

## حل عددی موتور استرلینگ نوع بتا با اعمال بازیاب حرارتی برای افزایش راندمان و توان خروجی

در این مقاله توسعه یک مدل مناسب ترمودینامیکی برای موتور استرلینگ نوع بتا، صورت گرفته است. این مدل، توانایی پیش‌بینی و بهینه‌سازی توان خروجی و پارامترهای عملکردی موتور استرلینگ را بر اساس شرایط فیزیکی و هندسی کلیه اجزا آن، دارا می‌باشد. برای این منظور، حل عددی موتور استرلینگ نوع بتا با استفاده از مدل آدیاباتیک، به روش پنج حجمی صورت گرفته است. برای صحه‌گذاری نتایج بدست آمده، از مشخصات هندسی و عملکردی موتور استرلینگ ساخت شرکت جنرال موتورز استفاده شده و نتایج بدست آمده با مقادیر منتشر شده، مقایسه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، برای افزایش توان خروجی موتور، مقادیر  $20\text{mm}$  برای طول بازیاب،  $21\text{mm}$  برای قطر بازیاب،  $70/2\text{mm}$  برای قطر پیستون توان،  $44\text{CC}$  برای حجم مرده بازیاب و مقدار  $0/6112$  برای ضریب تخلخل بازیاب پیشنهاد شده است.

مسعود ضیاء بشرحق<sup>۱</sup>

دانشیار

مصطفی محمودی<sup>۲</sup>

دانشجوی دکترا

واژه های راهنما : موتور استرلینگ، حل عددی، مدل آدیاباتیک، بازیاب حرارتی

### ۱- مقدمه

در سرتاسر جهان تلاش های زیادی برای ساخت موتورهای مولدی که با داشتن راندمان مناسب بتوانند از منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع اتلاف حرارتی به خوبی سوخت های فسیلی استفاده کنند، صورت گرفته است. افزایش قیمت انرژی و آلودگی های محیطی و صوتی در جهان باعث شده است تا تحقیقات بر روی موتورهای جدید تولید توان، با جدیت بیشتری صورت گیرد. مصرف منابع انرژی های تجدید ناپذیر زمین شامل نفت، گاز و زغال سنگ علاوه بر از بین بردن ثروتهای عمومی جوامع، باعث تولید سه چهارم از کل دی کسید کربن موجود در جهان می‌شود. موتور استرلینگ از جمله ایده‌هایی است که در سال های اخیر علاقه‌مندان زیادی را به خود جلب کرده است. به لحاظ فیزیکی، موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی است و می‌تواند از هر نوع منبع حرارتی خارجی (انرژی احتراقی، خورشیدی و پسماند حرارتی ماشین آلات صنعتی) برای تولید انرژی مکانیکی استفاده کند. در سال های اخیر، محققان در طراحی و استفاده از موتورهای استرلینگ به نتایج بسیار خوبی دست یافته‌اند. از جمله مهمترین دستاوردهای بدست آمده،

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

پیشبرد فنآوری استرلینگ در زمینه ساخت موتورهای خورشیدی با تولید قدرت محوری  $10\text{KW}$  است. با توجه به سهم قابل ملاحظه انرژی خورشیدی در کشورهایمانند ایران، تولید انرژی با استفاده از این فنآوری، بسیار قابل ملاحظه است. طرح تولید همزمان برق و حرارت ( $\text{CHP}^1$ ) نیز یکی از ایده‌های جدیدی است که توسط شرکت‌های تولیدکننده این فنآوری تجاری شده و در پایگاه‌های تولید برق از آن استفاده می‌شود. در حال حاضر روش‌های نوینی در بکارگیری 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 بعنوان جایگزین توربین‌های بخار نیروگاه‌های هسته‌ای اشاره کرد.

از زمان اختراع موتور استرلینگ توسط رابرت استرلینگ تاکنون تحقیقات زیادی در مورد آن صورت گرفته است. 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<sup>۲</sup> ارائه شده است. با استفاده از فرض اشمیت، معادلات ترمودینامیکی خطی شده و محاسبات اولیه برای اندازه‌گیری توان و راندمان خروجی موتور، به راحتی صورت می‌گیرد. تحلیل اشمیت امروزه نیز بطور وسیعی در تحلیل‌های اولیه موتورهای استرلینگ بکار می‌رود. چرخه اشمیت، فرایندهای تراکم و انبساط را هم فرض می‌کند. در صورتی که در عمل برای موتورهایی با دور موتور  $1000\text{ rpm}$  یا بیشتر، این فرض درست نیست زیرا همان گونه که رانکین ثابت کرده است، حرارت‌دهی و یا خنک‌کنندگی، دقیقاً در حجم ثابت یا دمای ثابت اتفاق نمی‌افتد و فرایندهای تراکم و انبساط در سیلندرهای موتور استرلینگ بیشتر به آدیاباتیک نزدیک هستند. بنابراین می‌بایست از فرضیات مناسب‌تر برای مدلسازی ترمودینامیکی استفاده شود تا بتوان با استفاده از این مدل‌ها به راندمان حقیقی موتور نزدیک شد.

هر کوششی برای مدل‌سازی موتور استرلینگ از حل ایزوترم خارج شود، معادلات بصورت صریح در نمی‌آیند و تنها بصورت دیفرانسیلی و 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 جاروب شده، 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 ذکر شده خواهد بود. در سال ۱۹۷۵، فینکن اشتاین [۲] تحلیل ترمودینامیکی اشمیت را ارتقا داد و تحلیل‌های اولیه آدیاباتیک<sup>۳</sup> را ارائه کرد. در حل معادلات بصورت آدیاباتیک، محفظه تراکم و محفظه انبساط، آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن فرض آدیاباتیک معادلات از حالت خطی خارج می‌شوند و برای حل آنها می‌بایست از روش‌های عددی استفاده شود. از زمان ارائه مدل فینکن اشتاین تاکنون، تحلیل‌های انجام شده 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) انجام شده است که از آنجمله می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط ایزرایئل یوریلی و برچوئیتس [۳] با استفاده از مدل ترمودینامیکی آدیاباتیک، برای بدست آوردن توان و راندمان خروجی موتور استرلینگ، اشاره کرد. کونگتراگول و وانگ وایز

<sup>1</sup> Combined Heat and Power

<sup>2</sup> Isotherm

<sup>3</sup> Adiabatic

[۴] مدل‌سازی و بهینه‌سازی موتور استرلینگ را با استفاده از مدل ایزوترم انجام داده‌اند و یوسف تیمومی و همکاران [۸،۷،۶،۵] با مدل‌سازی آدیباتیک موتور استرلینگ، افت‌ها و بازگشت ناپذیریها را در آن، بررسی کرد. در تحقیقات اخیر انجام شده توسط اسکندر تلیلی و همکاران [۹]، موتور استرلینگ با استفاده از انرژی خورشیدی بعنوان منبع حرارتی، مدل‌سازی شده است. در تحقیقات انجام شده توسط تومبارو و ورما [۱۰]، تکنولوژی‌های موجود و پیشرفت‌های حاصل شده در خصوص تحلیل موتورهای استرلینگ گردآوری شده و در نهایت در خصوص استفاده از آنها، پیشنهادهای ارائه شده است. علیرضا توکلپور و همکاران [۱۱] نیز با استفاده از تئوری اشمیت، حل معادلات بصورت ایزوترم و استفاده از صفحات تخت در جذب دمای خورشید بعنوان منبع دمایی گرم، آنالیز موتور استرلینگ نوع گاما را انجام داده است. گستانته و اینورنیزی [۱۲] پس از مدل‌سازی موتور استرلینگ، اثر استفاده از گازهای مختلف را بر روی راندمان و توان خروجی موتور بررسی کرده است. فرموسا و دسپسه [۱۳] مدل‌سازی را با استفاده از مدل ایزوترم برای بررسی اثرات حجم‌های مرده بر روی راندمان و توان خروجی موتور، انجام داده است.

در تحقیق حاضر، با اعمال روابط ترمودینامیکی کلیه اجزا موتور و با استفاده از کد عددی نوشته شده در نرم‌افزار مطلب<sup>۱</sup>، شبیه‌سازی موتور استرلینگ نوع بتا به روش ۵ حجمی با استفاده از مدل ترمودینامیکی آدیباتیک انجام شده است. برای بالابردن دقت شبیه‌سازی، از روابط واقعی تغییرات حجم پیستونها در داخل سیلندرها استفاده شده و در اینخصوص ساده‌سازی صورت نگرفته است. در پایان نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده برای موتور ساخته شده توسط شرکت جنرال موتورز (GPU-3) که مشخصات هندسی و عملکردی آن موجود است، مقایسه شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، جریان انرژی در بازیاب حرارتی بسیار با اهمیت است و طراحی بهینه آن می‌تواند از اتلاف بخش زیادی از حرارت دریافت شده از منبع حرارتی دما بالا، در طی سیکل کاری موتور، جلوگیری کند. در نهایت، اثر شرایط فیزیکی و هندسی متفاوت بازیاب حرارتی در راندمان و توان خروجی موتور مطالعه شده و مقادیر بهینه، پیشنهاد شده است.

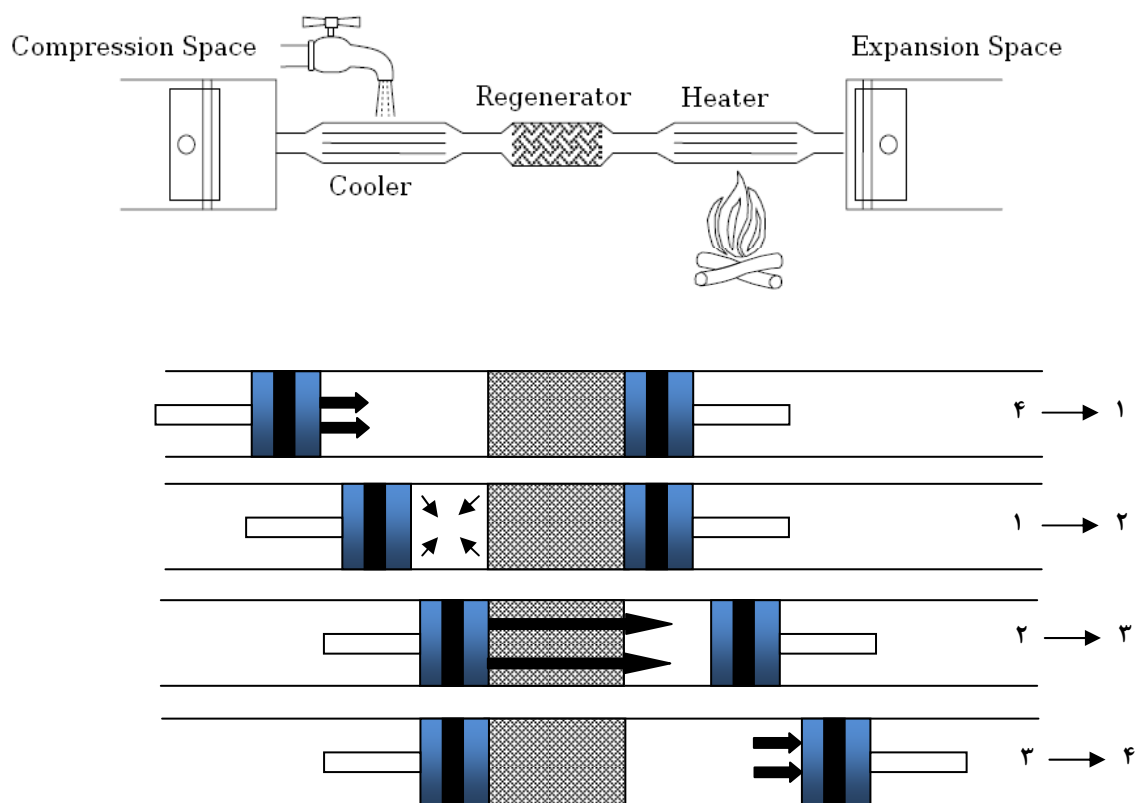
## ۲- مدل‌سازی ترمودینامیکی

موتور استرلینگ در یک سیکل بسته ترمودینامیکی کار کرده و انرژی گرمایی را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند. موتور استرلینگ به لحاظ ساختار فیزیکی شامل پنج زیر سیستم اصلی است که در مدل‌سازی، هر زیر سیستم بصورت یک حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود. دو فضا با حجم متغیر به نام‌های فضای انبساط و فضای تراکم و سه مبدل حرارتی با حجم ثابت، به نام‌های گرم‌کن، خنک‌کن و بازیاب<sup>۲</sup> در موتور وجود دارد (شکل ۱). موتور همچون 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. انواع مختلف موتور استرلینگ با نام‌های آلفا، بتا و گاما شناخته می‌شوند. همه آنها به لحاظ سیکل ترمودینامیکی مشابه‌اند ولی تفاوت‌های اساسی در نوع مکانیزم‌های مکانیکی دارند.

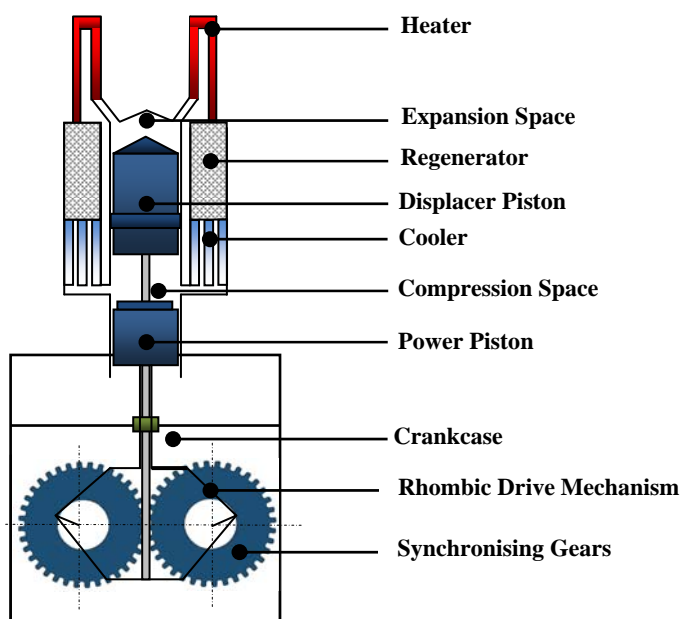
<sup>1</sup> Matlab software

<sup>2</sup> Regenerator

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 بوسیله بازیاب وارد خنک‌کن می‌شود. در موتور استرلینگ نوع بتا دو عدد پیستون به نامهای پیستون جابجایی و پیستون توان در داخل یک سیلندر قرار گرفته‌اند. پیستون جابجایی سیال عامل را میان فضای گرم و فضای سرد از میان گرم‌کن، بازیاب و خنک‌کن جابجا می‌کند و باعث حرکت پیستون توان می‌شود (شکل ۲). موتور استرلینگ نوع گاما ترکیبی از نوع آلفا و بتا است. 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. 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 (شکل ۱).

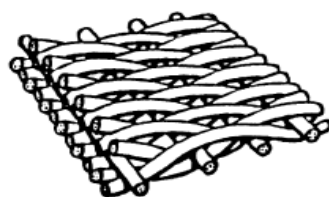
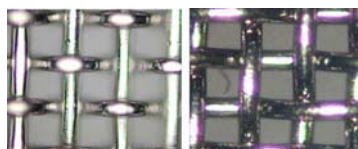


شکل ۱- اجزا موتور استرلینگ و نحوه عملکرد سیکل آنها



شکل ۲- موتور استرلینگ نوع بتا

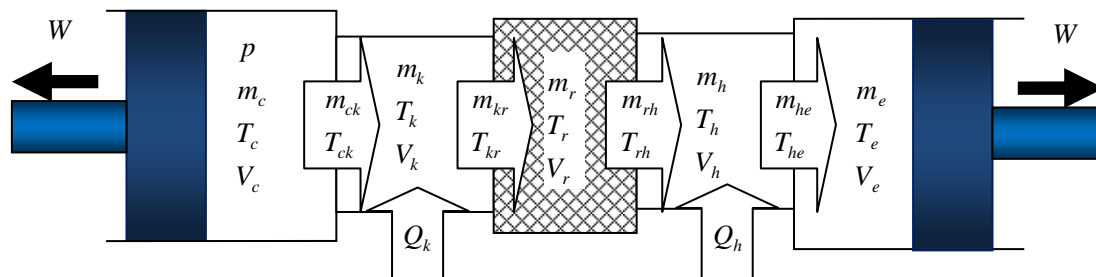
شاید مهمترین قسمت موتور استرلینگ که نقش اساسی در افزایش راندمان آن دارد، بازیاب حرارتی است. به لحاظ ساختار فیزیکی، بازیاب حرارتی از فولاد ضد زنگ بصورت ورقه‌های توری و یا میله‌های ضد زنگ فولادی روی هم چیده شده، ساخته می‌شوند (شکل ۳). در طی نیمی از سیکل کاری موتور، بازیاب حرارتی مانند اسفنج حرارتی باعث جذب گرما از گاز عامل می‌شود. در نیمه دیگر سیکل، بازیاب، حرارت را به گاز عامل پس می‌دهد بنابراین گرمای کمتری برای دفع در منطقه سرد موتور، وجود خواهد داشت و بدین صورت باعث افزایش راندمان موتور می‌شود. بنابراین استفاده از بازیاب در موتور استرلینگ باعث کم شدن اتلاف حرارتی و در نهایت افزایش راندمان موتور می‌شود.



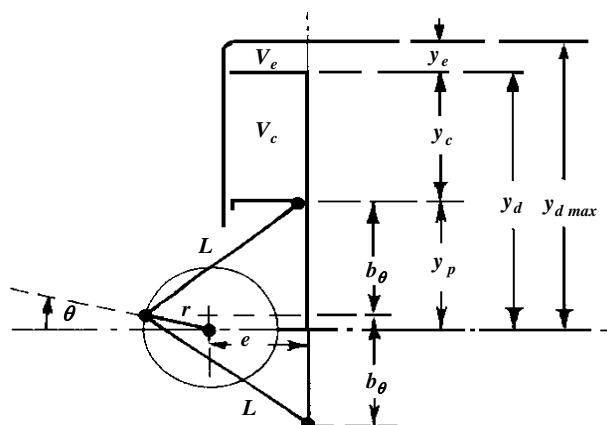
شکل ۳- ساختار بازیاب حرارتی

مدلسازی انجام شده در این تحقیق برای موتور نوع بتا به روش ۵ حجمی صورت گرفته است. در این روش، اجزا موتور استرلینگ به پنج واحد جداگانه تقسیم شده و برای هر واحد معادلات ترمودینامیکی، استخراج می‌شود. 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 بدست آمده به روش عددی با استفاده از روشی که در ادامه شرح داده خواهد شد، حل می‌شوند. شماتیک مدل و توزیع دماهای گوناگون در

قسمتهای مختلف موتور در شکل (۴) نشان داده شده است. نرخ تغییرات حجمی موتور با استفاده از مکانیزم حرکتی و روابط بدست آمده برای آن، در شکل (۵) نشان داده شده است. برای آزمایش توانایی مدل سازی انجام شده نیاز به مشخصات قابل اعتماد ورودی است.



شکل ۴- مدل ۵ حجمی برای شبیه سازی موتور استرلینگ



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

$$b_1 = \sqrt{L^2 - (e - r)^2}$$

$$b_2 = \sqrt{(L - r)^2 - e^2}$$

$$b_3 = \sqrt{L^2 - (e + r)^2}$$

$$b_\theta = \sqrt{L^2 - (e + r \cos \theta)^2}$$

$$V_e = V_{cle} + A_d (b_\theta - b_2 - r \sin \theta)$$

$$V_c = V_{clc} + 2A_p (b_1 - b_\theta)$$

$$\frac{dV_c}{d\theta} = \frac{-2A_p r \sin \theta (e + r \cos \theta)}{\left(\frac{dV_c}{d\theta}\right) A_d b_\theta}$$

$$\frac{dV_e}{d\theta} = -\frac{\left(\frac{dV_c}{d\theta}\right) A_d b_\theta}{2A_p} - A_d r \cos \theta$$

برای این منظور از مشخصات دقیق موتور ساخت شرکت جنرال موتورز (GPU-3)<sup>۱</sup> استفاده شده است که علاوه بر مشخصات دقیق هندسی و فیزیکی، مشخصات عملکردی آن موجود می باشد و توسط محققان زیادی برای اعتبار سنجی مدل سازی، استفاده شده است. در جدول (۱) پارامترهای هندسی موتور شامل: مشخصات دقیق هندسی، حجم جاروب شده توسط پیستون توان و پیستون جابجایی، مقادیر لقی پیستون توان و پیستون جابجایی، مشخصات هندسی و تعداد لوله های مبدل های حرارتی بکار رفته، آورده شده است. در جدول (۲) مشخصات عملکردی موتور شامل: گاز عامل، دماهای مناطق گرم و سرد، متوسط فشار سیال عامل، جرم گاز و فرکانس حرکتی موتور آورده شده است. در جدول (۳) مشخصات سلول بازیاب با تخلخل<sup>۲</sup> و قطرهای متفاوت سیم، برای مشاهده تغییرات راندمان و توان خروجی موتور، نسبت به تغییرات آنها، آورده

<sup>1</sup> Ground power Unit

<sup>2</sup> Porosity

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 می شود.

**جدول ۱- پارامترهای هندسی موتور GPU-3**

پيستون	خنک کن
فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم	$28/68 \text{ cm}^3$
فضای خالی (حجم مرده) محفظه انبساط	$30/52 \text{ cm}^3$
حجم جاروب شده محفظه تراکم	$113/14 \text{ cm}^3$
حجم جاروب شده محفظه انبساط	$120/82 \text{ cm}^3$
طول میله اتصال دهنده (L)	۴۶ mm
خروج از مرکز (e)	۲۰/۸ mm
قطر پیستون توان ( $d_p$ )	۶۹/۹ mm
قطر پیستون جابجایی ( $d_h$ )	۶۹ mm
هدایت حرارتی پیستون	۱۵ W/mK
کورس حرکتی پیستون	۴۶ mm
<b>بازیاب</b>	
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 $\mu\text{m}$
تخلخل	۰/۶۹۷
تعداد در هر سیلندر	۸
ضریب هدایت حرارتی	۱۵ W/mK
حجم مرده	$50/55 \text{ cm}^3$
<b>گرم کن</b>	
تعداد لوله ها	۴۰ عدد
قطر داخلی لوله	۳/۰۲ mm
طول لوله	۲۴۵/۳ mm
حجم مرده	$70/88 \text{ cm}^3$

**جدول ۲- پارامترهای عملکردی موتور GPU-3**

گاز عامل	هلیوم	فشار متوسط گاز عامل	۴۱۳۰ Kpa
دمای منبع گرم (گرم کن) Th	۹۷۷ K	جرم گاز عامل	۱/۰۳ grm
دمای منبع سرد (سرد کن) Tk	۲۸۸ K	فرکانس عملکردی موتور	۴۱/۷ Hz

**جدول ۳- مشخصات سلول بازیاب با تخلخل و قطر سیم متفاوت**

	ضریب تخلخل بازیاب	قطر سیم بازیاب (mm)
M1	۰/۹۱۲۲	۰/۰۰۳۵
M2	۰/۸۳۵۹	۰/۰۰۶۵
M3	۰/۷۵۰۸	۰/۰۰۰۷
M4	۰/۷۲۲۱	۰/۰۰۰۷
M5	۰/۶۹۷۰	۰/۰۰۰۴
M6	۰/۶۶۵۵	۰/۰۰۰۸
M7	۰/۶۱۱۲	۰/۰۰۰۸

### ۳- معادلات حاکم و روش حل

مدل سازی ترمودینامیکی موتور در دو بخش انجام می پذیرد. در بخش اول مدلسازی به روش ایزوترم با استفاده از مدل اشمیت صورت می گیرد. مقادیر بدست آمده در این بخش بعنوان مقادیر اولیه در بخش دوم مورد استفاده قرار می گیرد.

#### ۳-۱- بخش اول: آنالیز موتور استرلینگ در حالت ایزوترم

هدف از آنالیز ایزوترم، بدست آوردن کار انجام شده در اثر تغییرات فشار و دمای گاز عامل با استفاده از انتقال حرارت به داخل موتور است. جاذبه اصلی آنالیز ایزوترم، روش حل بسته‌ای است که در معادلات آن ظاهر می‌شود. فرض اساسی در این آنالیز این است که گاز در محفظه انبساط و گرم‌کن، در درجه حرارت گرم‌کن، و در محفظه تراکم و خنک‌کن، در درجه حرارت خنک‌کن نگه داشته می‌شود. چرخه ترمودینامیکی ایزوترم از دو فرآیند هم دما و دو فرآیند حجم ثابت تشکیل شده است. همچنین فرایندهای انبساط و تراکم درون موتور، هم دما در نظر گرفته می‌شود و تأثیرات ایده‌آل نبودن بازتاب و افت فشار نیز در نظر گرفته نمی‌شود. نقطه شروع آنالیز، ثابت گرفتن جرم کل در تمام حجم‌های اشغال شده توسط گاز است. [۱۲].

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

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  $T_r$  بر اساس فرض اشمیت بصورت خطی و با استفاده از رابطه زیر نشان داده می‌شود [۱۱]:

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

در نهایت با قرار دادن معادله (۳) در معادله حالت، معادله فشار بصورت زیر حاصل می‌شود:

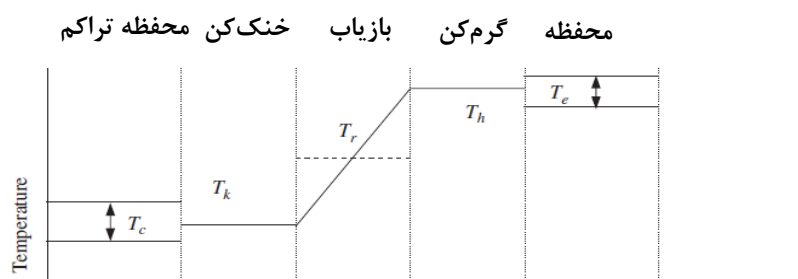
$$p = MR \left( \frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r \ln(T_h/T_k)}{(T_h - T_k)} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_h} \right)^{-1} \quad (4)$$

حجم محفظه تراکم و انبساط در هر لحظه، با حرکت مکانیزم سینماتیکی موتور در زوایای مختلف حرکتی لنگ، رابطه دارد. رابطه بین تغییرات حجم و مکانیزم‌های سینماتیکی، در شکل (۵) آورده شده است.

#### ۳-۲- بخش دوم: آنالیز موتور استرلینگ در حالت آدیاباتیک

مدل آدیاباتیک بر این فرضیات استوار است که گرم‌کن و خنک‌کن دارای انتقال حرارت نامحدود هستند و شرایط هم دما در آنها برقرار می‌باشد. 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. شکل (۶) دما در قسمتهای مختلف موتور و همچنین شیب درجه حرارت در ۵ قسمت موتور را نشان می‌دهد.





شکل ۶- شماتیک دمای قسمتهای مختلف در موتور استرلینگ نوع بتا

برای حل در حالت آدیباتیک، 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 اندازه گیری میزان انتقال حرارت به موتور و کار انجام شده و در نهایت راندمان موتور بدست می آید. بر اساس قرارداد، پسوندهای منفرد در شکل (۴)، نشان دهنده ۵ سلول موتور و پسوندهای دوگانه نشان دهنده محل تقاطع سلولها با یکدیگر است. با در نظر گرفتن دستگاه معادلات تعریف شده برای مدل، مشخص می شود که تعداد ۲۲ متغیر و ۱۶ عدد معادله دیفرانسیل برای حل سیکل موتور وجود دارد. معادلات مستخرج شده به شرح ذیل است:

$$dp = \frac{-\gamma p(dV_c/T_{ck} + dV_e/T_{he})}{[V_e/T_{ck} + \gamma(V_k/T_k + V_r/T_r + V_h/T_h) + V_e/T_{he}]} \quad \text{معادله فشار:} \quad (5)$$

$$dm_c = (pdV_c + V_c dp / \gamma) / (RT_{ck}) \quad \text{معادلات جرم:} \quad (6)$$

$$m_k = pV_k / (RT_k)$$

$$m_r = pV_r / (RT_r)$$

$$m_h = pV_h / (RT_h)$$

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

$$\text{معادلات مربوط به تغییرات جرم:} \quad (7)$$

$$m_{ck} = -dm_c$$

$$m_{kr} = m_{ck} - dm_k$$

$$m_{rh} = m_{kr} - dm_r$$

$$m_{he} = m_{rh} - dm_h$$

$$T_c = pV_c / (Rm_c)$$

$$T_e = pV_e / (Rm_e)$$

معادلات دما:

$$(8)$$

شرایط مرزی در محل تقاطع سلولها:

$$\text{if } m_{kc} > 0$$

$$\text{Then } T_k \rightarrow T_{kc}$$

$$\text{Otherwise } T_c \rightarrow T_{kc}$$

$$\text{if } m_{eh} > 0$$

$$\text{Then } T_e \rightarrow T_{he}$$

$$\text{Otherwise } T_h \rightarrow T_{he}$$

و در نهایت معادلات حاصل شده برای مقادیر کار و گرمای داده شده در گرم کن و گرمای گرفته شده در خنک کن و در نهایت گرمای مبادله شده در بازیاب حرارتی با استفاده از روابط زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned} dW &= p(dV_e + dV_c) \\ dQ_k &= V_k dp_{c_v} / R - c_p (T_{ck} m_{ck} - T_{kr} m_{kr}) \\ dQ_r &= V_r dp_{c_v} / R - c_p (T_{kr} m_{kr} - T_{rh} m_{rh}) \\ dQ_h &= V_h dp_{c_v} / R - c_p (T_{rh} m_{rh} - T_{he} m_{he}) \end{aligned} \quad (9) \quad \text{معادلات انرژی :}$$

برای حل عددی معادلات بدست آمده از مدل آدیاباتیک، می‌بایست معادلات فشار و تغییرات جرم در ناحیه تراکم به همراه معادلات انرژی بصورت همزمان حل شوند. بهترین روش برای حل عددی استفاده از روش مقادیر اولیه است. در این روش، مقادیر اولیه تمام متغیرها در نقطه شروع، مشخص است و برای بدست آوردن مقادیر نهایی حل معادلات با استفاده از این مقادیر اولیه انجام می‌شود. بصورتی که توابع بدست آمده شامل تمام متغیرهای موجود به همراه توابع مربوط به تغییرات حجم موتور در زوایای مختلف لنگ می باشد. برای حل، بردار  $y$  بصورت تابعی از متغیرهای موجود، تعریف می‌شود. بعنوان مثال،  $y_p$  نشان دهنده فشار گاز سیستم،  $y_{mc}$  نشان دهنده جرم گاز در محفظه تراکم و همینطور تا به آخر. چنانچه مقادیر اولیه متغیرها موجود باشد بردار  $y$  بصورت  $y(t_0) = y_0$  تعریف می‌شود. بر اساس 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 بدست می‌آورد. در روش حل آدیاباتیک، مقادیر اولیه فشار و تغییرات جرم در محفظه تراکم می‌بایست به همراه سایر معلومات مسئله، منجمله تغییرات حجم، وارد معادلات شوند. این مقادیر از بخش اول یعنی حل معادلات در حالت ایزوترم در برنامه بدست می‌آیند. با قرار دادن مشخصات هندسی و عملکردی موتور GPU-3 و مقادیر اولیه بدست آمده از حل ایزوترم، مقادیر حرارتی برای گرم کن، خنک کن و مقادیر کار انجام شده و راندمان موتور بدست می‌آید. کد عددی قادر است تا تغییرات مورد نظر در قسمتهای مختلف را به لحاظ هندسی و فیزیکی وارد کند و تغییرات مقادیر توان عملکردی و راندمان موتور را با اعمال شرایط جدید نشان دهد.

#### ۴- بحث بروی نتایج

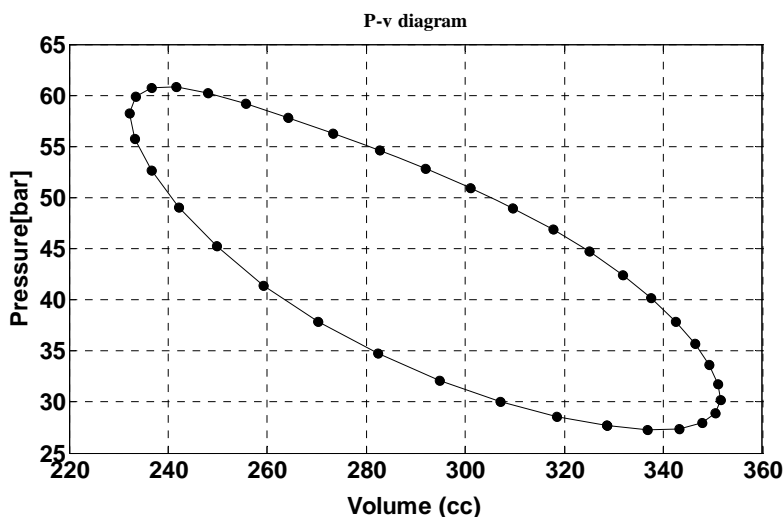
با اعمال مشخصات ورودی مورد نیاز کد از جداول (۱ و ۲)، شامل مشخصات هندسی و عملکردی موتور GPU-3 و با حل معادلات به روش عددی، کلیه مقادیر مورد نیاز در طی سیکل به دست می‌آید. مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی با مقادیر منتشر شده در مقالات در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج ارائه شده توانایی کد عددی در پیش‌بینی توان و راندمان موتور استرلینگ را نشان می‌دهد. تفاوت میان نتایج بدست آمده با نتایج منتشر شده در جدول (۴) ناشی از استفاده از مشخصات دقیق عملکردی و مکانیزم

حرکتی موتور، در این تحقیق است (شکل ۵) که معمولا در سایر کدهای عددی این تغییرات، ساده سازی شده و از روابط معادل و یا تغییرات سینوسی حجم موتور استفاده می شود.

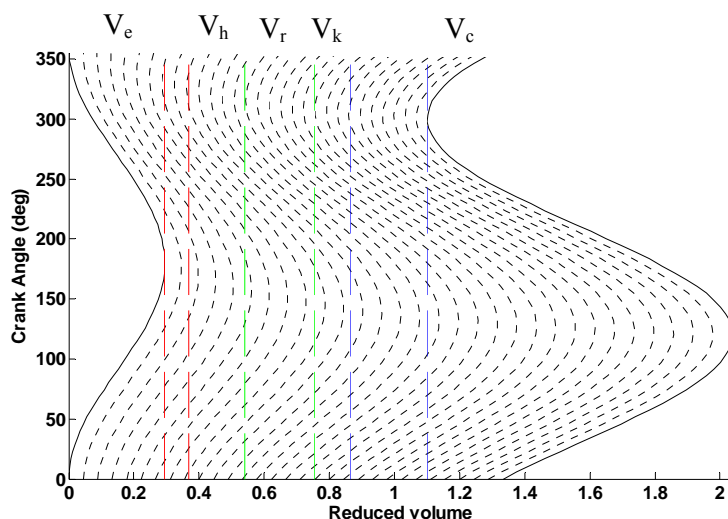
**جدول ۴-** مقایسه نتایج بدست آمده با استفاده از مشخصات موتور GPU-3 با تحقیقات منتشر شده

تحقیق حاضر	تیمومی [۸]	یوریلی [۳]
$Q_k [J/cycle]$ حرارت دفع شده توسط خنک کن	۱۲۴/۰۶	۱۱۹/۴۳
$Q_h [J/cycle]$ حرارت منتقل شده توسط گرم کن	۳۲۷	۳۱۸/۵
$P [W]$ توان خروجی	۸۲۸۶/۷	۸۳۰۰
$\eta$ راندمان حرارتی	۶۲/۰۶	۶۲/۵

تغییرات فشار نسبت به حجم موتور در شکل (۷) نشان داده شده است. سطح بدست آمده، میزان کار انجام شده توسط موتور در طی هر سیکل را نشان می دهد. نتایج بدست آمده با نمودار سیکل کارنو که از دو فرآیند حجم ثابت و دو فرآیند دما ثابت تشکیل شده است، تفاوت قابل توجهی دارد که ناشی از اعمال شرایط واقعی در کد عددی نسبت به نمودار ایده ال کارنو است. شکل (۸) تغییرات جرم گاز عامل را در داخل موتور، در طی سیکل، نشان می دهد. با استفاده از معادله جرم و انرژی برای پنج سلول موتور و با استفاده از روابط گاز ایده آل، تجمع جرم در داخل هر کدام از سلولها در طی سیکل موتور بدست آمده است. نتایج بدست آمده، تغییرات جرم در محفظه تراکم را با شدت بیشتری نسبت به محفظه انبساط نشان می دهد.

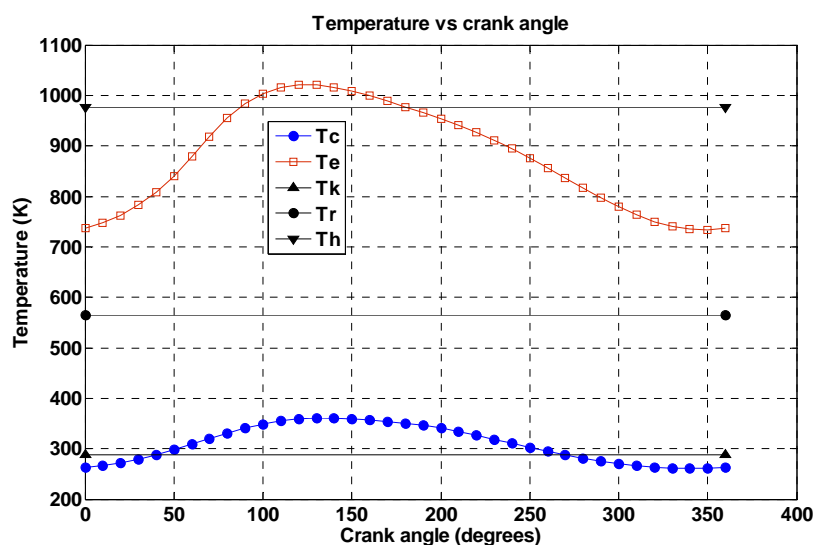


**شکل ۷-** مقادیر فشار حجم برای سیکل موتور

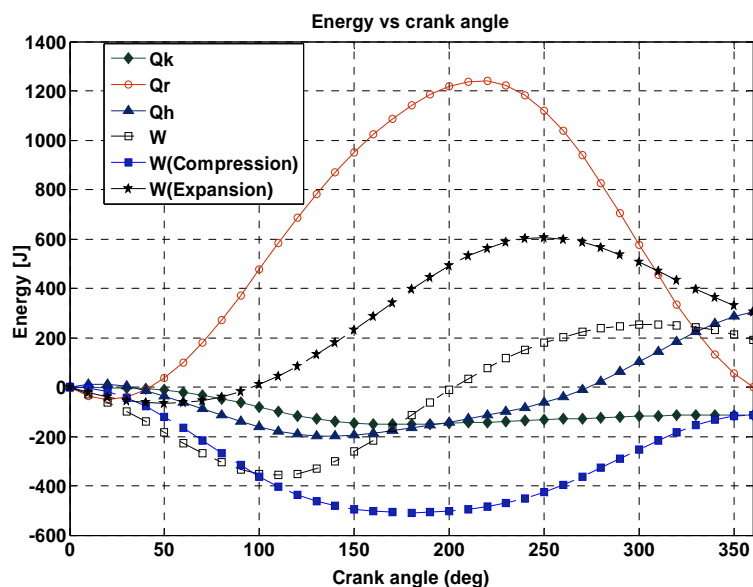


شکل ۸- تغییرات جریان عبوری در سلولهای موتور

نوسانات دما در طی سیکل کاری موتور در محفظه انبساط و تراکم، در شکل (۹) نشان داده شده است. درجه حرارت‌های ورودی برنامه در جدول (۲) آورده شده است که شامل دمای گاز در سمت گرم و سرد موتور است. دمای گاز در مبدل‌های حرارتی ثابت در نظر گرفته شده است. جریان انرژی بعلاوه کل کار انجام شده در هر سیکل کاری موتور در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقادیر برای حرارت دفع شده با استفاده از خنک‌کن و حرارت اضافه شده توسط گرم‌کن بعلاوه کل کار انجام شده در این شکل نشان داده شده است. اختلاف دامنه انرژی میان بازیاب، گرم‌کن و خنک‌کن کاملاً مشهود است. همچنین در این شکل نشان داده شده است که کل انرژی سیکلی عبور کننده در یک مدل ایده آل از میان بازیاب در پایان سیکل، برابر صفر است.



شکل ۹- تغییرات دما در سلولهای موتور استرلینگ



شکل ۱۰- تغییرات انرژی در سلولهای موتور

با مشخص شدن دقت کد عددی در پیش بینی راندمان و توان خروجی موتور GPU-3 در مقایسه با نتایج منتشر شده، می توان با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترهای جداول (۲ و ۱)، تغییرات بوجود آمده در حرارت منتقل شده به گرم کن (حرارت ورودی)، گرمای منتقل شده توسط خنک کن (گرمای خروجی)، راندمان و توان خروجی موتور را بدست آورد تا بر اساس آن، با توجه به انرژی حرارتی در دسترس برای تولید توان حرارتی مورد نیاز موتور (محفظه احتراق خارجی، انرژی خورشیدی، پسماند انرژی حرارتی تولیدی توسط سیستمهای تولید توان و...) و ابعاد هندسی مورد نظر طراح، بهترین پارامترهای طراحی برای موتور پیشنهاد شود. در مورد موتور GPU-3 توان حرارتی ورودی ۱۳ کیلو وات است [۸] که با توجه به مشخصات هندسی و عملکردی (جداول ۱ و ۲)، در حدود ۷/۹ کیلو وات توان خروجی تولید می کند. حال با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی، پارامترهای هندسی و عملکردی موتور GPU-3 تغییر داده می شود، تا اینکه مقادیر بهینه برای آنها استخراج شود.

#### ۴-۱- طول بازیاب

بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش طول بازیاب میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش می یابد (جدول ۵). این امر باعث می شود که طراح بر اساس میزان فضای در اختیار و نیز مقدار توان حرارتی ورودی برای گرم کن، در خصوص طول بازیاب، تصمیم گیری کند. با توجه به اینکه افزایش طول بازیاب باعث کم شدن میزان حرارت ورودی موتور می شود می توان در طراحی موتورهایی که توان حرارتی ورودی کمتری دارند، از بازیاب حرارتی با طول زیاد استفاده کرد. منحنی تغییرات توان و راندمان بر اساس طول بازیاب در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نقاط مربوط به موتور GPU-3 بر روی منحنی علامتگذاری شده است. بر این اساس با افزایش طول بازیاب، راندمان موتور GPU-3 افزایش می یابد ولیکن توان خروجی کاهش پیدا می کند. در شکل (۱۲) اثر طول بازیاب بر

روی میزان حرارت بازیابی شده در آن، نشان داده شده است. بر این اساس هرچه طول بازیاب افزایش یابد، مقدار حرارت ورودی به موتور کاهش یافته و در نتیجه حرارت کمتری وارد بازیاب حرارتی می شود. بر اساس نتایج بدست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی موتور GPU-3، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست طول بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلیمتر به مقدار ۲۰ میلیمتر کاهش یابد.

#### ۴-۲- قطر بازیاب

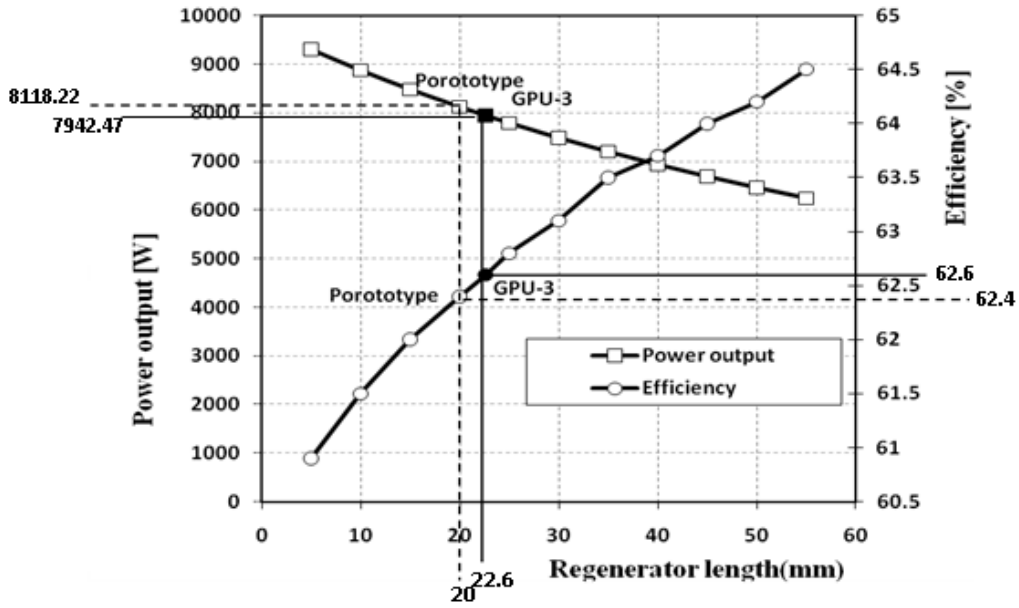
با توجه به نتایج، با افزایش قطر بازیاب، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی کاهش می یابد، در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند (جدول ۶). شیب افت توان نسبت به افزایش قطر بازیاب، بسیار شدید است (شکل ۱۳) بصورتیکه از مقدار قطر ۳۰ میلیمتر، با افزایش هر ۱۰ میلیمتر قطر بازیاب، تقریباً ۱ کیلو وات توان موتور کاهش می یابد. بر اساس نتایج بدست آمده، هرچه قطر بازیاب افزایش یابد میزان حرارت ورودی برای تولید توان کاهش می یابد در نتیجه حرارت بازیابی شده در بازیاب حرارتی نیز کاهش پیدا می کند (شکل ۱۴). بر اساس نتایج بدست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست قطر بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلیمتر به مقدار ۲۱ میلیمتر کاهش یابد.

#### جدول ۵- نتایج بدست آمده از تغییر طول بازیاب بر راندمان و توان خروجی موتور

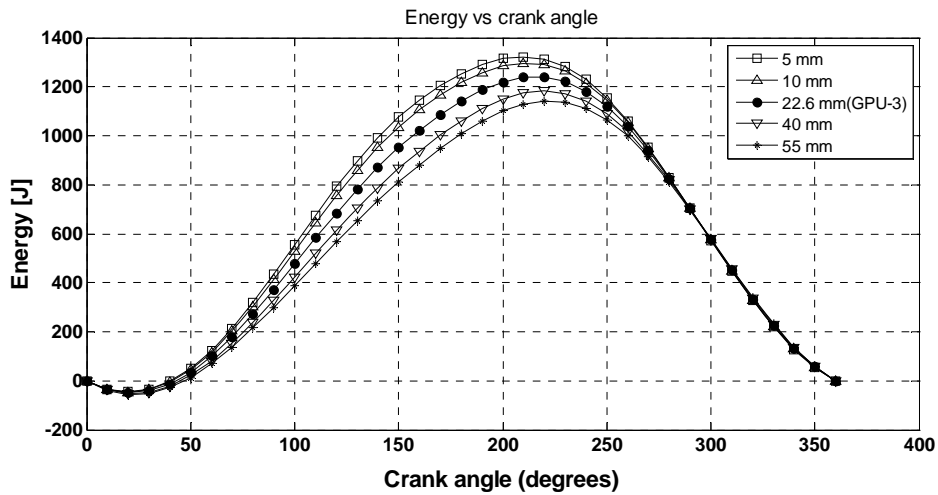
Regenerator length(mm)	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
5	15256.38	-5957.81	9297.91	60.9
10	14423.17	-5553.48	8869.88	61.5
15	13678.47	-5201.08	8478.10	62.0
<b>20(Prototype)</b>	<b>13007.95</b>	<b>-4890.99</b>	<b>8118.22</b>	<b>62.4</b>
22.6(GPU-3)	12684.80	-4743.93	7942.47	62.6
25	12400.57	-4615.63	7786.59	62.8
30	11847.18	-4369.35	7480.08	63.1
35	11341.11	-4147.60	7195.95	63.5
40	10876.15	-3947.00	6931.87	63.7
45	10447.28	-3764.46	6685.85	64.0
50	10050.71	-3597.78	6456.10	64.2
55	9682.52	-3444.84	6241.11	64.5

#### ۴-۳- قطر پیستون توان

بر اساس نتایج بدست آمده (جدول ۷) با افزایش قطر پیستون توان، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی، افزایش می یابد در حالیکه راندمان موتور کاهش پیدا می کند. بر این اساس تا قطر ۳۰ میلیمتر توان و راندمان هر دو همزمان افزایش می یابند ولیکن بعد از قطر ۳۰ میلیمتر، راندمان سیر نزولی پیدا می کند. موتور با قطر پیستون ۳۰ میلیمتر راندمان بالایی دارد ولیکن توان کمی تولید می کند. شیب افزایش توان با تغییر قطر پیستون، نسبت به شیب کاهش راندمان، بیشتر است (شکل ۱۵).



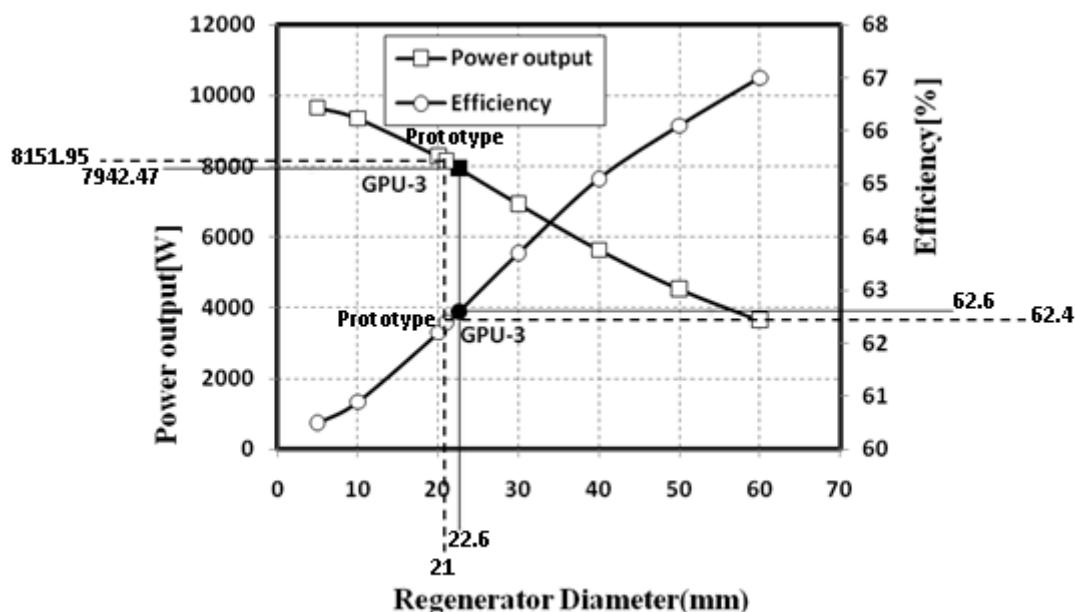
شکل ۱۱- تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر طول بازیاب



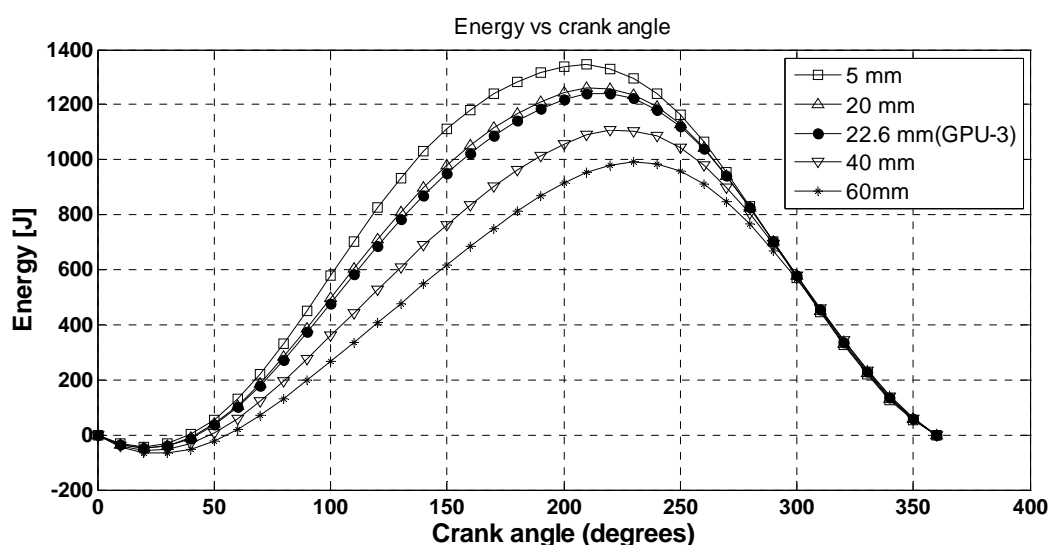
شکل ۱۲- تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر طول بازیاب

جدول ۶- نتایج بدست آمده از تغییر قطر بازیاب بر راندمان و توان خروجی موتور

Regenerator diameter(mm)	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
5	15978.21	-6317.01	9659.59	60.5
10	15358.75	-6008.13	9349.7	60.9
20	13308.06	-5028.87	8280.12	62.2
<b>21 (Prototype)</b>	<b>13070.32</b>	<b>-4919.60</b>	<b>8151.95</b>	<b>62.4</b>
22.6(GPU-3)	12684.8	-4743.93	7942.47	62.6
30	10891.97	-3953.78	6940.9	63.7
40	8675.87	-3035.04	5644.43	65.1
50	6863.01	-2328.22	4538.81	66.1
60	5455.12	-1805.77	3653.32	67



شکل ۱۳- تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر قطر بازیاب



شکل ۱۴- تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر قطر بازیاب

در موتورهایی که محفظه احتراق خارجی موتور، توان تولید حرارت بالایی را نداشته باشد (محفظه احتراق خارجی با توان تولید حرارتی پایین، انرژی خورشیدی با سطح جمع آوری حرارتی کوچک و امکان تولید توان حرارتی کم و ...) و یا اینکه موتور از پسماند حرارتی بعنوان منبع حرارتی برای تولید توان استفاده کند (موتورهای استرلینگ که در طرح های تولید همزمان برق و حرارت بکار برده می شوند)، استفاده از قطر پیستون کم بهینه خواهد بود.

مقادیر حرارت بازیابی شده توسط بازیاب در شکل (۱۶) نشان داده شده است. هرچه میزان قطر پیستون افزایش یابد با توجه به افزایش مقدار حرارت ورودی، مقدار حرارت بازیابی شده در بازیاب حرارتی نیز



افزایش می یابد. بر اساس نتایج بدست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست قطر پیستون توان از مقدار ۶۹/۹ میلیمتر به مقدار ۷۰/۲ میلیمتر افزایش یابد.

#### ۴-۴- حجم مرده بازیاب

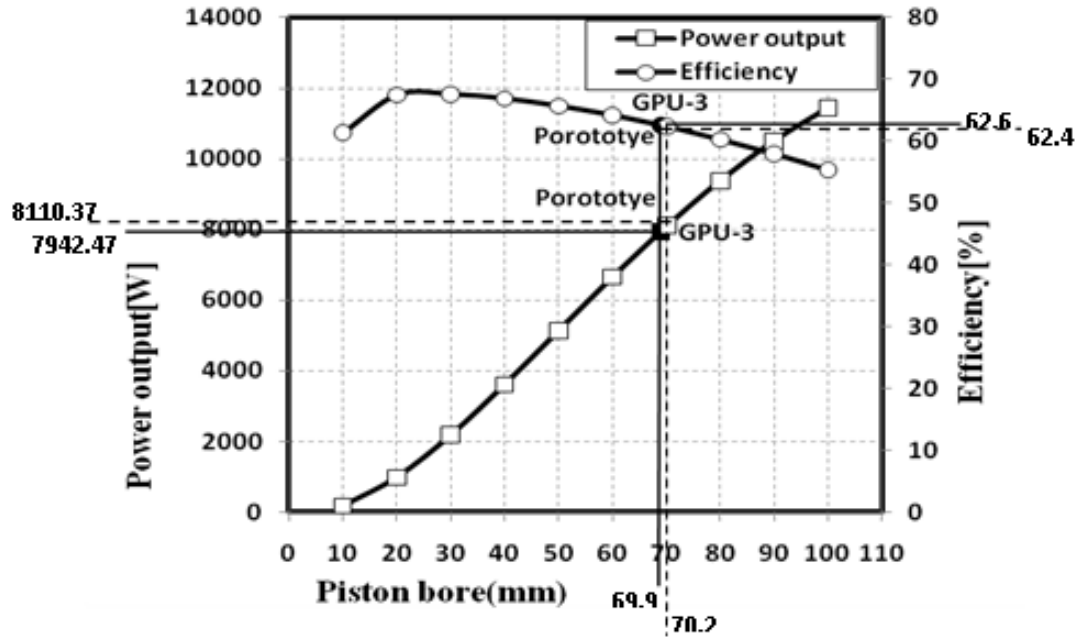
حجم مرده بازیاب، فضای باقیمانده میان شبکه بازیاب و حجم کل بازیاب است. در موتور استرلینگ از عوامل مختلفی در کاهش توان نام برده شده که یکی از آن حجم مرده بازیاب حرارتی است [۳]. بر اساس نتایج بدست آمده در جدول (۸)، هرچه میزان حجم مرده بازیاب افزایش یابد، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی موتور، کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند.

افزایش حجم مرده بازیاب، باعث کم شدن فشار موتور و در نتیجه کاهش توان خروجی موتور می شود (شکل ۱۷). تا محدوده حجم مرده بازیاب به میزان ۵۰ سی سی (محدوده حجم مرده موتور GPU-3)، شیب افزایش راندمان زیاد است در حالیکه توان خروجی موتور کاهش می یابد. از این محدوده به بعد راندمان تا محدوده ۸۰ سی سی با شیب کم افزایش می یابد در حالیکه توان با همان شیب قبلی کاهش می یابد. با توجه به نتایج بدست آمده، افزایش حجم مرده باعث کم شدن حرارت ورودی به موتور می شود در نتیجه مقادیر حرارت بازیابی شده در بازیاب موتور نیز کاهش می یابد (شکل ۱۸).

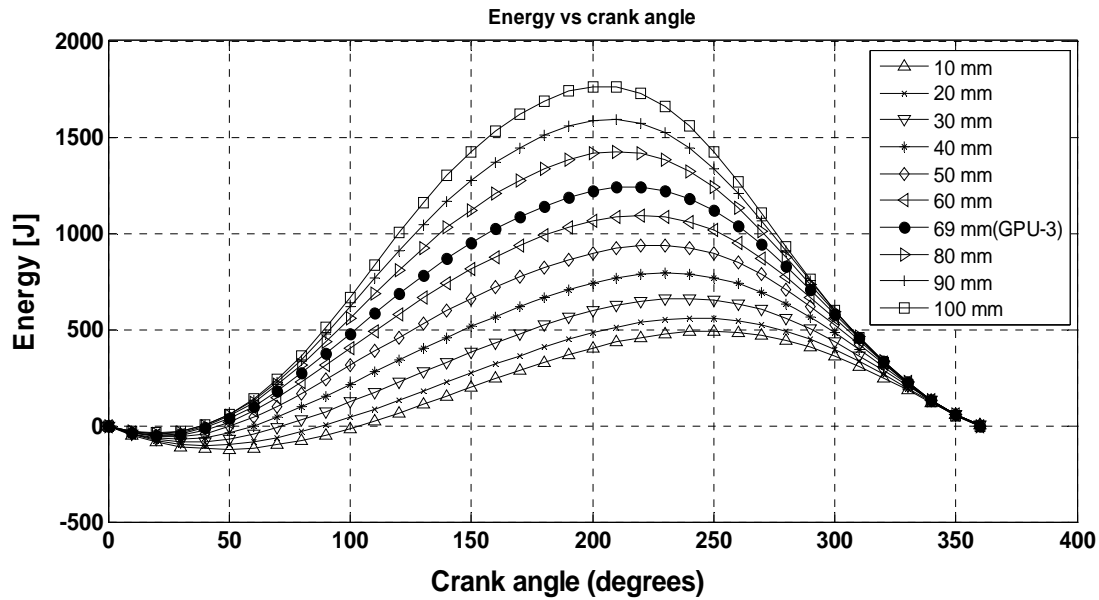
با توجه به نتایج بدست آمده انتخاب حجم مرده ۵۰/۵۵ سی سی برای موتور GPU-3 بر مبنای فضای در دسترس طراح و امکان تولید حرارت ورودی مطابق جدول (۸)، بوده است. چنانچه موتور، توان حرارتی بیشتری را در منبع حرارتی گرم (گرم کن) تولید کند، می بایست طراحی بر مبنای حجم مرده کمتر صورت گیرد که این امر منجر به تولید توان خروجی بیشتر ولی راندمان کمتر می گردد. بر اساس نتایج بدست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی موتور GPU-3، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست حجم مرده بازیاب از مقدار ۵۰/۵۵ سی سی به مقدار ۴۴ سی سی، کاهش یابد.

#### جدول ۷- نتایج بدست آمده از تغییر قطر پیستون توان بر راندمان و توان خروجی موتور

Power piston bore(mm)	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
10	283.23	-123.24	173.89	61.4
20	1460.61	-485.9	986.56	67.5
30	3226.56	-1053.99	2181.65	67.6
40	5395.34	-1792.34	3609.23	66.9
50	7807.72	-2678.2	5133.23	65.7
60	10349.31	-3702.97	6648.57	64.2
69.9(GPU-3)	12684.8	-4743.93	7942.47	62.6
<b>70.2 (Prototype)</b>	<b>13002.53</b>	<b>-4893.71</b>	<b>8110.37</b>	<b>62.4</b>
80	15545.25	-6170.50	9376.53	60.3
90	18115.33	-7615.51	10502.67	58.0
100	20630.4	-9197.86	11437.52	55.4



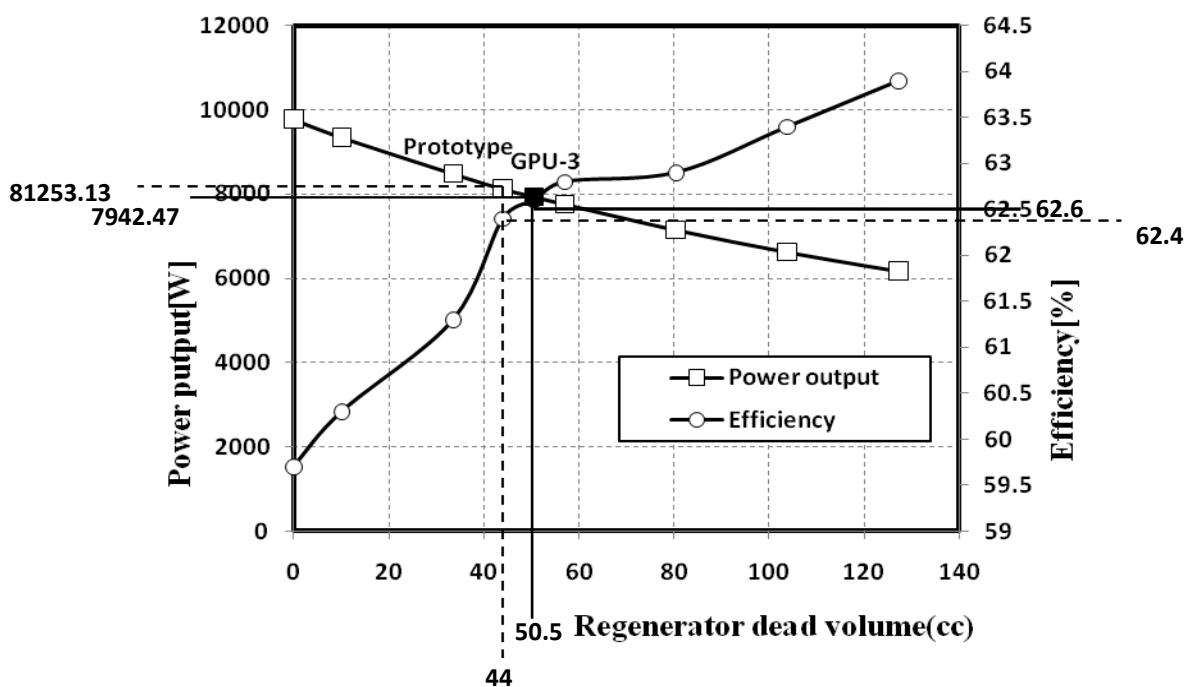
شکل ۱۵- تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر قطر پیستون توان



شکل ۱۶- تغییرات انرژی دریافتی بازتاب ناشی از تغییر قطر پیستون توان

**جدول ۸-** نتایج بدست آمده از تغییر حجم مرده بازیاب بر راندمان و توان خروجی موتور

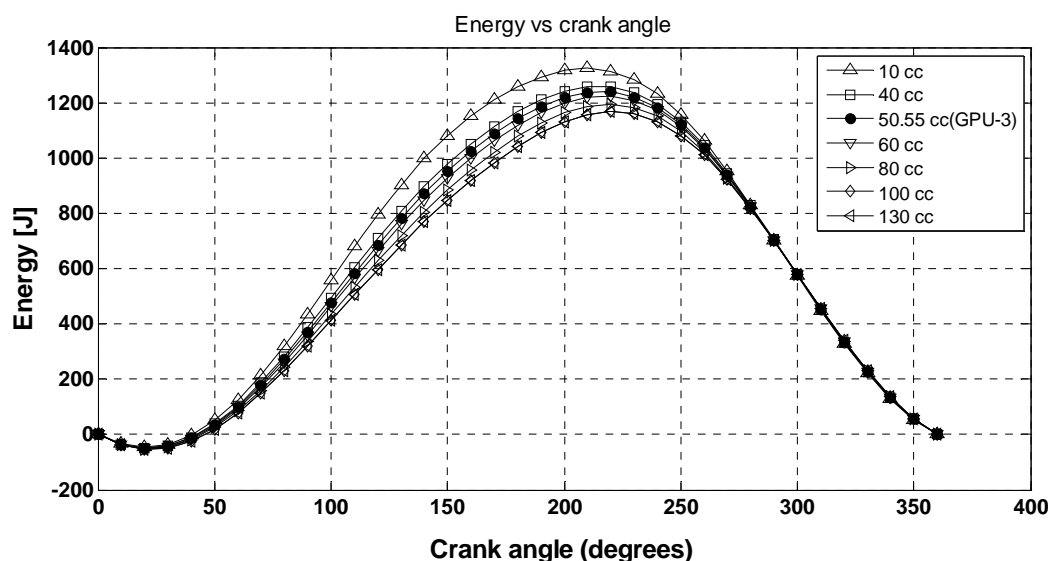
Regenerator dead volume(cc)	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
0	16385.61	-6502.4	9779.87	59.7
10	15515.25	-6066.99	9350.12	60.3
40	13835.28	-5260.48	8487.25	61.3
<b>44(Prototype)</b>	<b>13020.72</b>	<b>-4896.83</b>	<b>8125.13</b>	<b>62.4</b>
50.55(GPU-3)	12684.8	-4743.93	7942.47	62.6
60	12488.13	-4643.9	7765.19	62.2
80	11379.96	-4155.5	7152.62	62.9
100	10451.11	-3758.61	6626.68	63.4
130	9660.62	-3429.51	6170.47	63.9



**شکل ۱۷-** تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر حجم مرده بازیاب

#### ۴-۵- تخلخل بازیاب

نتایج حاصل از اثر استفاده از انواع مختلف شکل بازیاب به لحاظ قطر سیمها و تخلخل در جدول (۹) آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده با کاهش میزان تخلخل بازیاب، میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی موتور افزایش می یابد در حالیکه راندمان موتور کاهش می یابد. در واقع با کاهش تخلخل بازیاب، حرکت سیال درون بازیاب راحت تر شده و موتور توانسته است توان زیادی تولید کند. در عوض با کاهش سطح موثر بازیاب، توان ذخیره سازی انرژی حرارتی در آن کاهش یافته، حرارت زیادتری را مصرف کرده است.



شکل ۱۸- تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر حجم مرده بازیاب

شکل (۱۹) نشان دهنده اثر تخلخل بازیاب بر روی راندمان و توان خروجی موتور است. میزان راندمان و توان خروجی موتور GPU-3 بر اساس تخلخل آن بر روی نمودار نشان داده شده است. بر اساس نتایج نشان داده شده، چنانچه از تخلخل کمتری در بازیاب موتور استفاده شود، توان بیشتری تولید می شود ولیکن راندمان کاهش می یابد. برای موتور GPU-3، تخلخل ۰/۶۹۷ در نظر گرفته شده است. در شکل (۲۰) میزان حرارت بازیابی شده در بازیاب حرارتی نشان داده شده است. با توجه به افزایش اندک در حرارت ورودی، با کاهش تخلخل بازیاب، حرارت بازیابی شده در بازیاب حرارتی نیز، افزایش می یابد (شکل ۲۰). بر اساس نتایج بدست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی موتور GPU-3، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست تخلخل بازیاب از مقدار ۰/۶۹۷ به مقدار ۰/۶۱۱۲، کاهش یابد.

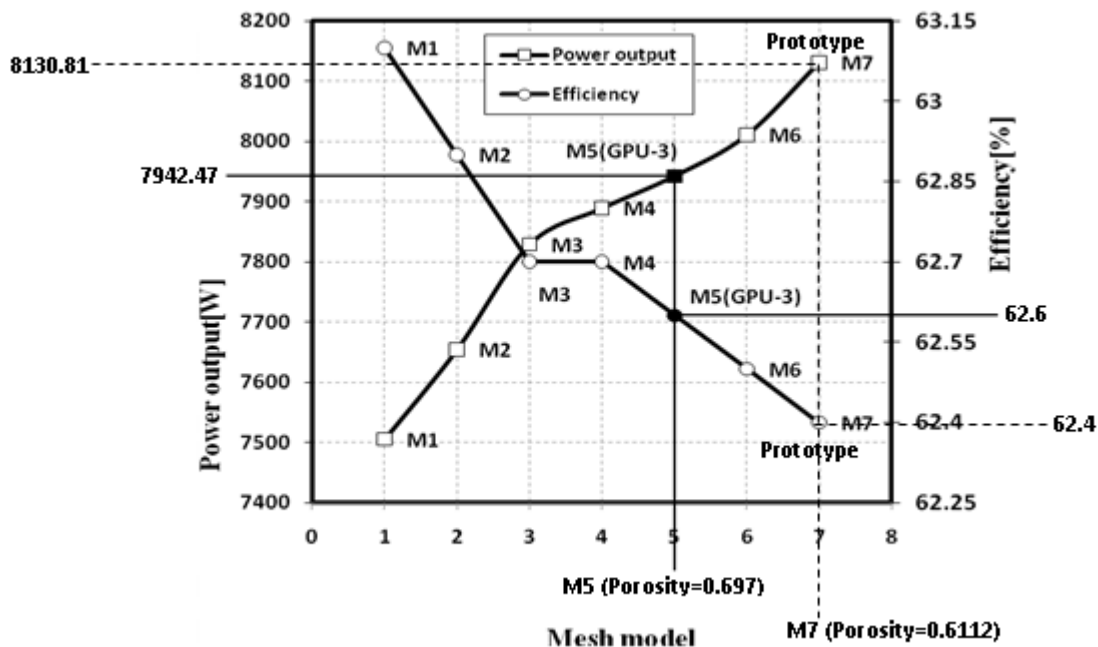
#### ۴-۶- گاز عامل

نتایج حاصل از اثر استفاده از گاز هیدروژن و هلیوم بعنوان گاز عامل در داخل موتور استرلینگ در جدول (۱۰) نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده با تغییر گاز عامل و استفاده از گاز هیدروژن به جای گاز هلیوم میزان حرارت ورودی، حرارت خروجی و توان خروجی موتور کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند. ، استفاده از گاز هیدروژن باعث کم شدن حرارت ورودی به موتور می شود در نتیجه مقادیر حرارت بازیابی شده در بازیاب موتور نیز کاهش می یابد (شکل ۲۱). حال چنانچه توان حرارتی وارد شده به موتور زیاد باشد هلیوم گزینه مناسب خواهد بود و چنانچه توان حرارتی ورودی از توان حرارتی موتور GPU-3 کمتر باشد، گاز هیدروژن با توجه به توان حرارتی مورد نیاز کمتر و راندمان بالاتر انتخاب بهینه است. بر اساس نتایج بدست آمده، با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، گاز هلیوم گزینه مناسب است.

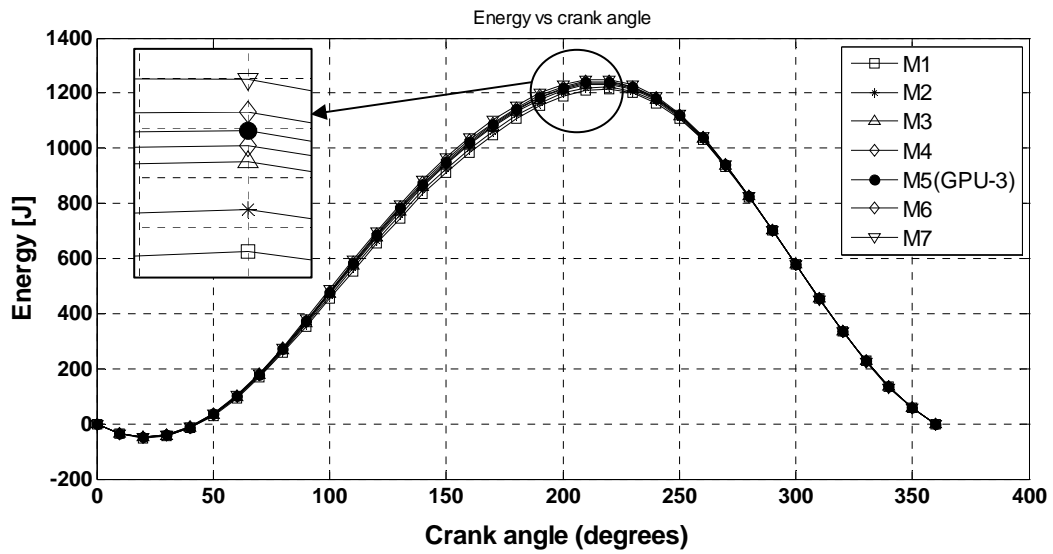
در جدول (۱۱)، روند تغییرات توان و راندمان موتور GPU-3 نسبت به تغییر پارامترهای هندسی و عملکردی، آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش طول بازیاب، قطر بازیاب، حجم مرده بازیاب و استفاده از هیدروژن بعنوان گاز عامل، توان خروجی موتور کاهش و راندمان آن افزایش می یابد. تغییر در قطر پیستون تا محدوده ۳۰ میلیمتر، باعث افزایش توان و راندمان خروجی می شود و از ۳۰ میلیمتر به بعد توان خروجی موتور افزایش و راندمان آن کاهش می یابد. بر اساس نتایج بدست آمده کاهش تخلخل بازیاب توان خروجی موتور را افزایش می دهد در حالیکه راندمان موتور کاهش می یابد.

**جدول ۹-** نتایج بدست آمده از تغییر ضریب تخلخل بازیاب بر راندمان و توان خروجی موتور

Mesh model	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
M1	11892.71	-4389.44	7505.45	63.1
M2	12161.16	-4508.53	7654.55	62.9
M3	12477.70	-4650.32	7829.00	62.7
M4	12587.26	-4699.83	7889.17	62.7
M5(GPU-3)	12684.8	-4743.93	7942.47	62.6
M6	12809.73	-4800.67	8010.63	62.5
<b>M7(Prototype)</b>	<b>13031.21</b>	<b>-4901.67</b>	<b>8130.81</b>	<b>62.4</b>



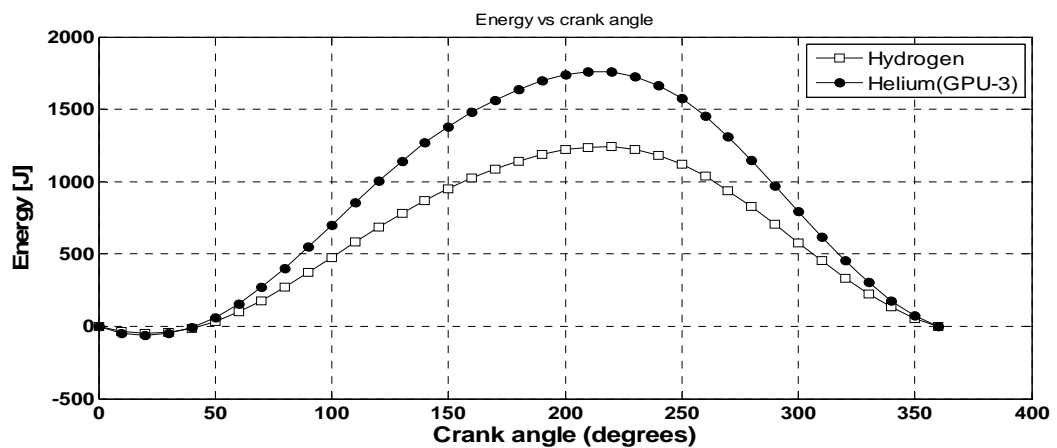
**شکل ۱۹-** تغییرات راندمان و توان خروجی موتور ناشی از تغییر ضریب تخلخل بازیاب



شکل ۲۰- تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر ضریب تخلخل بازیاب

جدول ۱۰- نتایج بدست آمده از تغییر گاز عامل بر راندمان و توان خروجی موتور

Working gas	Heat in[W]	Heat out[W]	Power[W]	Efficiency[%]
Helium(GPU-3)	12684.80	-4743.93	7942.47	62.6
Hydrogen	11825.06	-4083.97	7739.45	65.4



شکل ۲۱- تغییرات انرژی دریافتی بازیاب ناشی از تغییر گاز عامل

جدول ۱۱- نتایج بدست آمده از تغییر پارامترهای موتور بر راندمان و توان خروجی

		Heat in[W]	Heat out[W]	Thermal regenerative[W]	Power[W]	Efficiency[%]
Regenerator length increase		↓	↓	↓	↓	↑
Regenerator diameter increase		↓	↓	↓	↓	↑
Piston bore increase	To 30 mm	↑	↑	↑	↑	↑
	From 30 mm to end					↓
Regenerator void volume increase		↓	↓	↓	↓	↑
Regenerator porosity decrease		↑	↑	↑	↑	↓
Working gas (Hydrogen replace Helium)		↓	↓	↓	↓	↑

### ۵- بهینه سازی عملکرد موتور GPU-3

با توجه به نتایج بدست آمده، چنانچه بهینه سازی موتور GPU-3 بر مبنای افزایش راندمان صورت گیرد، توان خروجی موتور کاهش می یابد. محفظه احتراق موتور GPU-3 توانایی تولید ۱۳ کیلو وات انرژی حرارتی را دارد. بنابراین می بایست بهینه سازی بر مبنای استفاده حداکثری از این توان حرارتی ورودی صورت گیرد. درحالیکه اثر استفاده از حدکثر توان حرارتی ورودی بر روی راندمان حرارتی موتور نیز بررسی می شود. بر این اساس پارامترهای هندسی و عملکردی موتور GPU-3 تغییر داده شده است تا بالاترین توان خروجی، بر مبنای توان حرارتی ورودی، بدست آید. بر اساس نتایج بدست آمده (جدول ۱۲)، با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست طول بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلیمتر به مقدار ۲۰ میلیمتر، قطر بازیاب از مقدار ۲۲/۶ میلیمتر به مقدار ۲۱ میلیمتر، قطر پیستون توان از مقدار ۶۹/۹ میلیمتر به مقدار ۷۰/۲ میلیمتر، حجم مرده بازیاب از مقدار ۵۰/۵۵ سی سی به مقدار ۴۴ سی سی و تخلخل بازیاب از مقدار ۰/۶۹۷ به مقدار ۰/۶۱۱۲، کاهش یابد. همچنین هلیوم بعنوان گاز عامل تغییر داده نمی شود و همچنان گزینه مناسب می باشد.

جدول ۱۲- بهینه سازی پارامترهای هندسی و عملکردی موتور GPU-3

	Regenerator length(mm)	Regenerator diameter(mm)	Piston bore (mm)	Regenerator dead volume(cc)	Regenerator porosity	Working gas
GPU-3	22.6	22.6	69	50.55	0.697	Helium
<b>Prototype</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>70.2</b>	<b>44</b>	<b>0.6112</b>	<b>Helium</b>

## نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از این تحلیل می توان گفت :

- جریان انرژی در بازیاب، تقریباً ۵ برابر بیشتر از گرم کن و ۶ برابر بیشتر از خنک کن است.
- با افزایش طول و قطر بازیاب توان خروجی موتور کاهش می یابد در حالیکه راندمان افزایش پیدا می کند. با توجه به توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی، می بایست طول بازیاب از مقدار  $۲۲/۶$  میلیمتر به مقدار  $۲۰$  میلیمتر و قطر بازیاب از مقدار  $۲۲/۶$  میلیمتر به مقدار  $۲۱$  میلیمتر کاهش یابد.
- با افزایش قطر پیستون موتور، توان کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند. بر این اساس تا قطر  $۳۰$  میلیمتر توان و راندمان هردو همزمان افزایش می یابند ولیکن بعد از قطر  $۳۰$  میلیمتر، راندمان سیر نزولی می گیرد. برای افزایش توان خروجی، می بایست قطر پیستون توان از مقدار  $۶۹/۹$  میلیمتر به مقدار  $۷۰/۲$  میلیمتر افزایش یابد.
- بر اساس نتایج بدست آمده هرچه میزان حجم مرده بازیاب افزایش یابد، توان خروجی موتور، کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند. با توجه به نتایج بدست آمده، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست حجم مرده بازیاب از مقدار  $۵۰/۵۵$  سی سی به مقدار  $۴۴$  سی سی، کاهش یابد.
- با کاهش میزان تخلخل بازیاب، توان افزایش می یابد در حالیکه راندمان موتور کاهش می یابد. با توجه به توان محفظه احتراق خارجی موتور در تامین توان حرارتی ورودی، برای افزایش توان خروجی موتور، می بایست تخلخل بازیاب از مقدار  $۰/۶۹۷$  به مقدار  $۰/۶۱۱۲$ ، کاهش یابد.
- بر اساس نتایج بدست آمده با تغییر گاز عامل و استفاده از گاز هیدروژن به جای گاز هلیوم میزان توان خروجی موتور کاهش می یابد در حالیکه راندمان موتور افزایش پیدا می کند. ، با توجه به توان حرارتی ورودی موتور، گاز هلیوم گزینه مناسب است.



## مراجع

- [1] Schmidt, G., "The Theory of Lehmann's Calorimetric Machine", Z. Vereines Deutcher Ingenieure, 15, part 1, (1871).
- [2] Finkellstein, T., "Analogue Simulation of Stirling Engine", Simulation, No.2, March (1975).
- [3] Urieli, I., and Berchowitz, D.M., "*Stirling Cycle Engine Analysis*", Oxford University Press, Oxford, (1984).
- [4] Kongtragool, B., and Wongwises, S., "A Review of Solar Powered Stirling Engines and Low Temperature Differential Stirling Engines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 7, pp. 131-154, (2003).
- [5] Timoumi, Y., T., and Nasrallah, S.B., and Tlili, I., "Numerical Simulation and Losses Analysis in a Stirling Engine", Heat and Thechnology, Vol. 24, No. 1, pp. 97-105, (2006).
- [6] Timoumi, Y., Tlili, I., Nasrallah, S.B., "Reduction of Energy Losses in a Stirling Engine", Heat and Thechnology, Vol. 25, No.1, pp. 81-90, (2007).
- [7] Timoumi, Y., Nasrallah, S.B., and Tlili, I., "Thermodynamic Analysis of the Stirling Heat Engine with Regenerative Losses and Internal Irreversibilities", Int. J. Engine Res. Vol. 9, pp. 45-56, (2007).
- [8] Timoumi, Y., Tlili, I., and Nasrallah, S.B., "Design and Performance Optimization of GPU-3 Stirling Engines, Energy, Vol. 33, pp. 1100-1114, (2008).
- [9] Tlili, I, Timoumi, Y., and Nasrallah, S.B., "Analysis and Design Consideration of Mean Temperature Differential Stirling Engine for Solar Application", Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1911-1921, (2008).
- [10] Thombare, D.G, and Verma, S.K, "Technological Development in the Stirling Cycle Engines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, pp. 1-38, (2008).
- [11] Tavakolpour, A., Zomorodian, A., and 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, Vol. 33, pp. 77-87, (2008).
- [12] Gostante, M., and Invernizzi, A., "Stirling Engines using Working Fluids with Strong Real Gas Effects, Applied Thermal Engineering, Vol. 30, pp. 1703-1710, (2010).
- [13] Formosa, F., and Despesse, G., "Analytical Model for Stirling Cycle Machine Design", Energy Conversion and Management, Vol. 51, pp. 1855-1863, (2010).

## فهرست نمادهای انگلیسی

- A : مساحت مقطع عبوری جریان، سطح پیستون ( $m^2$ )
- $c_p$  : گرمای ویژه گاز در فشار ثابت ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
- $c_v$  : گرمای ویژه گاز در حجم ثابت ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
- e : خروج از مرکز (m)
- L : طول محور اتصال (m)
- m : جرم گاز (kg)
- P : فشار (pa)
- Q : حرارت انتقال یافته به سیال عامل (J)
- r : شعاع لنگ (m)
- R : ثابت عمومی گازها ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
- T : دمای گاز (K)
- V : حجم ( $m^3$ )
- W : ارا انجام شده توسط سیال عامل (J)

### زیرنویس ها

- c : فضای تراکم
- ck : تداخل تراکم و خنک کن
- clc : فضای خالی تراکم
- cle : فضای خالی انبساط
- d : جابجا کننده
- e : فضای انبساط
- h : گرم کن
- he : تداخل گرم کن و انبساط
- k : خنک کن
- kr : تداخل خنک کن و بازیاب
- p : پیستون
- r : بازیاب
- rh : تداخل بازیاب و گرم کن

### نمادهای یونانی

- $\theta$  : زاویه لنگ
- $\eta$  : راندمان حرارتی

**Abstract**

In this paper, the development of an adequate thermodynamic model for beta-type Stirling engine has been made. This model ability to predict and optimize power output and performance parameters of the Stirling engine based on geometric and physical conditions of all components. For this reason, the numerical solution of beta-type Stirling engine with heat regenerator equation of using five volume adiabatic thermodynamic model methods has been done. For validation results, the geometric and operational characteristics of the Stirling engine made by General Motors and the results with published values are compared. According to the results, to increase the engine power output, the values 20 mm for regenerator length, 21 mm for regenerator diameter, 70.2 mm for power piston diameter, 44 cc for regenerator dead volume and 0.6112 for regenerator porosity, have been proposed.