter of Beta-type Stirling Engine

Ali-Reza Ahmadpoor¹, Nader Rahbar^{2*}, Hadi Kargar²

1-Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
2- Strategic center for energy and sustainable development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
* P.O.B. 35141-179 Semnan, Iran, Rahbar@semnaniau.ac.ir

Abstract

The most important part of the Stirling engine that has an important role in improving efficiency, heat recovery. Stirling cycle heat recovery is one of the important parts of that model because of the influence of various parameters is very complex. In terms of physical structure, heat recovery from stainless steel sheet, stainless steel net or stacked bars, are made. Over half of the engine cycle, heat recovery heat like a sponge to absorb the heat of the operating gas. In the other half cycle, recovery of heat after the gas, so less heat to ward off the cold the engine, there will be a way to increase engine efficiency. Therefore, the recovery Stirling engine reduces heat loss and thus increasing the engine's efficiency. The development of an appropriate thermodynamic model for beta type Stirling engine, has been the recovery area. This model, predict and optimize power output and performance parameters based on the physical conditions and geometric Stirling engine regenerator requirements. For this purpose, the numerical solution of beta type Stirling engine uses isothermal and adiabatic model is done. To validate the results, the geometric and functional Stirling engine manufactured by General Motors used and the results were compared with published values.

Keywords: Stirling engine, Degenerator, Isotherm, Mathematical modeling

1- 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 الودگی‌های 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 10 KW است. با توجه به سهم قابل ملاحظه انرژی خورشیدی در کشورهایی مانند 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.

2- پیشینه تحقیق

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 [1]. تحلیل اشمیت بر مبنای تئوری محفظه تراکم و محفظه انبساط ایزوثرم 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 دما فرض می‌کند. در صورتی که در عمل برای موتورهایی با دور موتور rpm 1000 یا بیشتر، این فرض درست نیست. زیرا همان گونه 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 ایزوثرم 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 1975، فینکن اشتاین [2] 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 یورلی و برچوئیتس [3] با استفاده از مدل ترمودینامیکی آدیباتیک، برای به دست آوردن توان و راندمان خروجی موتور استرلینگ، اشاره کرد. کونگترگول و وانگ وایز [4] مدل‌سازی و بهینه‌سازی موتور استرلینگ را با استفاده از مدل ایزوترم انجام داده‌اند و یوسف تیمومی و همکاران [5,6,7,8] با مدل‌سازی آدیباتیک موتور استرلینگ، افت‌ها و بازگشت‌ناپذیری‌ها را در آن، بررسی کرد. در تحقیقات اخیر انجام شده توسط اسکندر تلیلی و همکاران [9]، موتور استرلینگ با استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع حرارتی، مدل‌سازی شده است. در تحقیقات انجام شده توسط تومبارو و ورما [10]، تکنولوژی‌های موجود و پیشرفت‌های حاصل شده در خصوص تحلیل موتورهای استرلینگ گردآوری شده و در نهایت در خصوص استفاده از آن‌ها، پیشنهاداتی ارائه شده است. علیرضا تولهپور و همکاران [11] 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. گستانه و اینورنیزی [12] پس از مدل‌سازی موتور استرلینگ، اثر استفاده از گازهای مختلف را بر روی راندمان و توان خروجی موتور بررسی کرده است. فرموسا و دسپسه [13] مدل‌سازی را با استفاده از مدل ایزوترم برای بررسی اثرات حجم‌های مرده بر روی راندمان و توان خروجی موتور، انجام داده است.

3- مدل‌سازی ترمودینامیکی

موتور استرلینگ در یک سیکل بسته ترمودینامیکی کار کرده و انرژی گرمایی را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند. موتور استرلینگ به لحاظ ساختار فیزیکی شامل پنج زیرسیستم اصلی است که در مدل‌سازی، هر زیرسیستم به صورت یک حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود. دو فضا با حجم متغیر به نام‌های فضای انبساط و فضای تراکم و سه مبدل حرارتی با حجم ثابت، به نام‌های گرم‌کن، خنک‌کن 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 پیستون‌ها را به شکل حرکت زاویه‌ای به محور محرکه منتقل می‌کند (شکل 3). انواع مختلف موتور استرلینگ با نام‌های آلفا، بتا و گاما شناخته می‌شوند. همه آن‌ها به لحاظ سیکل ترمودینامیکی مشابه‌اند ولی تفاوت‌های اساسی در نوع مکانیزم‌های مکانیکی دارند. در تحقیق حاضر، با اعمال روابط ترمودینامیکی بررسی منحنی تغییرات توان و راندمان در بازیاب حرارتی با استفاده از کد عددی مشخص می‌گردد و نیز در این بخش شبیه‌سازی با استفاده از مدل ترمودینامیکی ایزوترم (شکل 1)، و آدیباتیک (شکل 2)، انجام خواهد شد. در پایان نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در خصوص بازیاب حرارتی در موتور ساخته شده توسط شرکت

معادلات مورد نیاز برای اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت به موتور و کار انجام‌شده توسط آن و در نهایت راندمان موتور به دست می‌آید. در تحلیل موتور استرلینگ با استفاده از مدل آدیباتیک، می‌توان جزئیات رفتار تک‌تک قسمت‌های موتور را به دست آورد. (شکل 4). با استفاده از این مدل اهمیت بازیاب و نمودارهای مربوط به توان و راندمان، در زوایای مختلف لنگ قابل محاسبه است. جدول 4,3,2,5

جدول 2 معادلات جرم و تغییرات جرم

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

جدول 3 معادلات دما

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

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

و در نهایت معادلات حاصل شده برای مقادیر کار و گرمای داده شده در گرم‌کن و گرمای گرفته شده در خنک‌کن و در نهایت گرمای مبادله شده در بازیاب حرارتی با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید.

جدول 4 معادلات انرژی و تغییرات حجم

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

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

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

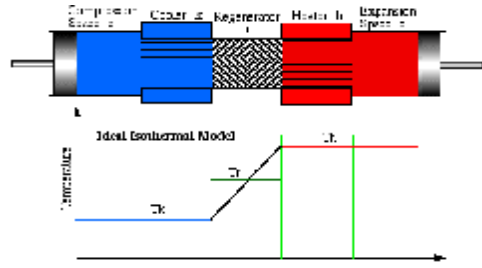
$$dW_e = p dV_e \quad (23)$$

$$dW_c = p dV_c \quad (24)$$

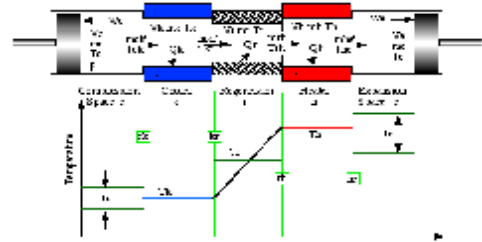
در چرخه آدیباتیک راندمان حرارتی به یک تابع تبدیل خواهد شد که نه تنها به دما بستگی دارد بلکه علاوه بر آن به نسبت حجم جاروب شده، زاویه فاز و نسبت حجم مرده نیز بستگی دارد. البته توان خروجی، چه در چرخه هم دما و چه در چرخه آدیباتیک، تابعی از همه پارامترهای ذکر شده خواهد بود. فرضیاتی که در حل معادلات به روش آدیباتیک ایده آل در نظر گرفته می‌شود به شرح زیر است:

- جرم سیال عامل ثابت است.
- معادله حالت گاز ایده آل برقرار است.
- سرعت ماشین ثابت است.
- سیکل پایدار است.
- مبدل های حرارتی ایده آل هستند.
- از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر می‌شود.

جنرال موتورز (GPU3) که مشخصات هندسی و عملکردی آن موجود است، مقایسه می‌شود. جدول 8,7,6.



شکل 1 مدل ایزوترم موتور استرلینگ



شکل 2 مدل آدیباتیک موتور استرلینگ

4- معادلات حاکم و روش حل

در این بخش مدل‌سازی ترمودینامیکی موتور به روش ایزوترم و آدیباتیک انجام می‌پذیرد.

4-1- آنالیز موتور استرلینگ در حالت ایزوترم

نخستین تحلیل به‌دست آمده برای موتور استرلینگ، تحلیل چرخه ایده‌آل ایزوترمال استرلینگ می‌باشد. 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 بستهای است که در معادلات آن ظاهر می‌شود. فرض اساسی در این آنالیز این است که گاز در محفظه انبساط و گرم‌کن، در درجه حرارت گرم‌کن، و گاز در محفظه تراکم و خنک‌کن، در درجه حرارت خنک‌کن نگاه‌داشته می‌شود. چرخه ترمودینامیکی ایزوترمال از دو فرایند هم‌دما و دو فرایند حجم ثابت تشکیل شده است. همچنین فرض می‌شود که فرایندهای انبساط و تراکم هم دما هستند و تأثیرات ایده‌آل نبودن بازیاب و افت فشار نیز در نظر گرفته نمی‌شود. نقطه شروع آنالیز، ثابت گرفتن جرم کل در تمام حجم‌های اشغال شده توسط گاز است. جدول 1

جدول 1 معادلات جرم و دما

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

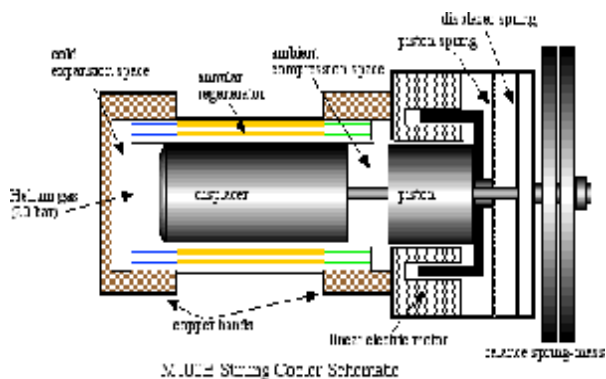
$$m = pV / RT \quad (2)$$

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

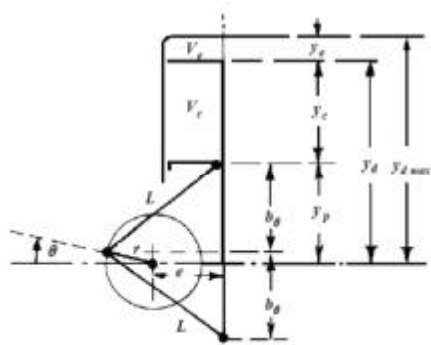
$$Tr = (Th - Tk) / \ln(Th / Tk) \quad (4)$$

4-2- آنالیز موتور استرلینگ در حالت آدیباتیک

برای حل در حالت آدیباتیک ایده‌آل، ابتدا جرم در کل سیستم ثابت در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از معادلات انرژی و حالت گاز کامل، -

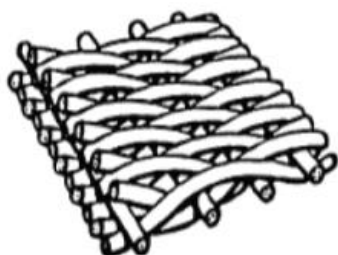
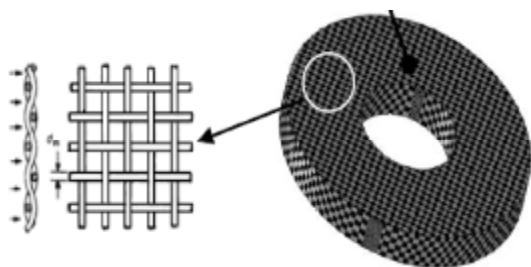


Stirling Converter Schraube



شکل 3 مکانیزم عملکرد و تغییرات حجم در موتور استرلینگ نوع بتا

شکل 4 ساختار موتور استرلینگ نوع بتا



شکل 5 ساختار بازیاب حرارتی



شکل 6 شبکه های فلزی بازیاب

جدول 5 معادلات تغییرات حجم در موتور استرلینگ

$$b_1 = \sqrt{l^2 - (e - r)^2} \quad (25)$$

$$b\theta = \sqrt{l^2 - (e + r \cos \theta)^2} \quad (26)$$

$$b_3 = \sqrt{l^2 - (e + r)^2} \quad (27)$$

$$b_2 = \sqrt{(l - r)^2 - e^2} \quad (28)$$

$$v_e = v_{dc} + A_d (b_\theta - b_2 - r \sin \theta) \quad (29)$$

$$v_c = v_{dc} + 2A_p (b_1 - b\theta) \quad (30)$$

$$\frac{dV_c}{d\theta} = \frac{-2A_p r \sin \theta (e + r \cos \theta)}{b\theta} \quad (31)$$

$$\frac{dV_e}{d\theta} = \frac{dV_c}{d\theta} \cdot \frac{A_d}{2A_p} - A_d r \cos \theta \quad (32)$$

برای حل عددی معادلات به دست آمده از مدل آدیاباتیک، می‌بایست 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 می‌شود. به صورتی که توابع به دست آمده شامل تمام متغیرهای موجود به همراه توابع مربوط به تغییرات حجم موتور در زوایای مختلف لنگ می‌باشد. 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 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 GPU3 تغییر داده شده است تا بالاترین توان خروجی، بر مبنای توان حرارتی ورودی، در بازیاب حرارتی بدست آید. (شکل 5)

جدول 6 پارامترهای هندسی موتور GPU3

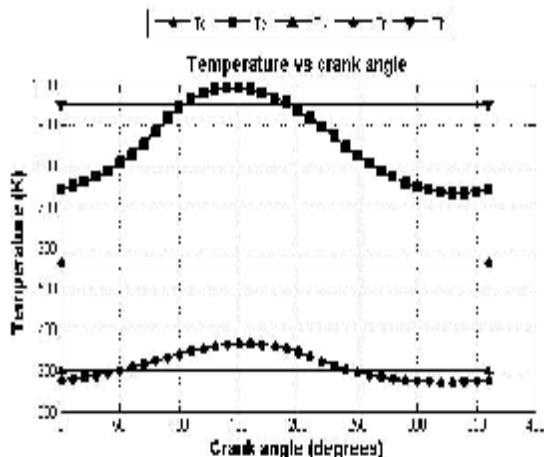
بازیاب	پیستون
فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم	28/26 cm ³ بدنه بازیاب لوله‌ای شکل است که در آن سیم های فلزی بر روی هم انباشته شده است.
فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم	30/52 cm ³ قطر
حجم جاروب شده محفظه تراکم	113/14 cm ³ طول
حجم جاروب شده محفظه انبساط	120/82 cm ³ قطر سیم
طول میله اتصال دهنده (L)	46/ mm تخلخل
خروج از مرکز (e)	20/8 mm تعداد در هر سیلندر
قطر پیستون توان (dp)	69/9 mm ضریب هدایت حرارتی بازیاب
قطر جابجایی (dd)	69/ mm ضریب هدایت حرارتی بازیاب
هدایت حرارتی پیستون	15 w/mk
کورس حرکتی پیستون	46/ mm
گرم کن	خنک کن
تعداد لوله ها	مجموعه‌ای از لوله‌های همگن و صاف
قطر داخلی لوله	3/20 mm تعداد لوله‌ها برای هر سیلندر
طول لوله	24/53 mm قطر لوله‌ها
حجم مرده	70/88 cm ³ طول لوله
	13/6 cm ³ حجم مرده

جدول 7 پارامترهای هندسی موتور GPU3

گاز عامل	هلیوم
دمای منبع گرم (گرم کن) Th	977 k
دمای منبع سرد (خنک کن) Tc	288 k
فشار متوسط گاز عامل	4130 kpa
جرم گاز عامل	1/03 گرم
فرکانس عملکردی موتور	41/7 هرتز

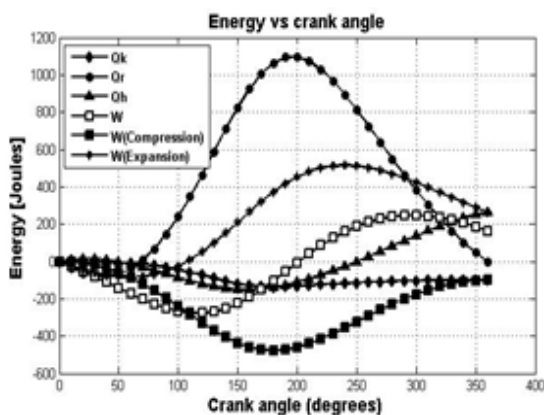
جدول 8 سلول بازیاب با تخلخل و قطر متفاوت سیم

	قطر سیم (mm)	ضریب تخلخل بازیاب
M1	0/0035	0/9122
M2	0/0065	0/8359
M3	0/007	0/7508
M4	0/007	0/7221
M5	0/004	0/6970
M6	0/008	0/6655
M7	0/008	0/6112



شکل 9 تغییرات دما در سلول‌های موتور استرلینگ

جریان انرژی علاوه کل کار انجام شده در هر سیکل کاری موتور در شکل 10 نشان داده شده است. مقادیر برای حرارت دفع شده با استفاده از خنک کن و حرارت اضافه شده توسط گرم‌کن علاوه کل کار انجام شده در این شکل نشان داده شده است. اختلاف دامنه انرژی میان بازیاب، گرم‌کن و خنک‌کن کاملاً مشهود است. همچنین در این شکل نشان داده شده است که کل انرژی سیکلی عبور کننده در یک مدل ایده‌آل از میان بازیاب در پایان سیکل، برابر صفر است.

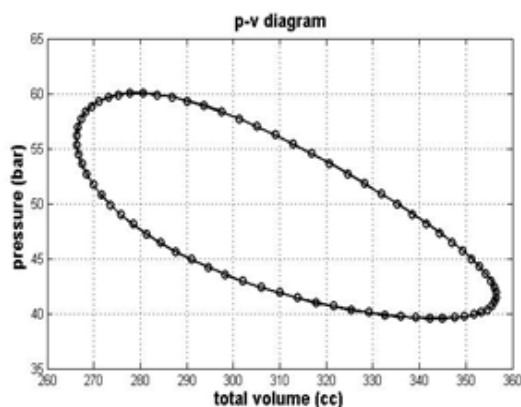


شکل 10 تغییرات انرژی در سلول‌های موتور

با مشخص شدن دقت عددی در پیش بینی راندمان و توان خروجی موتور GPU-3 در مقایسه با نتایج منتشر شده، می‌توان با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترهای جداول (1 و 2) تغییرات به وجود آمده در حرارت منتقل 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 GPU3 - توان حرارتی ورودی 13 کیلووات است که با توجه به مشخصات هندسی و عملکردی جداول (6 و 7)، در حدود 7/9 کیلووات توان خروجی تولید می‌کند.

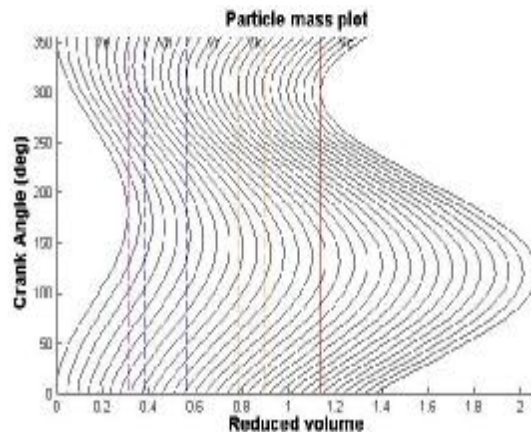
5- بحث بر روی نتایج

تغییرات فشار نسبت به حجم موتور در شکل 7 نشان داده شده است. سطح به دست آمده، میزان کار انجام شده توسط موتور در طی هر سیکل را نشان می‌دهد. 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 ایده‌آل کارنو است. شکل 8 تغییرات جرم گاز عامل را در داخل موتور، در طی سیکل، نشان می‌دهد. با استفاده از -



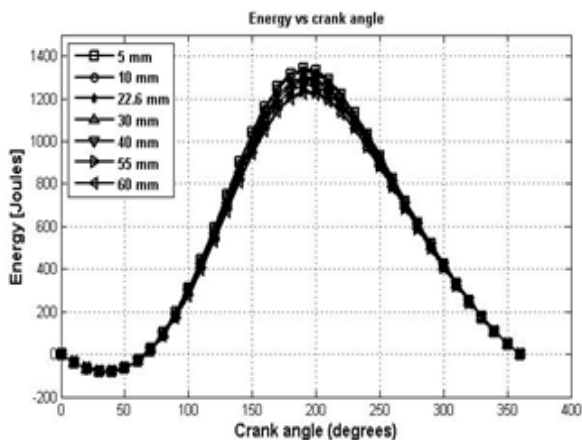
شکل 7 مقادیر فشار - حجم برای سیکل موتور

معادله جرم و انرژی برای پنج سلول موتور و با استفاده از روابط گاز ایده‌آل، تجمع جرم در داخل هر کدام از سلول‌ها در طی سیکل موتور به دست آمده است. نتایج به دست آمده، تغییرات جرم در محفظه تراکم را با شدت بیشتری نسبت به محفظه انبساط نشان می‌دهد.

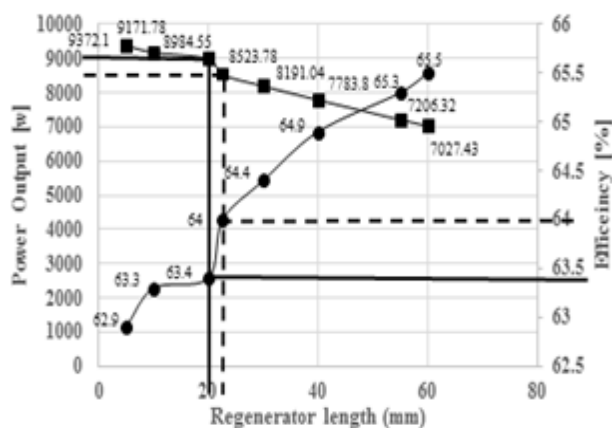


شکل 8 تغییرات جریان عبوری در سلول‌های موتور

نوسانات دما در طی سیکل کاری موتور در محفظه انبساط و تراکم، در شکل 9 نشان داده شده است. درجه حرارت‌های ورودی برنامه در جدول شماره 2 آورده شده است که شامل دمای گاز در سمت گرم و سرد موتور است. دمای گاز در مبدل‌های حرارتی ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل 11 تغییرات انرژی دریافتی ناشی از تغییر طول بازایاب



شکل 12 تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر طول بازایاب

جدول 10 نتایج به دست آمده از تغییر قطر بازایاب بر راندمان و توان خروجی موتور

قطر بازایاب (میلیمتر)	حرارت ورودی (وات)	حرارت خروجی (وات)	توان (وات)	راندمان (درصد)
10	15612/48	- 5870/29	9742/19	62/4
20	14220/62	- 5204/74	9015/88	63/4
(نقطه بهینه) 21	14068/ 32	- 5120/86	8947/46	63/6
22/6 (GPU3)	13787/18	- 4990/95	8796/23	63/8
30	12364/44	- 4377/01	7987/43	64/6
40	10410/72	- 3581/28	6828/72	65/6
50	8638/64	- 2816/19	5822/45	66/4
60	7142/2	- 2356 /92	4785/28	67

حال با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی، پارامترهای هندسی و عملکردی موتور GPU-3 تغییر داده می شود، تا اینکه مقادیر بهینه برای آنها استخراج شود.

5-1- طول بازایاب

بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش طول بازایاب میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان کاهش می یابد در حالی که راندمان موتور افزایش می یابد (جدول 9). این امر باعث می شود که طراح بر اساس میزان فضای در اختیار و نیز مقدار توان حرارتی ورودی برای گرم کن، در خصوص طول بازایاب، تصمیم گیری کند. با توجه به اینکه افزایش طول بازایاب باعث کم شدن میزان حرارت ورودی موتور می شود می توان در طراحی موتورهایی که توان حرارتی ورودی کمتری دارند، از بازایاب حرارتی با طول زیاد استفاده کرد. در شکل 11 اثر طول بازایاب بر روی میزان حرارت بازایابی شده در آن، نشان داده شده است، منحنی تغییرات توان و راندمان بر اساس طول بازایاب در شکل 12 نشان داده شده است. نقاط مربوط به موتور GPU-3 بر روی منحنی علامت گذاری شده است. بر این اساس با افزایش طول بازایاب، راندمان موتور GPU-3 افزایش می یابد ولیکن توان خروجی کاهش پیدا می کند. بر این اساس هر چه طول بازایاب افزایش یابد، مقدار حرارت ورودی به موتور کاهش یافته و در نتیجه حرارت کمتری وارد بازایاب حرارتی می شود. بر اساس نتایج به دست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی موتور GPU-3، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست طول بازایاب از مقدار 22/6 میلی متر به مقدار 20 میلی متر کاهش یابد.

جدول 9 نتایج به دست آمده از تغییر طول بازایاب بر راندمان و توان خروجی موتور

راندمان (درصد)	توان (وات)	حرارت خروجی (وات)	حرارت ورودی (وات)	طول بازایاب (میلیمتر)
62/9	9372/1	- 5623/26	14665/36	5
63/3	9171/78	- 5317/59	14489/37	10
63/4	8984/55	- 5276/63	14261/18	(نقطه بهینه) 20
64	8523/78	- 4794 /62	13318/4	22/6 (GPU3)
64/4	8191/04	- 4527/96	12719	30
64/9	7783/8	- 4209/72	11993/52	40
65/3	7206/32	- 3829/38	11035/7	55
65/5	7027/43	- 3701/47	10728/9	60

5-2- قطر بازایاب

با توجه به نتایج، با افزایش قطر بازایاب، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی کاهش می یابد، در حالی که راندمان موتور افزایش پیدا می کند (شکل 13). در جدول 10 شیب افت توان نسبت به افزایش قطر بازایاب، نشان داده شده است، به صورتی که از مقدار قطر 30 میلی متر، با افزایش هر 10 میلی متر قطر بازایاب، تقریباً یک کیلو وات توان موتور کاهش می یابد. بر اساس نتایج به دست آمده، هر چه قطر بازایاب افزایش یابد میزان حرارت ورودی برای تولید توان کاهش می یابد در نتیجه حرارت بازایابی شده در بازایاب حرارتی نیز کاهش پیدا می کند (شکل 14). بر اساس نتایج به دست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست قطر بازایاب از مقدار 22/6 میلی متر به مقدار 21 میلی متر کاهش یابد.

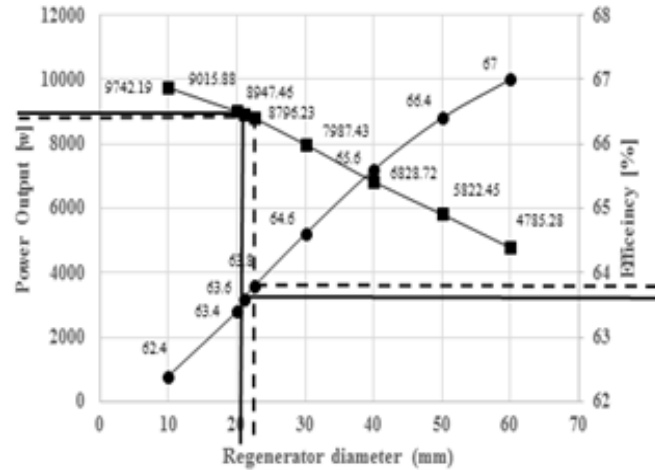
3.Diameter regenerator
4.Length regenerator

- e خروج از مرکز (m)
- m جرم گاز (kg)
- r شعاع لنگ (m)
- P فشار (pa)
- Cp گرمای ویژه گاز در فشار ثابت ($J/kg \cdot K^{-1}$)
- Cv گرمای ویژه گاز در حجم ثابت ($J/kg \cdot K^{-1}$)
- T دمای گاز (K)
- V حجم (m^3)
- W کار انجام شده توسط سیال گاز (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 بازباب و گرم کن
- d جابجا کننده
- θ زاویه لنگ
- η راندمان حرارتی

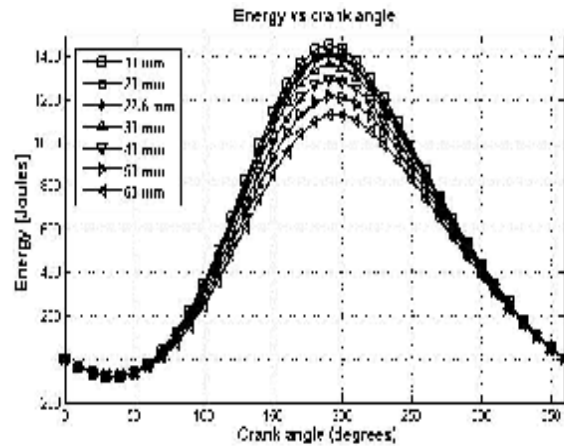
7- فهرست علائم

8- مراجع

- [1] Finkellstein , T., Organ A., "Air Engines ", United Kingdom by Professional Engineering Publishing Limited, 2001
- [2] Thombare D.G, Verma S.K, "Technological development in the Stirling cycle engines" . Renewable and sustainable Energy Reviews Vol 12 , pp 1-38 , 2008 .
- [3] Schmidt , G., "The theory of Lehmann's Calorimetric Machine". Z.ver.Dtsching 15, part 1 , 1871
- [4] Finkellstein , T. "analogue simulation of Stirling engine". Simulation, No.2, March 1963
- [5] Urieli , I., "AComputer simulation of Stirling cyclemachines ", ph.D thesis , University of Witwatersrand . Jonansburg , South A South Africa , February, 1997.
- [6] Martini , W.R , "A simple method of calculating Stirling engines for optimization", IECEC Record .pp 1753 -1762,1978.
- [7] Gedeon , D.R, " Optimization of Stirling cycle machines " , IECEC Record .pp 1748-1790, 1978 .
- [8] , A. , "Nodal analysis of Stirling cycle devices " , Preliminary Draft , 1978
- [9] Kaushik SC. , Kumar S.: "Finite time thermodynamic analysis ofendoreversible heat engine with regenerative losses " Journal of Energy , No. 25 , pp989 - 1003,2000
- [10] 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.42, pp377 - 586 , 2002
- [11] Wu F.,Chen L., Wu C. , Sun F.; "Optimum performace of irreversible Stirling imperpect regeneration" Energy Conversion Manage , No.39, PP727 -32, 1998.
- [12] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., Tlili ,I. "Numerical Simulation andLossesAnalysis in a Stirling Engine " , Heat and Thechnology , Vol 24 , No .1,2006
- [13] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., "Reduction of Energy Losses in a Stirling Engine" Heat and Thechnology , Vol 25 , No.1, 2007 .
- [14] 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 .9, 2007 .
- [15] stirling engine cycle image
- [16] 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 .9, 2007 .
- [17] Timoumi , Y., Nasrallah , S.B., "Design and performance Optimiazation of GPU- 3 Stirling Engines , Energy , Vol 33 , pp.1100 -1114 , 2008.
- [18] Kongragool B., Wongwiset S., "A review of solar powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines , Renewable and sustainable Energy Reviews , Vol 7 , pp 131 -154 , 2003 .



شکل 13 تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر قطر بازباب



شکل 14 تغییرات انرژی دریافتی ناشی از تغییر قطر

6- نتیجه گیری:

مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- با افزایش طول و قطر بازباب 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 بازباب از مقدار 22/6 میلی متر به مقدار 20 میلی متر و قطر بازباب از مقدار 22/6 میلی متر به مقدار 21 میلی متر کاهش یابد. (جدول 11)

جدول 11 نتایج به دست آمده از تغییر طول و قطر بازباب بر راندمان و توان خروجی موتور

موتور استرلینگ	طول بازباب حرارتی (میلیمتر)	قطر بازباب حرارتی (میلیمتر)
GPU -3	22/6	22/6
نقطه بهینه	20	21

- [19] Kongtragool B, Wongwisew S, "Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space , cold space and regenerator " , Renewable Energy , Vol 31 , pp 345-359 , 2006.
- [20] Popescu G., Radceenco V., Costea M., Feidt M., Thermodynamic Optimization in the Finished Time of Stirling Engine " Revue Generale De Thermique, No .35 ,pp.656-61 , 1996 .
- [21] Cinar C., Yucesu S., Topgul T., Okur M., "Beta- Type Stirling Engine Operating at Atmospheric Pressure" , Appl Energy, No.81 , pp. 351 -357 , 2005.
- [22] 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 33 , pp 77 -87 , 2008 .
- [23] Tlili , I " Thermodynamic Study on Optimal Solar Stirling Engine Cycle Taking Into Account the Irreversibilities Effects" , Energy Procedia , Volume 14 , Pages 584 -591,2012.
- [24] Gostante M. Invernizzi, A., "Stirling engines using working fluids with strong real gas effects , Applied Thermal Engineering , Vol 30 , pp 1703 -1710,2010.
- [25] Formosa.F, Despesse .G., "Analytical model for Stirling cycle machine desing", Energy Conversion and Management , Vol 51 , pp 1855-1863 , 2010 .
- [26] 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 33-34 , Pages 119-123, February 2012.
- [27] Rogdakis , D., Antonakos , G.D., Koronaki, I.P. "Thermodynamic analysis and experimental investigation of a Solo V161 Stirling cogeneration unit " , energy , volume 45, Issue 1 , Pages 503-511 , September 2012.
- [28] Urieli, I., Berchowitz , D.M., "stirling Cycle Engine Analysis", Oxford University Press, 1984