

آنالیز ترمودینامیکی موتور استرلینگ نوع بتا و بهینه سازی بخش پیستون توان جهت

افزایش راندمان و توان خروجی

سید بهمن حسین زاده ساداتی^۱، هادی کارگر شریف آباد*^۲، نادر رهبر^۲

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

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

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

*سمنان، صندوق پستی ۱۷۹-۳۵۱۴۵، h.kargar@semnaniau.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله، توسعه یک مدل مناسب ترمودینامیکی برای موتور استرلینگ نوع بتا با تغییر شکل در پیستون توان جهت افزایش راندمان و توان خروجی می باشد. برای این منظور مدل سازی ترمودینامیکی در دو بخش انجام می پذیرد، در بخش اول مدلسازی ایزوترمال صورت گرفته و پس از آن با استفاده از نتایج این بخش مدلسازی عددی برای مدل هندسی به روش آدیاباتیکی صورت می پذیرد. در واقع نتایج بدست آمده از بخش اول (مدل سازی ایزوترمال)، بعنوان مقادیر اولیه بخش دوم (مدل سازی آدیاباتیکی)، استفاده می شود. مدل سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده و با تغییر در اندازه قطر پیستون، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و نیز راندمان موتور مقایسه گردیده و در نهایت نتایج بدست آمده با مقادیر منتشر شده، مقایسه شده است.

کلید واژگان

موتور استرلینگ، حل عددی، مدل آدیاباتیکی، پیستون توان

Thermodynamic analysis and optimization of the power piston Stirling engine beta can be used to increase the output power and efficiency

Syed Bahman Hosseinzadeh Sadati¹, Hadi Kargar^{2*}, Nader Rahbar²

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, h.kargar@semnaniau.ac.ir

Abstract

The purpose of this article is to develop a thermodynamic model appropriate to be piston Stirling engine beta-type deformation is to increase efficiency and output power. For this purpose, thermodynamic modeling is done in two parts, the first part was isothermal modeling and then using the results of numerical modeling to model the geometry of adiabatic method is performed. In fact, the results of the first part (modeling isothermal), as initial values of the second part (modeling adiabatic), is used. Modeling was performed using MATLAB software and by changing the diameter of the piston, the heat input, heat output and engine efficiency. The results obtained were compared with published values, compared.

Keyword: Stirling engine; Numerical simulation; Adiabatic model; Power Piston

چرخه کارنو را عملی می کند. به عنوان یک موتور احتراق خارجی که قادر به تولید حد اقل گازهای آلاینده و حداقل آلودگی صوتی (بدلیل عدم وجود احتراق متناوب و نداشتن سوپاپ) و بسیاری ویژگی های دیگر که در این مقاله به آنها اشاره خواهد شد، گزینه مناسبی برای جایگزینی به نظر می رسد.

موتور استرلینگ از نظر مکانیزم بسیار ساده و دارای گشتاور مناسب است و چنانچه به صورت معکوس به کار گرفته شود، جایگزین بسیار خوبی برای چرخه های تبرید نیز هست. موتور استرلینگ دارای کاربرد های زمینی به صورت ایستگاهی (نیروگاههای برق) و متحرک (اتومبیل) و کاربردهای پزشکی (قلب مصنوعی) می باشد. دسترسی آسان به منبع انرژی فراوان خورشیدی در فضاپیماها و نیز احتراق فلز در زیر دریایی ها امکانات منحصر

۱- مقدمه

توسعه جوامع شهری علاوه بر نیاز به منابع انرژی در صورت های مختلف از جمله انرژی الکتریکی، موجب افزایش روز افزون تعداد خودرو ها گردیده است. این در حالی است که محدودیت های سوخت های فسیلی بویژه نفت، موجب بالا رفتن قیمت این نوع سوخت ها شده و خطرات زیست محیطی ناشی از گاز های آلاینده و آلاینده ای صوتی، استفاده از موتور های احتراق داخلی را با مشکلاتی مواجه ساخته است.

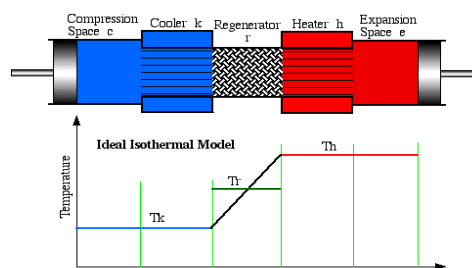
امروزه با توجه به محدودیت هایی که در امر بهسازی موتورهای بنزینی و دیزلی وجود دارد انگیزه زیادی برای پیدا کردن جایگزین مناسب در صنایع موتور سازی ایجاد شده است موتور استرلینگ که بر اساس دو فرایند حجم ثابت و دو فرایند دما ثابت از نظر ترمودینامیکی امکان دستیابی به بازده به

بفردی هستند که استفاده از موتور های استرلینگ را در این موارد توسعه داده است.

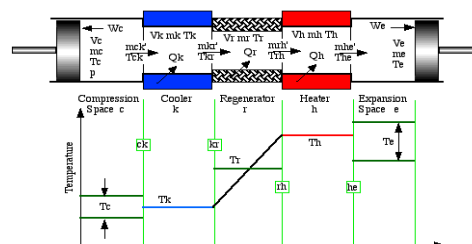
۲- مدل سازی ترمودینامیکی

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 و راندمان در پیستون توان با استفاده از کد عددی مشخص می گردد و نیز در این بخش شبیه سازی با استفاده از مدل ترمودینامیکی ایزوترم (شکل ۱)، و آدیباتیک (شکل ۲)، انجام خواهد شد. در پایان نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در خصوص پیستون توان در موتور ساخته شده توسط شرکت جنرال موتورز (GPU3) که مشخصات هندسی و عملکردی آن موجود است، مقایسه می شود. جدول ۵، ۶، ۷



شکل ۱ مدل ایزوترم موتور استرلینگ



شکل ۲ مدل آدیباتیک موتور استرلینگ

۳- معادلات حاکم و روش حل

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

۳-۱- 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 حرارت خنک کن نگه 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

جدول ۱ معادلات جرم و دما

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

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

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

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

۳-۲- آنالیز موتور استرلینگ در حالت آدیباتیک

برای حل در حالت آدیباتیک 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 آدیباتیک، می توان جزئیات رفتار تک تک قسمت های موتور را به دست آورد. با استفاده از این مدل نمودارهای مربوط به توان و راندمان، در زوایای مختلف لنگ قابل محاسبه است. جدول ۲، ۳، ۴

جدول ۲ معادلات جرم و تغییرات جرم

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

تنها به دما بستگی دارد بلکه علاوه بر آن به نسبت حجم جاروب شده ، $dWe = p dVe \quad (23)$

زاویه فاز و نسبت حجم مرده نیز بستگی دارد. $dWc = p dVc \quad (24)$

در چرخه آدیاباتیک راندمان حرارتی به یک تابع تبدیل خواهد شد که نه

جدول ۵ پارامترهای هندسی موتور GPU3

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

جدول ۶ پارامترهای هندسی موتور GPU3

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

جدول ۷ سلول بازیاب با تخلخل و قطر متفاوت سیم

ضریب تخلخل بازیاب	قطر سیم (mm)
۰/۹۱۲۲	۰/۰۰۳۵
۰/۸۳۵۹	۰/۰۰۶۵
۰/۷۵۰۸	۰/۰۰۷
۰/۷۲۲۱	۰/۰۰۷
۰/۶۹۷۰	۰/۰۰۴
۰/۶۶۵۵	۰/۰۰۸
۰/۶۱۱۲	۰/۰۰۸

۴- بحث بر روی نتایج

بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش قطر پیستون توان، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی افزایش می یابد در حالیکه راندمان موتور کاهش پیدا می کند. بر این اساس تا قطر ۳۰ میلیمتر توان و راندمان هر دو همزمان افزایش می یابند ولیکن بعد از قطر ۳۰ میلیمتر، راندمان سیر نزولی پیدا می کند. موتور با قطر پیستون ۳۰ میلیمتر راندمان بالایی دارد ولیکن توان کمی تولید می کند. شکل ۳ و ۴

۵- نتیجه گیری:

مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

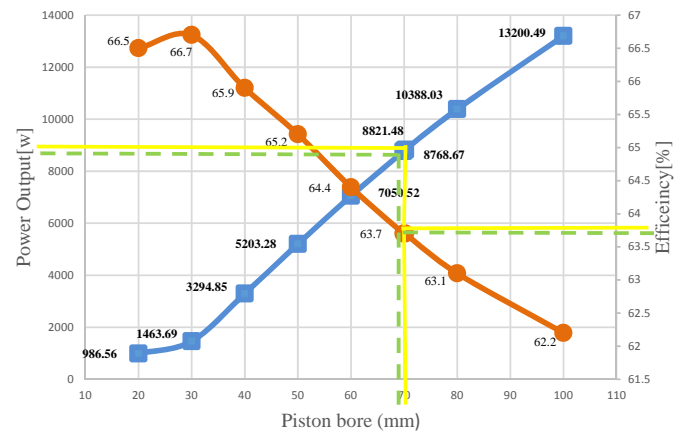
با افزایش قطر پیستون موتور، توان کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند. برای افزایش توان خروجی می بایست قطر پیستون توان از مقدار ۶۹/۹ میلیمتر به مقدار ۷۰/۲ میلیمتر افزایش یابد.

۶- فهرست علائم

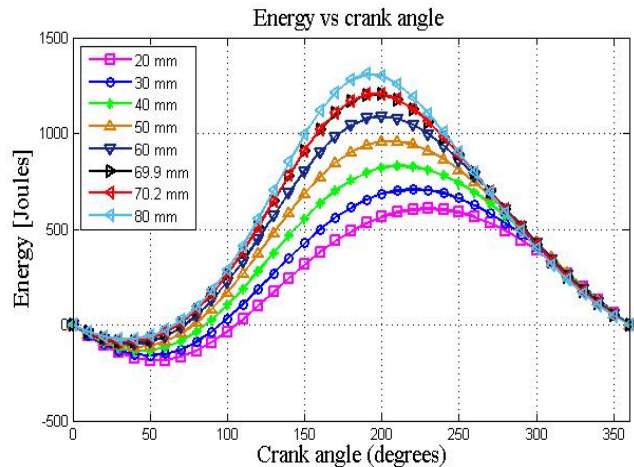
- e خروج از مرکز (m)
- m جرم گاز (kg)
- r شعاع لنگ (m)
- p فشار (pa)
- Cp گرمای ویژه گاز در فشار ثابت (J/kg·K⁻¹)
- Cv گرمای ویژه گاز در حجم ثابت (J/kg·K⁻¹)
- T دمای گاز (K)
- V حجم (m³)
- W کار انجام شده توسط سیال گاز (J)
- C فضای تراکم
- Ck تداخل تراکم و خنک کن
- Clc فضای خالی تراکم
- Cle فضای خالی انبساط
- he تداخل گرم کن و انبساط
- rh تداخل بازیاب و گرم کن
- d جایجا کننده
- θ زاویه لنگ
- η راندمان حرارتی

۷- مراجع

- [1] Finkelstein, 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.Dtsch.ing 15, part 1, 1871
- [4] Finkelstein, 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.



شکل ۳ تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر قطر پیستون توان



شکل ۴ تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر قطر پیستون توان

- [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 of endoreversible 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 and Losses Analysis 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.