

شبیه سازی و آنالیز توان و راندمان در موتور استرلینگ نوع بتا به روش عددی با تغییر شکل در بازیاب حرارتی در شرایط آدیاباتیک با مبدل های ایده آل

علیرضا احمدپور^{۱*}، نادر رهبر^۲، هادی کارگر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، گروه مهندسی مکانیک واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳- هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

*Semanan, V.56@gmail.com, ۲۵۱۴۱-۱۷۹, Ahmadpour.a.56@gmail.com

چکیده

هدف از این مقاله، توسعه یک مدل مناسب ترمودینامیکی برای موتور استرلینگ نوع بتا، با تغییر شکل در بازیاب حرارتی است. در موتور های استرلینگ متعارف مدل بتا، جابجا کننده و پیستون توان در یک سیلندر قرار دارند و سیال عامل بین محفظه های انبساط و تراکم، از مسیر کنار گذر سیلندر، عبور می کند. در تحقیق حاضر شکل جدیدی از بازیاب حرارتی برای موتور استرلینگ مدل بتا پیشنهاد شده است. در شکل جدید، لایه های همگن پی دی پی سیم های مربعی، فضای پیستون جابجا کننده را پر کرده است، بطوری که پیستون جابجایی، نقش جابجاکننده و بازیاب حرارتی را همزمان بر عهده دارد. برای این منظور، مدل سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده و نتایج بدست آمده با مقادیر منتشر شده، مقایسه شده است.

کلید واژگان

موتور استرلینگ، حل عددی، مدل آدیاباتیک، بازیاب متحرک

Numerical Solution and Evaluation of Variation Power and Efficiency of Conventional and moving regenerator of Beta-type Stirling Engine in the case of Adiabatic with Exchangers Ideal

Ali-Reza Ahmadpour¹, 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 purpose of this research was to develop a thermodynamic model for engine via changing the form of regenerator. In conventional beta-type Stirling the working fluid passes between the compression and expansion space via the bypass of the main cylinder. In the present study a new form of regenerator was proposed for the beta-type Stirling engine. In this new form successive homogeneous layers of square wire meshes filled the space of displacer piston so that the displacer piston took the role of regenerator and displacer simultaneously. To this end modeling was done using MATLAB software and the obtained results were compared with the published values.

Keyword: Stirling engine; Numerical simulation; Adiabatic model; Moving regenerator

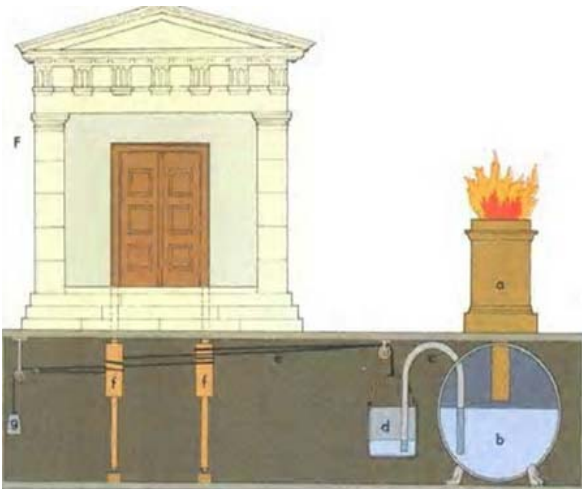
آمدن بحران انرژی درجهان و افزایش قیمت سوخت های فسیلی و بیم از اتمام منابع سوختی باعث شد تا استفاده از منابع متنوع تولید کننده توان بیشتر از قبل مورد توجه دانشمندان در جهان قرار گیرد. موتور استرلینگ یکی از ایده هایی است که چنانچه راندمان بالاتری تولید کند، می تواند بیشتر مورد توجه واقع شود.

ارزیابی انواع روش های استفاده از انرژی حاکی از آن است که استفاده از موتور استرلینگ چه از منظر فنی و چه از دیدگاه ملاحظات اقتصادی، بهینه ترین روش برای بهره گیری از انرژی های پسماندهای طبیعی محسوب می شود. موتورهای استرلینگ سال هاست که در حال تحقیق و توسعه اند. علیرغم این امر، به نظر می رسد ارزان بودن سوخت های فسیلی و عدم توجه کافی به منابع آلوده کننده محیط زیست از اهم دلایل عدم توسعه و اصلاح این نوع موتورها باشد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته در سال های اخیر و افزایش قیمت حامل های انرژی و همچنین کم شدن منابع سوختی درجهان

۱- مقدمه

موتور استرلینگ درسال ۱۸۱۶ (حدوداً ۸۰ سال قبل از اختراع موتور دیزل) توسط رابرت استرلینگ در اسکاتلند اختراع شد و موفقیت های تجاری قابل توجهی را تا اوایل سال ۱۹۰۰ میلادی بدست آورد. موتور استرلینگ یک موتور برون سوز است که در یک چرخه بسته ترمودینامیکی بازیابی، با تراکم و انبساط متناوب سیال عامل، بین دو سطح دمایی متفاوت کار می کند. جریان سیال توسط تغییرات حجم، کنترل می شود و یک تبدیل حرارت به کار خالص و یا برعکس حاصل می شود. به تعبیری موتور استرلینگ یک ماشین مکانیکی است که در آن از سیال های تراکم پذیر مانند هوا، هیدروژن، هلیوم، نیتروژن یا حتی بخارها به عنوان سیال عامل استفاده می شود. با اختراع موتور اتو و دیزل و ارزانی قیمت سوخت، موتور استرلینگ اهمیت اولیه خود را از دست داد. در اواخر قرن گذشته، بوجود

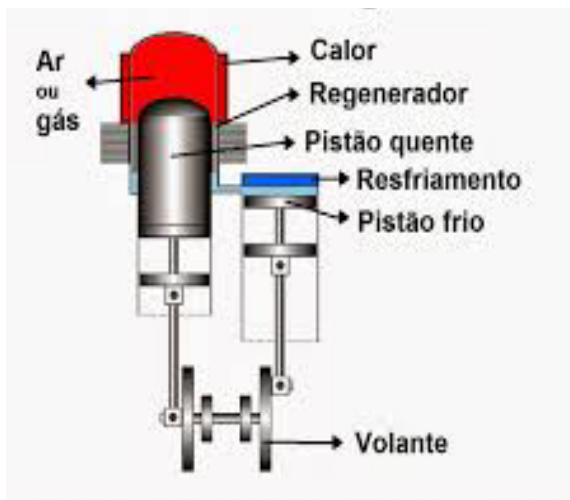
مجدداً از طریق استوانه بسته می شدند. کسانی که به معبد می رفتند و از وجود این سیستم خبر نداشتند آن را نشانه ای از وجود خدا می دانستند.



شکل ۱ موتور هرون

۳- مدل سازی ترمودینامیکی

انواع مختلف موتور استرلینگ با نام های آلفا، بتا و گاما شناخته می شوند. (شکل ۴،۳،۲)، همه آن ها به لحاظ سیکل ترمودینامیکی مشابه اند ولی تفاوت های اساسی در نوع مکانیزم های مکانیکی دارند. موتور استرلینگ مدل آلفا دو پیستون در دو سیلندر جداگانه دارد. گرم کن در یک سیلندر و خنک کن در سیلندر دیگر تعبیه شده است. گاز عامل حرکت رفت و برگشت خود را از گرم کن آغاز و بوسیله بازیاب وارد خنک کن می شود. در موتور استرلینگ نوع بتا دو عدد پیستون به نام های پیستون جابجایی و پیستون توان در داخل یک سیلندر قرار گرفته اند. پیستون جابجایی سیال عامل را میان فضای سرد از میان گرم کن، بازیاب و خنک کن جابجا می کند و باعث حرکت پیستون توان می شود. موتور استرلینگ نوع گاما ترکیبی از نوع آلفا و بتا است.



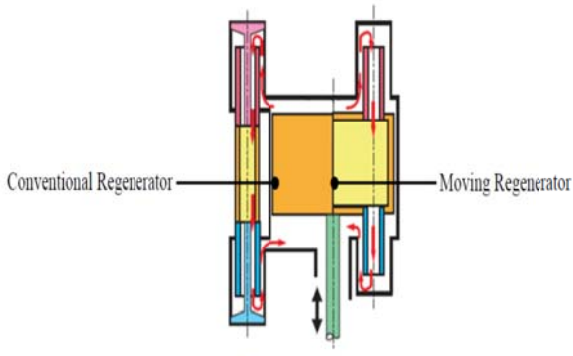
شکل ۲ موتور استرلینگ نوع آلفا با بازیاب ثابت، (متعارف)

موتور استرلینگ دوباره به صورت یکی از ایده های مناسب تحقیق و توسعه برای استفاده بعنوان موتورهای مولد توان مطرح شده اند که مزیت اساسی آنها استفاده از سوخت های متنوع برای تولید انرژی است. بخصوص استفاده از سوخت جامد به عنوان منبع تولید حرارتی دمای بالا می تواند باعث شود تا موتور استرلینگ در بسیاری از نقاط جهان که امکان استفاده از سوخت های متعارف وجود ندارد و هزینه خرید و حمل و نقل این سوخت ها بسیار زیاد است مورد استفاده قرار گیرد. موتورهای استرلینگ در این نقاط می توانند از سوخت های در دسترس محل زندگی مانند سوخت های جامد (چوب زغال سنگ، ساقه های برنج) سوخت های حیوانی (فضولات) و یا استفاده از انرژی خورشیدی، توان مورد نیاز خود را تامین کنند. بنابراین، شبهه سازی جامع عمرکرد این موتور با در نظرگیری شرایط واقعی کارکردی، به منظور محاسبه توان و بازده خروجی واقعی آن و همچنین تخمین میزان انحراف چرخ عملکرد واقعی از شرایط ایده آل، با هدف توسعه موتور استرلینگ ضروری است. بر اساس همین ضرورت، مدل سازی ریاضی فرآیندهای یک موتور استرلینگ، به عنوان ابزاری ارزشمند در زمینه تحقیق و توسعه این گونه موتورها پیش روی محققان و طراحان موتور قرار دارد. علت این موضوع، توسعه کامل تر و فهم دقیق تر فرآیندهای داخل موتور، کاهش هزینه های زمانی و همچنین اقتصادی ناشی از تجهیزات آزمایشگاهی، رصد و کنترل متغیرهایی که نیاز به توجه خاص و ویژه دارند، پیشگویی جامع تر رفتار موتور در محدوده گسترده تری از متغیرهای کارکردی و همچنین فراهم آوردن شرایطی برای توسعه موتورهای هم خانواده جدید می باشد.

تحقیقات انجام شده بر روی موتورهای استرلینگ، امروزه، بر چند محور اصلی متمرکز شده است: روش های دستیابی به بازده خروجی بیشتر و بهبود عملکرد مدل های حرارتی بویژه بازیاب حرارتی به عنوان یکی از مهمترین بخش های موتور و تخمین میزان انحراف عملکرد موتور از شرایط ایده آل بوسیله ارزیابی افت های مکانیکی و ترمودینامیکی در بخش های مختلف موتور. در حاضر موتورهای هواگرمایی بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند و به ویژه در دهه های اخیر یکی از کانون های توجه مهندسان مکانیک بوده اند. انتظار می رود با افزایش قیمت سوخت های فسیلی و توجه به منابع آلوده کننده محیط زیست، و پیشرفت های صنعتی در تولید آلیاژهای فلزی با تحمل دما و فشار بالا، استفاده از موتورهای استرلینگ اهمیت بیشتری پیدا کند.

۲- تاریخچه ی موتورهای استرلینگ

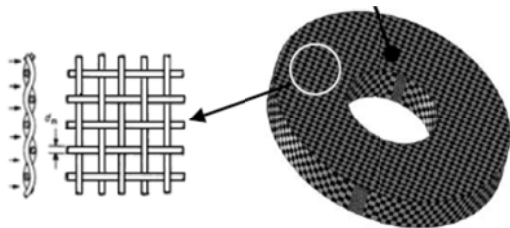
نخستین سند موجود که در مورد موتورهایی که با گرم شدن و سرد شدن سیال عامل، کار انجام می دهند، مربوط به موتور هرون است. (شکل ۱)، تصویر معبدی را نشان می دهد که درب آن به وسیله این موتور باز و بسته می شد. وقتی که آتش قربانگاه افروخته می گردید، گرما باعث انبساط هوا در داخل جایگاه a می شد. این انبساط، فشار محفظه b را که نیمی از آن با آب پر شده بود، افزایش می داد و در نتیجه ستونی از آب از طریق لوله c به داخل ظرف d انتقال می یافت. سپس افزایش وزنی این محفظه باعث حرکت طناب e شده و حرکت این طناب از طریق دو استوانه باعث باز شدن درب های معبد f می گشت. وقتی آتش خاموش می گردید، فشار هوا در جایگاه کاهش می یافت و آب موجود در ظرف به داخل محفظه کره ای که نیمی از آن با آب پر بود، بر می گشت و در نتیجه این فرآیند، وزنه g که در سر دیگر طناب تعبیه شده بود، از ظرف d سنگین تر می گردید و نهایتاً درب ها



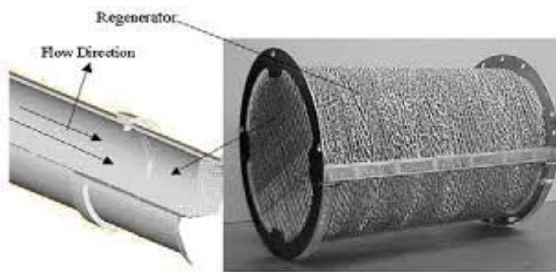
شکل ۵ شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا با بازیاب متحرک

۴- بازیاب حرارتی

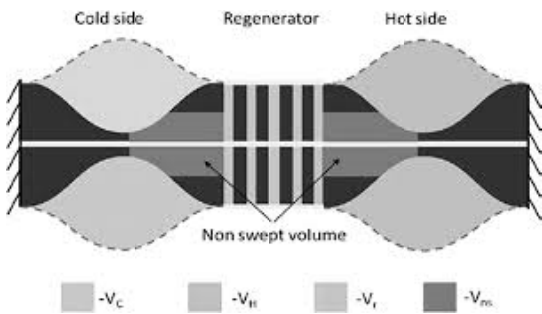
شاید مهمترین قسمت موتور استرلینگ که نقش اساسی در افزایش راندمان آن دارد، بازیاب حرارتی است. به لحاظ ساختار فیزیکی، بازیاب حرارتی از لایه های همگن پی دی سیم های مربعی از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شده است که بر اساس تعداد مورد نیاز برای عملکرد مطلوب موتور، در حجم طراحی شده برای آن، بر روی هم قرار داده می شود. شکل های ۶، ۷، ۸



شکل ۶ بازیاب حرارتی



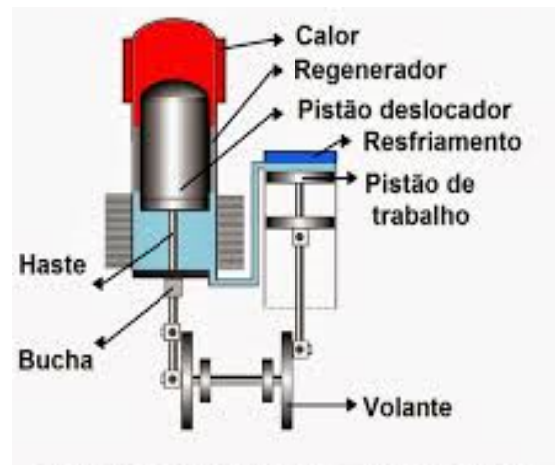
شکل ۷ بازیاب حرارتی به شکل حلقوی با شبکه سیم های بافته شده



شکل ۸ بازیاب حرارتی به شکل حلقوی با شبکه سیم های بافته شده



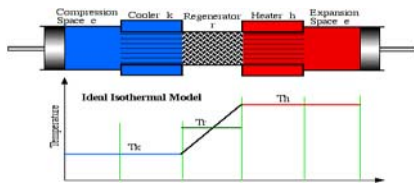
شکل ۳ موتور استرلینگ نوع بتا با بازیاب ثابت، (متعارف)



شکل ۴ موتور استرلینگ نوع گاما

مدل سازی ترمودینامیکی در تحلیل انجام شده بر اساس حرکت سیال از مسیر کانال بازیاب ثابت، میان محفظه های انبساط و تراکم بوده است، در چیدمان اجزاء موتورهای متعارف، بازیاب حرارتی در مسیر کنارگذر سیلندر اصلی قرار گرفته و مبدل های حرارتی، خنک کن و گرم کن در طرفین بازیاب قرار می گیرند، با اعمال تغییر در شکل قرارگیری اجزاء موتور، تحلیل ترمودینامیکی بر مبنای مشخصات هندسی جدید صورت می گیرد. هدف از تحقیق حاضر شبه سازی ترمودینامیکی موتور استرلینگ نوع بتا با تغییر در شکل قرارگیری بازیاب و استفاده از جایجا کننده، بعنوان بازیاب متحرک است. شکل ۵

قرارگیری بازیاب بر روی پیستون جایجایی، علاوه بر کوچک کردن اندازه موتور، باعث کاهش حجم مرده در موتور و حرکت سیال عامل از میان پیستون جدا کننده می شود.



شکل ۹ مدل ایزوترم موتور استرلینگ

جدول ۱ معادلات جرم و دما

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

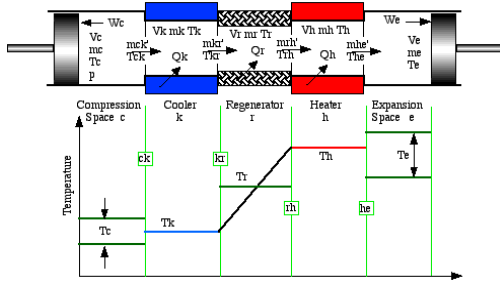
$$m = p V / R T \quad (2)$$

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

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

۲-۵- 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. شکل ۱۰، با استفاده از این مدل اهمیت بازیاب و نمودارهای مربوط به توان و راندمان، در زوایای مختلف لنگ قابل محاسبه است. جدول ۲، ۳، ۴



شکل ۱۰ مدل آدیاباتیک موتور استرلینگ

جدول ۲ معادلات جرم و تغییرات جرم

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

در طی نیمی از سیکل کاری موتور، بازیاب حرارتی مانند اسفنج حرارتی باعث جذب گرما از گاز عامل، در هنگام حرکت به سمت قسمت سرد موتور می شود و در نیمه دیگر سیکل، بازیاب، حرارت را به گاز عامل در هنگام حرکت به سمت قسمت گرم موتور، پس می دهد. با ذخیره سازی حرارت در بازیاب و کم شدن اتلاف حرارتی، راندمان موتور افزایش می یابد.

مدل سازی انجام شده در این تحقیق برای بازیاب حرارتی موتور استرلینگ نوع بتا با روش حل عددی در نرم افزار MATLAB انجام گرفته است. در این روش انرژی بازیابی شده نسبت به تغییرات طول، قطر، ضریب تخلخل و حجم مرده در بازیاب متحرک مورد بررسی قرار گرفته و برای هر بخش معادلات ترمودینامیکی آن استخراج و سپس در محل برخورد بازیاب با گرم کن و خنک کن، شروط مرزی مناسب برای حرکت سیال در داخل اجزاء، در نظر گرفته می شود. در نهایت معادلات بدست آمده برای موتور بتا با شکل جدید بازیاب حرارتی به روش عددی حل می شوند، و در پایان نتایج مقدار توان و راندمان خروجی بازیاب متحرک با نتایج مقدار توان و راندمان خروجی بازیاب متعارف موتور استرلینگ ساخت شرکت جنرال موتورز GPU3 مورد مقایسه قرار می گیرد.

برای آزمایش توانایی مدل سازی انجام شده نیاز به مشخصات قابل اعتماد ورودی است. برای این منظور از مشخصات دقیق موتور ساخت شرکت جنرال موتورز GPU3 استفاده شده است. جدول ۵، ۶، ۷.

۵- معادلات حاکم و روش حل

در این بخش مدل سازی ترمودینامیکی موتور به روش ایزوترم با استفاده از مدل اشمیت صورت می گیرد. مقادیر بدست آمده در این بخش بعنوان مقادیر اولیه در بخش دوم، یعنی مدل آدیاباتیک، مورد استفاده قرار می گیرد.

۵-۱- 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 خنک کن نگاه داشته می شود. چرخه ترمودینامیکی ایزو ترمال 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، (جدول ۱) و سپس با استفاده از معادلات انرژی و معادله حالت گاز کامل، معادلات مورد نیاز برای اندازه گیری میزان انتقال حرارت به موتور و کار انجام شده و در نهایت راندمان موتور بدست می آید.

شکل ۹

پیستون توان، المانی است که برای تبدیل انرژی گازی سیال عامل به کار مکانیکی استفاده می شود. این انتقال انرژی مستلزم این است که ساختار پیستون به اندازه کافی محکم و قوی باشد تا بتواند نیروهای گازی، مکانیکی و اینرسی که برای آن اعمال می شود را تحمل کند. اختلاف فشار بزرگی در دو طرف پیستون یعنی بین فضای کاری موتور و محفظه لنگ وجود دارد بنابراین پیستون کاملاً باید آب بند باشد تا جلو نشتی را بگیرد.

پیستون جابجا کننده المانی است که حرکت آن باعث جابجا شدن سیال عامل بین فضاهای گرم و سرد از طریق گرم کن، بازیاب و خنک کن در حجم ثابت می شود. جابجا کننده کاملاً برعکس پیستون می باشد چون اختلاف فشار بین دو سر آن صفر و اختلاف دمای آن زیاد می باشد. بنابراین یک جابجا کننده سبک و کم وزن ساخته می شود چون نیروهای فشاری و اینرسی کوچکی را تحمل می کند ولی در عین حال باید تلفات رسانایی حرارتی آن حداقل باشد.

جدول ۳ 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 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.

جدول ۴ معادلات انرژی و تغییرات حجم

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

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

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

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

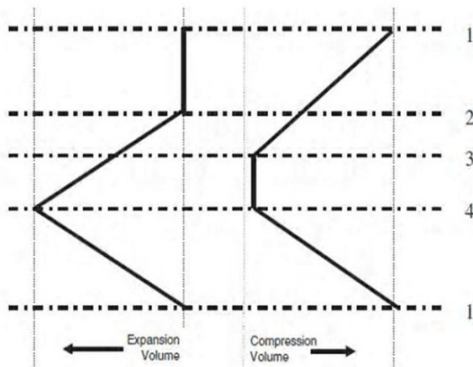
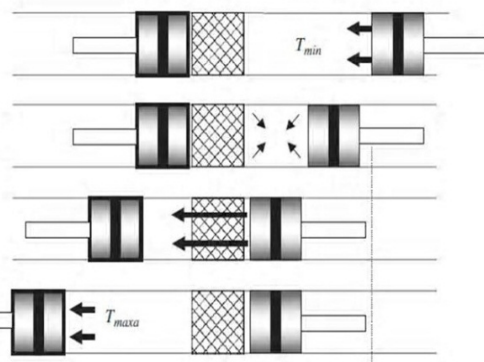
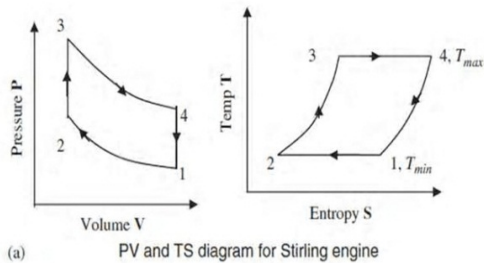
$$dWc = p dVc \quad (24)$$

۶- چرخه استرلینگ

چرخه ایده آل استرلینگ از بعضی جهات شبیه به چرخه کارنو می باشد. سیلندری را در نظر بگیرید که شامل دو پیستون در مقابل یکدیگر و یک بازیاب بین این دو پیستون ها باشد. یکی از دو حجم موجود بین بازیاب و پیستون ها، فضای انبساط نامیده می شود که در دمای بالای چرخه T_{max} نگه داشته می شود و حجم دیگر فضای تراکم نامیده می شود که در دمای پایین چرخه T_{min} نگه داشته می شود. (شکل ۱۱)، بنابراین یک گرایان دمایی $(T_{max} - T_{min})$ بین دو سر بازیاب وجود دارد و فرض می شود که هیچ رسانایی حرارتی در جهت طولی وجود ندارد و مانند چرخه کارنو فرض می شود که پیستون ها بدون اصطکاک یا تلفات حاصل از نشتی سیال عامل، حرکت می کنند. برای شروع چرخه، فرض می شود که پیستون فضای تراکم در نقطه مرگ بیرونی و پیستون فضای انبساط در نقطه مرگ داخلی یعنی چسبیده به بازیاب قرار دارد. بنابراین کل سیال عامل در فضای سرد تراکم قرار دارد. حجم در حداکثر مقدار خود می باشد و فشار و دما در کمترین مقدار خود می باشند. نقطه ۱ روی نمودارهای P-V، T-S بیانگر این حالت می باشد. طی فرایند تراکم (فرایند ۱→۲)، پیستون تراکم به سمت نقطه مرگ داخلی حرکت می کند و پیستون فضای انبساط ساکن باقی می ماند.

فرایند ۲→۳ با حرکت همزمان پیستون تراکم و به سمت بازیاب و دور شدن پیستون انبساط در طی فرایند حجم ثابت صورت می گیرد. در فرایند انبساط ۳→۴ پیستون انبساط به حرکت در جهت دور شدن از بازیاب یعنی به سمت نقطه مرگ بیرونی ادامه می دهد و پیستون تراکم در نقطه مرگ داخلی مجاور بازیاب، ساکن باقی می ماند. در طول فرایند انبساط با افزایش حجم فشار کاهش یافته و دما ثابت می ماند زیرا حرارت Q_{in} از یک منبع خارجی به سیستم اضافه می شود. فرایند نهایی در چرخه فرایند انتقال ۱→۴ می باشد که در طی آن هر دو پیستون به طور همزمان حرکت می کنند تا سیال عامل را در حجم ثابت از طریق ماتریس بازیاب از فضای انبساط به فضای تراکم بازگردانند. هنگام عبور از ماتریس حرارت از سیال عامل به ماتریس منتقل می شود. بنابراین دمای سیال عامل کاهش می یابد و با دمای T_{min} وارد فضای تراکم می شود. حرارت گرفته شده در این فرایند در ماتریس باقی می ماند تا در فرایند ۲→۳ مربوط به چرخه بعد به سیال عامل منتقل شود. شماتیک فرایندهای ۱ تا ۴ در نشان داده شده است.

المان های رفت و برگشتی در ساختار موتورهای استرلینگ، به دو دسته کلی تقسیم می شوند: پیستون توان و پیستون جابجا کننده.



شکل ۱۱ مدل آدیباتیک موتور استرلینگ

جدول ۵ پارامترهای هندسی موتور GPU3

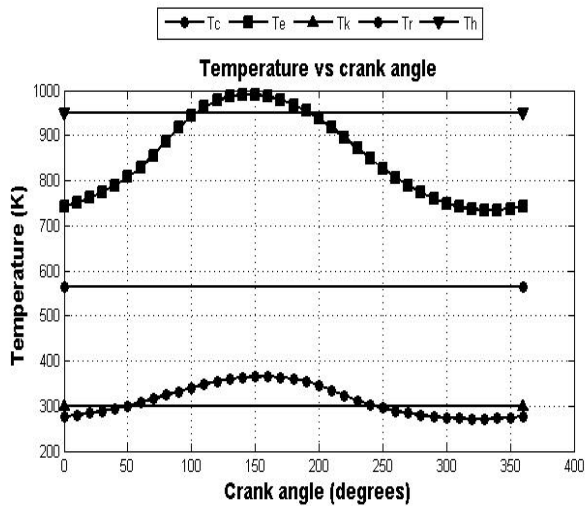
بازیاب		پیستون	
فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم		۲۸/۲۶ cm ³ بدنه بازیاب لوله‌ای شکل است که در آن سیم های فلزی بر روی هم انباشته شده است.	
۲۲/۶ mm	۶۵/۷ moving	۳۰/۵۲ cm ³ قطر	فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم
۲۲/۶ mm	۲۰ moving	۱۱۳/۱۴ cm ³ طول	حجم جاروب شده محفظه تراکم
۴۰ μm		۱۲۰/۸۲ cm ³ قطر سیم	حجم جاروب شده محفظه انبساط
۰/۶۹۷		۴۶/ mm تخلخل	طول میله اتصال دهنده (L)
۸		۲۰/۸ mm تعداد در هر سیلندر	خروج از مرکز (e)
۱۵ w/mk		۶۹/۹ mm ضریب هدایت حرارتی بازیاب	قطر پیستون توان (dp)
۵۰/۵۵ cm ³	۴۷/۱۶ moving	۶۹/ mm ضریب هدایت حرارتی بازیاب	قطر جابجایی (dd)
		۱۵ w/mk	هدایت حرارتی پیستون
		۴۶/ mm	کورس حرکتی پیستون
خنک‌کن		گرم کن	
مجموعه‌ای از لوله‌های همگن و صاف		۴۰ عدد	
۳۱۲		۳/۲۰ mm تعداد لوله‌ها برای هر سیلندر	۳/۰۰ moving قطر داخلی لوله
۴۶/۱ mm		۲۴/۵۳ mm قطر لوله‌ها	طول لوله
۴۶/۱ mm		۷۰/۸۸ cm ³ طول لوله	۶۹/۳۶ moving حجم مرده
۱۳/۶ cm ³	۱۳/۲ moving	حجم مرده	

جدول ۶ پارامترهای هندسی موتور GPU3

هلیوم	گاز عامل
۹۷۷ k	Th دمای منبع گرم (گرم کن)
۲۸۸ k	Tc دمای منبع سرد (خنک کن)
۴۱۳۰ kpa	فشار متوسط گاز عامل
۱/۰۳ گرم	جرم گاز عامل
۴۱/۷ هرتز	فرکانس عملکردی موتور

جدول ۷ سلول بازیاب با تخلخل و قطر متفاوت سیم

	قطر سیم (mm)	ضریب تخلخل بازیاب
M1	۰/۰۰۳۵	۰/۹۱۲۲
M2	۰/۰۰۶۵	۰/۸۳۵۹
M3	۰/۰۰۷	۰/۷۵۰۸
M4	۰/۰۰۷	۰/۷۲۲۱
M5	۰/۰۰۴	۰/۶۹۷۰
M6	۰/۰۰۸	۰/۶۶۵۵
M7	۰/۰۰۸	۰/۶۱۱۲

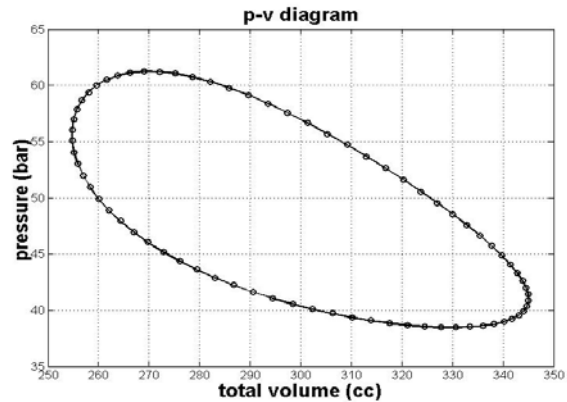


۷- بحث بر روی نتایج

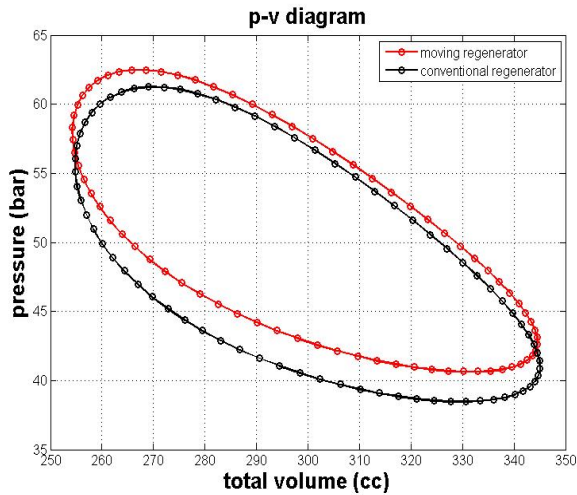
تغییرات فشار نسبت به حجم موتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سطح به دست آمده، میزان کار انجام شده توسط موتور در طی هر سیکل را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده با نمودار سیکل کارنو که از دو فرآیند حجم ثابت و دو فرآیند دما ثابت تشکیل شده است، تفاوت قابل توجهی دارد که ناشی از اعمال شرایط واقعی در کد عددی نسبت به نمودار ایده آل کارنو است. شکل ۱۳ تغییرات جرم گاز عامل را در داخل موتور، در طی سیکل، نشان می‌دهد. 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 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.

۸- آنالیز بازیاب متحرک و مقایسه آن با بازیاب متعارف

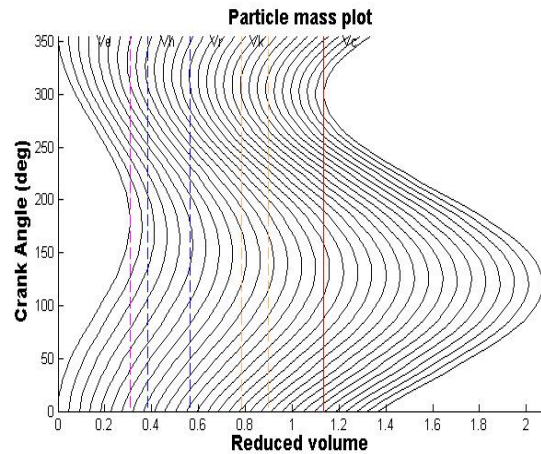
در این بخش بازیاب حرارتی، متحرک و آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود، بنابراین با توجه به پارامترهای هندسی جدول ۳،۲،۱، مجدداً موتور مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با بازیاب متعارف مقایسه می‌گردد. در شکل های ۱۵ و ۱۶، مقادیر مقایسه میان کار تولید شده در موتور استرلینگ با بازیاب متحرک و بازیاب متعارف و همچنین مقدار انرژی بازیابی شده در هر دو شکل بازیاب نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده موتور استرلینگ با بازیاب متحرک مقدار انرژی کمتری را بازیابی می‌کند.



شکل ۱۲ مقادیر فشار- حجم برای سیکل موتور با بازیاب متعارف



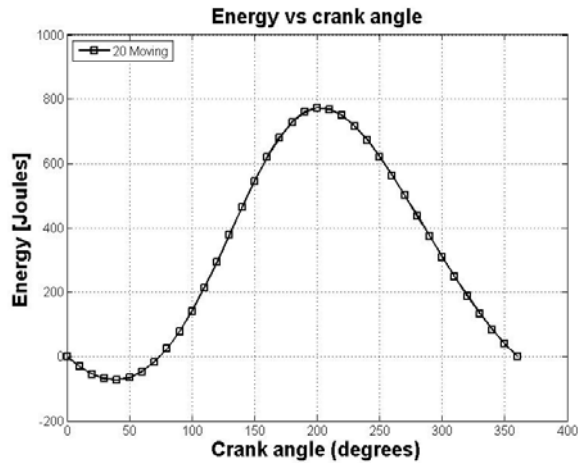
شکل ۱۵ مقایسه مقادیر کار انجام شده در بازیاب متحرک و متعارف (ثابت)



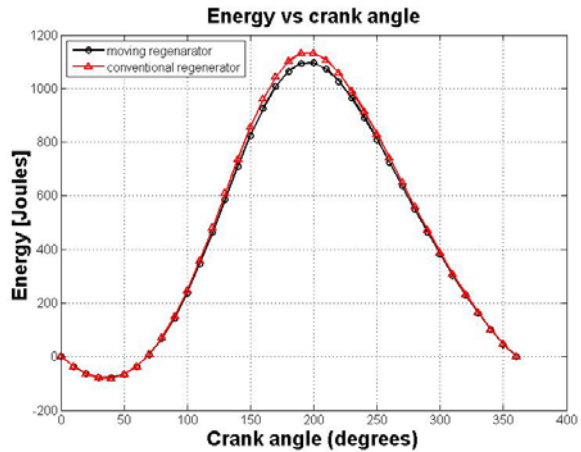
شکل ۱۳ تغییرات جریان عبوری در سلول‌های موتور با بازیاب متعارف

نوسانات دما در طی سیکل کاری موتور در محفظه انبساط و تراکم، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. درجه حرارت‌های ورودی برنامه در جدول شماره ۲ 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 ۱۴ تغییرات دما در سلول‌های موتور استرلینگ با بازیاب متعارف



شکل ۱۸ انرژی دریافتی ناشی از تغییر طول در بازیاب متحرک



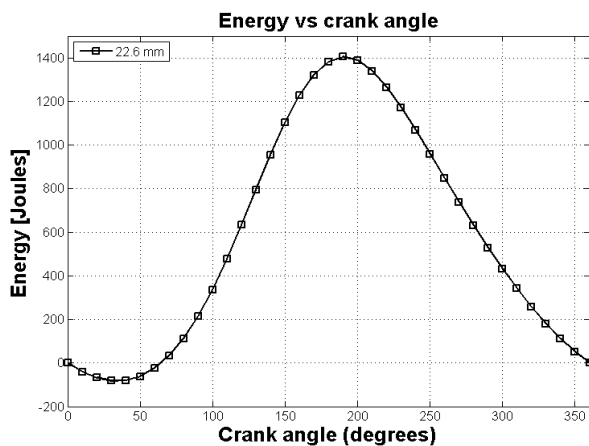
شکل ۱۶ مقایسه انرژی بازیابی شده در بازیاب متحرک و متعارف (ثابت) در موتور

۱۰- اثر قطر در بازیاب متحرک

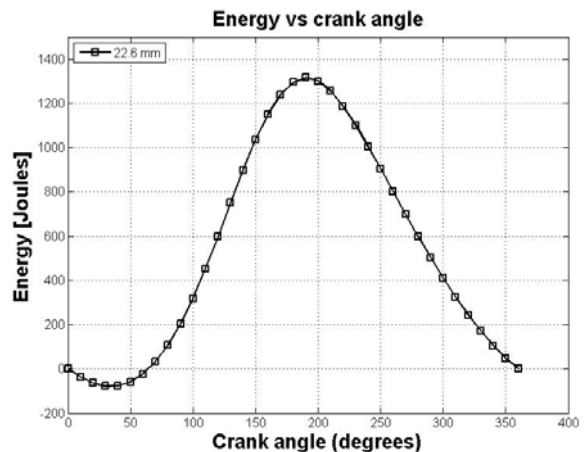
در شکل های ۱۹ و ۲۰، مقدار انرژی بازیابی شده در موتور استرلینگ با بازیاب متعارف (GPU-3) و بازیاب متحرک مقایسه شده است. براساس نتایج بدست آمده موتور استرلینگ با بازیاب متحرک، مقدار انرژی کمتری را بازیابی می کند، در مرحله اول علاوه بر افزایش قطر و کاهش تعداد بازیاب در هر سیلندر در بازیاب متحرک که باعث افزایش شدید راندمان در موتور می شود، پس از آن به لحاظ اقتصادی نمودن، در مصارف عمومی می تواند بخش کوچکی از نیاز موتورهای تولید توان در آینده را برطرف کند.

۹- اثر طول در بازیاب متحرک

در شکل های ۱۷ و ۱۸، مقدار انرژی بازیابی شده در موتور استرلینگ با بازیاب متعارف (GPU-3) و بازیاب متحرک مقایسه شده است. براساس نتایج بدست آمده موتور استرلینگ با بازیاب متحرک مقدار انرژی کمتری را بازیابی می کند، در مرحله اول علاوه بر کاهش طول بازیاب در بازیاب متحرک که باعث افزایش راندمان در موتور می شود، پس از آن به لحاظ اقتصادی نمودن، در مصارف عمومی می تواند بخش کوچکی از نیاز موتورهای تولید توان در آینده را برطرف کند.

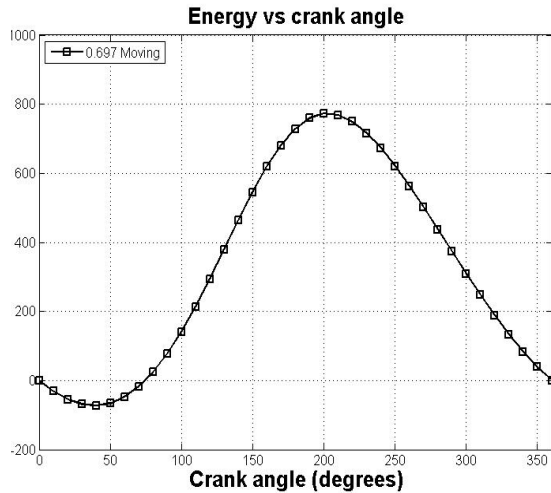


شکل ۱۹ انرژی دریافتی ناشی از قطر بازیاب متعارف در موتور GPU-3

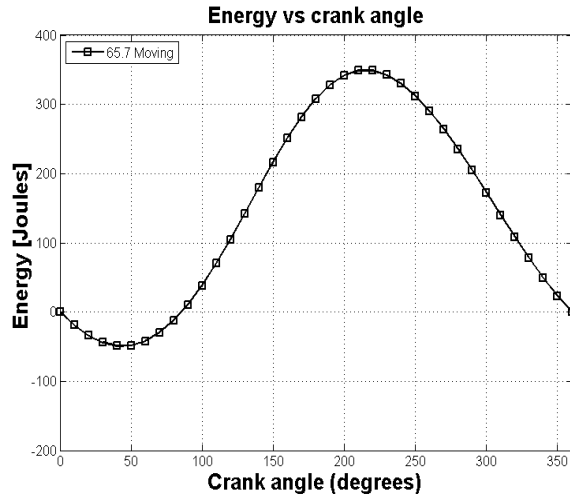


شکل ۱۷ انرژی دریافتی ناشی از طول بازیاب متعارف در موتور GPU-3

5.Regenerator standard
6.Regenerator moving
7.Diameter regenerator



شکل ۲۲ انرژی دریافتی ناشی از ضریب تخلخل در بازیاب متحرک



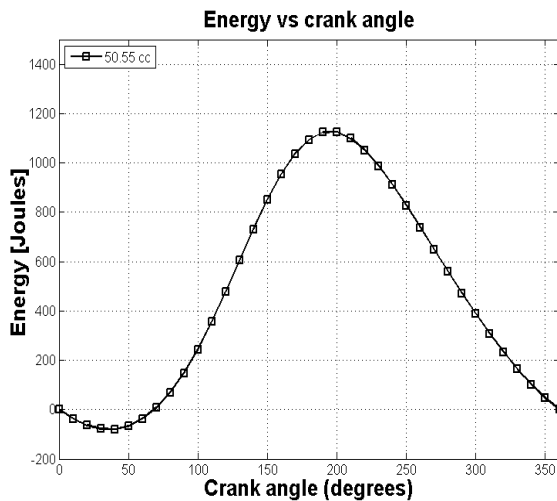
شکل ۲۰ انرژی دریافتی ناشی از تغییر قطر در بازیاب متحرک

۱۲- اثر حجم مرده بازیاب در بازیاب متحرک

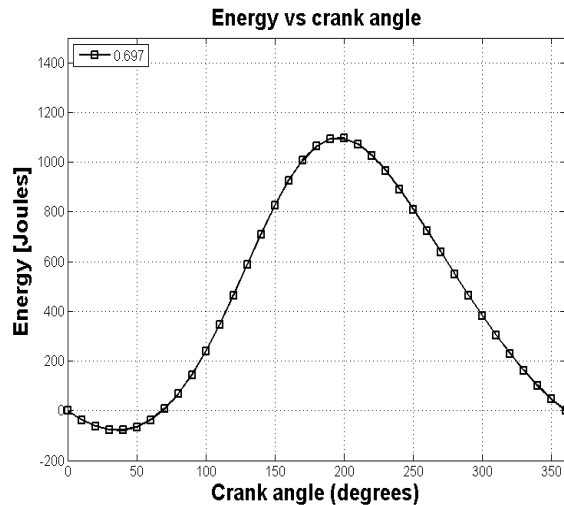
در شکل های ۲۳ و ۲۴، مقدار انرژی بازیابی شده در موتور استرلینگ با بازیاب متعارف (GPU-3) و بازیاب متحرک مقایسه شده است. براساس نتایج بدست آمده موتور استرلینگ با بازیاب متحرک مقدار انرژی کمتری را بازیابی می کند، در مرحله اول علاوه بر کاهش حجم مرده در بازیاب متحرک که باعث افزایش راندمان در موتور می شود، پس از آن به لحاظ اقتصادی نمودن، در مصارف عمومی می تواند بخش کوچکی از نیاز موتورهای تولید توان در آینده را برطرف کند.

۱۱- اثر ضریب تخلخل در بازیاب متحرک

در شکل های ۲۱ و ۲۲، مقدار انرژی بازیابی شده در موتور استرلینگ با بازیاب متعارف (GPU-3) و بازیاب متحرک مقایسه شده است. براساس نتایج بدست آمده موتور استرلینگ با بازیاب متحرک، مقدار انرژی کمتری را بازیابی می کند، در مرحله اول علاوه بر ثابت ماندن میزان تخلخل بازیاب که باعث افزایش راندمان در بازیاب متحرک موتور می شود، پس از آن به لحاظ اقتصادی نمودن، در مصارف عمومی می تواند بخش کوچکی از نیاز موتورهای تولید توان در آینده را برطرف کند.



شکل ۲۳ انرژی دریافتی ناشی از حجم مرده بازیاب متعارف در موتور GPU-3



شکل ۲۱ انرژی دریافتی ناشی از ضریب تخلخل بازیاب متعارف در موتور GPU-3

9. Dead volume regenerator
10. Porosity regenerator

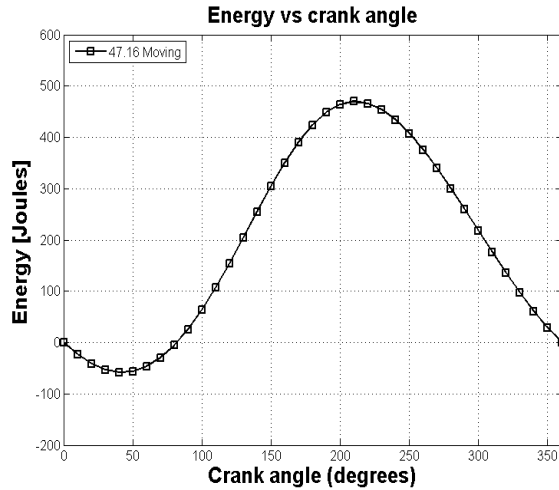
8. Length regenerator

۱۴- فهرست علائم

- 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⁻¹K⁻¹)
- Cv گرمای ویژه گاز در حجم ثابت (J/kg⁻¹K⁻¹)
- T دمای گاز (K)
- V حجم (m³)
- 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 بازیاب و گرم کن
- d جابجا کننده
- θ زاویه لنگ
- η راندمان حرارتی

۱۵- 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., Wongwisew 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 .
- [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.



شکل ۲۴ انرژی دریافتی ناشی از تغییر حجم مرده در بازیاب متحرک

۱۳- نتیجه گیری

در این تحقیق شبیه سازی موتور استرلینگ مدل بتا با تغییر در شکل بازیاب حرارتی، انجام شده است. در این طرح، گاز عامل از میان پیستون جابجایی عبور داده می شود بصورتیکه پیستون جابجایی، نقش جابجا کننده و بازیاب حرارتی را همزمان بر عهده دارد. شبیه سازی عددی ابتدا برای موتور استرلینگ نوع بتا در بازیاب متعارف (ثابت) انجام گرفته و در نهایت با تغییر در شکل بازیاب حرارتی و استفاده از بازیاب متحرک، نتایج حاصله مقایسه شده است.

مقایسه نتایج، مقادیر بیشتری از جذب انرژی حرارتی را در بازیاب متحرک در مقایسه با بازیاب متعارف (ثابت) نشان می دهد. جذب گرما از گاز عامل، باعث می شود تا حرارت کمتری در سرد کن موتور تلف شود و در نهایت با وجود نیاز به حرارت ورودی کمتر در عملکرد سیکل بعدی موتور، راندمان بالاتری تولید کند. جدول ۸.

همچنین به لحاظ اقتصادی بودن، در مصارف عمومی می تواند بخش کوچکی از نیاز موتورهای تولید توان در آینده را برطرف کند.

جدول ۸- نتایج بدست آمده بر راندمان و توان خروجی موتور در بازیاب متعارف و متحرک

راندمان (درصد)	توان (وات)	حرارت خروجی (وات)	حرارت ورودی (وات)	قطر بازیاب (میلیمتر)
۶۳/۵	۸۹۳۳/۰۲	۵۱۳۰/۶۶	۱۴۰۶۳/۸۵	بازیاب ثابت
۶۶/۲	۵۸۶۰/۲۱	۳۰۲۲/۸۳	۸۸۸۳/۰۵	بازیاب متحرک

- [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