



تحلیل ترمودینامیکی پارامترهای عملکردی ساختار جدید سه - سیلندر موتور استرلینگ

علی امارلو¹، علی کشاورز ولیان²، علیرضا بتویی³، سیامک علیزاده نیا⁴

1- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشجوی دکتری، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

4- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران

* تهران، صندوق پستی 19395-1999 keshavarz@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 مرداد 1395

پذیرش: 26 شهریور 1395

ارائه در سایت: 01 آبان 1395

کلید واژگان:

موتور استرلینگ

ساختار گاما

ساختار سه - سیلندر

تحلیل ترمودینامیکی

پارامترهای عملکردی

چکیده

ساختارهای هندسی زیادی برای موتورهای استرلینگ ارائه شده است که تفاوت آن‌ها در تعداد اجزا و نحوه قرار گرفتن آن‌ها در کنار یکدیگر است. در ساختار بتا و گاما، جابه‌جاکننده وظیفه‌ی جابه‌جایی سیال را بین منبع سرد و منبع گرم دارد و ساختار آلفا بدون آن، هندسه‌ی ساده‌تری دارد. از این‌رو در این پژوهش، یک ساختار جدید معرفی می‌شود که دو سیلندر و پیستون به جای جابه‌جاکننده جایگزین می‌شود و نتیجه آن یک ساختار جدید سه سیلندر است. گاما خواهد بود که همانند ساختار آلفا بدون جابه‌جاکننده، هندسه ساده‌تر و فرایند ساخت راحت‌تری خواهد داشت. برای بررسی نحوه‌ی عملکرد ساختار جدید، یک مدل شبیه‌سازی شده از یک موتور استرلینگ ساخته شده با ساختار گاما بر اساس ساختار جدید و هندسه‌ی موتور اس‌تی-500 تهیه شده است. مدل‌سازی در نرم‌افزار تحلیلی-صنعتی با نام جی‌تی-سویت انجام شده است. بیشترین خطا بین ساختار جدید و نتایج تجربی ساختار گاما، در حرارت مصرفی 20 درصد و در کار تولیدی 14.7 درصد است که با توجه تغییر هندسی ساختار، قابل قبول است و از این‌رو تحلیل ترمودینامیکی بر پارامترهای عملکردی ساختار جدید انجام شده است. نتایج این تحلیل علاوه بر تأیید ماهیت ساختار، نشان می‌دهد که افزایش سرعت دورانی موتور برای افزایش عملکرد موتور مناسب نیست و بازده موتور را کاهش می‌دهد اما افزایش دمای منبع گرم و فشار تغذیه اثر خوبی بر بازده داشته و برای بهبود عملکرد موتور پیشنهاد می‌شود.

Thermodynamic analysis of performance parameter of a novel 3 cylinder Stirling engine configuration

Ali Amarloo¹, Ali Keshavarz Valian^{1*}, Alireza Batooei¹, Siamak Alizade Nia²

1- Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran

* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, keshavarz@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 July 2016

Accepted 16 September 2016

Available Online 22 October 2016

Keywords:

Stirling Engine

Gamma configuration

3-Cylinder Configuration

Thermodynamic Analysis

Performance Parameters

ABSTRACT

Various configurations for Stirling engines have been presented. In Beta and Gamma type configurations, a displacer moves the working fluid between hot and cold sources. In the Alpha type there is no such part and it has a much simpler structure than the Beta and Gamma type. Therefore in this study, a novel configuration is introduced for Stirling engine where the displacer is replaced by two pistons and cylinders. With this replacement, the new configuration can be called 3-Cylinders Gamma configuration for Stirling engine. Similar to Alpha type engine, this configuration has a simpler structure and manufacturing process. For evaluation of new configuration, a simulated model of fabricated Gamma Stirling engine is prepared based on new configuration and geometry of ST-500 engine. The modeling is developed in GT-Suit software which is an industry-leading simulation tool. Maximum error between the experimental results and simulation of the new engine is about 20 percent for heat consumption and 14.7 percent for power generated. Thermodynamic analysis of performance parameters is done after the validation. The thermodynamic analysis results indicate that the increment of engine speed does not have appropriate effect on the performance and this led to engine efficiency reduction. On the other hand, increasing the pressure and hot source temperature led to improvement in engine performance and higher thermal efficiency.

1- مقدمه

مسائل زیست‌محیطی نیز بسیار مورد توجه هستند. از این‌رو تحقیقات و مطالعات علمی بر روی موتورهای استرلینگ در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

اولین موتور استرلینگ در سال 1816 میلادی توسط رابرت استرلینگ

[1] معرفی شد و پس از آن، امکان دست‌یابی به بازده‌ای برابر با بازده کارنو

موتورهای استرلینگ¹ موتورهای گرمایی برون‌سوزی هستند که در تئوری، بازده ترمودینامیکی خوبی از خود نشان داده‌اند. این موتورها به دلیل امکان استفاده از انواع مختلف منابع گرمایی و امکان کنترل میزان آلاینده‌ها از لحاظ

¹ Stirling

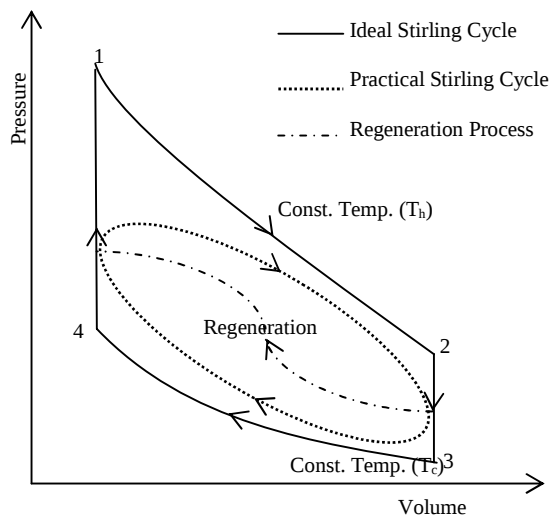


Fig. 1 The Stirling power thermodynamic cycle [2]

شکل 1 چرخه ترمودینامیکی تولید توان استرلینگ [2]

گرم است که جابه‌جاکننده در داخل آن سیال را بین سمت سرد و سمت گرم آن جابه‌جا می‌کند و محفظه دیگر یک سیلندر و پیستون معمولی برای تولید توان است. این سه ساختار در بخش معرفی ساختار جدید به تفصیل و به همراه طرح‌واره عملکرد آن‌ها توضیح داده شده‌اند. در میان این سه ساختار، نوع آلفا به دلیل ساختار ساده‌تر بیشتر مورد توجه و تحقیق قرار گرفته است اما نوع گاما به دلیل ساختار پیچیده‌تر موجود در جابه‌جاکننده، کم‌تر ساخته و مورد تحقیق واقع شده است. در این مطالعه، یک ساختار جدید برای موتورهای استرلینگ معرفی می‌شود که از نوع گاما الهام گرفته شده است و دارای سه سیلندر و پیستون است و در واقع از دو سیلندر و پیستون به جای جابه‌جاکننده استفاده شده است.

در زمینه تحلیل و مدل‌سازی موتور استرلینگ اولین تحلیل مربوط به اشمیت است که در سال 1871 انجام شد [3]، که در آن دمای محفظه‌ی تراکم با خنک‌کن و دمای محفظه‌ی انبساط و گرم‌کن برابر و ثابت در نظر گرفته می‌شود و به همین دلیل، تحلیل هم‌دمای نیز نامیده می‌شود. تحلیل بعدی که ارائه شد، توسط فینکلشتاین در سال 1960 میلادی بود [4] که در آن محفظه تراکم و انبساط به صورت بی‌دررو فرض شد و دما در طول موتور داخل حجم کنترل‌ها تغییر می‌کرد که با استفاده از معادله حالت گاز، بقای جرم و بقای انرژی به تحلیل موتور استرلینگ پرداخت و در دهه 1970 اولین تحلیل‌های عددی برای این چرخه ارائه شدند [5]. پس از آن حل‌های عددی به جای حل‌های تحلیلی مورد استقبال قرار گرفت و تاکنون نیز ادامه داشته است.

از جمله تحقیقات اخیر برای تحلیل موتور استرلینگ می‌توان به تحلیل ترمودینامیکی موتور نوع گامای توسط پارلاک و همکاران [6] اشاره نمود. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار برنامه‌نویسی فترن⁷ و پنج حجم کنترل و استخراج معادلات بقای جرم و انرژی به شبیه‌سازی رفتار ترمودینامیکی موتور نوع گاما پرداخته‌اند. چن و همکاران [7] یک موتور استرلینگ نوع بتا را ساخته و با مدل‌سازی عددی آن به تحلیل ترمودینامیکی و کارکردی پرداخته‌اند و اثر بازیاب و سرعت کاری را بر بازدهی خروجی موتور بررسی کرده‌اند. ضیابشرحق و محمودی [8] با استفاده از یک حل عددی با فرض

برای این موتور، بسیار مورد توجه قرار گرفت؛ اما در آن زمان به دلیل فناوری محدود ساخت، امکان دستیابی به این بازده را نداشت و از طرف دیگر رشد چشمگیر دیگر موتورهای شامل موتورهای احتراق داخلی و الکتریکی باعث شد تا در یک سده‌ی اخیر توسعه موتورهای استرلینگ سرعت بسیار کمی داشته باشد؛ اما در چند دهه‌ی اخیر به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و محدودیت در منابع فسیلی، این موتور که امکان استفاده از منابع برگشت‌پذیر مانند انرژی خورشیدی و زیست‌توده را دارد، دوباره به کانون توجه محققان برگشته است.

موتور استرلینگ، یک موتور گرمایی با منبع حرارت خارجی است که به صورت تئوری می‌تواند گرما را با بازده‌ای برابر با بازده کارنو به کار مکانیکی تبدیل کند. چرخه‌ی ترمودینامیکی ایده‌آل استرلینگ که در شکل 1 با خط پر دیده می‌شود، متشکل از چهار مرحله است [2]: انبساط در شرایط هم‌دمای (فرایند 1 به 2)، انتقال به محفظه سرد صورت حجم ثابت و جذب حرارت از سیال توسط بازیاب (فرایند 2 به 3)، تراکم در شرایط هم‌دمای (فرایند 3 به 4) و برگشت به محفظه گرم در حجم ثابت و جذب حرارت ذخیره شده در بازیاب (فرایند 4 به 1). در موتورهای استرلینگ دستیابی به این چرخه‌ی کاملاً ایده‌آل امکان‌پذیر نیست و فرایندهای ترمودینامیکی مربوط به موتورهای استرلینگ در شکل 1 به صورت نقطه‌چین نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود فرایندهای انتقال حرارت هم‌دمای، با اختلاف از فرایندهای ایده‌آل اتفاق می‌افتند که هرچه انتقال حرارت در گرم‌کن و خنک‌کن بهتر انجام شود این فرایند ترمودینامیکی به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر می‌شود. در مورد دو فرایند هم‌حجم که همان فرایندهای انتقال سیال عامل میان خنک‌کن و گرم‌کن است، به دلیل حرکت مداوم در موتور واقعی، فرایند حجم ثابتی صورت نمی‌گیرد و تنها در حجم بیشینه و کمینه، فرایند ایده‌آل و واقعی با هم اشتراک دارند. این موتور شامل پنج قسمت اصلی است که شامل محفظه‌ی انبساط، گرم‌کن، بازیاب، خنک‌کن و محفظه تراکم است. برای بیان نحوه‌ی کارکرد این موتور به طور ساده می‌توان گفت که برای تولید توان در محفظه انبساط سیال عامل از منبع گرمایش حرارت دریافت کرده و منبسط شده و در نتیجه تولید کار می‌کند و سپس توسط همین کار تولید شده، سیال به محفظه سرد منتقل می‌شود تا با دفع حرارت در خنک‌کن و تراکم در محفظه تراکم به حالت اولیه برگردد تا ماهیت چرخه‌ای آن حفظ شود.

نحوه جابه‌جایی سیال عامل بین محفظه تراکم و انبساط به هندسه‌ی موتور بستگی دارد که به چه صورت این پنج قسمت در کنار هم قرار گرفته‌اند. برای ساختار هندسی این موتور، هندسه‌های متفاوتی معرفی شده است که سه ساختار شناخته‌شده‌تر از بقیه هستند که شامل آلفا¹، بتا² و گاما³ می‌شود. همه‌ی آن‌ها بر اساس چرخه‌ی استرلینگ کار می‌کنند و در ادامه به ساختار هندسی هر کدام و تفاوت‌های آن‌ها به اختصار اشاره می‌شود.

ساختار آلفا دارای دو سیلندر⁴ و پیستون⁵ سرد و گرم است که سیال به وسیله پیستون‌ها بین این دو سیلندر جابه‌جا می‌شود اما ساختار بتا، یک سیلندر دو سر بسته دارد که طرفین آن سرد و گرم است و یک جابه‌جاکننده⁶ که اصطلاحاً جابه‌جاکننده نامیده می‌شود، در داخل آن و یک پیستون در انتهای آن قرار دارد که هم‌محور، حرکت می‌کند. ساختار گاما دو سیلندر دارد که یکی از آن‌ها دوطرف بسته است و یک سمت آن سرد و سمت دیگر

¹ Alpha

² Beta

³ Gamma

⁴ Cylinder

⁵ Piston

⁶ Displacer

⁷ Fortran

در این پژوهش برای بررسی ساختار جدید و مقایسه آن با یک ساختار نوع گاما که نزدیک ترین ساختار به این ساختار جدید است، از پارامترهای هندسی یک موتور استرلینگ گامای ساخته شده استفاده شده است. موتور اس-تی-500⁵ ساخته شده توسط مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو)⁶ [18] انتخاب شده است تا در این مدل سازی ساختار جدید مورد ارزیابی قرار بگیرد و پس از صحت گذاری بر ساختار جدید ارائه شده، تحلیل پارامترهای کارکردی این موتور انجام شود.

2- تئوری ها و مدل سازی

2-1- ساختارهای موتور استرلینگ

موتورهای استرلینگ بر اساس چرخه تولید توان استرلینگ کار می کنند که یکی از مزیت های مهم این موتور توانایی رسیدن به بازدهای برابر با بازده چرخه ایده آل کارنو است که رابطه (3) نشانگر چنین قابلیت است [2]. در طی سال های متمادی، همراه با پیشرفت تکنولوژی های ساخت، نزدیک شدن به این بازده ایده آل امکان پذیر شده است و همان گونه که بیان شد ساختارهای مختلفی از این موتور توسعه داده شده است. ساختارهای موجود را می توان در سه دسته طبقه بندی کرد. البته اصول ترمودینامیکی برای همه ساختارهای موتور استرلینگ یکسان است و تفاوت اساسی در بین آنها، نحوه ی قرار گرفتن اجزای مختلف این موتور، در کنار یکدیگر است [19].

$$q_{in} = RT_h \ln r = P_1 V_1 \ln r \quad (1)$$

$$w = R(T_h - T_c) \ln r \quad (2)$$

$$\eta = \frac{w}{q_{in}} = \left(1 - \frac{T_h}{T_c}\right) \times 100 \quad (3)$$

در روابط (3-1)، q_{in} میزان حرارت دریافتی و w کار تولیدی بر حسب ژول ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)، در یک چرخه از چرخه ی ایده آل استرلینگ است. R ثابت جهانی گازها و برابر با $8.314 \text{ kgm}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ است. T_h دمای منبع گرم و T_c دمای منبع سرد بر حسب کلوین (K) است. r نسبت تراکم موتور است که عبارت است از نسبت بیشترین حجم سیستم به کمترین حجم آن، P_1 و V_1 فشار و حجم مربوط به وضعیت 1 در شکل 1 است و به ترتیب بر حسب پاسکال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) و متر مکعب (m^3) هستند [2].

2-1-1- ساختار آلفا

ساختار نوع آلفا موتورهای استرلینگ دارای دو سیلندر مجزا برای فضاهای تراکم و انبساط بوده و در هر سیلندر یک پیستون قرار دارد. دو سیلندر مجزا به واسطه بازتاب حرارتی و لوله ی رابط، به هم متصل شده اند و دو پیستون دارای اختلاف زاویه ای فاز 90 درجه در حرکت رفت و برگشتی خود هستند که طرحواره آن را می توان در شکل 2 مشاهده کرد.

در این ساختار سیال عامل در سیلندر گرم به واسطه گرم کنی که بعد از آن قرار دارد حرارت داده شده و منبسط می شود و توان مکانیکی تولید می شود، سپس پیستون گرم به بالا و پیستون سرد به سمت پایین حرکت کرده و سیال به سیلندر سرد و خنک کن منتقل می شود. در این مرحله سیال عامل، متراکم شده و به حالت اولیه بازمی گردد تا با انتقال مجدد به محفظه گرم برای تولید دوباره توان مکانیکی آماده شود.

2-1-2- ساختار بتا

ساختار نوع بتا از ترکیب یک پیستون قدرت و یک جابجاکننده تشکیل شده

بازتاب غیر ایده آل و در نظر گرفتن افت های هیدرولیکی و حرارتی، مدل را برای یک موتور استرلینگ مدل بتا به نام GPU-3 تحلیل کرده اند.

تلیلی و همکاران [9] یک نوع خاص موتور نوع آلفا به نام یوک-راس¹ را به وسیله مدل سازی عددی شبیه سازی کرده اند و بازده خروجی این موتور را با نوع معمولی آلفا و گاما مقایسه کرده اند. جوزف و همکاران نیز موتور استرلینگ نوع گاما به اسم جنوا² را به صورت عددی مدل سازی و صحت گذاری کرده اند. عوامل مختلف در اتلافات این موتور را بررسی کرده و بررسی ویژه اتلافات و طراحی آن را در سیستم های تولید هم زمان آورده اند [10] و بر اساس مدل ارائه شده پارامترهای مختلف مؤثر بر کار ترمزی خروجی را برای یک طراحی بهینه بررسی کرده اند [11]. بابالهی و صیادی [12] نیز یک مدل حرارتی دیفرانسیلی به منظور شبیه سازی عملکرد حرارتی موتور استرلینگ ارائه کرده اند. در این مدل حرارتی به جای فرض های هم دما و آدیاباتیک، فرایند انبساط و تراکم به صورت پلی ترو پیک در نظر گرفته شده و مدل های حرارتی متفاوتی را در بازتاب در نظر گرفته اند. پارامترهای افت فشار و اتلاف حرارتی در بخش های مختلف موتور مورد بررسی قرار گرفته و بازتاب به عنوان مؤثرترین بخش در اتلافات حرارتی و کاری (افت فشار) بیان شده است. در تحقیقات گذشته انواع ساختارهای موتور استرلینگ شامل آلفا، بتا و گاما با مدل های ترمودینامیکی متفاوت شامل هم دما، بی دررو و غیره مورد بررسی قرار گرفته اند. بیشتر شبیه سازی های انجام شده برای بررسی اثر پارامترهای گوناگون ساختاری و عملکردی بر خروجی موتور بوده است و عموماً به صورت عددی (مانند برنامه نویسی در فرترن) انجام شده است؛ که به علت پیچیدگی در ساختار موتور و فرایندهای ترمودینامیکی، فرض های ساده کننده بسیاری در آنها دیده می شود. در این پژوهش با معرفی یک ساختار جدید برای طراحی ساده تر موتورهای استرلینگ نوع گاما، از یک نرم افزار تحلیل موتور خودرو استفاده شده است که محصول شرکت گاما تکنولوژی³ است و انحصاراً مربوط به تحلیل های سیالاتی و ترمودینامیکی خودرو و موتور است و از طرفی با توجه به شباهت ساختار جدید ارائه شده با ساختار موتورهای احتراق داخلی، استفاده از این نرم افزار می تواند گزینه بسیار مناسبی باشد. هدف این پژوهش بررسی میزان قابلیت کاردهی و نحوه عملکرد ساختار جدید در مقایسه با ساختار گامای موتور استرلینگ است؛ لذا صحت طرح و مدل ارائه شده توسط تحلیل های ترمودینامیکی توسط این نرم افزار مورد ارزیابی قرار می گیرد. اگرچه در این نرم افزار و شبیه سازی های انجام شده در این پژوهش تحلیل های سیالاتی همچون افت فشار نیز در نظر گرفته شده است.

این نرم افزار در زمینه شبیه سازی پروسه هایی که در خودرو و به خصوص موتور اتفاق می افتد، دارای ابزارهای کامل و دقیقی است و قابلیت اعتماد نرم افزار، در این موارد اثبات شده است. برای مثال فالون [13] با کمک این نرم افزار یک مدل سیستمی پویا از جریان تراکم پذیر داخل موتورهای احتراق داخلی را بررسی کرده است. سمین و همکاران [14] برای مدل سازی پایا و گذرای جریان گاز ورودی به موتور از این نرم افزار کمک گرفته اند. لازم به ذکر است که این نرم افزار پیش از این نیز در زمینه طراحی موتور استرلینگ نوع آلفا مورد استفاده قرار گرفته است و شرکت ماهله⁴ از آن برای طراحی یک موتور استرلینگ نوع آلفا با قدرت 25 کیلووات کمک گرفته است [15، 16]. بتویی و همکاران نیز از این نرم افزار برای تحلیل یک موتور استرلینگ آلفا برای احیای حرارت اتلافی خروجی اگزوز خودرو استفاده کرده اند [17].

¹ Yoke-Ross

² Genoa

³ Gamma Technology

⁴ MAHLE

⁵ ST-500

⁶ IPCO

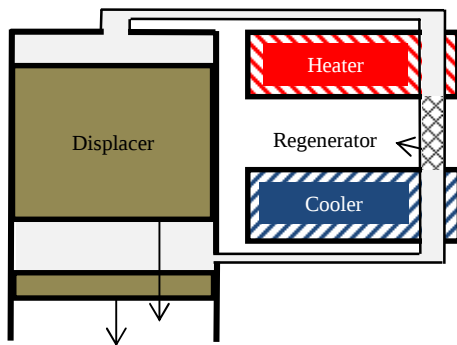


Fig. 3 The schematic of Beta type of Stirling configurations [19]

شکل 3 طرحواره موتور استرلینگ نوع بتا [19]

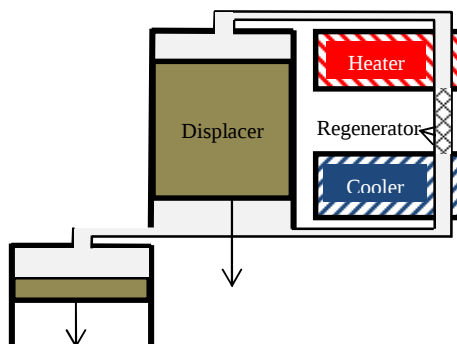


Fig. 4 The schematic of Beta type of Stirling configurations [19]

شکل 4 طرحواره موتور استرلینگ نوع گاما [19]

گاما پرداخته می‌شود.

2-2- ساختار جدید برای موتور استرلینگ

همان گونه که بیان شد یکی از قسمت‌های پیچیده در ساختار گاما که فرایند ساخت و تعمیر سخت‌تری دارد، قسمت بدنه سیلندر جابجاکننده است، زیرا خنک‌کن، بازیاب و گرم‌کن روی آن تعبیه شده و باید در اطراف مسیر حرکت جابجاکننده قرار بگیرند که برای رفع این مشکل و ساده‌تر کردن هندسه بدنه جابجاکننده، یک ساختار جدید برای جابجاکننده‌های موجود در موتورهای نوع گاما پیشنهاد می‌شود که این بخش از ساختار موتور توسط دو سیلندر و پیستون مطابق شکل 5 معادل‌سازی شده‌اند.

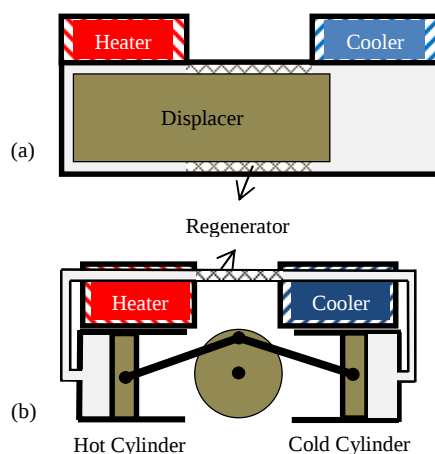


Fig. 5 The schematic conversion of Gamma and Beta configuration displacer (a) with two cylinders and pistons (b)

شکل 5 جایگزینی جابجاکننده ساختار گاما (a) با دو سیلندر و پیستون معادل (b)

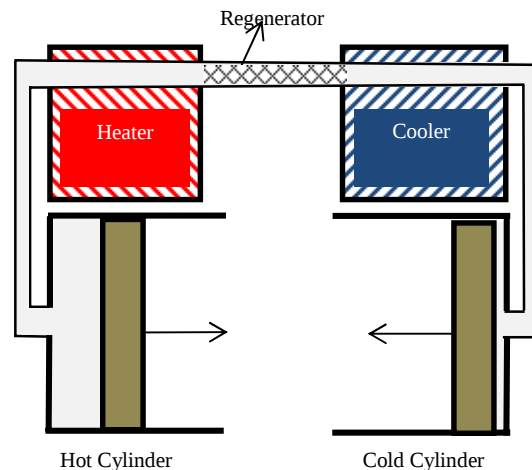


Fig. 2 The schematic of Alpha type of Stirling configurations [19]

شکل 2 طرحواره موتور استرلینگ نوع آلفا [19]

است. ساختمان آن به این گونه است که هر دو پیستون در یک سیلندر به صورت هم‌محور قرار گرفته‌اند و طرحواره آن را می‌توان در شکل 3 دید. جابجاکننده وظیفه جابه‌جایی سیال بین قسمت سرد و گرم این سیلندر را برعهده دارد و بازیاب در میانه سیلندر، بازیابی حرارت را در این جابه‌جایی سیال انجام می‌دهد. نحوه تولید توان مطابق با ساختاری که در شکل 3 مشاهده می‌شود به این صورت است که ابتدا جابجاکننده در پایین قرار دارد لذا سیال در قسمت بالا و در مجاورت گرم‌کن قرار گرفته و با دریافت حرارت منبسط می‌شود. این افزایش حجم پیستونی که در قسمت انتهایی موجود است جابه‌جا کرده و تولید توان مکانیکی صورت می‌گیرد. پس از آن با حرکت جابجاکننده به سمت بالا سیال عامل در قسمت پایین و در کنار منبع سرد قرار می‌گیرد و با از دست دادن حرارت، متراکم شده و پیستون تولید توان به محل اولیه خود بازمی‌گردد و موتور برای انجام یک چرخه دیگر در حالت اولیه قرار می‌گیرد.

3-1-2- ساختار گاما

موتور استرلینگ با ساختار گاما همانند موتور با ساختار بتا دارای ترکیب یک پیستون تولید توان و یک سیلندر شامل جابجاکننده است اما در این ساختار، پیستون قدرت و جابجاکننده در دو سیلندر مجزا قرار دارند و هم‌محور نیستند. بین حرکت رفت و برگشتی پیستون قدرت و جابجاکننده اختلاف زاویه‌ای فاز 90 درجه وجود دارد تا فرایندی مشابه با فرایندی که در ساختار بتا توضیح داده شد، انجام شود. طرحواره‌ی این ساختار را در شکل 4 می‌توان مشاهده کرد.

همان گونه که در شکل 2 تا شکل 4 می‌توان مقایسه کرد وجود جابجاکننده با حرکت خطی و شرایط دمایی متفاوت بر روی آن نحوه ساخت ساختار بتا و گاما را نسبت به نوع آلفا پیچیده‌تر و سخت‌تر می‌کند.

در این پژوهش با الهام از جابجاکننده ساختار موتور استرلینگ نوع بتا و گاما، ساختار جدیدی برای موتورهای استرلینگ ارائه می‌شود که با وجود تفاوت‌های ساختاری آن، بیشترین شباهت را به ساختار نوع گاما دارد اما پیچیدگی‌های وجود جابجاکننده دیگر وجود ندارد در نتیجه امکان ساخت آن‌ها را راحت‌تر می‌کند. پس از معرفی ساختار جدید موتور استرلینگ به نحوه‌ی کارکرد آن و ارزیابی سازوکار آن در مقایسه با موتور استرلینگ نوع

اطلاعات کافی با همکاری مرکز تحقیقات، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) و مشاهده و تشریح کامل موتور، به دست آمد.

در [17] جزییات فرض‌ها و نحوه محاسبات در نرم‌افزار جی تی - سویت² ذکر شده است اما در مورد مدل‌سازی ساختار جدید سه-سیلندر لازم به ذکر است که دقیقاً مطابق با شکل 6 سه سیلندر و پیستون، یک میل‌لنگ و لوله‌هایی با شرایط دمایی متفاوت و شرایط هندسی منطبق با جزییاتی که در جدول 1 آمده است، در کنار یکدیگر قرار داده و با اعمال شرایط کاری، دما، فشار و جنس سیال عامل به‌عنوان شرایط اولیه‌ی سیال داخل اجزای موتور، مدل‌سازی تکمیل شده است.

تمامی شبیه‌سازی‌ها با شرط سرعت ثابت انجام شده‌اند. به این معنا که محاسبات به نحوی صورت می‌گیرد که تحت هر شرایطی سرعت چرخش میل‌لنگ ثابت بوده و توان خروجی متغیر است و در صورتی که موتور توانی تولید نکند، توان خروجی منفی (به معنای مصرف توان) خواهد بود.

در شکل 8 تمایزی از نحوه مدل‌سازی ساختار جدید در محیط نرم‌افزار مشاهده می‌شود. با مقایسه شکل 6 و شکل 8 نحوه‌ی مدل‌سازی کاملاً مشخص است که سه سیلندر با شرایط دمایی و هندسی که در جدول 1 آمده است به یک میل‌لنگ متصل شده‌اند که در آن اختلاف فاز زاویه‌ای حرکت سه

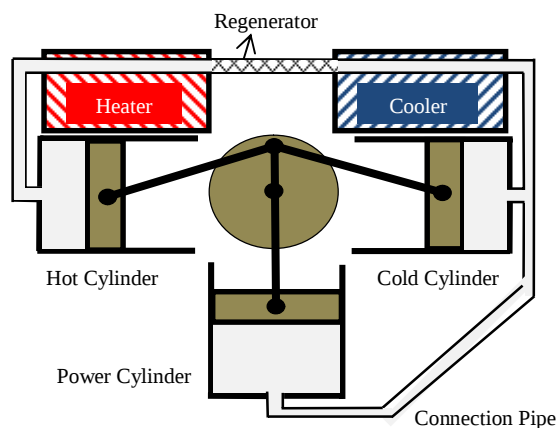


Fig. 6 The schematic of new configuration of Stirling engines as 3-Cylinder Gamma configuration

شکل 6 شماتیک ساختار جدید موتور استرلینگ تحت عنوان ساختار گامای سه-سیلندر

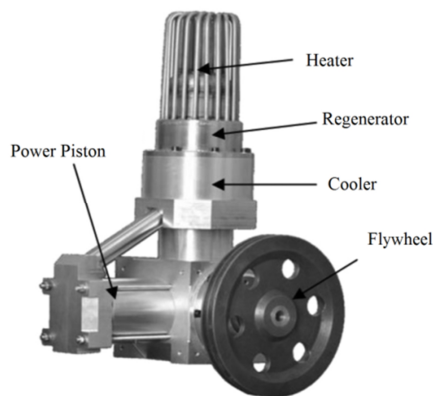


Fig. 7 Picture of ST-500 Stirling engine fabricated by IPCO [18]

شکل 7 تصویری از موتور اس تی-500 ساخته شده توسط ایپکو [18]

در ساختار آلفا، تنها دو سیلندر و پیستون وجود دارد که با اختلاف فاز حرکت دورانی 90 درجه، هر دو وظیفه‌ی تولید توان و جابه‌جایی سیال بین منبع سرد و گرم را انجام می‌دهند. در ساختار گاما جابه‌جاکننده صرفاً سیال عامل را بین منبع سرد و گرم جابه‌جا می‌کند و نقشی در تولید و مصرف توان ندارد؛ سیلندر و پیستون قدرت وظیفه تولید توان را دارا است. در ساختار جدید نیز سه سیلندر و پیستون موجود است که دو عدد آن‌ها با اختلاف فاز حرکت دورانی 180 درجه، صرفاً وظیفه جابه‌جایی سیال را دارند و سیلندر و پیستون سوم مشابه با سیلندر و پیستون قدرت در ساختار گاما، وظیفه تولید توان را دارد. از این‌رو ساختار جدید شباهت بسیار زیادی با ساختار گاما دارد و تنها تفاوت‌های کوچکی میان آن‌ها وجود دارد که در بخش ارزیابی ساختار جدید، به تفصیل به این تفاوت اشاره شده است.

این تغییر ساختار به این‌گونه است که حرکت جابه‌جاکننده و شرایط دمایی اطراف آن، توسط دو سیلندر و پیستون معمولی با اختلاف زاویه‌ای فاز حرکتی 180 درجه با شرایط دمایی متفاوت در لوله‌ی متصل‌کننده آن دو، معادل شده است با این معادل‌سازی، می‌توان با اضافه کردن سیلندر و پیستون سوم به‌عنوان سیلندر و پیستون قدرت که با حرکت رفت و برگشتی پیستون جابه‌جاکننده 90 درجه اختلاف فاز زاویه‌ای دارد، موتور استرلینگ را با ساختار جدید سه سیلندر تکمیل کرد که در شکل 6 طرح‌واره موتور کامل استرلینگ به‌عنوان یک موتور استرلینگ با ساختار سه‌سیلندر مشاهده می‌شود.

تفاوتی که بین این ساختار جدید با ساختار نوع گاما وجود دارد که دیگر نمی‌توان این ساختار را گاما نامید در جایگزینی جابه‌جاکننده با دو سیلندر و پیستون است که در موتور گاما طول آن ثابت است و عملاً با جابه‌جایی آن تغییر حجمی رخ نمی‌دهد و مجموع حجم محفظه‌های تراکم و انبساط ثابت است اما در ساختار جدید طول جابه‌جاکننده یا به عبارت دیگر مجموع حجم محفظه‌های تراکم و انبساط ثابت نیست و در طول یک چرخه تغییر می‌کند. همان‌گونه که در شکل 6 مشاهده می‌شود، برای ساخت این ساختار جدید موتور استرلینگ تنها سه سیلندر و پیستون معمولی که در انواع کمپرسورها و موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود و چند مبدل حرارتی نیاز است. برای ارزیابی ساختار جدید و تفاوت آن با ساختار گاما بهترین روش ساخت موتور استرلینگ با این ساختار جدید است اما با توجه به سختی‌های فرایند ساخت و هزینه‌بر بودن آن، در این پژوهش از یک نرم‌افزار تحلیل خودرو و موتور که کاملاً امکان بررسی این نوع موتورها را دارد، استفاده می‌شود.

2-3- مدل‌سازی موتور اس تی-500

برای مدل‌سازی این ساختار جدید ارائه شده‌ی موتور استرلینگ، با توجه به الهام آن از موتور نوع گاما، پیش‌بینی می‌شود که نزدیک‌ترین شباهت را به ساختار گاما داشته باشد. از این‌رو نیاز است که برای مدل‌سازی این ساختار جدید در نرم‌افزار، از مشخصات هندسی یک موتور گامای ساخته شده با ساختار گاما استفاده کرد تا مدل‌سازی آن با ساختار جدید انجام شود و با ارزیابی نتایج حاصله، نحوه کارکرد ساختار جدید بررسی شود. از این‌رو، موتور اس تی-500 [18] که نمونه ساخته شده از موتور اصلاح شده‌ی فیباخ¹ در واحد استرلینگ مرکز تحقیقات، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) است، انتخاب شد تا با ساختار سه سیلندر پیشنهادی مدل‌سازی شود. در شکل 7 تصویری از این موتور مشاهده می‌شود. برای تکمیل مدل در نرم‌افزار

² GT-Suite

¹ Viebach

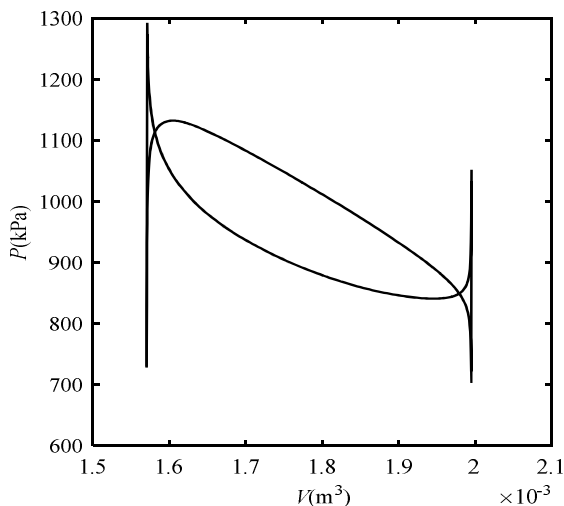


Fig. 10 The P-V diagram of new presented structure model based on introduced equivalent pressure

شکل 10 نمودار تغییرات فشار معادل تعریف شده بر حسب حجم کل موتور برای ساختار جدید ارائه شده

شکل 10 نشان می‌دهد که ساختار جدیدی که با الهام از ساختار گامای موتورهای استرلینگ ارائه شده است دارای کارکرد قابل قبول و انطباق قابل توجهی است به طوری که علاوه بر پیروی از چرخه تئوری استرلینگ (مقایسه‌ی شکل 1 و شکل 10)، تطابق بسیار مناسبی نیز با آزمایش تجربی که بر روی موتور اس-تی-500 شده است، مشاهده می‌شود (شکل 9). از طرفی خروجی کار موتور نیز حدود 459 وات بوده که با کار خروجی بیان شده در مرجع [18] حدود 15 درصد خطا دارد که با توجه به تغییر ساختار موتور و تفاوت بنیادی مذکور این خطا قابل چشم‌پوشی است. برای سه فشار مطابق جدول 2 خطاهای مدل‌سازی ساختار جدید بیان شده است.

2-2-3- تحلیل کارکردی

با توجه به نتایج ذکر شده جهت صحت‌گذاری، می‌توان ادعا کرد که ساختار جدید سه سیلندر برای موتور استرلینگ، کارایی قابل قبولی دارد و از آن می‌توان برای ساخت و طراحی ساده‌تر این موتور استفاده کرد. از این رو تغییرات خروجی موتور با توجه به شرایط کاری مانند فشار تغذیه، سرعت کاری موتور و دماهای منبع سرد و گرم می‌تواند در طراحی یک موتور با بازده بالاتر بسیار مفید باشد.

2-2-3-1 اثر سرعت کاری

همان‌طور که در شکل 11 می‌توان دید، تغییرات حرارت مصرفی با افزایش سرعت موتور افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش سرعت در هر واحد زمانی تعداد چرخه‌های بیشتری اتفاق می‌افتد لذا توقع می‌رود که افزایش حرارت مصرفی با سرعت تقریباً به صورت خطی باشد که این گونه نیز هست و همچنین به همین دلیل توقع می‌رود که میزان کار تولیدی نیز با افزایش سرعت به صورت خطی افزایش یابد اما همان‌گونه در شکل 12 دیده می‌شود در سرعت‌های کم این اتفاق می‌افتد اما با افزایش سرعت این روند افزایشی کمتر می‌شود تا اینکه از سرعتی به بعد، تغییرات کار کاهشی خواهد بود.

تغییراتی که در شکل 12 مشاهده می‌شود، می‌تواند به علت افزایش کار اصطکاکی موتور با افزایش سرعت باشد. لذا در شکل 13 کار خروجی بدون اتلافات اصطکاکی موتور نشان داده شده است که باز هم رفتاری مشابه در آن مشاهده می‌شود. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که روند سهمی‌وار کار

جدول 2 مقایسه مقادیر کار ترمزی و حرارت مصرفی موتور اس-تی-500، بین مقادیر تجربی و مقادیر شبیه‌سازی ساختار جدید سه سیلندر موتور استرلینگ

Table 2 Comparison of heat Consumption and brake power between experimental data and simulation of new 3-cylinder configuration

پارامتر	مورد 1	مورد 2	مورد 3
فشار تغذیه (kPa)	8100	6200	4600
حرارت مصرفی - شبیه‌سازی (kW)	3.205	2.589	2.193
حرارت مصرفی - شبیه‌سازی (kW)	3.340	2.860	2.755
حرارت مصرفی - خطا (%)	4	9.4	20
کار ترمزی - شبیه‌سازی (kW)	0.459	0.346	0.203
کار ترمزی - تجربی (kW)	0.400	0.343	0.235
کار ترمزی - خطا (%)	14.7	0.8	13.6

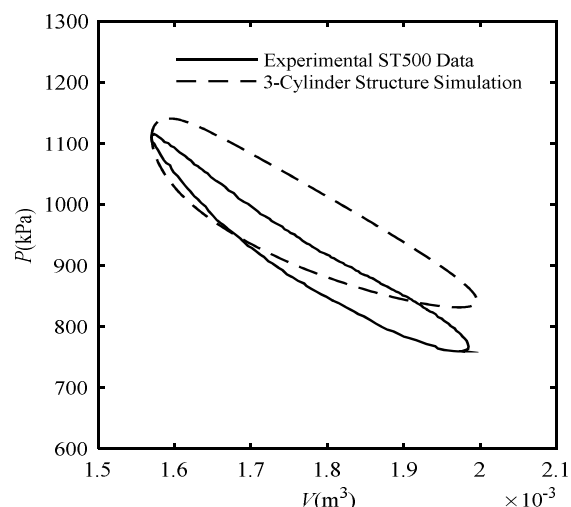


Fig. 9 The P-V diagram of new presented structure model in comparison of experimental data of ST-500 (based on power piston pressure)

شکل 9 نمودار تغییرات فشار بر حسب حجم ساختار ارائه شده در مقایسه با داده‌های آزمایش تجربی موتور اس-تی-500 (بر اساس فشار سیلندر قدرت)

استفاده می‌شود. بیشترین اختلاف برابر با 156 کیلو پاسکال است و نسبت به فشار تغذیه (800 کیلو پاسکال) 19.5% خطا دارد که با توجه به تفاوت بنیادی مذکور قابل قبول است.

از سوی دیگر به همین دلیل نمی‌توان برای رسم نمودار فشار-حجم چرخه موجود در ساختار جدید تنها از فشار سیلندر قدرت استفاده کرد به همین دلیل با توجه به رابطه (1) می‌توان یک فشار معادل تعریف کرد تا بتوان نمودار فشار-حجم ساختار جدید را رسم کرد؛ که رابطه (6) این فشار معادل را تعریف می‌کند.

$$dw = P_e dV_{total} \rightarrow P_e = \frac{dw}{dV_{total}} = \frac{P_{exp}dV_{exp} + P_{comp}dV_{comp} + P_{pst}dV_{pst}}{dV_{total}} \quad (6)$$

در رابطه‌ی (6)، P_e نشانگر فشار معادلی است که برای هر لحظه تعریف شده است و بر حسب پاسکال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) است.

با تعریفی که در رابطه (6) آمده است، برآیند کار تولیدی توسط سه سیلندر حساب شده و با تقسیم بر تغییر حجم کل سیستم، فشار معادل به دست می‌آید. شکل 10 نمودار تغییرات فشار معادل با حجم را نشان می‌دهد و همان‌گونه که دیده می‌شود چرخه مشابه با شکل 1 و نمودار فشار-حجم موتور اس-تی-500 در شکل 9، از چرخه‌ی استرلینگ پیروی می‌کند.

ترمزی، فقط مربوط به افزایش کار اصطکاکی نیست. علت دیگر، ماهیت رفت و برگشتی بودن سیال در این موتور است که در فرکانسهای بالا سیال زمان کافی برای انبساط ندارد و باعث می‌شود که کار تولیدی کاهش یابد. لذا می‌توان گفت افزایش سرعت تا حدی قابل قبول است و پس از آن باعث کاهش کار تولیدی می‌شود. در شکل 14 هم بازده خروجی موتور با افزایش سرعت رسم شده است که با توجه به تغییرات حرارت دریافتی و کار تولیدی، توقع می‌رود که با افزایش سرعت، بازده کاهش یابد. با توجه به شیب تقریباً ثابت کاهش بازده در شکل 14 به طور میانگین با افزایش 100 واحدی سرعت بر حسب دوربر دقیقه، 0.997 درصد (تقریباً 1%) بازده موتور کاهش می‌یابد.

3-2-2- اثر فشار تغذیه

تحلیلی مشابه بر روی پارامترهای خروجی با افزایش فشار انجام شده است. شکل 15 تغییرات حرارت مصرفی را با افزایش فشار تغذیه نشان می‌دهد که روندی صعودی دارد. این تغییرات با توجه به رابطه (1) که در تحلیل چرخه ایده‌آل استرلینگ به دست آمده است، نشان می‌دهد که حرارت مصرفی با افزایش فشار کاری به صورت خطی افزایش می‌یابد. شکل 16 این افزایش تقریباً خطی کار تولیدی موتور را نسبت به افزایش فشار نشان می‌دهد.

شکل 17 که نمایشگر تغییرات بازدهی موتور با افزایش فشار است، نشان‌دهنده این موضوع است که افزایش کار تولیدی از حرارت مصرفی بیشتر بوده و با افزایش فشار، بازده نیز افزایش می‌یابد. البته با توجه به رابطه (3) در چرخه‌ی استرلینگ ایده‌آل، بازده حرارتی موتور به سرعت و فشار وابستگی ندارد اما در شکل 14 نشان داده شد که در واقعیت موتور استرلینگ در سرعت‌های پایین‌تر خروجی بهتر نشان داده و کارایی موتور به سرعت وابستگی زیادی دارد که می‌توان برای این نحوه‌ی رفتار موتور با تغییرات سرعت گفت که با افزایش سرعت کاری موتور، سرعت انتقال سیال عامل بین بخش‌های متفاوت موتور بیشتر می‌شود و عملاً زمان موجود برای انجام فرایند ترمودینامیکی همچون انتقال حرارت، انبساط و تولید توان کاهش می‌یابد و کاهش بازده را به دنبال دارد.

در مورد فشار نیز شکل 17 نشان می‌دهد که فشار تأثیر زیادی همچون سرعت بر بازده ندارد بلکه در فشارهای بالا به یک بازدهی مشخص میل می‌کند و در فشارهای پایین بازدهی کمتری دارد. به طور میانگین با افزایش

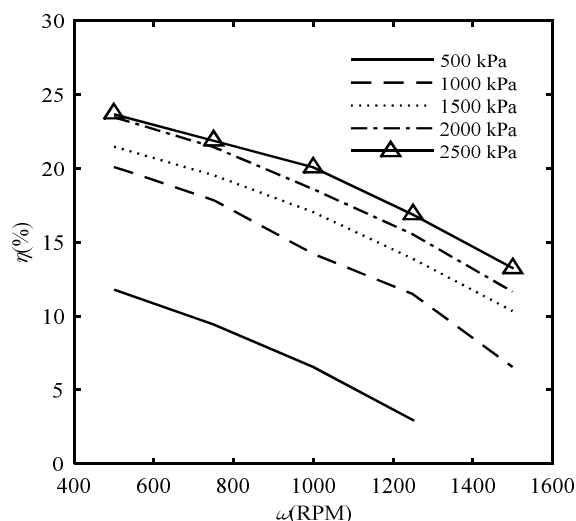


Fig. 14 Efficiency of Stirling engine versus its speed in constant pressure

شکل 14 تغییرات بازده خروجی موتور با افزایش سرعت در فشارهای متفاوت

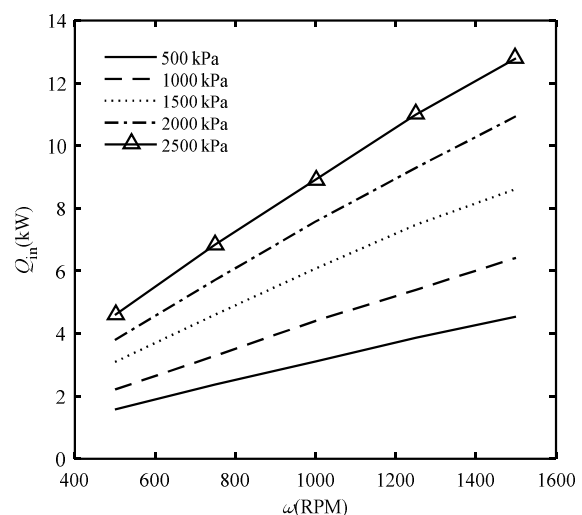


Fig. 11 Heat consumption versus its speed in constant pressure

شکل 11 نمودار تغییرات حرارت مصرفی موتور با افزایش سرعت در فشار ثابت

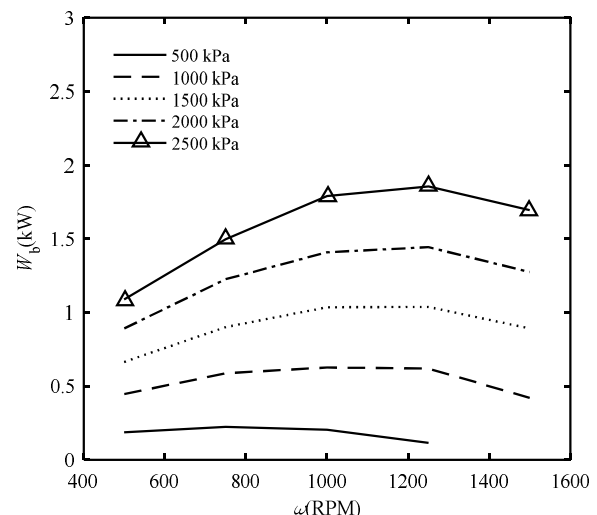


Fig. 12 Brake power of Stirling engine versus its speed in constant pressure

شکل 12 تغییرات کار ترمزی حاصله با افزایش سرعت کاری در فشارهای متفاوت

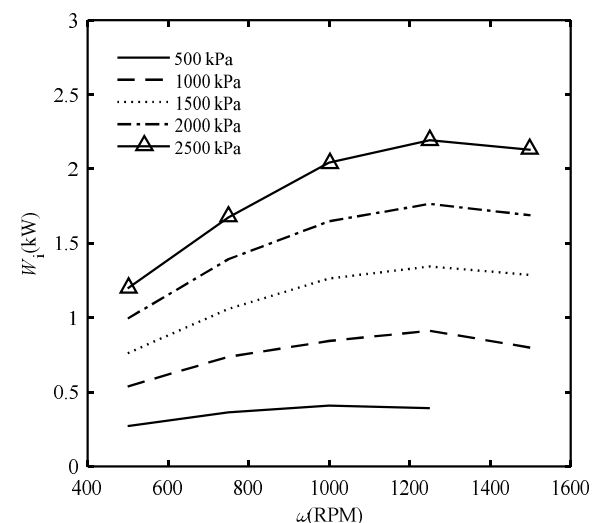


Fig. 13 Indicatory power of Stirling engine versus its speed in constant pressure

شکل 13 تغییرات کار خروجی خالص (بدون اصطکاک) با افزایش سرعت کاری در فشار ثابت

فشار به میزان 100 کیلو پاسکال (یک بار) حدود 0.449% (تقریباً 0.5%) افزایش می‌یابد. در نتایج شکل 15 تا شکل 17 دمای منبع گرم و سرد مطابق با جدول 1 به ترتیب 390 و 34 درجه سانتی‌گراد اعمال شده است.

3-2-3- تغییرات دما

یکی دیگر از شرایط کارکردی که به موتور اعمال می‌شود میزان دمای منبع گرم است و مطابق با رابطه (3) تأثیر مستقیمی در میزان بازدهی موتور دارد به‌طوری‌که هرچه اختلاف دمای منبع سرد و گرم بیشتر باشد بازده موتور افزایش می‌یابد اما برای افزایش این اختلاف دما، کاهش دمای منبع سرد به علت هزینه‌بر بودن تأمین دمایی کمتر از دمای محیط، پیشنهاد نمی‌شود لذا با استفاده از مدل ارائه شده، تأثیر افزایش دمای منبع گرم بر پارامترهای کارکردی بررسی می‌شود.

شکل 18 تغییرات میزان حرارت مصرفی، کار خروجی و بازده موتور را بر اساس تغییرات نسبت دمای منبع گرم به دمای منبع سرد نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این نتایج با دمای ثابت منبع سرد 35 درجه سانتی‌گراد و سرعت کاری 840 دور بر دقیقه و فشار تغذیه 800 کیلو پاسکال به‌دست‌آمده است. همان‌طور که در شکل 18 مشاهده می‌شود، روند تغییرات مطابق با انتظارات از یک موتور استرلینگ و روابط (3-1) است که با افزایش دمای منبع گرم مقدار حرارت مصرفی و کار تولیدی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و بازده نیز تقریباً روندی مطابق با رابطه (3) دارد. به طور میانگین با افزایش 10 درصدی دمای منبع گرم نسبت به دمای منبع سرد، بازده موتور به اندازه 1.6 درصد افزایش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری

موتور استرلینگ در ساده‌ترین ساختار دارای پنج بخش اصلی است که شامل محفظه‌ی انبساط، گرم‌کن، بازیاب، خنک‌کن و محفظه‌ی تراکم است. با توجه به تعداد و نحوه قرارگیری این اجزا در کنار هم ساختارهای هندسی زیادی ارائه شده است. سه ساختار رایج برای موتورهای استرلینگ شامل آلفا، بتا و گاما می‌شود. جابه‌جاکننده در ساختار بتا و گاما سیال عامل را بین محفظه‌ی

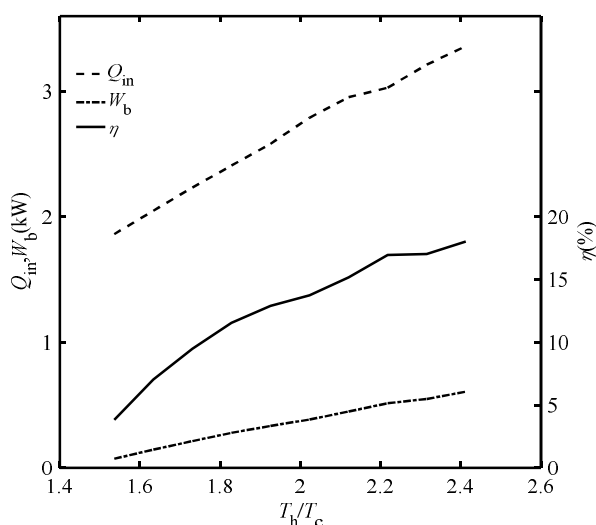


Fig. 18 Heat consumption, brake power and efficiency of Stirling engine versus ratio of hot source temperature to cold source temperature in constant speed

شکل 18 نمودار تغییرات حرارت مصرفی، کار تولیدی و بازده موتور استرلینگ گاما با افزایش نسبت دمای منبع گرم به دمای منبع سرد

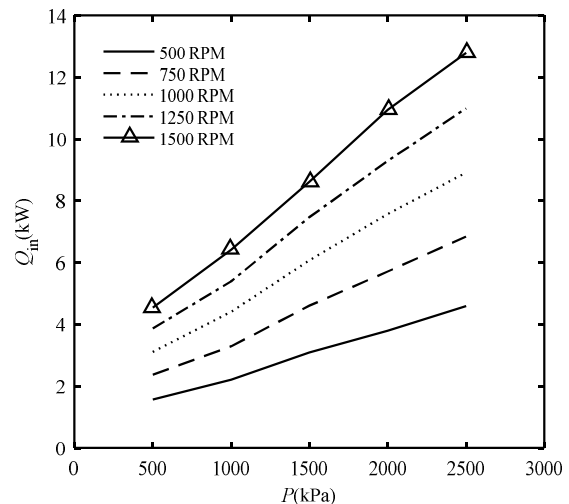


Fig. 15 Heat consumption of Stirling engine versus its feed pressure in constant speed

شکل 15 نمودار تغییرات حرارت مصرفی موتور با افزایش فشار تغذیه در سرعت ثابت

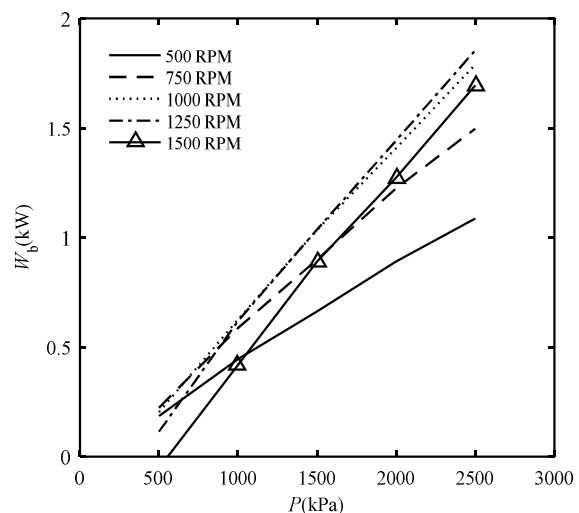


Fig. 16 Brake power of Stirling engine versus its feed pressure in constant speed

شکل 16 تغییرات کار ترمزی با افزایش فشار تغذیه در سرعت ثابت

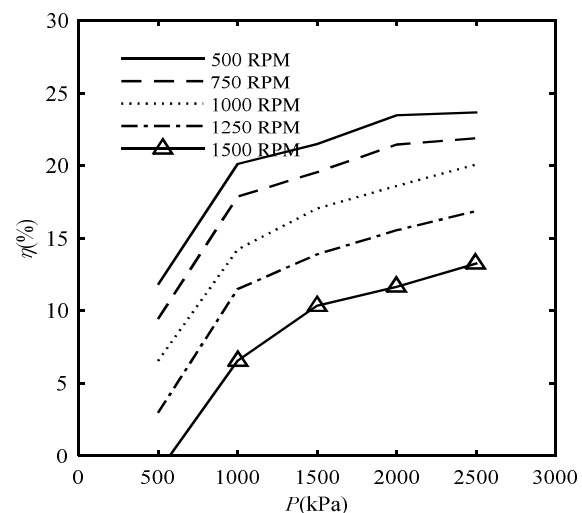


Fig. 17 Efficiency of Stirling engine versus its feed pressure in constant speed

شکل 17 نمودار تغییرات بازدهی حرارتی موتور با افزایش فشار تغذیه در سرعت ثابت

ω سرعت دورانی (دور بر دقیقه)

زیر نویس‌ها

b ترمزی

c منبع گرمایی خنک‌کن

comp محفظه‌ی تراکم

e معادل

exp محفظه‌ی انبساط

h منبع گرمایی گرم‌کن

i بدون اتلاف اصطکاکی

in دریافتی

pst پیستون قدرت

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌بینند تا از مرکز تحقیقات، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) مخصوصاً مهندس علیرضا به دلیل همکاری در واحد استرلینگ این مرکز، کمال تشکر و تقدیر را به عمل آورند.

7- مراجع

- [1] G. Walker, *Stirling-cycle machines*, pp. 10-11, Canada: Oxford University Press, 1973.
- [2] Y. A. Çengel, M. A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach*, 8th edition pp. 502-505, New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [3] G. Schmidt, The theory of Lehmann's calorimetric machine, *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 15, No. 1, 1871.
- [4] T. Finkelstein, Insights into the thermodynamics of Stirling cycle machines, in *Proceeding of 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Monterey, California, pp. 1829-1834, August 7-11, 1994.
- [5] I. Urieli, C. J. Rallis, D. M. Berchowitz, Computer simulation of Stirling cycle machines, *Proceeding of 12th intersociety energy conversion engineering conference*, Washington D.C., pp. 1512-1521, August 28 Through September 2, 1977.
- [6] N. Parlak, A. Wagner, M. Elsner, H. S. Soyhan, Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in non-ideal adiabatic conditions, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 1, pp. 266-273, 2009.
- [7] W. L. Chen, K.-L. Wong, L. W. Po, A numerical analysis on the performance of a pressurized twin power piston gamma-type Stirling engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 62, No. 1, pp. 84-92, 2012.
- [8] M. Ziabasharhagh, M. Mahmoodi, Analysis and optimization of beta-type Stirling engine taking into account the non-ideal regenerator thermal and hydraulic losses effects, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 45-57, 2012. (in Persian)
- [9] I. Tlili, A. Sa'ed, Thermodynamic evaluation of a second order simulation for Yoke Ross Stirling engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 68, No. 1, pp. 149-160, 2013.
- [10] J. A. Araoz, E. Cardozo, M. Salomon, L. Alejo, T. H. Fransson, Development and validation of a thermodynamic model for the performance analysis of a gamma Stirling engine prototype, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 83, No. 1, pp. 16-30, 2015.
- [11] J. A. Araoz, M. Salomon, L. Alejo, T. H. Fransson, Numerical simulation for the design analysis of kinematic Stirling engines, *Applied Energy*, Vol. 159, No. 1, pp. 633-650, 2015.
- [12] M. Babaelahi, H. Sayyadi, Differential Polytropic Model for Simulation of Stirling Engines Considering Various Regenerators Models, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 187-197, 2015. (in Persian)
- [13] K. M. Follen, *A system dynamics modeling methodology for compressible fluid flow systems with applications to internal combustion engines*, PhD Thesis, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 2010.

انبساط و تراکم جابه‌جا می‌کند و با توجه به وجود منبع گرم‌کن، منبع خنک‌کن و بازپاب در اطراف آن، هندسه‌ی پیچیده‌ای دارد. در صورتی که در ساختار آلفا جابجاکننده‌ی وجود ندارد و این سه بخش بر روی مسیر سیال بین دو محفظه‌ی تراکم و انبساط قرار گرفته‌اند و هندسه‌ی ساده‌تری برای ساختار آلفا ایجاد کرده است. در نتیجه فرایند ساخت و نگهداری نیز راحت‌تر و کم‌هزینه‌تر خواهد بود. از این‌رو در این پژوهش با توجه به این مشکل که در ساختار بتا و گاما موجود است، یک ساختار جدید برای موتور استرلینگ معرفی شد که دو سیلندر و پیستون جایگزین جابجاکننده می‌شود و در نتیجه یک ساختار با سه سیلندر و پیستون برای موتور گاما تهیه شد که تنها تفاوت آن با ساختار آلفا در یک سیلندر و پیستون بیشتر است.

برای بررسی کارکرد این ساختار جدید، یک مدل با مشخصه‌های هندسی یک موتور استرلینگ گاما استفاده شد. با توجه به ویژگی مهمی که در ساختار جدید موجود است و آن تعویض جابجاکننده با دو سیلندر و پیستون است برای مدل‌سازی از نرم‌افزار تحلیلی-صنعتی با نام جی‌تی-سویت که مختص تحلیل‌های خودرو و موتور است، استفاده شده است.

پس از مقایسه با نتایج تجربی و مشاهده انطباق قابل‌قبول با نتایج مدل شبیه‌سازی‌شده، تحلیل ترمودینامیکی بر پارامترهای کارکردی ساختار جدید انجام شد؛ که این نتایج و روند تغییرات آن‌ها علاوه بر تأیید پیروی ساختار جدید از چرخه‌ی استرلینگ، می‌تواند در مسائل طراحی بسیار کاربردی باشد. از مهم‌ترین نکاتی که در تغییرات پارامترهای کارکردی مشاهده شد می‌توان به وابستگی شدید کار خروجی موتور به سرعت اشاره کرد که برای افزایش توان موتور پیشنهاد نمی‌شود چون علاوه بر افزایش توان اتلافی اصطکاک، با توجه به ماهیت رفت و برگشتی سیال در چرخه، با افزایش سرعت زمان انتقال حرارت و تولید کار کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر می‌توان به افزایش فشار اشاره کرد که هم در میزان کار تولیدی و هم بازدهی موتور اثر مثبتی دارد ولی محدودیت‌های فیزیکی و فرایند ساخت برای حفظ فشارهای بالا در داخل موتور مانع افزایش فشار می‌شود. با توجه به این موضوع می‌توان گفت این هندسه‌ی ساده‌تر مربوط به ساختار جدید می‌تواند امکان افزایش فشار را در نمونه‌های ساخته شده ساختار گاما افزایش داده و باعث بهبود عملکرد موتور شود. افزایش دمای منبع گرم‌کن نیز باعث افزایش خروجی و بازده موتور می‌شود که آن نیز نیازمند فناوری مواد پیشرفته در کنار منابع حرارتی پر قدرت است.

5- فهرست علائم

dw کار تولیدی دیفرانسیلی ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)

dV تغییر حجم دیفرانسیلی (m^3)

P فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

Q شار حرارتی در واحد زمان ($\text{kgm}^2\text{s}^{-3}$)

q گرما ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)

R ثابت جهانی گازها ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}\text{mol}^{-1}$)

r نسبت تراکم

T دما (K)

V حجم (m^3)

W کار تولیدی در واحد زمان ($\text{kgm}^2\text{s}^{-3}$)

w کار تولیدی ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)

علائم یونانی

η بازده ترمودینامیکی (%)

- [17] A. Batooei, A. Keshavarz Valian, Thermal analysis and efficiency optimization of Otto-Stirling combined cycles with SI engine exhaust heat recovery, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 147-158, 2016. (in Persian فارسی)
- [18] M. Hooshang, R. A. Moghadam, S. A. Nia, M. T. Masouleh, Optimization of Stirling engine design parameters using neural networks, *Renewable Energy*, Vol. 74, No. 1, pp. 855-866, 2015.
- [19] B. Kongtragool, S. Wongwises, A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, *Renewable and Sustainable energy reviews*, Vol. 7, No. 2, pp. 131-154, 2003.
- [14] A. R. I. Semin, R. A. Bakar, I. Ali, Steady-State and Transient Simulation of Gas Flow Temperature of Intake Port Engine, *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 4, No. 7, pp. 767-777, 2008.
- [15] I. Reynolds, O. Fritz, H. Hoffmann, P. Wieske, S. Simmonds, D. Wise, The design of the MAHLE 25kWe Solar heated Stirling Engine, *15th International Stirling Engine Conference*, Croatia, Dubrovnik, 2012.
- [16] S. Simmonds, R. Corbishley, J. Hughes, G. Teylor, H. Hoffmann, P. Wieske, I. Reynolds, D. Wise, The Development of the MAHLE 25kWe Solar Heated Stirling Engine, *15th International Stirling Engine Conference*, Croatia, Dubrovnik, 2012.