مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 448-458

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل ترمودینامیکی پارامترهای عملکردی ساختار جدید سه- سیلندر موتور استرلینگ

علی امارلو[1]، علی کشاورز ولیان[2*]، علیرضا بتویی[3]، سیامک علیزاده نیا[4]

1- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران
3- دانشجوی دکتری، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران
4- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو، 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-سیلندره
تحلیل ترمودینامیکی
پارامترهای عملکردی

چکیده

ساختارهای هندسی زیادی برای موتورهای استرلینگ ارائه شده است که تفاوت آن‌ها در تعداد اجزا و نحوه‌ی 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 سیلندره‌ی 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-سوییت 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 Amarloo[1], Ali Keshavarz Valian[1*], Alireza Batooei[1], Siamak Alizade Nia[2]

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

موتورهای استرلینگ[1] 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 مسائل زیست‌محیطی نیز بسیار موردتوجه هستند. ازاین‌رو تحقیقات و مطالعات علمی بر روی موتورهای استرلینگ در سال‌های اخیر بسیار موردتوجه 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

[1] Stirling

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Amarloo, A. Keshavarz Valian, A. Batooei, S. Alizade Nia, Thermodynamic analysis of performance parameter of a novel 3 cylinder Stirling engine configuration, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 448-458, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

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 موتورها 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 به‌صورت 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 هم‌دما (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 هم‌دما (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 کاملا ایده‌آل امکان‌پذیر نیست و فرایندهای ترمودینامیکی مربوط به موتورهای استرلینگ در شکل 1 به‌صورت نقطه‌چین نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود فرایندهای انتقال حرارت هم‌دما، 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 خنک-کن 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 محفظه-ی انبساط، گرم‌کن، بازیاب، خنک‌کن و محفظه تراکم است. برای بیان نحوه‌ی کارکرد این موتور به‌طور 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 آلفا[1]، بتا[2] و گاما[3] می‌شود. همه‌ی آن‌ها بر اساس چرخه‌ی استرلینگ کار می‌کنند و در ادامه به ساختار هندسی هرکدام و تفاوت‌های آن‌ها به‌اختصار اشاره می‌شود.

ساختار آلفا دارای دو سیلندر[4] و پیستون[5] سرد و گرم است که سیال به‌وسیله 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 جابجاکننده[6] که اصطلاحا جابه‌جاکننده نامیده می‌شود، در داخل آن و یک پیستون در انتهای آن قرار دارد که هم‌محور، حرکت می‌کنند. 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

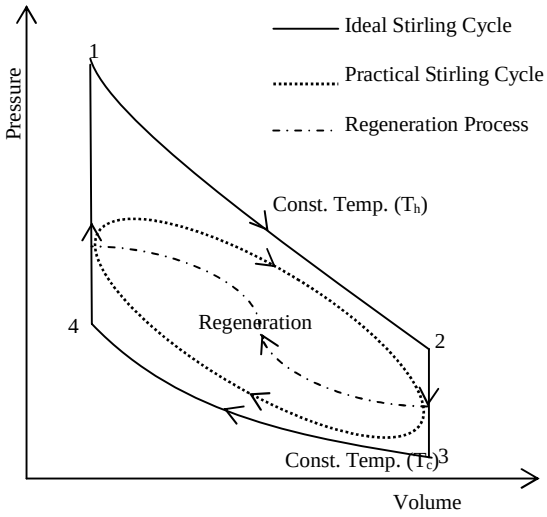

Fig. 1 The Stirling power thermodynamic cycle [2]

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 به‌تفصیل 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 جابجاکننده، 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 هم‌دما نیز نامیده می‌شود. تحلیل بعدی که ارائه شد، توسط فینکلشتاین در سال 1960 میلادی بود [4] که در آن محفظه تراکم و انبساط به‌صورت 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 به‌جای حل‌های تحلیلی مورد استقبال قرار گرفت و تاکنون نیز ادامه داشته است.

ازجمله 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 فرترن[7] 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

[7] Fortran

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

بازیاب غیر ایده‌آل و در نظر گرفتن افت‌های هیدرولیکی و حرارتی، مدل را برای یک موتور استرلینگ مدل بتا به نام GPU-3 تحلیل کرده‌اند.

تلیلی و همکاران [9] یک نوع خاص موتور نوع آلفا به نام یوک-راس[1] را به‌وسیله مدل‌سازی عددی شبیه‌سازی کرده‌اند و بازده خروجی این موتور را با نوع معمولی آلفا و گاما مقایسه کرده‌اند. جوزف و همکاران نیز موتور استرلینگ نوع گاما به اسم جنوا[2] را به‌صورت عددی مدل‌سازی و صحه‌گذاری کرده‌اند. عوامل مختلف در اتلافات این موتور را بررسی کرده و بررسی ویژه اتلافات و طراحی آن را در سیستم‌های تولید هم‌زمان آورده‌اند [10] و بر اساس مدل ارائه شده پارامترهای مختلف مؤثر بر کار ترمزی خروجی را برای یک طراحی بهینه بررسی کرده‌اند [11]. باباالهی و صیادی [12] نیز یک مدل حرارتی دیفرانسیلی به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد حرارتی موتور استرلینگ ارائه کرده‌اند. در این مدل حرارتی به‌جای فرض‌های هم‌دما و آدیاباتیک، فرایند انبساط و تراکم به‌صورت پلی‌ترو پیک در نظر گرفته شده و مدل‌های حرارتی متفاوتی را در بازیاب در نظر گرفته‌اند. پارامترهای افت فشار و اتلاف حرارتی در بخش‌های مختلف موتور مورد بررسی قرار گرفته و بازیاب 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 مدل‌های ترمودینامیکی متفاوت شامل هم‌دما، بی‌دررو و غیره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بیشتر شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر پارامترهای گوناگون ساختاری و عملکردی بر خروجی موتور بوده است و عموما به‌صورت عددی (مانند برنامه‌نویسی در فرترن) انجام شده است؛ که به علت پیچیدگی در ساختار موتور و فرایندهای ترمودینامیکی، فرض‌های ساده‌کننده بسیاری در آن‌ها دیده می‌شود. در این پژوهش با معرفی یک ساختار جدید برای طراحی ساده‌تر موتورهای استرلینگ نوع گاما، از یک نرم‌افزار تحلیل موتور خودرو استفاده شده است که محصول شرکت گاما تکنولوژی[3] است و انحصارا مربوط به تحلیل‌های 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 نرم‌افزار می‌تواند 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 تحلیل‌های ترمودینامیکی توسط این نرم‌افزار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اگرچه در این نرم‌افزار و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش تحلیل‌های سیالاتی همچون افت فشار نیز در نظر گرفته شده است.

این نرم‌افزار در زمینه شبیه‌سازی پروسه‌هایی که در خودرو و به خصوص موتور اتفاق می‌افتد، دارای ابزارهای کامل و دقیقی است و قابلیت اعتماد نرم‌افزار، در این موارد اثبات شده است. برای مثال فالون [13] با کمک این نرم‌افزار یک مدل سیستمی پویا از جریان تراکم پذیر داخل موتورهای احتراق داخلی را بررسی کرده است. سمین و همکاران[14] برای مدل‌سازی پایا و گذرای جریان گاز ورودی به موتور از این نرم‌افزار کمک گرفته‌اند. لازم به ذکر است که این نرم‌افزار پیش از این نیز در زمینه طراحی موتور استرلینگ نوع آلفا مورد استفاده قرار گرفته است و شرکت ماهله[4] از آن برای طراحی یک موتور استرلینگ نوع آلفا با قدرت 25 کیلووات کمک گرفته است[16,15]. بتویی و همکاران نیز از این نرم‌افزار برای تحلیل یک موتور استرلینگ آلفا برای احیای حرارت اتلافی خروجی اگزوز خودرو استفاده کرده‌اند[17].

[1] Yoke-Ross
[2] Genoa
[3] Gamma Technology
[4] MAHLE

در این پژوهش برای بررسی ساختار جدید و مقایسه آن با یک ساختار نوع گاما که نزدیک‌ترین ساختار به این ساختار جدید است، از پارامترهای هندسی یک موتور استرلینگ گامای ساخته شده استفاده شده است. موتور اس‌تی-500[5] ساخته شده توسط مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو)[6] [18] انتخاب شده است تا در این مدل‌سازی ساختار جدید مورد ارزیابی قرار بگیرد و پس از صحه‌گذاری بر ساختار جدید ارائه شده، تحلیل پارامترهای کارکردی این موتور انجام شود.

2- تئوری‌ها و مدل‌سازی

2-1- ساختارهای موتور استرلینگ

موتورهای استرلینگ بر اساس چرخه تولید توان استرلینگ کار می‌کنند که یکی از مزیت‌های مهم این موتور توانایی رسیدن به بازده‌ای برابر با بازده چرخه ایده‌آل کارنو است که رابطه (3) نشانگر چنین قابلیتی است [2]. در طی سال‌های متمادی، همراه با پیشرفت تکنولوژی‌های ساخت، نزدیک شدن به این بازده ایده‌آل امکان‌پذیر شده است و همان‌گونه که بیان شد ساختارهای مختلفی از این موتور توسعه داده شده است. ساختارهای موجود را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد. البته اصول ترمودینامیکی برای همه ساختارهای موتور استرلینگ یکسان است و تفاوت اساسی در بین آن‌ها، نحوه‌ی قرار گرفتن اجزای مختلف این موتور، در کنار یکدیگر است [19] .

$$q_{\mathrm{in}} = RT_{\mathrm{h}} \ln r = P_1 V_1 \ln r \tag{1}$$

$$w = R(T_{\mathrm{h}} - T_{\mathrm{c}}) \ln r \tag{2}$$

$$\eta = \frac{w}{q_{\mathrm{in}}} = \left(1 - \frac{T_{\mathrm{h}}}{T_{\mathrm{c}}}\right) \times 100 \tag{3}$$

در روابط (1-3)، q_{in} میزان حرارت دریافتی و w کار تولیدی بر حسب ژول ($\mathrm{kgm^2s^{-2}}$)، در یک چرخه از چرخه‌ی ایده‌ال استرلینگ است. R ثابت جهانی گازها و برابر با $8.314\ \mathrm{kgm^2s^{-2}K^{-1}mol^{-1}}$ 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 ($\mathrm{kgm^{-1}s^{-2}}$) و متر مکعب ($\mathrm{m^3}$) 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 به‌واسطه بازیاب حرارتی و لوله‌ی رابط، به هم متصل شده‌اند و دو پیستون دارای اختلاف زاویه‌ای فاز 90 درجه در حرکت رفت و برگشتی خود هستند که طرح‌واره آن را می‌توان در شکل 2 مشاهده کرد.

در این ساختار سیال عامل در سیلندر گرم به‌وسیله گرم‌کنی که بعد از آن قرار دارد حرارت داده شده و منبسط می‌شود و توان مکانیکی تولید می‌شود، سپس پیستون گرم به بالا و پیستون سرد به سمت پایین حرکت کرده و سیال به سیلندر سرد و خنک‌کن منتقل می‌شود. در این مرحله سیال عامل، متراکم شده و به حالت اولیه بازمی‌گردد 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

[5] ST-500
[6] IPCO

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

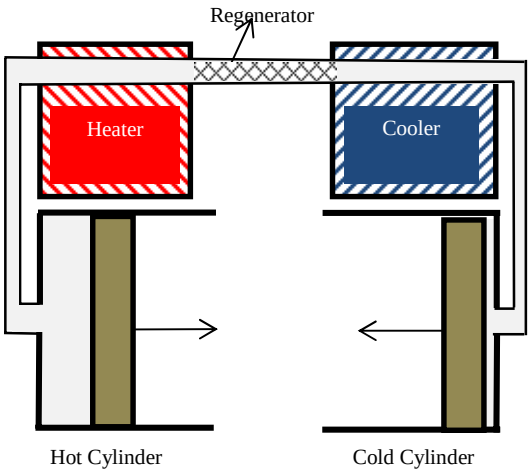

Fig. 2 The schematic of Alpha type of Stirling configurations [19]

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.

2-1-3- ساختار گاما

موتور استرلینگ با ساختار گاما همانند موتور با ساختار بتا دارای ترکیب یک پیستون تولید توان و یک سیلندر شامل جابجا کننده 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 4می‌توان مشاهده کرد.

همان‌گونه 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

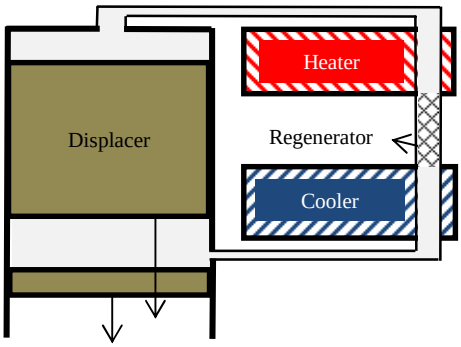

Fig. 3 The schematic of Beta type of Stirling configurations [19]

شکل 3 طرحواره موتور استرلینگ نوع بتا [19]

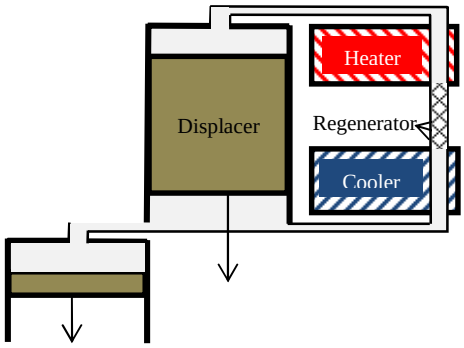

Fig. 4 The schematic of Beta type of Stirling configurations [19]

شکل 4 طرحواره موتور استرلینگ نوع گاما [19]

گاما پرداخته می‌شود.

2-2- ساختار جدید برای موتور استرلینگ

همان‌گونه 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 جابه‌جاکننده‌های موجود در موتورهای نوع گاما پیشنهاد می‌شود که این بخش از ساختار موتور توسط دو سیلندر و پیستون مطابق شکل 5معادل‌سازی شده‌اند.

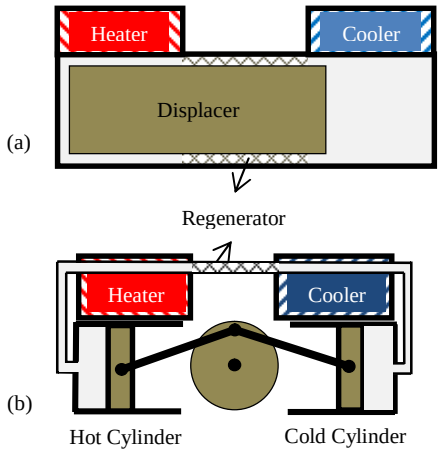

Fig. 5 The schematic conversion of Gamma and Beta configuration displacer (a) with two cylinders and pistons (b)

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

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 صرفا سیال عامل را بین منبع سرد و گرم جابه جا 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، صرفا 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، به‌تفصیل به این تفاوت اشاره شده است.

این تغییر ساختار به این‌گونه است که حرکت جابجاکننده 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 جابجاکننده 90 درجه اختلاف فاز زاویه‌ای دارد، موتور استرلینگ را با ساختار جدید سه سیلندره تکمیل کرد که در شکل 6 طرح‌واره موتور کامل استرلینگ به‌عنوان یک موتور استرلینگ با ساختار سه‌سیلندره 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 عملا با جابه‌جایی آن تغییر حجمی رخ نمی‌دهد و مجموع حجم محفظه‌های تراکم و انبساط ثابت است اما در ساختار جدید طول جابه‌جاکننده یا به‌عبارت‌دیگر 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 کاملا امکان بررسی این نوع موتورها را دارد، استفاده می‌شود.

3-2- مدل‌سازی موتور اس‌تی-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. ازاین‌رو 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. ازاین‌رو، موتور اس‌تی-500 [18] که نمونه ساخته شده از موتور اصلاح شده‌ی فیباخ[1] در واحد استرلینگ مرکز تحقیقات، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) است، انتخاب شد تا با ساختار سه سیلندره پیشنهادی مدل‌سازی شود. در شکل 7 تصویری از این موتور مشاهده می‌شود. برای تکمیل مدل در نرم‌افزار اطلاعات کافی با همکاری مرکز تحقیقات، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) و مشاهده و تشریح کامل موتور، به دست آمد.

در [17] جزییات فرض‌ها و نحوه محاسبات در نرم‌افزار جی‌تی –سوییت[2] ذکر شده است اما در مورد مدل‌سازی ساختار جدید سه-سیلندره لازم به ذکر است که دقیقا 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 درصورتی‌که موتور توانی تولید نکند، توان خروجی منفی (به معنای مصرف توان) خواهد بود.

در شکل 8نمایی از نحوه مدل‌سازی ساختار جدید در محیط نرم‌افزار مشاهده می‌شود. با مقایسه شکل 6 و شکل **8**نحوه‌ی مدل‌سازی کاملا 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

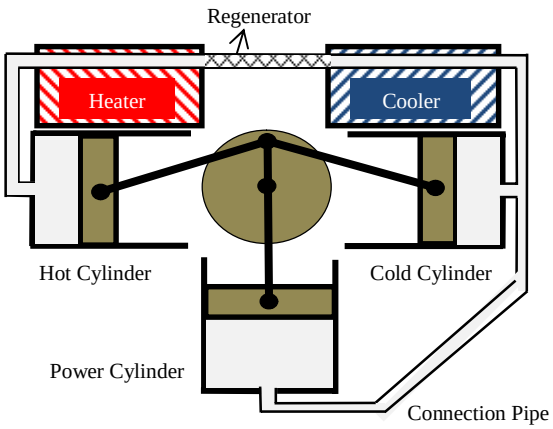

Fig. 6 The schematic of new configuration of Stirling engines as 3-Cylinder Gamma configuration

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

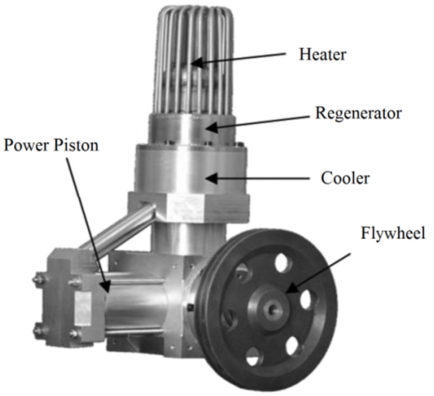

Fig. 7 Picture of ST-500 Stirling engine fabricated by IPCO [18]

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

[1] Viebach

[2] GT-Suite

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

جدول 1 مشخصات کاری و هندسی موتور اس‌تی-500 [18]

Table 1 Physical and performance characteristics of ST-500 Stirling engine [18]

مشخصه	مقدار
سیال عامل	هلیوم
کورس[1] پیستون قدرت (mm)	75
قطر پیستون قدرت (mm)	84
کورس جابجاکننده (mm)	75
قطر جابجاکننده (mm)	97
زاویه‌ی فاز	90
نوع گرم‌کن	لوله‌ای (قطر 6mm) × 20
نوع خنک‌کن	کانال (مقطع $1\times13mm^2$)× 144
بازیاب	ماتریس آهنی (تخلخل 0.96)
فشار تغذیه (kPa)	8100
فرکانس کاری (Hz)	14
دمای خنک‌کن (°C)	34
دمای گرم‌کن (°C)	390

پیستون مشخص شده است. همانند ساختاری که در شکل 6 مشاهده می‌شود یک لوله‌ی رابط بین سیلندر قدرت و سیلندر سرد (تراکم) موجود است و سه مبدل حرارتی نیز بین سیلندر سرد و گرم موجود هستند که به ترتیب نقش خنک‌کن، بازیاب و گرم‌کن را دارند. در تمامی این بخش‌ها مشخصات هندسی مطابق با جدول 1 وارد شده است. سایر اجزا که در بین این بخش‌های اصلی موجود هستند، محفظه‌هایی با حجم مشخص و بسیار کم هستند که صرفا برای اتصال میان اجزا باید تعریف شوند که جزو الزامات نرم‌افزاری برای تکمیل سازی مدل هستند.

برای مدل‌سازی بازیاب نیز از لوله‌های با قطر بسیار ریز (0.25 میلی‌متر برابر با قطر منافذ محیط متخلخل بازیاب) و تعدادی که حجمی معادل با حجم بازیاب واقعی داشته باشد، استفاده شده است که در تماس با یک جرم آهنی به وزنی برابر با وزن بازیاب هستند و این جرم آهنی وظیفه‌ی ذخیره‌سازی حرارت را دارد.

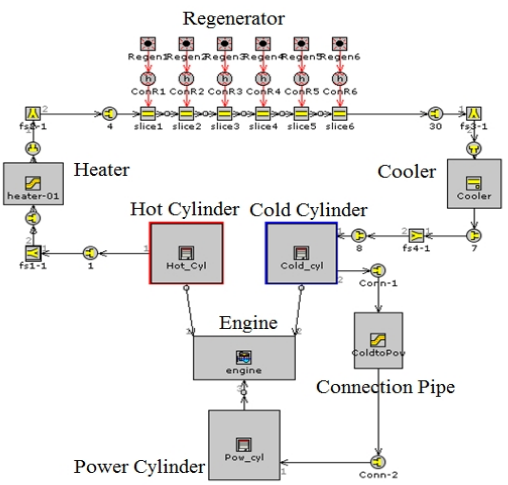

Fig. 8 Modeling of 3-Cylinder Gamma configuration in GT-Suit

شکل 8 نمایی از مدل‌سازی ساختار سه-سیلندره گاما در نرم‌افزار جی‌تی سوییت

[1] Stroke

3- نتایج

3-1- ارزیابی ساختار جدید

پس از تکمیل مدل شبیه‌سازی موتور اس‌تی-500، جهت صحه‌گذاری مدل از نتایج تست تجربی آقای هوشنگ و همکاران [18] استفاده شده است، شرایط کارکردی مورد نظر در این مقاله، شامل فشار تغذیه سیال، سرعت دورانی موتور، دمای منبع سرد و دمای منبع گرم است که در جدول 1 آمده است.

اگر به‌صورت ساده به این چرخه‌ی تولید توان توجه شود، سه محفظه شامل محل‌های انبساط، انقباض و پیستون قدرت دارای تغییر حجم هستند لذا تنها در این سه محفظه، امکان تولید یا مصرف کار وجود دارد. رابطه‌ی (4) میزان دیفرانسیلی کار تولیدی این سه محفظه را در هر لحظه نشان می‌دهد.

$$dw = P_{\mathrm{exp}}dV_{\mathrm{exp}} + P_{\mathrm{comp}}dV_{\mathrm{comp}} + P_{\mathrm{pst}}dV_{\mathrm{pst}} \quad (4)$$

در رابطه‌ی (4)، P و dV فشار و تغییر حجم دیفرانسیلی است و به ترتیب بر حسب پاسکال ($kgm^{-1}s^{-2}$) و مترمکعب (m^3) هستند. زیرنویس‌های exp، comp و pst نیز به ترتیب به محفظه انبساط، محفظه تراکم و محفظه پیستون قدرت اشاره دارند. dw کار تولیدی دیفرانسیلی برحسب ژول (kgm^2s^{-2}) است.

همان‌گونه که بیان شد در ساختار موتور گاما تغییر حجم محفظه‌ی تراکم و انبساط برابر و قرینه هم هستند و با صرف‌نظر از افت فشارها می‌توان فشار را در تمامی بخش‌های موتور در هر لحظه برابر فرض کرد به همین دلیل در موتور گاما توان تولیدی، با تقریب خوبی تنها به حجم و فشار سیلندر قدرت بستگی دارد و به عبارتی میزان کار مصرفی یا تولیدی محفظه‌های تراکم و انبساط توسط یکدیگر خنثی می‌شود و عملا تغییر حجم محفظه‌ی پیستون قدرت با تغییر حجم کل حجم موتور برابر است.

$$dw = P_{\mathrm{pst}}dV_{\mathrm{pst}} \rightarrow dw = P_{\mathrm{pst}}dV_{\mathrm{total}} \quad (5)$$

در رابطه‌ی (5)، زیرنویس total به تمامی اجزای موتور اشاره دارد.

به همین دلیل در شرایط آزمایش نیز مشابه با تحقیق انجام شده توسط هوشنگ و همکاران [18]، برای رسم نمودار فشار-حجم چرخه، از فشار سیلندر قدرت بر حسب حجم کل سیال در موتور استفاده شده است و مطابق با تئوری چرخه استرلینگ توقع می‌رود که موتور دارای نمودار تغییرات فشار بر حسب حجم، به‌عنوان مشخصه‌ی از نحوه پیروی از چرخه استرلینگ، همانند شکل 1 باشد؛ اما برای مقایسه این موتور با موتور گاما اس‌تی 500 مطابق با شرایط کاری که در جدول 1 آمده است، می‌توان نمودار فشار سیلندر قدرت بر حسب حجم کل را در شکل 9مشاهده کرد. تغییرات فشار سیلندر قدرت به دلیل اینکه نقش اصلی را در تولید توان دارد و از طرفی در موتورهای گاما تنها بخشی است که تغییرات فشار آن باعث تولید کار می‌شود، برای ارزیابی انتخاب شده است.

اما در ساختار جدید به دلیل اینکه طول معادل جابجاکننده ثابت نیست و در نتیجه تغییر حجم در سیلندر تراکم و انبساط با یکدیگر اختلاف اندکی دارند و کار مصرفی و تولیدی این دو محفظه با هم خنثی نمی‌شود. ازاین‌رو علاوه بر تغییر حجم سیلندر قدرت، تغییر حجم دو محفظه تراکم و انبساط نیز بر میزان کار خالص سیستم اثرگذار خواهد بود و عملا این موضوع تفاوت بنیادی ساختار ارائه شده با ساختار گاما است. لذا این تفاوت بنیادی و این‌که دو محفظه‌ی تراکم و انبساط در نظر گرفته نشده‌اند می‌تواند علت اختلاف موجود در نمودار فشار-حجم بین مدل جدید و موتور اس‌تی-500 باشد (شکل 9). برای بررسی این موضوع با توجه به این‌که تغییرات حجم در هر دو یکسان است از اختلاف فشار بیشینه در طول چرخه، به عنوان معیار انطباق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

جدول 2 مقایسه مقادیر کار ترمزی و حرارت مصرفی موتور اس‌تی-500، بین مقادیر تجربی و مقادیر شبیه‌سازی ساختار جدید سه سیلندره 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- شبیه-سازی (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

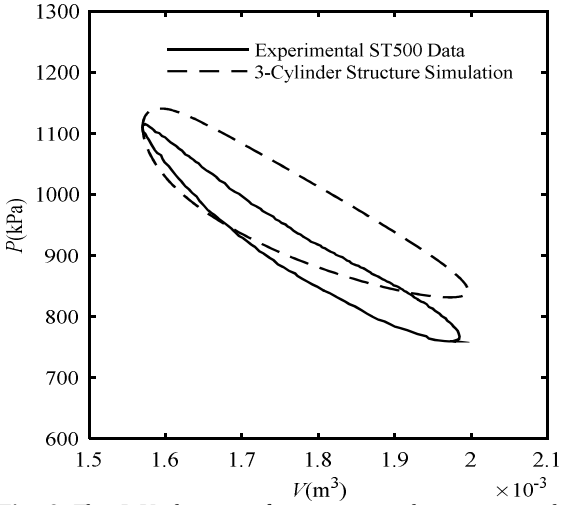

Fig. 9 The P-V diagram of new presented structure model in comparison of experimental data of ST-500 (based on power piston pressure)

شکل 9 نمودار تغییرات فشار بر حسب حجم ساختار ارائه شده در مقایسه با داده-های آزمایش تجربی موتور اس‌تی-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 قابل‌قبول 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 ($kgm^{-1}s^{-2}$) 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 اس‌تی-500 در شکل 9، از چرخه‌ی استرلینگ پیروی می‌کند.

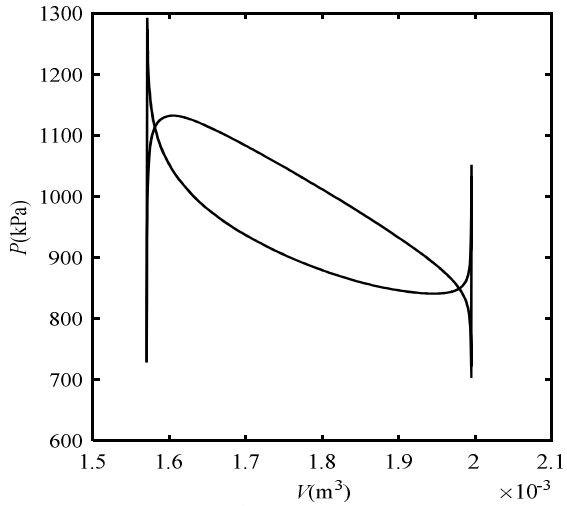

Fig. 10 The P-V diagram of new presented structure model based on introduced equivalent pressure

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 به‌طوری‌که علاوه بر پیروی از چرخه تئوری استرلینگ (مقایسه‌ی شکل 1 و شکل **10**)، تطابق بسیار مناسبی نیز با آزمایش تجربی که بر روی موتور اس‌تی-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 قابل‌چشم‌پوشی است. برای سه فشار مطابق جدول 2 خطاهای مدل‌سازی ساختار جدید بیان شده است.

3-2- تحلیل کارکردی

با توجه به نتایج ذکر شده جهت صحه‌گذاری، می‌توان ادعا کرد که ساختار جدید سه سیلندره برای موتور استرلینگ، کارایی قابل قبولی دارد و از آن می‌توان برای ساخت و طراحی ساده‌تر این موتور استفاده کرد. ازاین‌رو 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.

3-2-1- اثر سرعت کاری

همان‌طور که در شکل 11می‌توان 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 تقریبا به‌صورت خطی باشد که این‌گونه نیز هست و همچنین به همین دلیل توقع می‌رود که میزان کار تولیدی نیز با افزایش سرعت به‌صورت خطی افزایش یابد اما همان‌گونه در شکل 12دیده 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 12مشاهده می‌شود، می‌تواند به علت افزایش کار اصطکاکی موتور با افزایش سرعت باشد. لذا در شکل 13کار 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

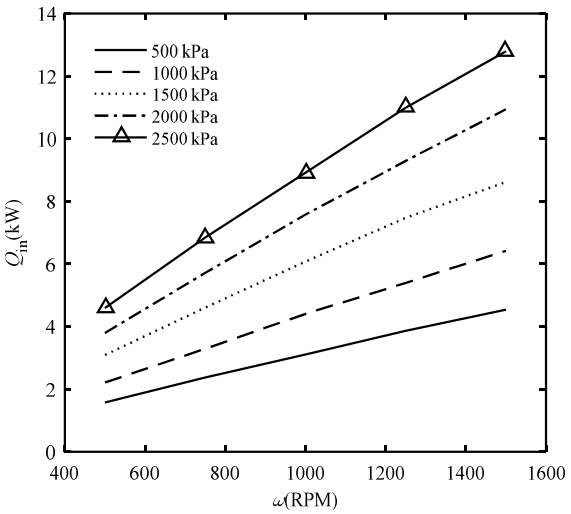

Fig. 11 Heat consumption versus its speed in constant pressure

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

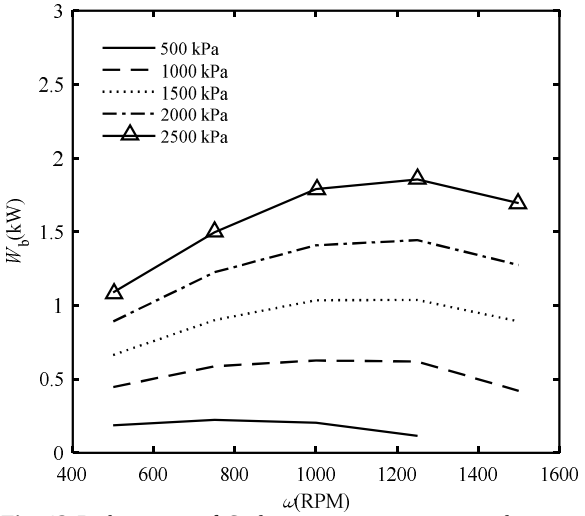

Fig. 12 Brake power of Stirling engine versus its speed in constant pressure

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

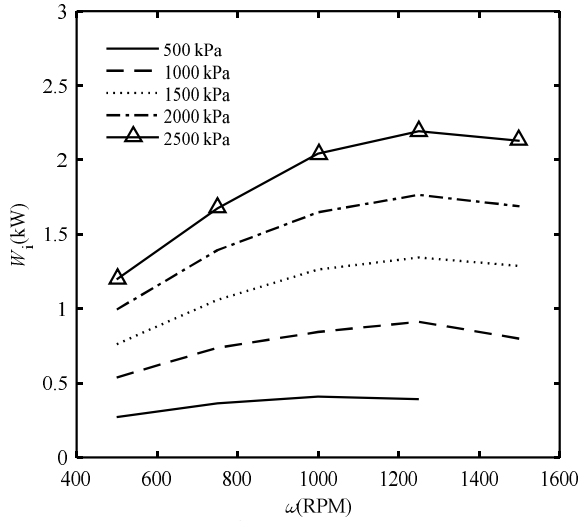

Fig. 13 Indicatory power of Stirling engine versus its speed in constant pressure

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

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 قابل‌قبول 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 تقریبا ثابت کاهش بازده در شکل 14 به طور میانگین با افزایش 100 واحدی سرعت بر حسب دوربردقیقه، 0.997 درصد (تقریبا 1%) بازده موتور کاهش می‌یابد.

3-2-2- اثر فشار تغذیه

تحلیلی مشابه بر روی پارامترهای خروجی با افزایش فشار انجام شده است. شکل 15تغییرات 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 به‌دست‌آمده است، نشان می‌دهد که حرارت مصرفی با افزایش فشار کاری به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. شکل 16این افزایش تقریبا خطی کار تولیدی موتور را نسبت به افزایش فشار نشان می‌دهد.

شکل 17که نمایشگر تغییرات بازده‌ی موتور با افزایش فشار است، نشان‌دهنده‌ی 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 عملا 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

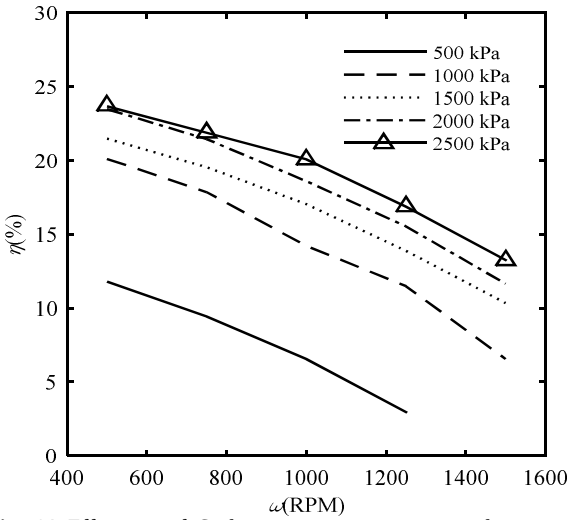

Fig. 14 Efficiency of Stirling engine versus its speed in constant pressure

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

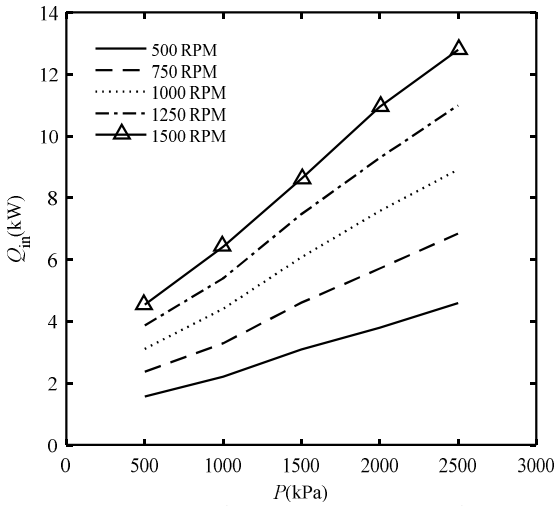

Fig. 15 Heat consumption of Stirling engine versus its feed pressure in constant speed

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

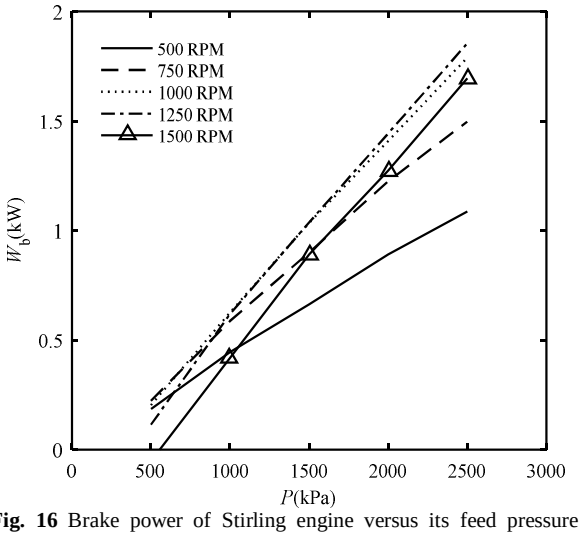

Fig. 16 Brake power of Stirling engine versus its feed pressure in constant speed

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

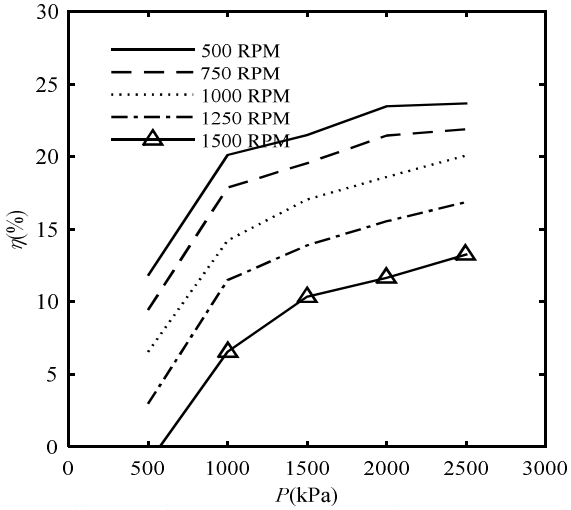

Fig. 17 Efficiency of Stirling engine versus its feed pressure in constant speed

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

فشار به میزان 100 کیلو پاسکال (یک بار) حدود 0.449% (تقریبا 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 18تغییرات 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 18مشاهده می‌شود، روند تغییرات مطابق با انتظارات از یک موتور استرلینگ و روابط (1-3) است که با افزایش دمای منبع گرم مقدار حرارت مصرفی و کار تولیدی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و بازده نیز تقریبا 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

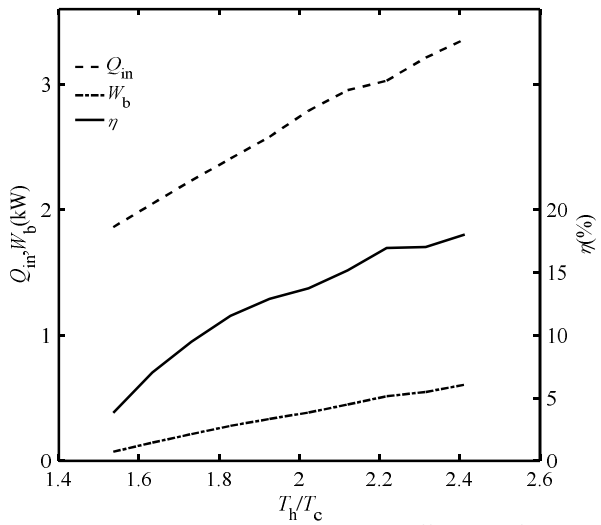

Fig. 18 Heat consumption, brake power and efficiency of Stirling engine versus ratio of hot source temperature to cold source temperature in constant speed

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

انبساط و تراکم جابه‌جا می‌کند و با توجه به وجود منبع گرم‌کن، منبع خنک‌کن و بازیاب 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-سوییت 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 چون‌که 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 پرقدرت است.

5- فهرست علایم

dw	کار تولیدی دیفرانسیلی (kgm^2s^{-2})
dV	تغییر حجم دیفرانسیلی (m^3)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Q	شار حرارتی در واحد زمان (kgm^2s^{-3})
q	گرما (kgm^2s^{-2})
R	ثابت جهانی گازها ($kgm^2s^{-2}K^{-1}mol^{-1}$)
r	نسبت تراکم
T	دما (K)
V	حجم (m^3)
W	کار تولیدی در واحد زمان (kgm^2s^{-3})
w	کار تولیدی (kgm^2s^{-2})

علایم یونانی

η	بازده ترمودینامیکی (%)
ω	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)

زیرنویس‌ها

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) مخصوصا مهندس علیزاده 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 edittion 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 فارسی)

[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 فارسی)

[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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]

[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. Reynols, 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. Reynols, D. Wise, The Development of the MAHLE 25kWe Solar Heated Stirling Engine, *15th International Stirling Engine Conference*, Croatia,Dubrovnik, 2012.

[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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.15.6]