

آنالیز و بهینه‌سازی موتور استرلینگ نوع بتا با در نظر گرفتن اثرات افت‌های حرارتی و هیدرولیکی بازیاب غیرایده‌آل

مسعود ضیاء بشرحق^{۱*}، مصطفی محمودی^۲

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹، mzia@kntu.ac.ir

چکیده- در این مقاله، حل عددی موتور استرلینگ نوع بتا، با در نظر گرفتن بازیاب غیرایده‌آل در آن، انجام شده است. برای این منظور از مدل مرتبه دوم، شامل افت‌های حرارتی و هیدرولیکی بازیاب، استفاده شده و اثر آن‌ها بر روی راندمان و توان خروجی موتور به‌دست آمده است. در ادامه، با استفاده از کد عددی، مقادیر بهینه ابعادی و عملکردی بازیاب محاسبه شده است. برای صحت‌گذاری نتایج به‌دست آمده، از پارامترهای هندسی و عملکردی موتور ساخته‌شده توسط شرکت جنرال موتورز به نام GPU-3 استفاده شده است. با استناد به نتایج به‌دست آمده، مقادیر افت‌های حرارتی و هیدرولیکی در بازیاب بسیار قابل توجه بوده و باعث کاهش توان موتور به میزان ۲۳ درصد و راندمان آن به میزان ۸ درصد می‌شود. با استفاده از کد عددی و نتایج به‌دست آمده، مقدار تخلخل کمتر از ۰/۷، فرکانس ۳۵ هرتز و طول ۲۴ میلی‌متر، برای بازیاب در شرایط بهینه هندسی و فیزیکی موتور، پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژگان: موتور استرلینگ، بازیاب، مدل آدیاباتیک، افت‌های حرارتی، افت هیدرولیکی

Analysis and optimization of beta-type Stirling engine taking into account the non-ideal regenerator thermal and hydraulic losses effects

M. Ziabasharhagh^{1*}, M. Mahmoodi²

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

2- PhD Student, Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

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

Abstract- In this paper, numerical solution of beta-type Stirling engine was presented considering its non-ideal regenerator. To this end, the second-order model including thermal and hydraulic losses of regenerator was used and their effect on the output power and efficiency of the engine was obtained. Then, a numerical code was used for calculating dimensional and functional optimum values of regenerator. To confirm the obtained result, the functional and geometrical parameters of the engine made by General Motors Corporation called GPU-3 were used. According to the obtained results, the values of hydraulic and thermal losses in the regenerator were considerable and led to the decrease in the engine power and efficiency by 23% and 8%, respectively. Using the obtained results and numerical code, the amounts of porosity, frequency and length of the regenerator were suggested as less than 0.7, 35 Hz and 24 mm, respectively, in the optimum physical and geometrical conditions of the engine.

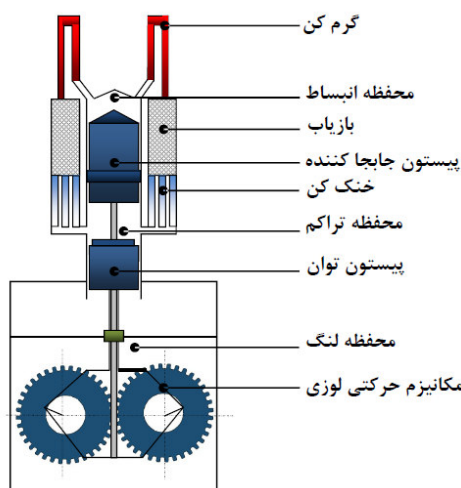
Keywords: Stirling Engine, Regenerator, Adiabatic Model, Heat Losses, Hydraulic Loss

۱- مقدمه

مصرف سرانه منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر زمین شامل گاز، نفت و زغال سنگ روز به روز افزایش می‌یابد. کاهش استفاده از این منابع تجدیدناپذیر به نقطه تمرکز تمام دانشمندان در سرتاسر جهان تبدیل شده است. مطالعه برای بهبود راندمان ماشین‌آلات (مانند خودرو، موتورهای نیروگاهی و غیره) و جایگزین کردن آن‌ها با استفاده از منابع تجدیدپذیر به حوزه بسیار جذابی برای محققان تبدیل شده است. موتور استرلینگ از جمله ایده‌هایی است که در سال‌های اخیر علاقه‌مندان زیادی را به خود جلب کرده است. پایین‌بودن آلودگی، پایین‌بودن مقادیر تولید صوت و ارتعاش، پایین‌بودن مصرف سوخت، استفاده از سوخت‌های چندگانه (سوخت جامد، مایع، گاز و استفاده از سوخت‌های حیوانی و بهترین آن، استفاده از انرژی خورشیدی) مزیت‌های عمده در استفاده از موتور استرلینگ به‌شمار می‌روند. اخیراً، در مدل‌های تحقیقاتی، از سوخت هسته‌ای در موتور استرلینگ استفاده شده است که دورنمای تجاری خوبی برای آن مشخص می‌کند.

به لحاظ فیزیکی، موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی است و می‌تواند از هر نوع منبع حرارتی خارجی برای تولید انرژی مکانیکی استفاده کند. در سال‌های اخیر، محققان در طراحی و استفاده از موتورهای استرلینگ به نتایج بسیار خوبی دست یافته‌اند. از جمله مهم‌ترین دستاوردهای به‌دست آمده، پیشبرد فناوری استرلینگ در زمینه ساخت موتورهای خورشیدی با تولید قدرت محوری ۱۰ کیلووات است. با توجه به سهم آفتاب در کشورهایی مانند ایران، تولید انرژی با استفاده از این فناوری بسیار قابل ملاحظه است. طرح تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP)^۱ نیز یکی از ایده‌های جدیدی است که توسط شرکت‌های تولیدکننده این فناوری تجاری شده و در پایگاه‌های تولید برق از آن استفاده می‌شود. در حال حاضر، روش‌های نوینی در به‌کارگیری موتورهای استرلینگ در دست اقدام است که از آن جمله می‌توان به کاربرد موتورهای استرلینگ برای تامین برق مورد نیاز ماهواره‌ها و استفاده از موتورهای استرلینگ به عنوان جایگزین توربین‌های بخار در نیروگاه‌های هسته‌ای اشاره کرد. موتور استرلینگ به لحاظ ساختار فیزیکی شامل پنج زیرسیستم اصلی است که در مدل‌سازی، هر زیرسیستم به

صورت یک حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود. دو محفظه با حجم متغیر به نام‌های محفظه انبساط^۲ و محفظه تراکم^۳ و سه مبدل حرارتی با حجم ثابت به نام‌های گرم‌کن، خنک‌کن و بازیاب در موتور وجود دارد (شکل ۱). موتور همچنین دارای یک مکانیزم رانش است که در طول سیکل کاری تغییرات حجم را کنترل کرده و حرکت متناوب خطی پیستون‌ها را به شکل حرکت زاویه‌ای به محور محرکه منتقل می‌کند.



شکل ۱ موتور استرلینگ نوع بتا

محققان بسیاری تاکنون عملکرد ترمودینامیکی موتور استرلینگ را مطالعه کرده‌اند. نخستین تحلیل ریاضی قابل قبول برای تحلیل سیکل استرلینگ، پنجاه سال پس از اختراع آن، توسط اشمیت ارائه شد [۱]. تحلیل اشمیت بر مبنای تئوری محفظه تراکم و محفظه انبساط ایزوترم ارائه شده است. با استفاده از فرض اشمیت، معادلات ترمودینامیکی خطی شده و محاسبات اولیه برای اندازه‌گیری توان و راندمان خروجی موتور به‌راحتی صورت می‌گیرد. فینکن استاین [۲] تحلیل ترمودینامیکی اشمیت را ارتقا داد و تحلیل‌های اولیه آدیاباتیک را ارائه کرد. یورلی و همکارش [۳] توان و راندمان خروجی موتور استرلینگ را با استفاده از مدل ترمودینامیکی آدیاباتیک محاسبه کردند. فورموسا و همکارش [۴] مدل‌سازی را با استفاده از مدل ایزوترم، برای بررسی اثرات حجم‌های مرده بر روی راندمان و توان خروجی موتور، انجام داده‌اند. پوپسکو و همکاران [۵] نشان دادند که عملکرد پایین اساساً ناشی از بازیابی

2. Expansion space
3. Compression space

1. Combined Heat and Power

سیلندرها استفاده شده و در این خصوص ساده‌سازی صورت نگرفته است. در ادامه، با اعمال معادلات مربوط به افت‌های حرارتی و هیدرولیکی به کد عددی، راندمان و توان خروجی موتور محاسبه شده است. برای اعتبارسنجی کد عددی، نتایج به‌دست آمده در حالت ایدئال با نتایج ارائه‌شده برای موتور ساخته‌شده توسط شرکت جنرال موتورز^۱ (GPU-3)، که مشخصات هندسی و عملکردی آن موجود است، مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد جریان انرژی و مقدار افت‌های حرارتی و هیدرولیکی در بازیاب حرارتی بسیار بالا بوده و طراحی بهینه آن می‌تواند از اتلاف بخش زیادی از حرارت دریافت‌شده از منبع حرارتی دما بالا، در طی سیکل کاری موتور، جلوگیری کند. در نهایت، با تغییر شرایط فیزیکی و هندسی بازیاب حرارتی، راندمان و توان خروجی موتور به‌دست آمده و مقادیر بهینه پیشنهاد شده است.

۲- مدل‌سازی ترمودینامیکی

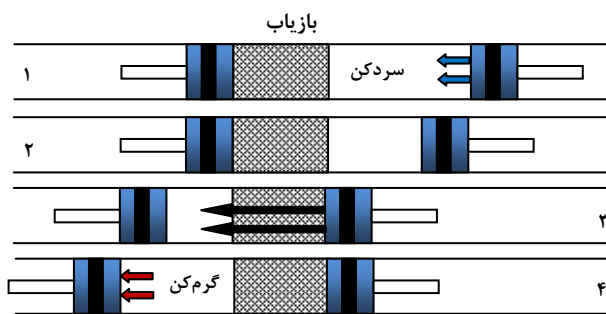
موتور استرلینگ در یک سیکل بسته ترمودینامیکی کار کرده و انرژی گرمایی را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند. انواع مختلف موتور استرلینگ با نام‌های آلفا، بتا و گاما شناخته می‌شوند. همه آن‌ها به لحاظ سیکل ترمودینامیکی مشابه هستند، ولی تفاوت‌های اساسی در نوع مکانیزم‌های مکانیکی دارند. موتور استرلینگ مدل آلفا دو پیستون در دو سیلندر جداگانه دارد. گرم‌کن در یک سیلندر و خنک‌کن در سیلندر دیگر تعبیه شده است. گاز عامل حرکت رفت و برگشت خود را از گرم‌کن آغاز و به وسیله بازیاب وارد خنک‌کن می‌شود. در موتور استرلینگ نوع بتا، دو عدد پیستون به نام‌های پیستون جابه‌جایی و پیستون توان در داخل یک سیلندر قرار گرفته‌اند. پیستون جابه‌جایی سیال عامل را میان فضای گرم و فضای سرد از میان گرم‌کن، بازیاب و خنک‌کن جابه‌جا می‌کند و باعث حرکت پیستون توان می‌شود. موتور استرلینگ نوع گاما ترکیبی از نوع آلفا و بتاست. به لحاظ تئوریک، راندمان موتور استرلینگ برابر با راندمان سیکل کارنو است. حرارت انتقال داده شده از گاز عامل به بازیاب طی فرایند ۴ به ۱، در طی فرایند ۲ به ۳، دوباره توسط گاز عامل جذب می‌شود (شکل ۲). یک منبع برای دفع حرارت و یک منبع برای تولید حرارت خارجی نیاز است تا در طی فرایندهای ۱ به ۲ و ۳ به ۴ مورد استفاده قرار گیرد. شاید

غیرایده‌آل بازیاب حرارتی است. کاشیک، سان، وو و همکاران [۸-۶] ثابت کردند که بیشترین فاکتورهای تاثیرگذار بر عملکرد موتورهای استرلینگ، هدایت حرارتی میان موتور و مخزن و ضریب بازیاب حرارتی در موتور استرلینگ است. کونگتراکول و همکارش [۹] اثر کارایی بازیاب و حجم مرده بر روی موتور، حرارت ورودی و راندمان موتور استرلینگ را شرح داده‌اند. کاسته و همکارش [۱۰] و یوسف تیمومی و همکاران [۱۱] اثرات بازگشت‌ناپذیری بر روی عملکرد راندمان سیکل موتور استرلینگ را بررسی کرده‌اند.

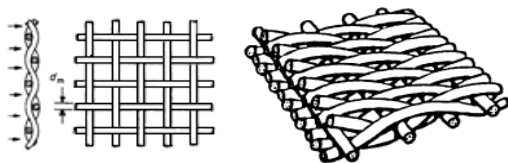
نتایج به‌دست آمده از این تحقیقات شامل اثر بازیاب حرارتی ناقص و بازگشت‌ناپذیری داخلی و خارجی بر روی راندمان موتور استرلینگ بوده است. سینار و همکاران [۱۲] یک موتور استرلینگ بتا ساختند که در فشار اتمسفر کار می‌کرد. تست‌های انجام‌شده بر روی این موتور نشان داد که سرعت، گشتاور و توان خروجی موتور، دمای منبع گرمایی را افزایش می‌دهند. در تحقیقات انجام‌شده توسط تومبارو و ورما [۱۳]، تکنولوژی‌های موجود و پیشرفت‌های حاصل‌شده در خصوص تحلیل موتورهای استرلینگ گردآوری شده و در نهایت در خصوص استفاده از آن‌ها پیشنهادهای ارائه شده است. توکلپور و همکاران [۱۴] نیز با استفاده از تئوری اشمیت، حل معادلات به صورت ایزوترم و استفاده از صفحات تخت در جذب دمای خورشید به عنوان منبع دمایی گرم آنالیز موتور استرلینگ نوع گاما را انجام داده‌اند. تحلیل‌های انجام‌شده تاکنون بر مبنای مدل‌های متفاوت ترمودینامیکی (ایزوترم و آدیاباتیک)، استفاده از منابع حرارتی متنوع (احتراقی، خورشیدی و پسماند حرارتی) و شکل‌های مختلف از موتور استرلینگ (موتور نوع آلفا، بتا و گاما) صورت گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در تحقیقات فوق، عملکرد موتور استرلینگ به پارامترهای فیزیکی و هندسی موتور، سیال عامل، راندمان بازیاب، تخلخل، حجم مرده، حجم جاروب شده، منابع دمایی و افت‌های انرژی وابسته است.

در تحقیق حاضر، با اعمال روابط ترمودینامیکی کلیه اجزای موتور و با استفاده از کد عددی نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب، شبیه‌سازی موتور استرلینگ نوع بتا به روش ۵ حجمی با استفاده از مدل آدیاباتیک غیرایده‌آل و با اعمال افت‌های حرارتی و هیدرولیکی بازیاب انجام شده است. برای بالابردن دقت شبیه‌سازی، از روابط واقعی تغییرات حجم پیستون‌ها در داخل

آزمایش توانایی مدل‌سازی انجام‌شده، نیاز به مشخصات قابل اعتماد ورودی است. برای این منظور، از مشخصات دقیق موتور ساخت شرکت جنرال موتورز (GPU-3) استفاده شده است که علاوه بر مشخصات دقیق هندسی و فیزیکی، مشخصات عملکردی آن موجود می‌باشد و توسط محققان زیادی، برای اعتبارسنجی مدل‌سازی‌های انجام شده، استفاده شده است.

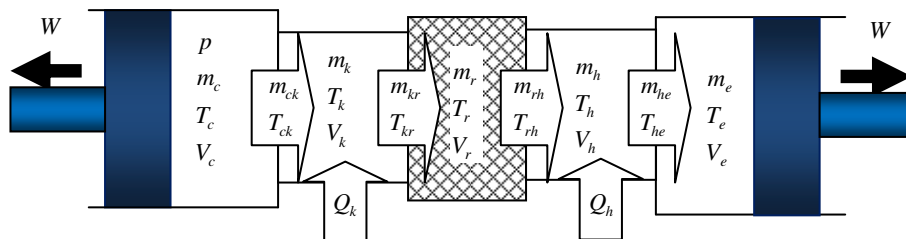


شکل ۲ اجزای موتور استرلینگ و نحوه عملکرد سیکل آن

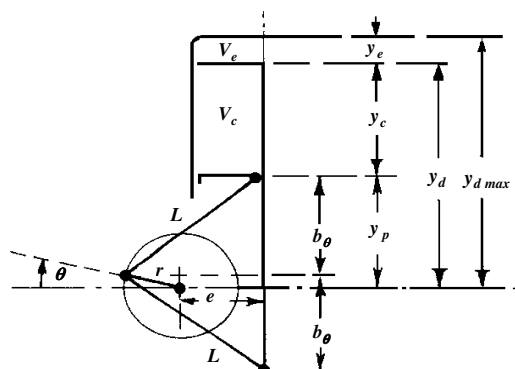


شکل ۳ ساختار بازیاب حرارتی [۱۵]

مهم‌ترین قسمت موتور استرلینگ که نقش اساسی در افزایش راندمان آن دارد، بازیاب حرارتی است. به لحاظ ساختار فیزیکی، بازیاب حرارتی از فولاد ضدزنگ به صورت ورقه‌های توری و یا میله‌های ضدزنگ فولادی روی هم چیده شده ساخته می‌شود (شکل ۳). در طی نیمی از سیکل کاری موتور، بازیاب مانند اسفنج حرارتی باعث جذب گرما از گاز عامل، در هنگام حرکت به سمت قسمت سرد موتور، می‌شود و در نیمه دیگر سیکل، بازیاب حرارت را به گاز عامل، در هنگام حرکت به سمت قسمت گرم موتور، پس می‌دهد. با ذخیره‌سازی حرارت در بازیاب و کم‌شدن اتلاف حرارتی، راندمان موتور افزایش می‌یابد. مدل‌سازی انجام‌شده در این تحقیق برای موتور نوع بتا به روش ۵ حجمی صورت گرفته است (شکل ۴). در این روش، اجزای موتور استرلینگ به ۵ واحد جداگانه تقسیم شده و برای هر واحد معادلات ترمودینامیکی استخراج می‌شوند. سپس، در محل برخورد واحدها با یکدیگر، شروط مرزی مناسب برای حرکت جریان سیال در داخل اجزا موتور در نظر گرفته می‌شود. در نهایت معادلات به‌دست آمده به روش عددی، با استفاده از روشی که در ادامه شرح داده خواهد شد، حل می‌شوند. نرخ تغییرات حجمی موتور با استفاده از مکانیزم حرکتی و روابط به‌دست آمده برای آن، در شکل ۵ نشان داده شده است. برای



شکل ۴ مدل ۵ حجمی برای شبیه‌سازی موتور استرلینگ



$$\begin{aligned}
 b_1 &= \sqrt{L^2 - (e-r)^2} \\
 b_2 &= \sqrt{(L-r)^2 - e^2} \\
 b_3 &= \sqrt{L^2 - (e+r)^2} \\
 b_\theta &= \sqrt{L^2 - (e+r)^2} \\
 V_e &= V_{cle} + A_d (b_\theta - b_2 - r \sin \theta) \\
 V_c &= V_{clc} + 2A_p (b_1 - b_\theta) \\
 \frac{dV_c}{d\theta} &= \frac{-2A_p r \sin \theta (e + r \cos \theta)}{b_\theta} \\
 \frac{dV_e}{d\theta} &= -\left(\frac{dV_c}{d\theta}\right) \frac{b_\theta}{2A_p} - A_d r \cos \theta
 \end{aligned}$$

شکل ۵ مکانیزم عملکرد و تغییرات حجم در موتور استرلینگ نوع بتا

و فرکانس حرکتی موتور نشان داده شده است. در جدول ۳، ضرایب تخلخل گوناگون با قطر سیم‌های مختلف، برای بررسی بهترین عملکرد حرارتی در بازیاب، آورده شده است. دیگر پارامترهای ورودی مورد نیاز برای آنالیز بر اساس شکل و شرایط موتور، با استفاده از معادلات موجود در طی حل عددی، محاسبه می‌شود.

جدول ۲ پارامترهای عملکردی موتور GPU-3

گاز عامل	هلیوم
دمای منبع گرم (گرم کن) T_h	۹۷۷ K
دمای منبع سرد (سرد کن) T_k	۲۸۸ K
فشار متوسط گاز عامل	۴۱۳۰ kPa
جرم گاز عامل	۱/۱۳۵ g
فرکانس عملکردی موتور	۴۱/۷ Hz

جدول ۳ سلول بازیاب با تخلخل و قطر متفاوت سیم

ضریب تخلخل بازیاب	قطر سیم بازیاب (mm)
M1	۰/۹۱۲۲
M2	۰/۸۳۵۹
M3	۰/۷۵۰۸
M4	۰/۷۲۲۱
M5	۰/۶۶۵۵
M6	۰/۶۱۱۲

۳- معادلات حاکم

هر کوششی برای مدلسازی موتور استرلینگ، خارج از فرض محفظه انبساط و تراکم ایزوترم، باعث ایجاد معادلات دیفرانسیلی پیچیده می‌شود. با فرض محفظه تراکم و محفظه انبساط آدیاباتیک، معادلات به صورت دیفرانسیلی در می‌آیند که تنها با استفاده از روش‌های عددی قابل حل خواهند بود. در چرخه آدیاباتیک راندمان حرارتی به یک تابع تبدیل خواهد شد که نه تنها به دما بستگی دارد، بلکه علاوه بر آن به نسبت حجم جاروب‌شده، زاویه فاز و نسبت حجم مرده نیز بستگی خواهد داشت. البته توان خروجی، چه در چرخه ایزوترم و چه در چرخه آدیاباتیک، تابعی از همه پارامترهای ذکرشده خواهد بود.

۳-۱- بخش اول: مدلسازی موتور استرلینگ در حالت ایدئال

مدل آدیاباتیک بر این فرضیات استوار است که گرم‌کن و خنک‌کن دارای انتقال حرارت نامحدودند و شرایط هم‌دما در

در جدول ۱، پارامترهای هندسی موتور شامل مشخصات دقیق ابعادی، حجم جاروب‌شده توسط پیستون توان و پیستون جابه‌جایی، مقادیر لقی پیستون توان و پیستون جابه‌جایی، مشخصات هندسی و تعداد لوله‌های به‌کار رفته در مبدل‌های حرارتی آورده شده است.

جدول ۱ پارامترهای هندسی موتور GPU-3

پیستون	
فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم	$28/68 \text{ cm}^3$
فضای خالی (حجم مرده) محفظه انبساط	$30/52 \text{ cm}^3$
حجم جاروب‌شده محفظه تراکم	$113/14 \text{ cm}^3$
حجم جاروب‌شده محفظه انبساط	$120/82 \text{ cm}^3$
طول میله اتصال‌دهنده (L)	۴۶ mm
خروج از مرکز (e)	۲۰/۸ mm
قطر پیستون توان (d_p)	۶۹/۹ mm
قطر پیستون جابه‌جایی (d_d)	۶۹ mm
هدایت حرارتی پیستون	$15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
کورس حرکتی پیستون	۴۶ mm
گرم‌کن	
تعداد لوله‌ها	۴۰ عدد
قطر داخلی لوله	۳/۰۲ mm
طول لوله	۲۴۵/۳ mm
حجم مرده	$70/88 \text{ cm}^3$
خنک‌کن	
مجموعه‌ای از لوله‌های همگن و صاف	
تعداد لوله‌ها برای هر سیلندر	۳۱۲
قطر لوله‌ها	۴۶/۱ mm
طول لوله	۴۶/۱ mm
حجم مرده	$13/8 \text{ cm}^3$
بازیاب	
بدنه بازیاب لوله ای شکل است که در آن سیم‌های فلزی بر روی هم انباشته شده است (شکل ۳)	
قطر	۲۲/۶ mm
طول	۲۲/۶ mm
قطر سیم	۴۰ μm
تخلخل	۰/۶۹۷
تعداد در هر سیلندر	۸
هدایت حرارتی بازیاب	$15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
حجم مرده	$50/55 \text{ cm}^3$

در جدول ۲، مشخصات عملکردی موتور شامل گاز عامل، دماهای مناطق گرم و سرد، متوسط فشار سیال عامل، جرم گاز

$$\begin{aligned} m_{rh} &= m_{kr} - Dm_r \\ m_{he} &= m_{rh} - Dm_h \\ Dm_k &= m_k Dp / p \\ Dm_r &= m_r Dp / p \\ Dm_h &= m_h Dp / p \end{aligned} \quad (5)$$

معادلات دما:

$$\begin{aligned} T_c &= pV_c / (Rm_c) \\ T_e &= pV_e / (Rm_e) \end{aligned} \quad (6)$$

شرایط مرزی در محل تقاطع سلول‌ها:

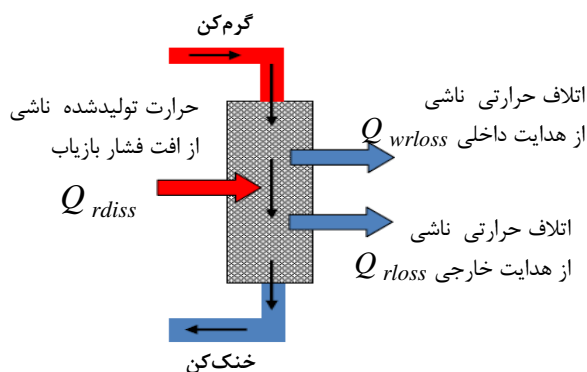
$$\begin{aligned} \text{if } m_{kc} > 0 \quad & \text{Then } T_{kc} \leftarrow T_k \\ & \text{Otherwise } T_{kc} \leftarrow T_c \\ \text{if } m_{eh} > 0 \quad & \text{Then } T_{he} \leftarrow T_e \\ & \text{Otherwise } T_{he} \leftarrow T_h \end{aligned} \quad (7)$$

و در نهایت معادلات حاصل‌شده برای مقادیر کار و گرمای داده‌شده در گرم‌کن و گرمای گرفته‌شده در خنک‌کن و گرمای مبادله‌شده در بازیاب حرارتی با استفاده از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} DW &= p(DV_e + DV_c) \\ DQ_k &= V_k Dp C_v / R - C_p (T_{ck} m_{ck} - T_{kr} m_{kr}) \\ DQ_r &= V_r Dp C_v / R - C_p (T_{kr} m_{kr} - T_{rh} m_{rh}) \\ DQ_h &= V_h Dp C_v / R - C_p (T_{rh} m_{rh} - T_{he} m_{he}) \end{aligned} \quad (8)$$

۳-۲- بخش دوم: مدلسازی افت‌های حرارتی و هیدرولیکی

در این بخش، بازیاب حرارتی، غیرایده‌آل در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین معادلات مربوط به افت‌های حرارتی و هیدرولیکی وارد کد عددی می‌شوند. این افت‌ها شامل اتلاف انرژی ناشی از افت فشار، اتلاف حرارتی ناشی از هدایت داخلی و اتلاف حرارتی ناشی از هدایت خارجی بازیاب است (شکل ۶).



شکل ۶ افت‌های حرارتی بازیاب

آن‌ها برقرار است. بنابراین، سیال در مبدل‌های حرارتی همیشه در دمای حداکثر یعنی T_{max} و یا در دمای حداقل یعنی T_{min} می‌باشد. دمای سیال عامل در سیلندرها در طی چرخه می‌تواند کمتر یا بیشتر از T_{max} در فضای انبساط یا T_{min} در فضای تراکم باشد. برای حل در حالت آدیاباتیک، ابتدا جرم در کل سیستم ثابت در نظر گرفته شده و سپس، با استفاده از معادلات انرژی و معادله حالت گاز کامل، معادلات مورد نیاز برای اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت به موتور و کار انجام‌شده و در نهایت راندمان موتور به‌دست می‌آیند. براساس قرارداد پسوندهای منفرد در شکل ۴ نشان‌دهنده ۵ سلول موتور و پسوندهای دوگانه نشان‌دهنده محل تقاطع سلول‌ها با یکدیگر است.

با در نظر گرفتن دستگاه معادلات تعریف‌شده برای مدل، مشخص می‌شود که تعداد ۲۲ متغیر و ۱۶ معادله دیفرانسیل برای حل سیکل موتور وجود دارد.

نقطه شروع آنالیز ثابت‌گرفتن جرم کل در تمام حجم‌های اشغال‌شده توسط گاز است [۳].

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

از قانون گاز ایده‌آل استفاده می‌کنیم و معادله حالت را در معادله (۱) قرار می‌دهیم:

$$M = p(V_c / T_k + V_k / T_k + V_r / T_r + V_h / T_h + V_e / T_h) / R \quad (2)$$

میزان Tr بر اساس فرض اشمیت به صورت خطی و با استفاده از رابطه زیر نشان داده می‌شود [۳]:

$$T_r = (T_h - T_k) / \ln(T_h / T_k) \quad (3)$$

در نهایت، با قراردادن معادله (۳) در معادله (۲)، معادله فشار به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$Dp = \frac{-\gamma p (DV_c / T_{ck} + DV_e / T_{he})}{[V_e / T_{ck} + \gamma (V_k / T_k + V_r / T_r + V_h / T_h) + V_e / T_{he}]} \quad (4)$$

معادلات جرم:

$$\begin{aligned} Dm_c &= (pDV_c + V_c Dp / \gamma) / (RT_{ck}) \\ m_k &= pV_k / (RT_k) \\ m_r &= pV_r / (RT_r) \\ m_h &= pV_h / (RT_h) \\ m_e &= M - (m_c + m_k + m_h + m_r) \\ m_{ck} &= -Dm_c \\ m_{kr} &= m_{ck} - Dm_k \end{aligned}$$

کامل پس داده نمی‌شود. در موارد ایدئال ضریب بازیابی حرارتی برابر یک است ($\varepsilon=1$) است. اتلاف انرژی توسط هدایت بیرونی برابر است با:

$$Q_{loss} = (1 - \varepsilon) \times (Q_{rmax} - Q_{rmin}) \quad (14)$$

ضریب بازیابی ایدئال از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\varepsilon = \frac{NTU}{(NTU + 1)} \quad (15)$$

اثرات بازیابی غیرایده‌آل با استفاده از تعداد واحدهای انتقال دهنده (NTU)^۱ به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$NTU = \frac{St \times A_{wg}}{2A} \quad (16)$$

A_{wg} مقدار سطح ترشده شبکه فلزی بازیابی در برخورد با گاز عامل است که بخش فلزی بازیابی را به بخش سیال آن پیوند می‌دهد [۳]. در شرایطی که عدد استانتون و پرانتل، مطابق با نتایج کیز و لندن [۱۶]، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$St = \frac{0.46 \times Re^{-0.4}}{Pr} \quad Pr = 0.7 \quad (17)$$

در نهایت، با به دست آوردن مقدار کار تلف شده ناشی از افت فشار گاز عامل در بازیابی، مقدار کار واقعی موتور استرلینگ به دست می‌آید:

$$actW_{power} = W_{power} - dW_{work} \quad (18)$$

با به دست آوردن مقادیر افت حرارتی در بازیابی و حرارت ایجاد شده در آن ناشی از افت فشار، می‌توان مقدار حرارت واقعی مورد نیاز موتور و در نهایت راندمان حرارتی موتور استرلینگ را با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه کرد:

$$actQ_{h power} = Q_{h power} + Q_{r loss} + Q_{wr loss} - Q_{diss} \quad (19)$$

$$\eta = \frac{actW_{power}}{actQ_{h power}} \quad (20)$$

۴- روش حل

بهترین روش برای حل عددی معادلات دیفرانسیلی به دست آمده، استفاده از روش مقادیر اولیه است. در این روش، مقادیر اولیه تمام متغیرها، در نقطه صفر شروع، مشخص است و برای به دست آوردن مقادیر نهایی حل معادلات با استفاده از این مقادیر اولیه انجام می‌شود؛ به صورتی که توابع به دست آمده

۳-۲-۱- اتلاف انرژی ناشی از افت فشار در بازیابی حرارتی در موتور استرلینگ، اصطکاک سیال با حرکت جریان گاز از میان بازیابی حرارتی ارتباط دارد. تخلخل بازیابی باعث افت فشار سیال عامل می‌شود. نتیجه افت فشار از میان بازیابی حرارتی کاهش توان خروجی موتور است. به علاوه، حرکت سیال از میان بازیابی باعث تولید گرما می‌شود که در نهایت باعث کاهش گرمای مورد نیاز موتور می‌شود. تغییرات فشار در بازیابی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$dp = \frac{2 \times f_r \times \mu \times V_r \times G \times l_r}{m_r \cdot d_r^2} \quad (9)$$

$$f_r = 54 + 1.43 \times Re^{0.78} \quad (10)$$

با قراردادن افت فشار در رابطه زیر مقدار گرمای تولید شده و کار تلف شده در بازیابی حرارتی به دست می‌آید:

$$Q_{rdiss} = \frac{dp \times m_r}{\rho} \quad (11)$$

$$dW_{work} = dp \times dV \quad (12)$$

۳-۲-۲- اتلاف حرارتی ناشی از هدایت داخلی بین قسمت‌های گرم و سرد موتور از میان بازیابی حرارتی

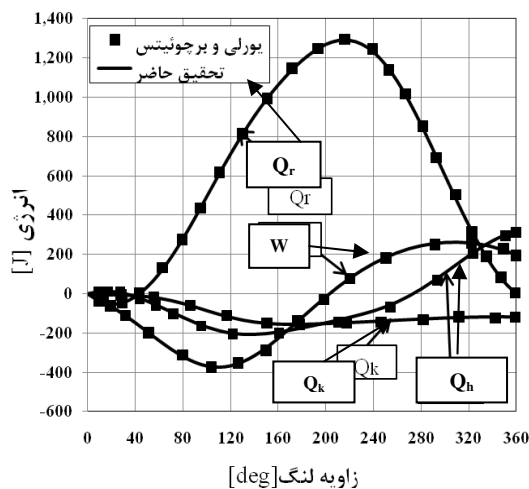
به لحاظ فیزیکی، بازیابی حرارتی در میان گرم‌کن و خنک‌کن قرار دارد. اختلاف دمایی این دو مبدل حرارتی باعث می‌شود که مقدار حرارت قابل توجهی به صورت ناخواسته هدر رود که مقدار آن به ضریب هدایت حرارتی بازیابی، سطح موثر برای هدایت حرارتی و طول بازیابی بستگی دارد. اتلاف حرارتی، ناشی از هدایت حرارتی داخلی، با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Q_{wr loss} = k \times \frac{A}{l_r} (T_{wh} - T_{wk}) \quad (13)$$

۳-۲-۳- افت انرژی ناشی از هدایت خارجی

افت انرژی ناشی از هدایت خارجی بر اثر بازیابی حرارتی غیرایده‌آل گاز عامل در هنگام عبور از بازیابی موتور به وجود می‌آید. ε ، به عنوان ضریب بازیابی حرارتی، نرخ میان حرارت مبادله شده در بازیابی توسط گاز عامل در طی انتقال به طرف محفظه تراکم و گرمای دریافت شده در بازیابی توسط گاز عامل در طی انتقال به محفظه انبساط را شرح می‌دهد [۳]. بنابراین، انرژی ذخیره شده توسط بازیابی، در زمان انتقال گاز از محفظه انبساط به محفظه تراکم، به گاز عامل در زمان برگشت به طور

است. مقدار کمی اختلاف وجود دارد که می‌تواند ناشی از شرایط عملکردی متفاوت، مدل‌سازی متفاوت تغییرات حجم و دستگاه معادلات باشد. حال، با توجه به نتایج به‌دست آمده از بخش اول، معادلات مربوط به افت‌های حرارتی داخلی و خارجی و افت انرژی ناشی از افت فشار در داخل بازیاب، در کد عددی، اعمال می‌شود. در نهایت، با استفاده از شرایط عملکردی و هندسی موتور، مطابق با جداول ۱ و ۲، مقادیر راندمان و توان خروجی به صورت جدول ۵ به‌دست می‌آید.



شکل ۷ اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده از حل عددی در حالت ایدئال

جدول ۴ مقایسه نتایج به‌دست آمده در حالت بازیاب ایدئال

راندمان	توان	حرارت منتقل شده	حرارت دفع شده	توسط خنک‌کن	توسط گرم‌کن	خروجی حرارتی	راندمان
η	P	Q_h	Q_k	W	Q_k	Q_h	η
%	W	J/cycle	W	J/cycle	W	J/cycle	%
۶۲/۵	۸۳۰۰	۳۱۸	۱۳۲۸۱	۱۱۹	۴۹۸۱	۱۱۹	یورلی [۳]
۶۲/۰۶	۸۴۶۲	۳۲۷	۱۳۶۳۵	۱۲۴	۵۱۷۳	۱۲۴	تیمیمی [۸]
۶۲/۶	۸۲۷۹	۳۱۷	۱۳۲۲۳	۱۱۸	۴۹۴۴	۱۱۸	تحقیق حاضر

جدول ۵ نتایج به‌دست آمده از آنالیز آدیاباتیکی غیرایده‌آل با اعمال افت‌های حرارتی و هیدرولیکی بازیاب

۷۲۹/۲	Q_{rloss} [W]	اتلاف حرارتی ناشی از هدایت خارجی
۱۰۰/۶	Q_{wrloss} [W]	اتلاف حرارتی ناشی از هدایت داخلی
۱۲۰۲	Q_{rdiss} [W]	حرارت تولیدشده ناشی از افت فشار در بازیاب
۱۲۴۰۰/۵	$actQ_h power$ [W]	گرمای واقعی مورد نیاز
۶۶۹۲/۷	$actW power$ [W]	توان واقعی
۵۴	η [%]	راندمان نهایی

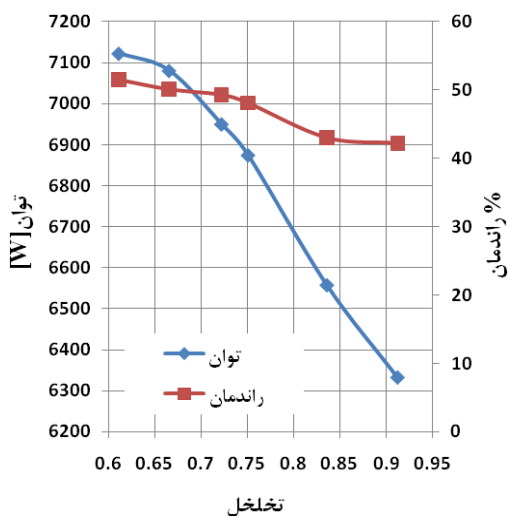
شامل تمام متغیرهای موجود به همراه توابع مربوط به تغییرات حجم موتور در زوایای مختلف لنگ می‌باشد. چنانچه مقادیر اولیه متغیرها موجود باشد، بردار y به صورت $y(t_0)=y_0$ تعریف می‌شود. براساس آن از دستگاه معادلات دیفرانسیل $Dy=F(t,y)$ مقدار $y(t)$ مشخص می‌شود که مقادیر مشخص شده هم‌زمان معادلات دیفرانسیل و مقادیر اولیه را ارضا می‌کند. در واقع در این روش عددی، ابتدا مقادیر اولیه در زمان t_0 محاسبه شده و پس از آن، با یک نمو کوچک زمانی، مقادیر جدید در زمان $t_1=t_0+\Delta t$ محاسبه می‌شود. بنابراین، مجموعه گسترده‌ای از حلقه‌های مستقیم در زمان‌های مختلف وجود دارد که مقادیر صحیح $y(t)$ را به‌دست می‌آورد. در حل آدیاباتیکی، مقادیر اولیه فشار و تغییرات جرم در محفظه تراکم به همراه سایر معلومات مسئله، از جمله تغییرات حجم، وارد معادلات می‌شوند. با قرار دادن مشخصات هندسی و عملکردی موتور GPU-3 و مقادیر اولیه، مقادیر حرارت مورد نیاز گرم‌کن، خنک‌کن و مقادیر کار انجام‌شده و راندمان موتور به‌دست می‌آیند. با توجه به مدل‌سازی تمام قسمت‌های تشکیل‌دهنده موتور، کد عددی قادر است تا مقادیر توان و راندمان خروجی را برای تغییرات هندسی و فیزیکی گوناگون محاسبه کند.

۵- بحث پیرامون نتایج

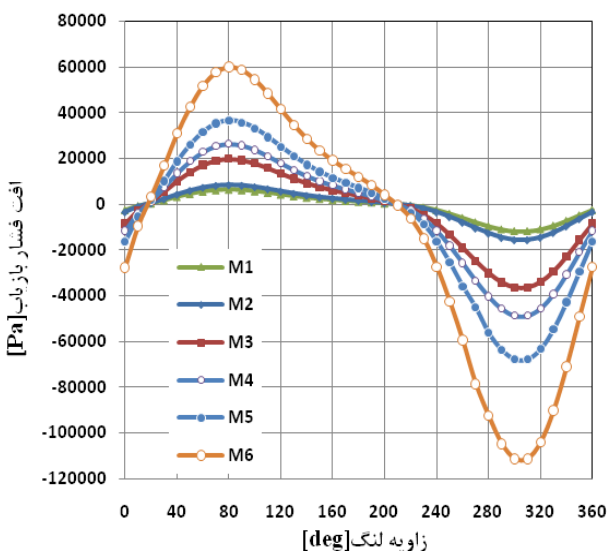
برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده، از پارامترهای طراحی و عملکردی موتور ساخته‌شده شرکت جنرال موتورز به نام GPU-3 استفاده شده است (جدول ۱ و ۲). مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج منتشرشده از یورلی و برچوئیس [۳] در حالت آدیاباتیکی ایدئال نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی صورت گرفته است (شکل ۷). با حل معادلات (۱) تا (۸) و با تغییرات 360° درجه‌ای زاویه لنگ موتور مطابق شکل ۵، مقادیر Q_h ، Q_k ، Q_r و W بر اساس معادله (۸) در هر زاویه لنگ (0° تا 360° درجه) به‌دست می‌آیند. مقدار Q_h مقدار حرارت انتقال داده شده به گرم‌کن، Q_k مقدار حرارت دفع‌شده توسط سردکن، Q_r مقدار حرارت بازیابی شده توسط بازیاب حرارتی و W توان به‌دست آمده از موتور در طی سیکل است.

در جدول ۴ توان و راندمان محاسبه‌شده با نتایج تیمیمی [۸] و یورلی مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد توان و راندمان محاسبه‌شده به نتایج منتشرشده بسیار نزدیک

با افزایش میزان تخلخل، راندمان و توان خروجی موتور کاهش می‌یابد (شکل ۹). این موضوع ناشی از افزایش افت‌های هدایت خارجی و کاهش تبادل انرژی میان گاز و سطح بازیاب است. بر اساس نتایج تست‌های آزمایشگاهی کیز و لندن در مبدل‌های حرارتی فشرده، حداقل تخلخل برای ایجاد سطح تماس مناسب حرارتی می‌بایست بیشتر از $0/6$ باشد. برای بررسی اثر تخلخل و قطر سیم بر روی افت فشار بازیاب، از جدول ۳، مقادیر مختلف آن (M1-M6) در کد عددی قرار گرفت که نتایج حاصل از آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹ اثر تخلخل بازیاب در راندمان و توان خروجی موتور



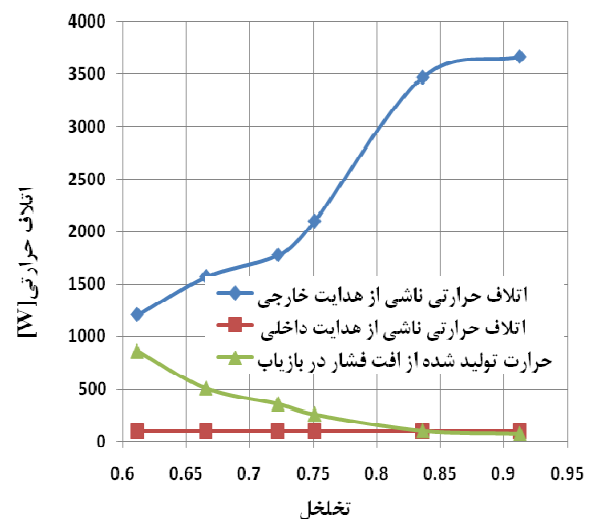
شکل ۱۰ اثر تخلخل بازیاب بر روی افت فشار

نتایج حاصل میزان افت‌های حرارتی داخلی و خارجی، حرارت ایجاد شده در اثر افت فشار، حرارت منتقل شده به موتور، توان و راندمان موتور را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج به‌دست آمده از جدول ۵ با جدول ۴ (نتایج در حالت ایدئال)، نشان‌دهنده کاهش توان موتور در اثر افت فشار بازیاب به میزان ۲۳ درصد و کاهش راندمان موتور به میزان ۸ درصد است. با توجه به نتایج حاصل، توان به‌دست آمده از نتایج تیمیومی ۲ درصد کمتر و از نتایج یورلی تقریباً ۲ درصد بیشتر است. همچنین، راندمان به‌دست آمده نیز به‌ترتیب $0/45$ و $0/1$ درصد از نتایج تیمیومی و یورلی بیشتر است.

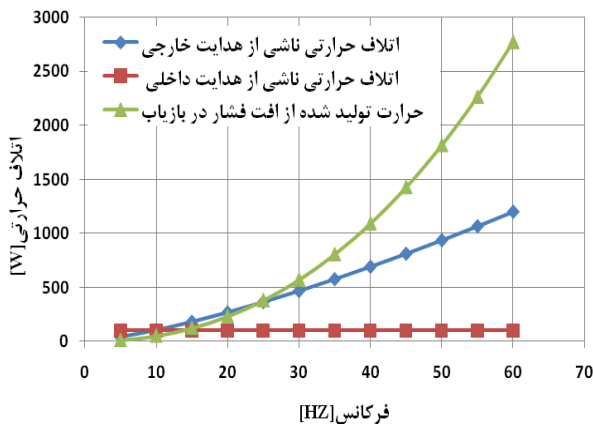
۵-۱- اثر میزان تخلخل بازیاب

تخلخل بازیاب نقش موثری در مقدار افت‌های حرارتی و هیدرولیکی و عملکرد موتور استرلینگ بر عهده دارد. قطر هیدرولیکی بازیاب، حجم مرده، سرعت گاز، سطح انتقال حرارت بازیاب و کارایی بازیاب همگی به تخلخل بازیاب بستگی دارد. مقدار تخلخل بازیاب بر روی افت‌های حرارتی هدایتی داخلی، خارجی و اتلاف ناشی از افت فشار تاثیر می‌گذارد. افت حرارتی جریان توسط هدایت داخلی و خارجی و اتلاف انرژی توسط افت فشار در میان بازیاب حرارتی، برای مقادیر متفاوت تخلخل بازیاب، در شکل ۸ آورده شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش افت هدایت خارجی، کاهش حرارت تولید شده ناشی از کاهش افت فشار و ثابت ماندن افت حرارتی هدایت داخلی با افزایش تخلخل بازیاب است.

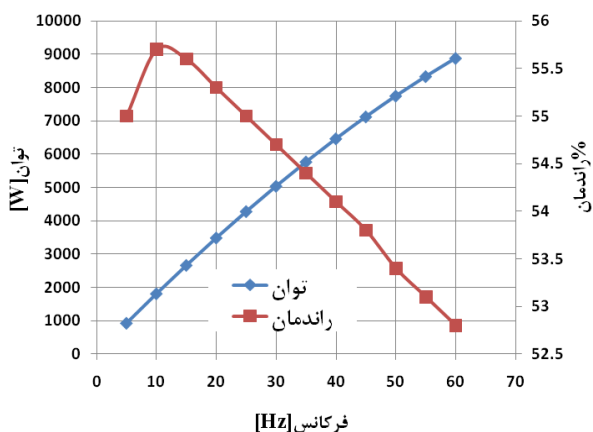


شکل ۸ اثر تخلخل بازیاب در افت‌های حرارتی بازیاب

برای موتور در نظر گرفته است. بنابراین، با توجه به توانایی موتور و نیز جلوگیری از کم‌شدن توان خروجی موتور، فرکانس ۳۰ تا ۴۰ هرتز برای موتور پیشنهاد شده است.



شکل ۱۱ اثر فرکانس در افت‌های حرارتی بازیاب



شکل ۱۲ اثر فرکانس در راندمان و توان خروجی موتور

۵-۳- اثر طول بازیاب

اثر طول بازیاب بر روی افت‌های حرارتی، راندمان و توان خروجی موتور در شکل ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، افت‌های هدایت داخلی و خارجی با افزایش طول بازیاب کاهش می‌یابد، درحالی که میزان حرارت تولیدشده ناشی از افت فشار، با افزایش طول بازیاب، روند افزایشی دارد. توان خروجی موتور از همان ابتدا، با افزایش طول بازیاب، روندی کاهشی داشته و در محدوده طول ۲۴ میلی‌متر با منحنی راندمان برخورد می‌کند. محل برخورد منحنی توان با منحنی راندمان در این شکل، نقطه بهینه طول بازیاب، به لحاظ داشتن توان و راندمان مناسب برای موتور است.

نتایج نشان‌دهنده کاهش افت فشار با افزایش میزان تخلخل در داخل بازیاب است. جریان از محفظه انبساط حرکت می‌کند و وارد بازیاب می‌شود. حرکت جریان از داخل محیط متخلخل بازیاب و برخورد با ماتریس بازیاب، علاوه بر انتقال گرمای موجود در گاز عامل به ماتریس بازیاب، باعث ایجاد افت فشار ناشی از حرکت سیال عامل در داخل آن می‌شود. پس از آن سیال عامل وارد محفظه تراکم می‌شود. پس از این مرحله سیال عامل دوباره به سمت محفظه انبساط حرکت می‌کند و با جذب گرمای جاگذاشته قبلی خود در ماتریس بازیاب دوباره موجب افت فشار در داخل بازیاب می‌شود. علامت منفی فقط برای نمایش جهت عکس حرکت جریان گاز عامل و برای کامل‌شدن چرخه سیکل استرلینگ است.

۵-۲- اثر میزان فرکانس عملکردی موتور

اثرات فرکانس عملکردی موتور بر روی افت‌های حرارتی، راندمان و توان خروجی موتور در شکل ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. هرچه فرکانس موتور بالاتر رود گردش سیال در بازیاب بالا رفته و در نتیجه آن مقادیر افت‌های حرارتی و هیدرولیکی افزایش می‌یابد. در کمتر از فرکانس ۳۰ هرتز، موتور راندمان مناسبی دارد، ولیکن توان بسیار کمی تولید می‌کند. در فرکانس ۲۰ هرتز، توان موتور در حدود ۳۵۰۰ وات و راندمان موتور در حدود ۵۵/۳ درصد است. با استفاده از این اعداد و رابطه ۲۰ مقاله، می‌توان دریافت که حرارت ورودی به موتور برای اینکه اجزای آن بتواند با فرکانس ۲۰ هرتز (۱۲۰۰ rpm) حرکت کند می‌بایست در حدود ۶۳۰۰ وات باشد. برعکس در فرکانس‌های بالا توان خروجی موتور افزایش می‌یابد، ولیکن راندمان کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در فرکانس ۵۰ هرتز توان موتور در حدود ۷۷۵۰ وات است، ولیکن راندمان موتور در حدود ۵۳/۴ درصد می‌باشد. با استفاده از همان رابطه قبلی، مشخص می‌شود که حرارت ورودی برای این موتور با فرکانس ۵۰ هرتز (۳۰۰۰ rpm) می‌بایست در حدود ۱۴۵۱۰ وات باشد.

با توجه به اطلاعات موتور (مراجع ۳ و ۱۵)، سیستم احتراقی موتور GPU-3 توانایی تولید این میزان حرارت را ندارد و چنانچه این سیستم تغییر داده شود تا بتواند توان بیشتری تولید کند، مستلزم تغییرات در پارامترهای هندسی موتور است. به همین دلیل است که شرکت جنرال موتورز فرکانس ۴۱/۷ را

- کاهش تخلخل ماتریس بازیاب باعث بالارفتن توان و راندمان خروجی موتور استرلینگ می‌شود. ماتریس بازیاب می‌تواند از مواد گوناگونی ساخته شود. عملکرد موتور به مواد به کار رفته در ماتریس بازیاب بستگی دارد. برای افزایش تغییرات دمایی بازیاب و کاهش افت‌های داخلی توسط هدایت حرارتی، ماده‌ای با ظرفیت حرارتی بالا و هدایت پایین می‌بایست انتخاب شود. فولاد ضدزنگ و فولاد معمولی مناسب‌ترین مواد برای ساخت ماتریس بازیاب هستند.

- افت فشار در بازیاب با افزایش تخلخل بازیاب کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش تخلخل بازیاب، مقاومت ماتریس بازیاب در مقابل حرکت جریان گاز عامل کاهش یافته و در نتیجه افت فشار در آن کاهش می‌یابد. در عوض، با افزایش تخلخل بازیاب، افت حرارتی خارجی در آن افزایش می‌یابد که یکی از عوامل کاهش راندمان و توان خروجی موتور است.

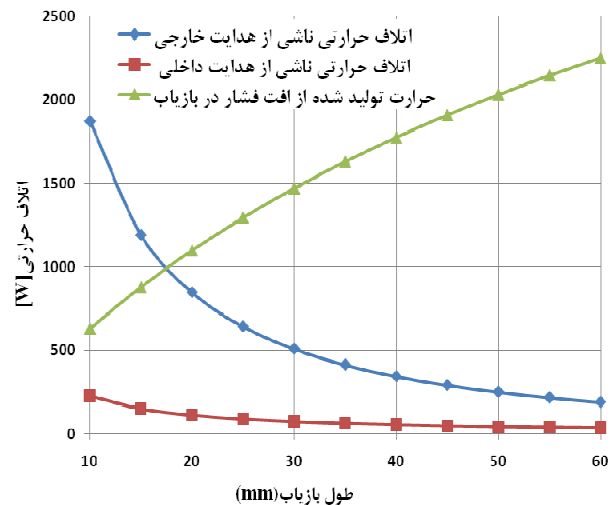
- راندمان و توان خروجی موتور به شدت به فرکانس عملکردی آن وابسته است. با افزایش فرکانس، توان افزایش یافته ولیکن راندمان موتور کاهش می‌یابد. بهینه‌ترین مقدار برای بالاترین توان و بیشترین راندمان در محدوده ۳۵ هرتز قرار دارد.

- با مشاهده نتایج در خصوص تاثیر افزایش طول بازیاب بر روی راندمان و توان خروجی موتور، بهترین مقدار طول ۲۴ میلی‌متر، برای بهینه‌ترین مقدار راندمان و توان خروجی موتور، پیشنهاد می‌شود. نتایج حاصل، افزایش حرارت تولیدی ناشی از بالارفتن افت فشار برای مقادیر بیشتر طول بازیاب را نشان می‌دهد. در حالی که مقادیر افت حرارت ناشی از هدایت داخلی و خارجی با افزایش طول بازیاب کاهش می‌یابد.

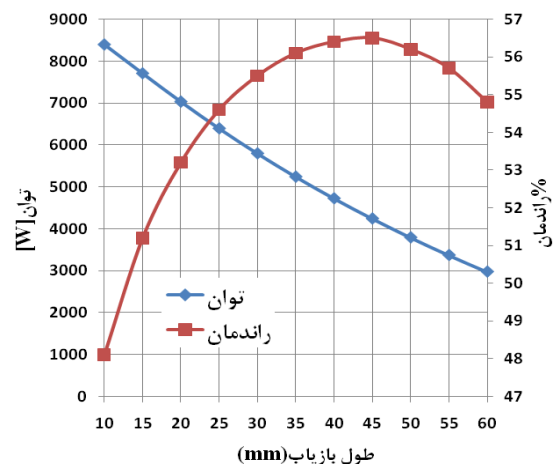
- موتور استرلینگ، در حالت تئوری، توان و راندمان بالایی دارد، در حالی که نمونه‌های ساخته شده توان و راندمان پایینی دارند. دلیل اصلی اختلاف نتایج تئوری و عملی وجود افت‌های قابل توجه و از آن جمله افت‌های هدایتی خارجی، داخلی و افت فشار بازیاب است. این افت‌ها به پارامترهای هندسی و فیزیکی نمونه طراحی شده بستگی دارند.

۷- فهرست علائم

A	سطح پیستون (m^2)
A	سطح جریان آزاد، سطح موثر انتقال حرارت (m^2)
C_p	گرمای ویژه گاز در فشار ثابت ($J/kg \cdot K^{-1}$)



شکل ۱۳ اثر طول بازیاب در افت‌های حرارتی بازیاب



شکل ۱۴ اثر طول بازیاب در راندمان و توان خروجی موتور

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدلسازی عددی موتور استرلینگ مدل بتا، با در نظر گرفتن افت‌های حرارتی و هیدرولیکی، انجام شده است. در ابتدا پارامترهای اصلی با استفاده از مدل آدیاباتیک ایدئال محاسبه شده و نتایج با مقادیر منتشر شده مقایسه شده است. در ادامه، اثر افت‌های حرارتی و هیدرولیکی در کد عددی وارد شده و با استفاده از پارامترهای فیزیکی و هندسی مختلف بازیاب، عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل از آن به شرح ذیل است:

- با اعمال معادلات مربوط به افت‌های حرارتی و هیدرولیکی، توان موتور به میزان ۲۳ درصد و راندمان موتور به میزان ۸ درصد کاهش می‌یابد.

C_v	گرمای ویژه گاز در حجم ثابت ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	p	پیستون
d	قطر هیدرولیکی (m)	r	بازیاب
e	خروج از مرکز (m)	rh	تداخل بازیاب و گرم‌کن
ε	راندمان بازیاب	w	دیوار
f_r	ضریب اصطکاک	wh	دیوار گرم‌کن
G	جریان جرم گاز عامل ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	wg	سطح ترشده شبکه فلزی بازیاب
k	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	wk	دیوار خنک‌کن

علائم یونانی

θ	زاویه لنگ (deg)	μ	ویسکوزیته دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})	η	راندمان
γ	گرمای ویژه نسبی ($C_p C_v^{-1}$)		

۸- مراجع

- [1] Schmidt G., *The Theory of Lehmann's Calorimetric Machine*, Z. Ver. Dtsch.ing., 15, Part 1. 1871.
- [2] Finkelstein T., "Analogue Simulation of Stirling Engine", *Simulation*, No. 2, March, 1975.
- [3] Urieli I., Berchowitz D. M., *Stirling Cycle Engine Analysis*, Bristol, Adam Hilger, 1984.
- [4] Formosa F., Despesse G., "Analytical Model for Stirling Cycle Machine Design", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 51, 2010, pp. 1855-1863.
- [5] Popescu G., Radcenco V., Costea M., Feidt M., "Thermodynamic Optimization in the Finished Time of Stirling Engine", *Revue Generale De Thermique*, No. 35, 1996, pp. 656-61.
- [6] Kaushik S. C., Kumar S., "Finite Time Thermodynamic Analysis of Endoreversible Stirling Heat Engine with Regenerative Losses", *Journal of Energy*, No. 25, 2000, pp. 989-1003.
- [7] Cun-quan Z., Yi-Nong W., Guo-lin J., "Dynamic Simulation of One-Stage Oxford Split-Stirling Cryocooler and Comparison with Experiment", *Cryogenics*, No. 42, 2002, pp. 377-586.
- [8] Wu F., Chen L., Wu C., Sun F., "Optimum Performance of Irreversible Stirling Engine with Imperfect Regeneration", *Energy Conversion Manage*, No. 39, 1998, pp. 727-32.
- [9] Kongtragool B., Wongwises S., "A Review of Solar Powered Stirling Engines and Low Temperature Differential Stirling Engines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 7, 2003, pp. 131-154.

L	طول شفت اتصال (m)	m	جرم گاز در قسمت‌های مختلف موتور (kg)
l	طول بازیاب (m)	NTU	تعداد واحدهای انتقال دهنده
M	جرم کل گاز (kg)	P	توان (W)
Pr	عدد پرانتل	p	فشار (Pa)
Q	حرارت انتقال یافته به سیال عامل (J)	Re	عدد رینولدز
C	ثابت عمومی گازها (JkgK^{-1})	r	شعاع لنگ (m)
St	عدد استانتون	T	دمای گاز (K)
V	حجم (m^3)	W	کار انجام شده توسط سیال عامل (J)

زیر نویس‌ها

c	فضای تراکم
ck	تداخل تراکم و خنک‌کن
clc	فضای خالی تراکم
cle	فضای خالی انبساط
d	جابه‌جا کننده
$diss$	اتلاف
e	فضای انبساط
h	گرم‌کن
he	تداخل گرم‌کن و انبساط
k	خنک‌کن
kr	تداخل خنک‌کن و بازیاب
$loss$	افت

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 12, 2008, pp. 1-38.
- [14] Tavakolpour A., Zomorodian A., Golneshan A. A., "Simulation, Construction and Testing of a Two Cylinder Solar Stirling Engine Powered by a Flat Plate Solar Collector without Regenerator", *Renewable Energy*, No. 33, 2008, pp. 77-87.
- [15] Organ A. J., *The Regenerator and the Stirling Engine*, London, Mechanical Engineering Publications, 1997.
- [16] Kays W. M., London A. L., *Compact Heat Exchangers*, New York, McGraw-Hill, 1964.
- [10] Costa M., Petrescu S., Harman C., "The Effect of Irreversibilities on Solar Stirling Engine Cycle Performance", *Energy Conversion Manage*, No. 40, 1999, pp. 1723-31.
- [11] Timoumi Y., Tlili I., Ben Nasrallah S., "Design and Performance Optimization of GPU-3 Stirling Engines", *Energy*, No. 33S, 2008, pp. 1100-1114.
- [12] Cinar C., Yucsesu S., Topgul T., Okur M., "Beta-Type Stirling Engine Operating at Atmospheric Pressure", *Appl Energy*, No. 81, 2005, pp. 351-357.
- [13] Thombare D. G., Verma S. K., "Technological Development in the Stirling Cycle Engines",