



تحلیل حساسیت اثر وابستگی خواص ترمودینامیکی سیال عامل به دما بر عملکرد موتور استرلینگ نوع گاما

بهرام وزیری^۱، محمد آزادی^{۲*}، مجتبی بیگلری^۳، سید نوید مدنی^۴

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، bvaziri@semnan.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، m_azadi@semnan.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، mbiglari@semnan.ac.ir

^۴ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، n_madani@ip-co.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

مقالات برتر یازدهمین همایش بین‌المللی

موتورهای درونسوز و نفت

کلیدواژه‌ها:

موتور استرلینگ

خواص ترمودینامیکی

سیال عامل

وابستگی به دما

در این تحقیق تاثیر تغییرات عدد پرانتل با دما بر توان، بازدهی و اتلاف حرارتی موتور استرلینگ نوع گاما بررسی شده است. شایان ذکر است که عدد پرانتل، تابع ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و ضریب گرمایی ویژه در فشار ثابت سیال عامل می‌باشد که وابستگی این دو خاصیت اول ترمودینامیکی به دما، در این مقاله، مطالعه شده است. به همین منظور، ابتدا یک کد ترمودینامیکی به روش آدیاباتیک غیر ایده‌آل نوشته شد که در آن تلفاتی مانند افت فشار موتور و تلفات حرارتی بازیاب، در نظر گرفته شد. در گام بعدی، کد نوشته با داده‌های آزمایش تجربی، اعتبارسنجی شد. سپس، نتایج مدنظر در فشار ۸ بار و سرعت ۹۷۰ دور بر دقیقه برای سه سیال عامل هوا، هلیوم و هیدروژن، در بازه دمایی منبع گرم (۳۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد) و در دو حالت پرانتل ثابت و متغیر با دما، استخراج گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که میزان درصد تغییرات توان، بازدهی و اتلاف حرارتی برای گاز هوا، در دو حالت پرانتل ثابت و متغیر کمتر از ۱۲ درصد، برای گاز هلیوم کمتر از ۶ درصد و برای گاز هیدروژن کمتر از ۵ درصد بود که بیشترین تغییرات در قسمت توان موتور مشاهده شد. در نهایت با استفاده از آنالیز رگرسیون، میزان حساس بودن درصد تغییرات عملکرد موتور استرلینگ، در هر دو حالت پرانتل ثابت و متغیر با دما، برای هر سه گاز مشخص شد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

موتور استرلینگ یک موتور برونسوز است که براساس اختلاف دما بین منبع گرم و سرد کار می‌کند. موتورهای استرلینگ از نظر ساختاری به چهار دسته موتورهای بتا، گاما، آلفا و فری پیستون^۱ تقسیم می‌شوند [۱]. از ویژگی‌های مهم این نوع از موتورها استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی است. موتور استرلینگ دارای یک سیال عامل است که می‌تواند یکی از گازهای هوا، هلیوم، هیدروژن، نیتروژن و ... باشد. از زمان اختراع موتور استرلینگ تا کنون مدل‌های ترمودینامیکی مختلفی مانند مدل هم‌دما، آدیباتیک و آدیباتیک غیر ایده‌آل (سیمپل^۲)، برای شبیه‌سازی فعالیت این موتورها ارائه شده است که در هر کدام از این روش‌ها فرضیاتی موجود است که این فرضیات میزان نزدیک شدن یا دور شدن جواب شبیه‌سازی به آزمایش تجربی را تعیین می‌کنند [۱]. کنگتراگل و همکاران [۲] به بررسی مروری موتور استرلینگ با منبع حرارتی خورشیدی و موتور استرلینگ دما پایین پرداختند. در نهایت دریافتند موتور استرلینگ هنگامی خوب کار می‌کند که سیال عامل دارای انتقال حرارت خوبی باشد، و انتقال حرارت خوب نیاز به دبی جرمی بالایی از سیال دارد. بنابراین برای کاهش تلفات پمپ استفاده از سیال عامل با ویسکوزیته پایین مناسب‌تر است. لی و همکاران [۳] به بررسی یک مدل جدید با عنوان مدل پلی‌تروپیک همراه با تلفات^۳ پرداختند که در نهایت نشان داده شد مدل پلی‌تروپیک توان و بازدهی موتور استرلینگ را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند. همچنین در این تحقیق با مقایسه گازهای هلیوم و هیدروژن دریافتند که گاز هلیوم برای سرعت‌های پایین ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و گاز هیدروژن برای سرعت‌های بالا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه مناسب هستند. هوشنگ و همکاران [۴] به بررسی ترمودینامیکی و تجربی موتور استرلینگ نوع گاما پرداختند و در نهایت نتایج بهینه را با استفاده از شبکه عصبی به دست آوردند. قیس و همکاران [۵] نتایج تجربی به دست آمده از موتور استرلینگ نوع گاما را با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه بهینه کردند. هدف از بهینه‌سازی در این تحقیق کاهش اختلاف دما بین دو طرف دیواره بازیاب و افزایش توان ترمزی موتور بوده است. در روش بهینه‌سازی، بهینه‌ترین قدرت ۲۶۰ وات با اختلاف دمای ۲۰ درجه بین دو طرف دیواره بازیاب بوده است در حالی که در آزمایش تجربی اول حداقل اختلاف دما بین دو طرف بازیاب ۱۷ درجه سانتیگراد بوده است. قیس و همکاران [۶] به بررسی تئوری و تجربی گرمکن^۴ موتور استرلینگ و بهینه‌سازی آن پرداختند برای این تحقیق چهار پارامتر غیر مستقل دمای منبع گرم، فشار ورودی، دبی آب خنک‌کننده و فرکانس موتور تغییر کرده‌اند. در نهایت دریافتند که در فرکانس‌های بالاتر انرژی گرمکن به نظر ثابت می‌ماند و روند مبادله بسیار سریع است. به همین دلیل سیال عامل زمان

کافی برای جذب تمام گرمای تولید شده توسط منبع گرم را ندارد. افزایش ۰٫۲ تا ۰٫۸ درصد راندمان گرمکن باعث افزایش ۲ و ۳ برابری میزان گرمای جذب شده توسط سیال عامل می‌شود که به ترتیب در فرکانس‌های کاری ۲ و ۳٫۵ هرتز است. توان ترمزی از میزان ۱۰۰ وات به ۳۴۰ وات به طور متوسط به ترتیب در فرکانس‌های ۲ و ۷ هرتز افزایش می‌یابد. بیشترین میزان توانایی گرمکن در فرکانس ۶٫۱ هرتز و فشار اولیه ۷ بار و درجه حرارت ۵۰۰ درجه سانتیگراد بوده است. لی و همکاران [۷]، به بررسی تاثیر تلفات بر روی عملکرد موتور استرلینگ موتور گاما پرداختند. در نهایت با مقایسه نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی دریافتند که در آزمایش تجربی مقدار کار در ۱۴۹ سیکل برابر ۰٫۴۷۹ ژول بوده است. به طور میانگین در هر سیکل، کار تجربی برابر ۰٫۰۳۲۱۳ ژول بود که در شبیه‌سازی این مقدار برابر ۰٫۰۳۵۱۸ ژول در هر سیکل محاسبه شد و خطایی در حدود ۹٫۴۹ درصد داشت. الفاروی و همکاران [۸] به بررسی و مقایسه نتایج مدل دوبعدی دینامیک سیالات محاسباتی^۵ با آزمایش تجربی پرداختند. این نتایج نشان داد که تغییر زاویه فاز باعث ایجاد تاثیر قابل توجهی بر توان موتور می‌شود به گونه‌ای که با افزایش زاویه فاز قدرت افزایش می‌یابد و سپس افت می‌کند. چنگ و یانگ [۹] به بهینه‌سازی پارامترهای هندسی موتور استرلینگ بر اساس روابط تئوری پرداختند. نتایج نشان داد که موتور استرلینگ بتا بالاترین توان شفت و موتور استرلینگ گاما پایین‌ترین توان شفت را دارند اگر چه در بین سه نوع موتور استرلینگ، نوع گاما برای کار در دماهای پایین‌تر مناسب‌تر است در حالی که موتور نوع آلفا اصلاً برای دماهای پایین مناسب نیست. الفاروی و همکاران [۱۰] به بررسی بهبود مدل‌های ترمودینامیکی موتور استرلینگ نوع گاما پرداختند. آنها دریافتند که قدرت شفت می‌تواند به میزان قابل توجهی افزایش یابد به طوری که برای هلیوم و نیتروژن هنگامی که دمای منبع سرد ۵۰ درجه سانتیگراد و دمای منبع گرم ۶۵۰ درجه سانتیگراد برسد به ترتیب، به میزان ۴۹ و ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین حداکثر انحراف ۱۵ درصد بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی ایجاد شده است. کاتو^۶ و همکاران [۱۱] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل هم‌دما به بررسی تاثیر هندسه و سرعت موتور استرلینگ بر دما پرداختند در نهایت دریافتند که افزایش سرعت موتور موجب کاهش دمای متوسط در محفظه جابجایی سمت گرم می‌شود. با این حال اثر افزایش سرعت موتور بر قدرت نشان داده شده، قوی‌تر از کاهش دمای متوسط است. چن و همکاران [۱۲] به بررسی پارامتریک دینامیک سیالات محاسباتی در موتور استرلینگ نوع گاما پرداختند و در نهایت نشان دادند که کورس و شعاع پیستون قدرت تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد موتور دارد و با افزایش آن، دو پارامتر قدرت و کارایی افزایش می‌یابد. کورس جابه‌جا

4 Heater

5 Computational Fluid Dynamics (CFD)

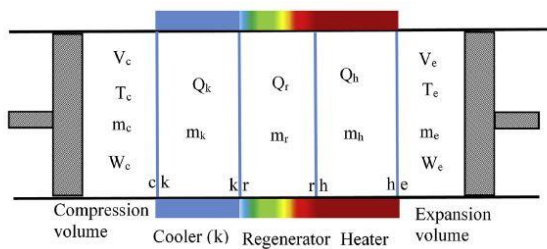
6 Kato

1 Free Piston

2 Simple

3 Polytropic Model Stirling with Losses (PSML)

شکل ۱ شماتیکی از موتور استرلینگ و محفظه‌های آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک موتور استرلینگ و محفظه‌های آن [۳]

روابط زیر مربوط به روابط مدل آدیاباتیک ایده‌آل است [۳].

$$p = \frac{m_t R}{\left(\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e}\right)} \quad (1)$$

$$m_i = \frac{p V_i}{R T_i} \quad (i = c, k, r, h, e) \quad (2)$$

$$dm_i = m_i \frac{dp}{p} \quad (i = k, r, h) \quad (3)$$

$$dm_c = -dm_{ck} \quad (4)$$

$$dm_e = dm_{he} \quad (5)$$

$$dm_{kr} = dm_{ck} - dm_k \quad (6)$$

$$dm_{rh} = dm_{kr} \quad (7)$$

$$dp = -\frac{\gamma p \left(\frac{dV_c}{T_{ck}} + \frac{dV_e}{T_{he}}\right)}{\frac{V_c}{T_{ck}} + \frac{V_e}{T_{he}} + \gamma \left(\frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h}\right)} \quad (8)$$

$$dm_c = \frac{pdV_c + \frac{V_c dp}{\gamma}}{T_{ck} R} \quad (9)$$

$$dm_e = \frac{pdV_e + \frac{V_e dp}{\gamma}}{T_{he} R} \quad (10)$$

$$\frac{dT_c}{T_c} = \frac{dV_c}{V_c} + \frac{dp}{p} - \frac{dm_c}{m_c} \quad (11)$$

$$\frac{dT_e}{T_e} = \frac{dV_e}{V_e} + \frac{dp}{p} - \frac{dm_e}{m_e} \quad (12)$$

$$dQ_k = \frac{C_v V_k dp}{R} - C_p (T_{ck} m_{ck} - T_{kr} m_{kr}) \quad (13)$$

$$dQ_r = \frac{C_v V_r dp}{R} - C_p (T_k m_{kr} - T_{rh} m_{rh}) \quad (14)$$

$$dQ_h = \frac{C_v V_h dp}{R} - C_p (T_{rh} m_{rh} - T_{he} m_{he}) \quad (15)$$

$$T_r = \frac{T_e - T_c}{\ln\left(\frac{T_e}{T_c}\right)} \quad (16)$$

$$m_t = m_c + m_e + m_k + m_r + m_h \quad (17)$$

$$dW = p(dV_c + dV_e) \quad (18)$$

در روابط ارائه شده منظور از $d = \frac{d}{d\theta}$ است [۳]. در رابطه (۹) و (۱۰)

اگر $m_{ck} > 0$ باشد $T_{ck} = T_c$ است در غیر اینصورت $T_{ck} = T_k$

است و اگر $m_{he} > 0$ باشد، $T_{he} = T_h$ است در غیر اینصورت $T_{he} = T_e$

است [۳].

کننده به شدت بر روی گرمای ورودی تاثیر دارد اما تاثیر آن بر روی قدرت ضعیف است بنابراین باعث کاهش بازدهی آن می‌شود. هوشنگ و همکاران [۱۳] به بررسی و ارائه الگوی ریاضی دینامیکی - ترمودینامیکی موتور استرلینگ جهت بهبود بازده و توان تولیدی پرداختند آنها دریافتند که عمده افت فشار ناشی از حرکت سیال در موتور استرلینگ مورد نظر ناشی از وجود بازیاب است. اما این در حالی است که افزایش افت فشار ناشی از کاهش تخلخل بازیاب در تخلخل بیش از ۹۰ درصد تاثیر چشمگیری بر بازده موتور ندارد. چن و همکاران [۱۴] به بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای موتور استرلینگ نوع گاما پرداختند، آنها دریافتند که رفتارهای پیچیده انتقال حرارت در موتور منجر به توزیع درجه حرارت بسیار غیرمستقیم در تمام بخش‌های موتور در بیشتر دوره‌های موتور می‌شود. چن و همکاران [۱۵] به بررسی آزمایش تجربی بر روی بازیاب موتور استرلینگ نوع گاما همراه با دو پیستون پرداختند. در نهایت دریافتند که بزرگترین قطر سیم باعث افزایش کارایی موتور می‌شود، در حالی که کوچکترین قطر سیم باعث بدترین حالت کارکرد می‌شود. چن [۱۶] به مطالعه بر روی پارامترهای هندسی موتور استرلینگ نوع گاما با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته است. براساس نتایج، زاویه فاز تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد موتور از جمله بر روی بازدهی موتور دارد به طوری که در زاویه فاز ۱۰۰ درجه حداکثر قدرت موجود است. درحالی که زاویه فاز ۹۰ درجه با توجه به عملکرد کلی موتور انتخاب بهتری است.

همانگونه که مشخص است مطالعه بر روی تغییرات خصوصیات سیال عامل با دما و تاثیر آن بر توان، بازدهی و اتلاف حرارتی موتور استرلینگ نوع گاما، بسیار به ندرت انجام شده است. در این تحقیق، قصد بر آن است که پس از اعتبارسنجی مدل ترمودینامیکی سیمپل با نتایج آزمایش تجربی، به بررسی اثر تغییرات پراتنل پرداخته شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل سیمپل و معادلات حاکم

در این تحقیق، از روش سیمپل استفاده شده است. به روش سیمپل، مدل آدیاباتیک غیر ایده‌آل نیز گفته می‌شود. با این تفاوت که در این کد برخی از تلفات مانند افت فشار ناشی از اصطکاک سیال و تلفات حرارتی در بازیاب نیز محاسبه می‌شود که باعث می‌گردد نتایج خروجی این کد نسبت به کدهای دیگر به آزمایش تجربی نزدیکتر باشد.

فرضیات موجود در این تحقیق به شرح زیر است:

- گاز استفاده شده در موتور، گاز ایده‌آل است.
- در موتور نشستی وجود ندارد یا جرم گاز در موتور ثابت است.
- محفظه گرم در تمام جهات به یک اندازه حرارت دریافت می‌کند.
- سرعت موتور و دمای منبع سرد ثابت است.
- ظرفیت حرارتی ویژه در فشار و حجم ثابت با دما تغییر نمی‌کند.

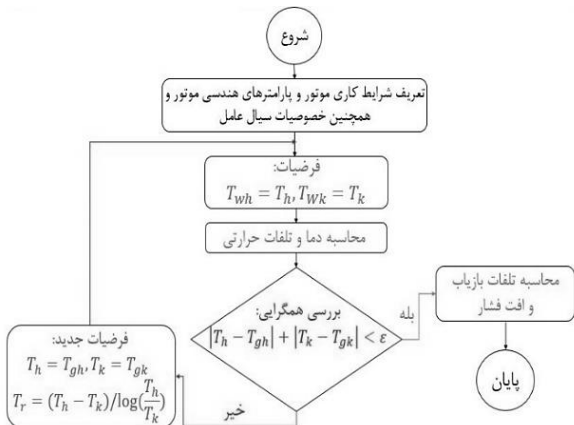
$$T_{gk} = T_{wk} - \frac{Q_k f_r}{h_k A_{wk}} \quad (33)$$

$$h_i = \frac{0.0791 \mu C_p Re_m^{0.75}}{2D_i Pr} \quad i = h, k \quad (34)$$

در نهایت، با محاسبه کاهش قدرت و همچنین تلفات انرژی، کار واقعی موتور استرلینگ و همچنین گرما واقعی، در مدل غیر ایده‌آل آدیباتیک به دست می‌آید. بنابراین، بازدهی موتور را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۱۷].

$$\eta = \frac{W - W_{loss}}{Q_H} \quad (35)$$

الگوریتم حل روش آدیباتیک غیر ایده‌آل در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: الگوریتم حل مدل آدیباتیک غیر ایده‌آل

همانطور که در روابط مشخص است نوع سیال در روابط تاثیر گذار است. با توجه به هدف این تحقیق بر روی تغییرات دما بر خصوصیات سیال برای این تحقیق، دو نوع روش در نظر گرفته شده است.

- در روش اول، مقدار پارامترهای ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته برای هر سه گاز هوا، هلیوم و هیدروژن، در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد (دمای کارکردی موتور)، ثابت در نظر گرفته شده است. در این مرحله، این مقادیر، با دما تغییر نخواهند کرد. ظرفیت گرمایی ویژه نیز، با توجه به فرضیاتی که گفته شد، ثابت است. در نتیجه، عدد پرانتل در این روش، براساس رابطه (۳۶)، برای هر سه سیال عامل، در مقدار ۰.۶۸ ثابت بوده است.
- در روش دوم، همانند قسمت اول، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، مقداری ثابت لحاظ شده است. اما تغییرات ویسکوزیته با دما از رابطه (۳۷) محاسبه خواهد شد [۱۸]. برای ضریب هدایت حرارتی نیز، با استفاده از جداول پیوست کتاب انتقال حرارت جابه جایی بجان [۱۹]، برای گازهای مختلف و با روش برازش منحنی، رابطه‌ای به صورت خطی به دست آمد (رابطه (۳۸)) و در نهایت با داشتن تمامی این پارامترها، عدد پرانتل، برحسب تغییرات دما، محاسبه می‌شود.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (36)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T_0 + S}{T + S} \right) \quad (37)$$

همانطور که در ابتدا ذکر شد این تحقیق بر اساس روابط آدیباتیک غیر ایده‌آل است که پایه آن روش آدیباتیک ایده‌آل است با این تفاوت که در روش غیر ایده‌آل برخی از تلفات در روابط لحاظ خواهند شد. یکی از این تلفات افت فشار است که می‌توان با محاسبه ضریب اصطکاک که خود به عدد رینولدز جریان مربوط می‌شود محاسبه کرد [۱۷].

$$dP_R = \frac{2f\mu V_r G l_r}{m_r d_r^2} \quad (19)$$

ضریب اصطکاک برای بازیاب از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷].

$$f = 54 + 1.43 Re^{0.78} \quad (20)$$

افت فشار و همچنین ضریب اصطکاک در گرمکن نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۷].

$$dP_H = \frac{2f\mu V_h G l_h}{m_h d_h^2} \quad (21)$$

$$f = 0.0791 Re^{0.75} \quad (22)$$

افت فشار در کولر نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷].

$$dP_K = \frac{2f\mu V_k G l_k}{m_k d_k^2} \quad (23)$$

برای محاسبه ضریب اصطکاک در کولر همانند ضریب اصطکاک در گرمکن از رابطه (۲۱) استفاده خواهد شد [۱۷]. در نهایت افت فشار کل از مجموع افت فشارهای موجود در کولر، گرمکن و بازیاب محاسبه خواهد شد [۱۷].

$$dP = dP_R + dP_H + dP_K \quad (24)$$

کار اتلافی به صورت زیر محاسبه خواهد شد [۱۷].

$$W_{loss} = f_r \int (dP dV) \quad (25)$$

علاوه بر افت فشار در بازیاب، تلفات انرژی نیز وجود دارد. هنگامی که سیال عامل از بازیاب عبور می‌کند مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد. این اتلاف انرژی از اختلاف بین انرژی بیشینه و کمینه در بازیاب در طول یک سیکل به دست می‌آید، لازم به ذکر است که در حالت ایده‌آل $\epsilon = 1$ می‌باشد و بنابراین اتلافی وجود ندارد [۱۷].

$$Q_{r,loss} = (1 - \epsilon)(Q_{r,max} - Q_{r,min}) \quad (26)$$

ضریب ایده‌آل بازیاب از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷].

$$\epsilon = \frac{NTU}{NTU + 1} \quad (27)$$

$$NTU = \frac{St \times A_{wg}}{2A} \quad (28)$$

$$St = \frac{0.46 Re^{-0.4}}{Pr} \quad (29)$$

با دانستن تلفات انرژی در بازیاب، انرژی حرارتی واقعی در گرمکن و کولر به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۷].

$$Q_H = Q_h + Q_{r,loss} \quad (30)$$

$$Q_K = Q_k - Q_{r,loss} \quad (31)$$

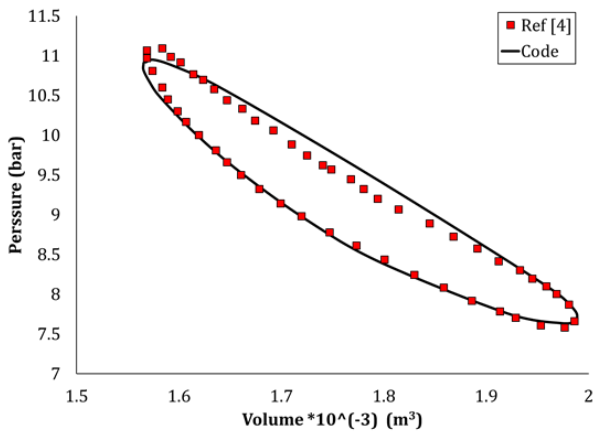
دمای گاز محفظه گرمکن و کولر از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۷].

$$T_{gh} = T_{wh} - \frac{Q_h f_r}{h_h A_{wh}} \quad (32)$$

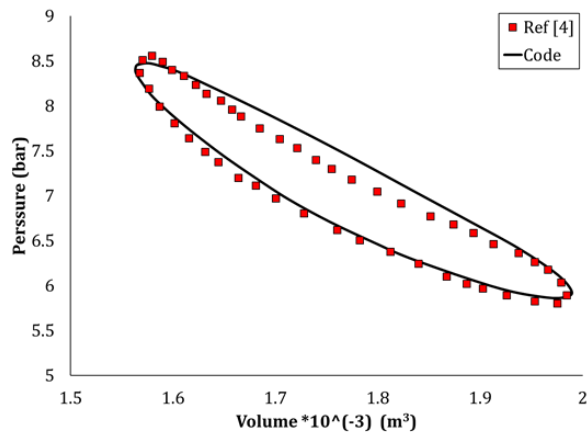
را نشان می‌دهد. به عنوان اولین نتیجه، توان اندیکاتوری موتور توسط کد نوشته شده (برای مدل ترمودینامیکی سیمپل)، در حالت‌های اول، دوم و سوم، به ترتیب برابر با مقادیر ۵۲۴، ۴۰۴ و ۲۸۷ وات محاسبه گردید. با مقایسه نمودارهای P-V می‌توان مشخص کرد که توان خروجی به دست آمده از کد با نتایج آزمایش تجربی، برای حالت‌های اول، دوم و سوم، به ترتیب دارای ۱۲٫۶۱، ۱۰٫۹۰ و ۲۰٫۶۷ درصد خطای نسبی است.

جدول ۳: شرایط کاری موتور استرلینگ با سیال عامل هلیوم

شرایط	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
فشار شارژ (پاسکال)	۸۱۰۰۰۰	۶۲۰۰۰۰	۴۶۰۰۰۰
دمای خنک‌کننده (درجه سانتیگراد)	۳۳٫۵	۴۰	۳۵
دمای گرمکن (درجه سانتیگراد)	۳۵۳	۳۵۰	۳۵۵
توان اندیکاتوری (وات)	۴۶۵	۳۶۴	۲۳۸



شکل ۳: مقایسه نمودار P-V برای حالت اول



شکل ۴: مقایسه نمودار P-V برای حالت دوم

از عوامل وجود خطا در این کد می‌توان به این موارد اشاره نمود که کد نوشته شده یک کد ترمودینامیکی صفر بعدی است و در آن برخی تلفات در نظر گرفته نشده است. به عنوان مثال، در کد استفاده شده در این مقاله، فقط تلفات موجود در بازیاب در نظر گرفته شده است و برای بقیه

$$k = k_0 + k_1 T \quad (38)$$

ضرایب روابط (۳۷) و (۳۸) در جدول ۱ ذکر شده است. شایان ذکر است که در انتها، نتایج این دو روش، با یکدیگر مقایسه خواهند شد تا اثر تغییرات دما بر خواص ترمودینامیکی سیال عامل در موتور استرلینگ، بر عملکرد آن مشخص گردد. همان گونه که قبلاً ذکر شد ظرفیت حرارتی ویژه در فشار و حجم ثابت با دما تغییر نمی‌کند اما دو پارامتر دیگر، برحسب دما، یک بار ثابت و یک بار متغیر لحاظ شده‌اند. عدد پرنتل نیز، بر اساس همین شرایط و مطابق با رابطه (۳۶)، محاسبه گردیده است.

تابع هدف استفاده شده در این تحقیق، مطابق با رابطه (۳۹) است که شامل درصد تغییرات خروجی‌های مسئله (توان، بازدهی و اتلاف حرارتی) در دو حالت عدد پرنتل ثابت و متغیر نسبت به دما، می‌باشد.

$$\text{Variation}(\%) = \frac{\text{Data (Pr: constant)} - \text{Data (Pr: variable)}}{\text{Data (Pr: constant)}} \times 100 \quad (39)$$

شایان ذکر است که منظور از دو حالت عدد پرنتل ثابت و متغیر، همان دو حالت پارامترهای ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی، وابسته و غیر وابسته به دما، است.

جزئیات و روابط آنالیز رگرسیون و تحلیل حساسیت، در مرجع [۲۰] آمده است. مشخصات موتور استرلینگ نوع گاما نیز، که در این تحقیق، مدنظر بوده است، در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱: ضراب مربوط به روابط (۳۷) و (۳۸) برای گازهای مختلف

خواص	هیدروژن	هلیوم	هوا
T_0	۲۷۳	۲۷۳	۲۷۳
μ_0	$۸,۴۱۱ \times 10^{-۱۰}$	$۱۸,۶۷۷ \times 10^{-۱۰}$	$۱۷,۱۶۴ \times 10^{-۱۰}$
S	۹۷	۸۰	۱۱۱
k_0	۷۳۶۱×10^{-۱۰}	۲۶۵۶×10^{-۱۰}	۸۳×10^{-۱۰}
k_1	۳۵۸×10^{-۱۰}	۳۵۳×10^{-۱۰}	۵۷×10^{-۱۰}

جدول ۲: مشخصات فنی موتور استرلینگ نوع گاما [۴]

مقدار	مشخصات فنی
۵۰۰ وات	توان خروجی
۸٫۵ درصد	بازدهی کلی
۷۵ میلیمتر	کورس پیستون
۰٫۹۶	تخلخل بازیاب
۹۰ درجه	زاویه فاز
۷۵ میلیمتر	کورس جابه‌جا کننده

۲-۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی، نمودار P-V و توان کد نوشته شده همراه با نتایج آزمایش تجربی در مرجع [۴]، در سه حالت مختلف، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند (شکل ۳ تا ۵). جدول ۳ نیز، شرایط کاری موتور، این سه حالت

دست آمده، در فشار ۸۰۰ کیلوپاسکال، دمای منبع سرد ۳۳٫۵ درجه سانتیگراد و سرعت ۹۷۰ دور بر دقیقه (شرایط کارکردی موتور) است. اطلاعات موجود در جدول ۴ نشان می‌دهند که بیشترین میزان درصد تغییرات توان، بازدهی و اتلاف حرارتی در سیال عامل هوا به ترتیب ۱۱٫۲، ۵٫۸ و ۷٫۸ درصد در دماهای ۳۵۰، ۴۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. شایان ذکر است که درصد تغییرات محاسبه شده، بین دو حالت نتایج برای خواص وابسته به دما و نتایج خواص بدون وابستگی به دما می‌باشد که براساس رابطه (۳۹) است.

جدول ۴: مقایسه عملکرد موتور برای دو حالت پرنتل ثابت و متغیر برای هوا

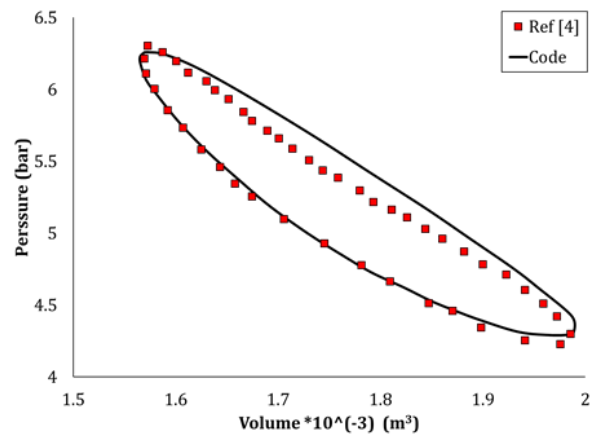
دما (درجه سانتیگراد)	پرنتل ثابت			پرنتل متغیر		
	توان (وات)	بازدهی (%)	حرارت اتلاfi (وات)	توان (وات)	بازدهی (%)	حرارت اتلاfi (وات)
۳۵۰	۲۷۴٫۸	۳٫۲	۶۷۱۵٫۰	۲۴۴	۳٫۱	۶۱۹۰٫۸
۴۰۰	۳۵۰٫۸	۳٫۶	۷۸۵۵٫۰	۳۱۵٫۷	۳٫۴	۷۲۵۸٫۸
۴۵۰	۴۱۹٫۹	۳٫۸	۸۸۹۵٫۰	۳۸۷٫۹	۳٫۷	۸۳۲۴٫۳
۵۰۰	۴۹۴٫۲	۴٫۰	۱۰۰۰۵٫۰	۴۶۰٫۷	۴	۹۳۸۸٫۶
۵۵۰	۵۶۲٫۱	۴٫۲	۱۱۰۲۳٫۰	۵۳۳٫۷	۴٫۲	۱۰۴۴۷
۶۰۰	۶۳۴٫۷	۴٫۳	۱۲۱۰۶٫۰	۶۰۷٫۳	۴٫۴	۱۱۵۰۴٫۹
۶۵۰	۷۰۱٫۴	۴٫۵	۱۳۱۰۳٫۰	۶۸۳٫۹	۴٫۵	۱۲۵۹۴٫۷
۷۰۰	۷۷۳	۴٫۶	۱۴۱۶۳٫۰	۷۵۸٫۶	۴٫۶	۱۳۶۴۵٫۱
۷۵۰	۸۳۸٫۷	۴٫۷	۱۵۱۴۱٫۰	۸۱۷	۴٫۸	۱۴۳۹۱٫۶

همچنین باتوجه به اطلاعات موجود در جدول ۵ می‌توان دریافت که بیشترین میزان درصد تغییرات توان، بازدهی و اتلاف حرارتی در سیال عامل هلیوم به ترتیب ۵٫۱، ۵٫۸ و ۱٫۹ درصد در دماهای ۷۰۰، ۷۵۰ و ۷۵۰ درجه سانتیگراد است. و طبق نتایج جدول ۶ می‌توان دریافت که بیشترین میزان درصد تغییرات توان، بازدهی و اتلاف حرارتی در سایل عامل هیدروژن به ترتیب ۴٫۰، ۳٫۱ و ۱٫۱ درصد در دماهای ۷۵۰، ۷۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد است.

جدول ۵: مقایسه عملکرد موتور برای دو حالت پرنتل ثابت و متغیر برای هلیوم

دما (درجه سانتیگراد)	پرنتل ثابت			پرنتل متغیر		
	توان (وات)	بازدهی (%)	حرارت اتلاfi (وات)	توان (وات)	بازدهی (%)	حرارت اتلاfi (وات)
۳۵۰	۴۹۰٫۰	۶٫۸	۵۱۵۰٫۰	۴۸۱٫۲	۶٫۷	۵۰۸۶٫۶
۴۰۰	۵۹۲٫۲	۷٫۲	۵۹۹۳٫۰	۵۸۶٫۶	۷٫۲	۵۹۱۸
۴۵۰	۶۸۹٫۰	۷٫۵	۶۷۹۴٫۰	۶۹۱٫۴	۷٫۶	۶۷۳۹٫۸
۵۰۰	۷۸۴٫۴	۷٫۸	۷۵۷۷٫۰	۷۹۶٫۲	۷٫۹	۷۵۲۳٫۱
۵۵۰	۸۷۵٫۱	۸	۸۳۳۳٫۰	۹۰۲٫۳	۸٫۲	۸۳۱۱٫۶
۶۰۰	۹۶۷٫۱	۸٫۲	۹۰۷۶٫۰	۱۰۰۴٫۳	۸٫۵	۹۰۵۷٫۷
۶۵۰	۱۰۵۷٫۵	۸٫۳	۹۸۱۳٫۰	۱۱۰۵٫۵	۸٫۷	۹۷۸۳٫۹
۷۰۰	۱۱۴۶٫۴	۸٫۵	۱۰۵۳۶٫۰	۱۲۰۵٫۷	۸٫۹	۱۰۴۹۰٫۴
۷۵۰	۱۲۳۳٫۸	۸٫۶	۱۱۲۴۶٫۰	۱۲۸۹٫۷	۹٫۱	۱۱۰۲۴٫۸

بخش‌های موتور، فرض آدیباتیک بودن برقرار است و تلفاتی در آن وجود ندارد. همچنین با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه مشخص شده است که روش‌های ترمودینامیکی مختلف برای موتورهای استرلینگ ارائه شده‌اند که خطاهای مختلفی نیز گزارش شده است. به عنوان مثال، احمدی و همکاران [۱]، لی و همکاران [۳]، بابالهی و همکاران [۲۱] به بررسی تئوری و تجربی موتور استرلینگ بتا با روش‌های مختلف از جمله روش آدیباتیک غیر ایده‌آل (سیمپل) در شرایط کاری دمای منبع گرم ۹۷۷ درجه کلوین، دمای منبع سرد ۲۸۸ درجه کلوین، فشار ۴٫۱۳ مگاپاسکال و فرکانس ۴۱٫۷ هرتز پرداختند و برای توان هر سه مرجع، به ترتیب ۱۲۳، ۱۲۹ و ۱۱۵ درصد خطا بدست آوردند. لذا با توجه به نتایج ارائه شده توسط محققان مختلف و نتایج بدست آمده در این مقاله، می‌توان دریافت که کد نوشته شده دارای دقت مناسبی است، چراکه خطای نسبی در کد نوشته شده کمتر از ۲۱ درصد است. از علت ایجاد چنین خطای کمی در این روش، نسبت به بقیه مراجع، می‌توان به متغیر گرفتن پرنتل در مدل این پژوهش اشاره کرد. همچنین تغییر ایجاد شده در نوع و حجم موتور در این مقاله، ممکن است بر مقدار خطای بدست آمده، موثر باشد.



شکل ۵: مقایسه نمودار P-V برای حالت سوم

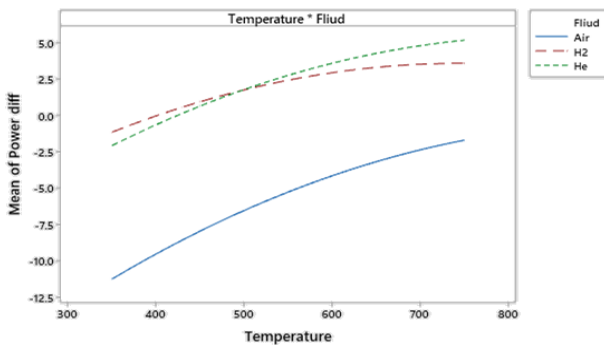
۳- نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی تغییرات توان، بازدهی و اتلاف حرارتی، یکبار درحالتی که پرنتل عددی ثابت و بار دیگر درحالتی که عدد پرنتل با دما در حال تغییر باشد، برای سه گاز پرکاربرد برای سیال عامل موتور، پرداخته خواهد شد. در جداول ۴، ۵ و ۶ مقایسه نتایج توان، بازدهی و اتلاف حرارتی در دو حالت پرنتل ثابت و پرنتل متغیر، به ترتیب برای گازهای هوا، هلیوم و هیدروژن است. جدول ۷ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت این پارامترها است که با استفاده از نرم افزار مینی‌تب^۱ و به روش آنالیز رگرسیون انجام شده است. لازم به ذکر است که نتایج به

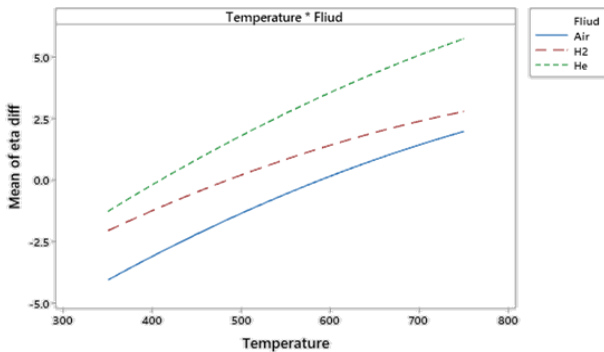
¹ Minitab

جدول ۷: نتایج تحلیل حساسیت به روش آنالیز رگرسیون

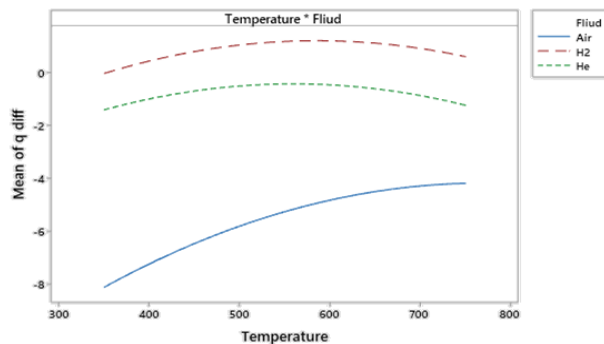
پارامترها	F-Value			P-Value	
	تغییرات اتلاف حرارتی	تغییرات بازدهی	تغییرات توان	تغییرات اتلاف حرارتی	تغییرات بازدهی
رگرسیون	۲۲۴٫۸۵	۲۲٫۸۶	۴۵۴٫۸۶	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
دما	۳۳٫۴۷	۳٫۳۲	۷۷٫۲۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۸۳
نوع سیال	۱۰۶٫۳۹	۱٫۰۱	۱۳۶٫۴۱	۰٫۰۰۰	۰٫۳۸۱
دما×دما	۱۷٫۵۸	۰٫۷۴	۲۶٫۹۵	۰٫۰۰۰	۰٫۴۰۰
دما×نوع سیال	۲۴٫۱۴	۱٫۰۱	۲۷٫۸۳	۰٫۰۰۰	۰٫۳۸۳



شکل ۶: درصد تغییرات توان در تقابل سیال عامل و دما



شکل ۷: درصد تغییرات بازدهی در تقابل سیال عامل و دما



شکل ۸: درصد تغییرات اتلاف حرارتی در تقابل سیال عامل و دما

در شکل ۷، هیدروژن دارای کمترین شیب و هلیوم دارای بیشترین شیب است که نشان می‌دهد در صد تغییرات بازدهی با دما، در سیال

جدول ۶: مقایسه عملکرد موتور برای دو حالت پراتل ثابت و متغیر برای هیدروژن

دما (درجه سانتیگراد)	پراتل ثابت			پراتل متغیر		
	توان (وات)	بازدهی (%)	حرارت اتلافی (وات)	توان (وات)	بازدهی (%)	حرارت اتلافی (وات)
۳۵۰	۴۸۱٫۴	۵٫۷	۶۶۸۱٫۰	۴۷۸٫۱	۵٫۶	۶۷۰۰٫۰
۴۰۰	۵۶۶٫۴	۵٫۹	۷۷۰۸٫۰	۵۶۷٫۰	۵٫۹	۷۷۴۸٫۲
۴۵۰	۶۴۹٫۸	۶٫۱	۸۷۱۲٫۰	۶۵۵٫۰	۶٫۰	۸۷۷۲٫۵
۵۰۰	۷۳۲٫۰	۶٫۲	۹۶۹۳٫۰	۷۴۲٫۷	۶٫۲	۹۷۷۴٫۴
۵۵۰	۸۱۲٫۷	۶٫۳	۱۰۶۵۷٫۰	۸۲۹٫۱	۶٫۳	۱۰۷۵۲
۶۰۰	۸۹۲٫۰	۶٫۴	۱۱۶۰۰٫۰	۹۱۶٫۵	۶٫۵	۱۱۷۲۸٫۳
۶۵۰	۹۶۹٫۵	۶٫۵	۱۲۵۲۳٫۰	۱۰۰۰٫۷	۶٫۶	۱۲۶۵۵٫۴
۷۰۰	۱۰۴۶٫۰	۶٫۵	۱۳۴۴۹٫۰	۱۰۸۳٫۹	۶٫۷	۱۳۵۶۱٫۱
۷۵۰	۱۱۲۱٫۱	۶٫۶	۱۴۳۲۰٫۰	۱۱۶۶٫۳	۶٫۸	۱۴۴۴۷٫۳

داده‌های جدول ۷ نشان می‌دهد که رگرسیون برای هر سه پارامتر توان، بازدهی و اتلاف حرارتی معنادار است، همچنین مشخص شده است که در صد تغییرات توان و اتلاف حرارتی به دما وابسته هستند ولی درصد تغییرات بازدهی به دما وابسته نیست، در بین درصد تغییرات توان و اتلاف حرارتی تاثیر دما بر توان نیز بیشتر است. همچنین نتایج نشان داده است که دو پارامتر درصد تغییرات توان و بازدهی به تغییر نوع سیال عامل نیز وابسته هستند به گونه‌ای که تاثیر در صد تغییرات توان بیشتر از در صد تغییرات اتلاف حرارتی است اما در صد تغییرات بازدهی به نوع سیال وابسته نیست. در حالتی که توان دوم دما محاسبه شده است مشخص شده است که به ترتیب در صد تغییرات توان و اتلاف حرارتی به توان دوم دما وابسته هستند ولی در صد تغییرات بازدهی به آن وابسته نیست. در نهایت مشخص شده است که دو پارامتر درصد تغییرات توان و اتلاف حرارتی به حاصل ضرب دما و سیال عامل وابسته هستند ولی درصد تغییرات بازدهی به حاصل ضرب دما و سیال وابسته نیست.

شکل‌های ۶، ۷ و ۸، درصد تغییرات توان، بازدهی و اتلاف حرارتی در تقابل سیال عامل با دما را نشان می‌دهد. علت وجود تغییرات زیاد برای هوا نسبت به دو سیال دیگر، تغییرات زیادتر در مقادیر عددی پراتل هوا (بزرگ‌تر بودن بازه تغییرات پراتل نسبت به دما) در مقایسه با هلیوم و هیدروژن است. با توجه به جدول ارائه شده در کتاب بجان [۱۹]، میزان تغییرات پراتل در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، برای هوا از ۰٫۶۸ تا ۰٫۷۲ است، در حالی که برای هلیوم ۰٫۶۷ و تقریباً ثابت است و برای هیدروژن از ۰٫۶۷ تا ۰٫۶۸ است. این میزان تغییرات در محاسبه دمای جدید (برای رسیدن به شرط همگرایی) تاثیرگذار است و در نتیجه، با توجه به این که محاسبه توان از این دماها استفاده می‌شود، لذا بر روی توان خروجی، تاثیر خواهد داشت. در نهایت، با مشاهده میزان تغییرات در شکل ۶ مشخص می‌شود که هوا دارای بیشترین شیب و پس از آن هلیوم و در نهایت هیدروژن است.

G	دبی سیال عامل، $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$
L	طول، m
D	قطر هیدرولیکی، m
Re	عدد رینولدز
St	عدد استنتون
Pr	عدد پراتل
dp	افت فشار، Pa
NTU	تعداد واحد انتقال
A_{wg}	قسمت خیس شده از بازیاب، m^2
A	سطح موثر انتقال حرارت، m^2
f_r	فرکانس، Hz
H	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$
K	ضریب انتقال حرارت هدایت، $\text{W}/\text{m.K}$
C_p	گرمای خاص در فشار ثابت، $\text{J}/(\text{kg}*\text{K})$
C_v	گرمای خاص در حجم ثابت، $\text{J}/(\text{kg}*\text{K})$

علائم یونانی

μ	ویسکوزیته دینامیکی، $\text{kg}/(\text{m}.\text{s})$
ε	تاثیر بازیاب
η	بازدهی
γ	نسبت حرارت خاص

زیرنویس

c	کمپرسور
k	کولر
r	بازیاب
h	گرمکن
e	منبع انبساط
$loss$	تلفات

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب قدردانی خود از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپیکو)، برای حمایت‌های فنی و از آقای مهندس علیزاده نیا، اعلام می‌دارند.

مراجع و منابع

- [1] M. H. Ahmadi, M. A. Ahmadi, F. Pourfayaz, Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, (2016) 168-184
 [2] B. Kongtragool, S. Wongwises, A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 7(2) (2003) 131-154

عامل هیدروژن کمتر و در سیال عامل هلیوم بیشتر است. بعلاوه با مشاهده جدول ۶ می‌توان دریافت که بازدهی در هلیوم بیشتر از هیدروژن است که علت آن وجود اتلاف بیشتر در سیال عامل هیدروژن است. چراکه در محاسبه رابطه استنتون (رابطه (۲۹))، تقابل عدد رینولدز و عدد پراتل به گونه‌ای است که باعث می‌شود عدد استنتون هیدروژن از هلیوم کمتر شود. این نیز باعث می‌شود که ضریب تاثیرپذیری بازیاب برای هیدروژن نسبت به هلیوم کاهش پیدا کند. از طرفی با توجه به رابطه (۱۴)، میزان اختلاف ماکزیمم و مینیمم شار حرارتی که بازیاب برای هیدروژن دریافت می‌کند، بیشتر از هلیوم است که در نهایت باعث افزایش اتلاف در سیال عامل هیدروژن می‌شود. در شکل ۸، هوا دارای بیشترین شیب است که نمایانگر این است که درصد تغییرات اتلاف حرارتی با دما، در سیال عامل هوا بیشتر از دو سیال عامل دیگر است. همچنین مشاهده می‌شود که درصد تغییرات اتلاف حرارتی در هیدروژن، در دو حالت پراتل ثابت و متغیر (دما ثابت یا متغیر)، نزدیک به صفر است که علت آن محدوده کمتر تغییرات پارامترهای ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی در هیدروژن است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا به اعتبارسنجی کد نوشته شده به روش آدیاباتیک غیر ایده‌آل با نتایج آزمایش تجربی برای موتور استرلینگ نوع گاما، پرداخته شد. سپس، نتایج توان، بازدهی و اتلاف حرارتی، در دو حالت پراتل ثابت و پراتل متغیر در دماهای مختلف کاری موتور از کد ترمودینامیکی استخراج گردید و درصد تغییرات توان، بازدهی و اتلاف حرارتی نیز محاسبه شد. در نهایت، نتایج فوق، با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و روش آنالیز رگرسیون، تحلیل حساسیت گردید. براساس نتایج، در صد تغییرات توان و اتلاف حرارتی به دما وابسته هستند ولی درصد تغییرات بازدهی به دما وابسته نیست. دو پارامتر درصد تغییرات توان و اتلاف حرارتی به تغییر نوع سیال عامل نیز وابسته هستند به گونه‌ای که تاثیر در صد تغییرات توان بیشتر از در صد تغییرات اتلاف حرارتی است اما درصد تغییرات بازدهی به نوع سیال وابسته نیست.

فهرست علائم

P	فشار، Pa
m_t	جرم کلی گاز، kg
R	ثابت گاز، $\text{J}/(\text{kg.K})$
V	حجم، m^3
T	دما، K
θ	زاویه، درجه
Q	شار حرارتی، J
W	کار، J
F	ضریب اصطکاک

- temperature-differential γ -type Stirling engine, *Energy Conversion and Management*, 106 (2015) 635-643
- [13] م. هوشنگ، ر. عسگری مقدم، م. طالع ماسوله، س. علیزاده نیا، ارائه الگوی ریاضی دینامیکی - ترمودینامیکی موتور استرلینگ جهت بهبود بازده و توان تولیدی، تحقیقات موتور، ۲۳ (۱۳۹۰) ۷۲ - ۸۵
- [14] W.L. Chen, K.L. Wong, Y. F. Chang, A computational fluid dynamics study on the heat transfer characteristics of the working cycle of a low-temperature-differential γ -type Stirling engine, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75 (2014) 145-155
- [15] W. L. Chen, K. L. Wong, H. E. Chen, An experimental study on the performance of the moving regenerator for a γ -type twin power piston Stirling engine, *Energy Conversion and Management*, 77 (2014), 118-128
- [16] W.L. Chen, A study on the effects of geometric parameters in a low-temperature-differential γ -type Stirling engine using CFD, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107 (2017) 1002-1013
- [17] S. Toghyani, A. Kasaeian, M.H. Ahmadi, Multi-objective optimization of Stirling engine using non-ideal adiabatic method, *Energy Conversion and Management*, 80 (2014) 54-62
- [18] F. M.White, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, 2006
- [19] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, John Wiley & sons, 2004
- [20] فاطمه احدی، بهینه سازی نوع و ضخامت پوشش حائل حرارتی به منظور بهبود بازدهی و توان موتور استرلینگ نوع گاما، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۸
- [21] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, Modified PSVL: A second order model for thermal simulation of Stirling engines based on convective-polytropic heat transfer of working spaces, *Applied Thermal Engineering*, 85 (2015) 340-355
- [3] R. Li, L. Grosu, W. Li, New polytropic model to predict the performance of beta and gamma type Stirling engine, *Energy*, 128 (2017) 62-76.
- [4] M. Hooshang, R. Askari Moghadam, S. Alizadeh Nia, M. T. Masouleh, Optimization of Stirling engine design parameters using neural networks, *Renewable Energy*, 74 (2015) 855-866
- [5] R. Gheith, F. Aloui, S. Ben Nasrallah, Study of temperature distribution in a Stirling engine regenerator, *Energy Conversion and Management Journal*, 88 (2014) 962-972
- [6] R. Gheith, H. Hachem, F. Aloui, S. Ben Nasrallah, Experimental and theoretical investigation of Stirling engine heater: Parametrical optimization, *Energy Conversion and Management Journal*, 105, (2015) 285-293
- [7] R. Li, L. Grosu, D. Queiros-Condé, Losses effect on the performance of a Gamma type Stirling engine, *Energy Conversion and Management Journal*, 114 (2016) 28-37
- [8] S. Alfarawi, R. AL-Dadah, S. Mahmoud, Influence of phase angle and dead volume on gamma-type Stirling engine power using CFD simulation, *Energy Conversion and Management Journal*, 124 (2016) 130-140
- [9] C. H. Cheng, H. S. Yang, Optimization of geometrical parameters for Stirling engines based on theoretical analysis, *Applied Energy*, 92 (2012) 395-405
- [10] S. Alfarawi, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, Enhanced thermodynamic modelling of a gamma-type Stirling engine, *Applied Thermal Engineering Journal*, 106 (2016) 1380-1390
- [11] Y. Kato, S. Saitoh, K. Ishimatsu, M. Iwamoto, Effect of geometry and speed on the temperatures estimated by CFD for an isothermal model of a gamma configuration low temperature differential Stirling engine with Flat-shaped heat exchangers, *Applied Thermal Engineering Journal*, 115 (2017) 111-122
- [12] W. L. Chen, Y. C. Yang, J. L. Salazar, A CFD parametric study on the performance of a low-



Sensitivity analysis of dependency of working fluid thermo-dynamics properties to temperature on performance of Gama-type Stirling engine

B. Vaziri¹, M. Azadi^{2*}, M. Biglari³, S. N. Madani⁴

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, bvaziri@semnan.ac.ir

² Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, m_azadi@semnan.ac.ir

³ Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, mbiglari@semnan.ac.ir

⁴ Irankhodro Powertrain Company(IPCO), Tehran, Iran, n_madani@ip-co.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Selected Papers of 11th
International Conference on
Internal Combustion Engine & Oil

Keywords:

Stirling engine
Thermo-dynamics properties
Working fluid
Temperature-dependency

ABSTRACT

This research proposes the effect of temperature variation in the Prandtl number on the power, the efficiency and the heat loss of the Gama-type Stirling engine. It should be noted that the Prandtl number included the viscosity, the thermal conductivity coefficient and the specific heat at constant pressures of the working fluid, which the temperature dependency of such first two thermo-dynamics properties were studied in this article. For this objective, a thermo-dynamics code based on the non-ideal-adiabatic method was firstly written to consider losses, including the engine pressure drop and the regenerator heat loss. In the second stage, such code was validated by experimental data. Then, results at 8 bar of the pressure, 970 rpm of the speed for three working fluids of air, helium and hydrogen were obtained within the hot source temperature of 350-750°C and for two conditions of constant Prandtl number and variable Prandtl number with the temperature. Obtained results demonstrated that the variation value for the power, the efficiency and the heat loss was less than 12%, 6% and 5% for air, helium and hydrogen, respectively, where the maximum change was observed in the engine power. Finally, using the regression analysis, the sensitivity value of the variation percentage of the Stirling engine performance was determined for three working fluids and under two conditions of constant and variable Prandtl number.

