بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک
گرایش تبدیل انرژی

طراحی، ساخت و بررسی عملکرد تجربی موتور استرلینگ نوع گاما

استاد راهنما:

دکتر محمد رهنما

اساتید مشاور:

دکتر مسعود ایرانمنش

مؤلف:

حسن خانجانپور

بهمن ۱۳۹۱

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو: حسن خانجانپور

استاد راهنما: دکتر محمد رهنما

استاد مشاور: دکتر مسعود ایرانمنش

داور۱: دکتر سید حسین منصوری

داور۲: دکتر مظفر علی مهرابیان

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر افتخاری

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: خانم دکتر احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مربوط به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به

همه آنان که می‌آموزند تا عمل نمایند.

تشکر و قدردانی:

سپاس و ستایش یزدان پاک را که رهتوشهٔ دانش در کوله بار اشرف آفریدگان خویش نهاد و با کرامت علم الاسماء او را شایستگی مقام خلیفه اللهی ارزانی داشت.

سپاس ویژه استاد راهنمایم **جناب آقای دکتر محمد رهنما** که الگوی فروتنی، مهربانی و نیک سیرتی توأم با دانش و آگاهی است و هرگز مرا از خوان بی دریغ اندوخته‌های خویش محروم نگذاشته و رهین محبت‌های پدرانه ایشان بوده و خواهم بود.

مراتب سپاس‌گزاری و قدردانی بی پایان خود را از ارشادات و هدایت‌های استاد محترم **جناب آقای دکتر مسعود ایرانمنش** که به عنوان مشاور این پایان نامه تحصیلی دستگیر و راه‌گشای این‌جانب بودند، می‌نمایم.

از درگاه ایزد منان، سربلندی و کامکاری این اساتید فاضل، دانشمند و بزرگوار را خواستارم.

چکیده:

در پایان‌نامه حاضر، یک موتور استرلینگ نوع گاما طراحی، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از روش پیشرفته ترمودینامیک بُعد محدود، مدل ریاضی مناسبی برای موتور استرلینگ به دست آمده و مورد تحلیل قرار گرفت. برای شبیه سازی سیستم، چند برنامه کامپیوتری بر اساس توان موتور در شرایط کاری فرض شده نوشته شد. طراحی اولیه بر اساس اختلاف دمای ۴۶۰ درجه بین منبع گرم و سرد موتور انجام پذیرفت. با اختلاف دمای ذکر شده نسبت حجم جاروب شده بهینه با توجه به مدل برابرِ ۳ محاسبه شد. ابعاد دیگر موتور نیز، همانند نسبت حجم جاروب شده، محاسبه شدند. ابعاد بدست آمده عبارتند از: قطر پیستون قدرت: ۳۸ میلی متر، کورس پیستون قدرت: ۴۰ میلی متر، قطر پیستون جابجایی: ۵۵ میلی متر، کورس پیستون جابجایی: ۶۰ میلی متر. در آخر، موتور مذکور ساخته شده و مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت.

کلید واژه‌ها: موتور استرلینگ - نوع گاما - ترمودینامیک بُعد محدود - مدل سازی ریاضی - نسبت حجم جاروب شده.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست جداول ..... ط

فهرست تصاویر ..... ط

فهرست علائم ..... م

۱- فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ای بر موتورهای استرلینگ ۱

۱-۲- انواع موتور استرلینگ ۳

۱-۳- نحوه عملکرد انواع موتور استرلینگ ۴

۱-۳-۱- نحوه عملکرد موتور استرلینگ نوع آلفا ۵

۱-۳-۲- نحوه ی عملکرد موتور استرلینگ نوع بتا ۷

۱-۳-۳- نحوه ی عملکرد موتور استرلینگ نوع گاما ۱۰

۱-۴- سیکل ایده‌آل استرلینگ ۱۲

۱-۵- سیال عامل در موتور استرلینگ ۱۵

۱-۶- کاربردهای موتور استرلینگ ۱۶

۱-۶-۱- استفاده از موتور استرلینگ در نیروگاه هسته ای ۱۶

۱-۶-۲- سیستم‌های CHP (تولید همزمان توان و گرما) ۱۶

۱-۶-۳- کولر استرلینگ (Crycooler) ۱۷

۱-۶-۴- خنک کردن CPU بر پایه موتور استرلینگ ۱۸

۱-۶-۵- سامانه قدرت جلو برنده زیردریایی ۱۹

۱-۶-۶- تولید برق از انرژی خورشیدی ۲۰
۱-۷- تاریخچه مطالعات قبلی ۲۲
۲- فصل دوم: معادلات حاکم ۲۵
۲-۱- مدل سازی ریاضی ۲۵
۲-۲- پارامترهای مرجع ۳۹
۲-۳- پارامترهای طراحی موتور ۴۱
۲-۴- محاسبه دمای واقعی گاز در فضای انبساط و فضای تراکم ۴۲
۲-۵- محاسبه راندمان حرارتی ۴۲
۲-۶- تخمین توان مشخصه موتور ۴۳
۲-۶-۱- انواع متدهای آنالیز موتور ۴۳
۲-۶-۲- انواع مختلف تلفات موتور استرلینگ ۴۴
۲-۶-۳- روش اشمیت ۴۴
۲-۶-۴- کار کل و زاویه فاز بهینه موتور ۴۸
۲-۶-۵- توان مشخصه موتور ۴۸
فصل سوم: ساخت موتور استرلینگ ۵۰
۳-۱- طراحی شمای کلی موتور ۵۰
۳-۲- ساخت قطعات موتور ۵۱
۳-۲-۱- سیلندر هوای گرم (Displacer cylinder) ۵۱
۳-۲-۲-پیستون‌جابجاکننده‌ی‌گاز و میله‌ی‌رابط آن (Displacer & Displacer connecting) ۵۱
۳-۲-۳- سیلندر قدرت (Power cylinder) ۵۲

۳-۲-۴- پیستون قدرت (Power piston) ۵۲
۳-۲-۵- دسته‌ی پیستون قدرت (Power piston rod) ۵۳
۳-۲-۶- صفحات میانی ۵۳
۳-۲-۷- پره‌های خنک‌کننده (Cooling fins) ۵۴
۳-۲-۸- صفحه‌ی تکیه‌گاهی و دوشاخه‌ی رابط ۵۵
۳-۲-۹- چرخ طیار (Flywheel) ۵۶
۳-۲-۱۰- صفحه‌ی زیرین ۵۶
۳-۳- سوار کردن قطعات موتور (Assemble) ۵۶
۴- فصل چهارم: مطالعه آزمایشگاهی و نتایج ۵۹
۴-۱- سیستم‌های اندازه‌گیری (Measurement apparatus) ۵۹
۴-۲- نتایج ۶۲
۴-۳- معتبرسازی نسبت حجم جاروب شده ۶۴
۵- فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۷

فهرست جداول

جدول۱- برخی از خواص گازهای انتخاب شده در دمای ۳۰۰ K ۱۶

جدول۲ - ابعاد مناسب موتور استرلینگ نوع گاما ۴۱

جدول۳- مشخصات فنی دیتالاگر ۵۹

فهرست تصاویر

شکل۱-۱- رابرت استرلینگ و اولین موتور ساخته شده توسط وی ۱

شکل۱-۲- انواع موتور استرلینگ ۳

شکل۱-۳- انبساط و انقباض یک حجم بسته با تبادل حرارت ۴

شکل۱-۴- موتور استرلینگ نوع آلفا ۵

شکل۱-۵- آلفا - مرحله اول- انبساط ۵

شکل۱-۶- آلفا - مرحله دوم- انتقال ۶

شکل۱-۷- آلفا - مرحله سوم- تراکم ۶

شکل۱-۸- آلفا - مرحله چهارم- انتقال ۷

شکل۱-۹- موتور استرلینگ نوع بتا ۷

شکل۱-۱۰- بتا – مرحله اول – انبساط ۸

شکل۱-۱۱- بتا – مرحله دوم – انتقال ۸

شکل۱-۱۲- بتا – مرحله سوم – تراکم ۹

شکل۱-۱۳- بتا – مرحله چهارم – انتقال ۹

شکل۱-۱۴- موتور استرلینگ نوع گاما ۱۰

شکل۱-۱۵- گاما – مرحله اول – انبساط ۱۰

شکل۱-۱۶- گاما – مرحله دوم – انتقال ۱۱
شکل۱-۱۷- گاما – مرحله سوم – تراکم ۱۱
شکل۱-۱۸- گاما – مرحله چهارم – انتقال ۱۲
شکل۱-۱۹- سیکل ایده‌آل استرلینگ ۱۲
شکل۱-۲۰- اصول عملکرد چرخه استرلینگ ۱۴
شکل۱-۲۱ - سیستم‌های CHP (تولید همزمان توان و گرما) ۱۷
شکل۱-۲۲-کولر استرلینگ (Crycooler) ۱۸
شکل۱-۲۳- خنک کن CPU بر پایه موتور استرلینگ ۱۸
شکل۱-۲۴- سامانه قدرت جلو برنده زیردریایی ۱۹
شکل۱-۲۵- سامانه مجهّز به اکسیژن مایع ۲۰
شکل۱-۲۶- گرداورنده خورشیدی ۲۱
شکل۱-۲۷- موتور استرلینگ استفاده شده در گردآورنده‌های شرکت SCE ۲۱
شکل۱-۲۸- مزرعه استرلینگ شرکت تزرا سولار – کالیفرنیا، ایالات متّحده ۲۲
شکل۲-۱- سیکل ایده‌آل استرلینگ ۲۵
شکل۲-۲- شماتیک موتور استرلینگ نوع گاما ۲۶
شکل۲-۳–راندمان حرارتی موتور (η) بر حسب نسبت حجم جاروب شده (ξ) ۴۰
شکل۲-۴- کار بی بعد (W^{**}) بر حسب نسبت حجم جاروب شده (ξ) ۴۱
شکل۲-۵– تغییرحجم انبساطی و انقباضی به صورت سینوسی ۴۵
شکل۲-۶- کل کار در هر سیکل بر حسب زاویه فاز ۴۸
شکل۲-۷- نمودارفشار بر حسب حجم ۴۹

شکل۳-۱- شمای کلی موتور استرلینگ نوع گاما ۵۰
شکل۳-۲ سیلندر هوای گرم..... ۵۱
شکل۳-۳- پیستون جابجاکننده ی گاز و میله‌ی رابط آن..... ۵۲
شکل۳-۴- سیلندر قدرت..... ۵۲
شکل۳-۵- پیستون قدرت ۵۳
شکل۳-۶- دسته‌ی پیستون قدرت ۵۳
شکل۳-۷- صفحات میانی (نگهدارنده سیلندر هوای گرم) ۵۴
شکل۳-۸- صفحات میانی (نگهدارنده سیلندر قدرت) ۵۴
شکل۳-۹- پره‌های خنک‌کن..... ۵۵
شکل۳-۱۰- صفحه‌ی تکیه‌گاهی و دوشاخه‌ی رابط ۵۵
شکل۳-۱۱– چرخ طیار..... ۵۶
شکل۳-۱۲- صفحه‌ی زیرین ۵۶
شکل۳-۱۳ –موتور استرلینگ نوع گامای ساخته شده (نمای جلو) ۵۷
شکل۳-۱۴ –موتور استرلینگ نوع گامای ساخته شده (نمای پشت)..... ۵۷
شکل۳-۱۵ –موتور استرلینگ نوع گامای ساخته شده (نمای جانب)..... ۵۸
شکل۳-۱۶ –موتور استرلینگ نوع گامای ساخته شده (نمای جانب)..... ۵۸
شکل۴-۱- موتور استرلینگ ساخته شده در حین حرکت ۵۹
شکل۴-۲- سیستم‌های اندازه‌گیری..... ۶۰
شکل۴-۳- ترمومتر به کار برده شده برای ثبت دما ۶۰
شکل۴-۴- دورسنج دیجیتال..... ۶۱

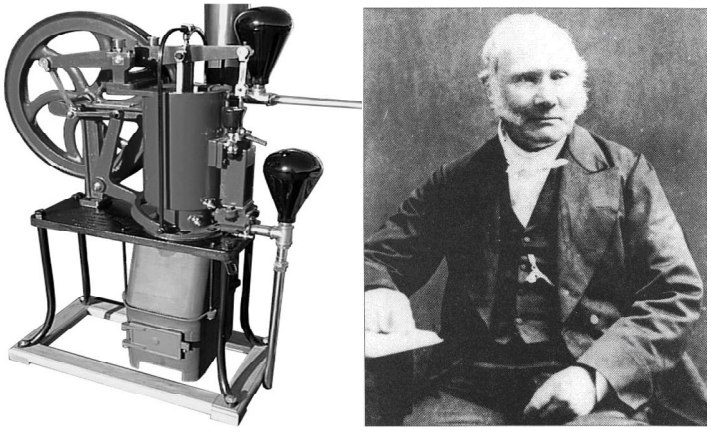
شکل۴-۵- منحنی تغییرات سرعت موتور بر حسب دمای منبع گرم ۶۲
شکل۴-۶- منحنی تغییرات گشتاور بر حسب گشتاور دور موتور..... ۶۳
شکل۴-۷- منحنی تغییرات توان ترمزی بر حسب دور موتور..... ۶۴
شکل۴-۸- منحنی تغییرات سرعت موتور بر حسب دمای منبع گرم (با سه نسبت مختلف)..... ۶۵
شکل۴-۹- منحنی تغییرات دور موتور بر حسب گشتاور (با سه نسبت مختلف)..... ۶۶
شکل۴-۱۰- منحنی تغییرات توان ترمزی بر حسب دور موتور (با سه نسبت مختلف) ۶۶

فهرست علائم			
زاویه فاز	φ	نسبت ظرفیت حرارتی گاز	γ
زاویه لنگ جابجاکننده	α	راندمان	η
زاویه‌لنگ‌پیستون‌قدرت= $\varphi-\alpha$	β	حرارت	Q
زیر نویس ها و بالا نویس ها		ثابت گاز	r
فضای سرد بیرونی	C	سطح	S
فضای سرد داخلی	c	کار	W
مرجع	0	جرم گاز	m
جابجاکننده	d	ثابت	k
فضای مرده	ds	حجم	V
فضای گرم بیرونی	H	دما	T
فضای گرم داخلی	h	موقعیت پیستون قدرت	x
اتلاف حرارتی	loss	موقعیت جابجاکننده	y
پیستون قدرت	p	اختلاف	Δ
بازیاب	reg	نسبت دمای داخلی $=(T_h/T_c)$	τ
بی بعد	*	نسبت‌حجم‌فضای‌مرده $=(V_{xds}/V_d)$	σ_x
بی بعد	**	فرکانسی	v
فرآیند ایزوترمال	′	فشار لحظه ای	p
نقطه	P_t	نسبت حجم جاروب شده	ξ
		ضریب انتقال حرارت جابجایی	h

۱ - فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ای بر موتورهای استرلینگ

موتور استرلینگ یا موتور هوا گرم، نوعی موتور احتراق خارجی است که نخستین بار در ۲۷ سپتامبر سال ۱۸۱۶ توسط رابرت استرلینگ (شکل۱-۱) و برادر مهندس اش جیمز در اسکاتلند ساخته شد و گسترش یافت [۱]. این موتور از نظر احتراق، امن تر و اقتصادی تر از موتورهای بخار آن روزگار به نظر می‌رسید. رابرت استرلینگ تا سن ۸۶ سالگی در کلیسایی در اسکاتلند به عنوان مُبلغ مذهبی خدمت کرد و اوقات فراغت خود را روی ساخت و تکمیل یک نمونه موتور گرمایی از این نوع در کارگاه کوچک منزل خود گذراند. هنگامی‌که در سال ۱۸۱۶، رابرت استرلینگ موتور اختراعی خود را ثبت کرد، به دنبال آسایش و رفاه بیش‌تر برای همشهریانش بود. او قصد داشت که این موتور، انتخاب مطمئن‌تری نسبت به دیگ‌های بخار باشد؛ زیرا اگر موتور بخار با کیفیت پایینی ساخته شود، ممکن است منفجر شده و موجب از بین رفتن افرادی شود که در نزدیکی هستند. همانند موتور بخار، منبع حرارتی موتور استرلینگ هم در خارج سیلندر قرار دارد، ولی فشارهای داخلی آن کمتر بوده و برای به کار انداختن موتور بخار کافی نیست. با وجود این استفاده از فولاد بسمر، کارآیی و ایمنی دیگ‌های بخار را به گونه ای افزایش داد که موتور استرلینگ فرصت خودنمایی پیدا نکرد. اما در دو دهه اخیر به خاطر خصوصیات منحصر به فرد خود مورد اقبال فراوانی قرار گرفته است [۲].



شکل۱-۱- رابرت استرلینگ و اولین موتور ساخته شده توسط وی

موتور استرلینگ یک سیستم مکانیکی است که بر مبنای یک سیکل بسته ترمودینامیکی شامل فرآیندهای تراکم و انبساط سیال عامل آن و در سطوح مختلف دمایی کار انجام می دهد. تغییر حجم سیال موجود در این موتورها باعث ایجاد یک زنجیره تبدیل گرما به کار و بالعکس می‌شود. در موتور استرلینگ عمل احتراق کامل است، از این رو مصرف سوخت این موتورها یک سومِ موتورهای هم قدرت خود می‌باشد. از نقطه نظر ترمودینامیکی بازده حرارتی تئوری آن بین ۴۵-۴۰ درصد است. در صورتی که بازده حرارتی تئوری، موتورهای بنزینی بین ۲۵-۱۷ درصد ودیزلی بین ۳۲-۲۸ درصد است [۳]. موتور استرلینگ دارای خصوصیاتی است که این موتور را برای کاربردهای ویژه، منحصر به فرد ساخته است. گرمایش خارجی آن می‌تواند از منابع حرارتی متنوعی از قبیل احتراق سوخت‌های فسیلی جامد، مایع و گازی شکل، حرارت خورشیدی، احتراق زیست توده، حرارت واکنش هسته‌ای و حرارت‌های ناشی از فرآیندهای شیمیایی و غیره تامین شود. بنابراین در مقایسه با یک موتور احتراق داخلی، آلودگی‌های خروجی موتور استرلینگ بسیار پایین‌تر و قابلیت تطابق‌پذیری با سوخت‌های مختلف در آن بسیار بالاتر است. در حال حاضر نمونه‌هایی از موتور استرلینگ در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار دارد: موتور استرلینگ خورشیدی، کولر استرلینگ، سامانه تهویه مطبوع استرلینگ و سامانه قدرت جلو برنده زیردریایی (که بی سر و صدا بودن آن مهم است). در آینده ای نزدیک شاهد نسل نوینی از این موتورها و کاربردهای جدید آن خواهیم بود [۲].

در مقابل خصوصیات منحصر به فرد و مزایای موتور استرلینگ، مشکلات و محدودیت‌هایی نیز در مورد این موتور وجود دارد. منبع گرم در این موتور می‌باید حرارت زیاد و مداومی ایجاد کند. بنابراین مواد به کار رفته در قسمت هیتر به طور پیوسته در معرض یک حرارت بالا قرار دارند که می‌تواند برای این مواد مشکل ساز باشد.

برای دریافت توان‌های بالا از یک موتور استرلینگ نیاز به دریافت کار خالص بالا از آن می‌باشد. این امر زمانی میسر است که فشار سیال عامل تا میزان زیادی بالا رود. با بالا رفتن فشار سیال عامل، برای نگه داشتن آن در موتور از یک سیکل به سیکل دیگر، نیاز به یک آب‌بندی موثر در موتور می‌باشد.

یکی دیگر از محدودیت‌های موتور استرلینگ، مسئله روان کاری آن می‌باشد. این مسئله‌ی خیلی مهمی است که مقدار روان‌کننده‌ها در سطح پایینی نگه داشته شود، مخصوصاً روغن‌های هیدروکربنی. در مورد موتورهایی که با هیدروژن و یا هلیم شارژ شده‌اند، اگر این روغن‌ها در

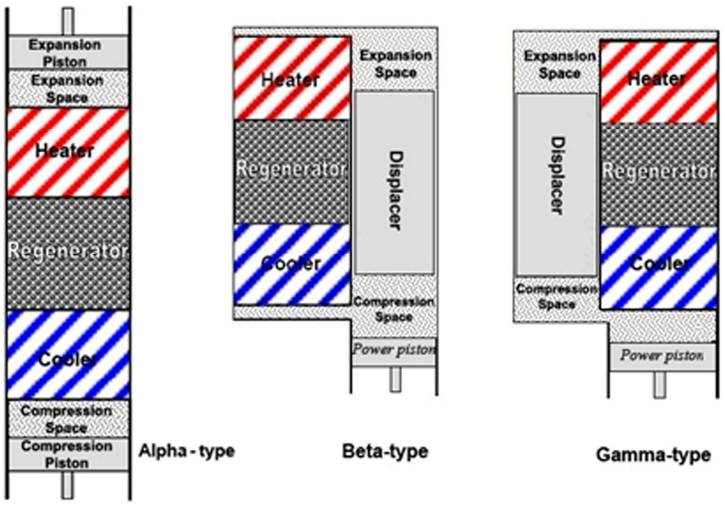
درجه حرارت بالای موتور بخار شوند، با اشغال فضای کاری موتور مانعی برای عملکرد سیال عامل هستند و بازده موتور راکاهش می‌دهند. همچنین در صورت کربونیزه شدن آن‌ها، راه‌های عبوری بازیاب برای سیال عامل ممکن است مسدود شود [۴].

۱-۲- انواع موتور استرلینگ

بر اساس مکانیزم‌های مکانیکی، موتورهای استرلینگ به سه گروه آلفا، بتا وگاما (شکل۱-۲) تقسیم می‌شوند. موتورهای نوع آلفا دارای دو سیلندر مجزا برای فضاهای تراکم و انبساط بوده و در هر سیلندر یک پیستون قرار دارد. موتور استرلینگ نوع بتا، قدیمی‌ترین ساختمان موتورهای استرلینگ می‌باشد. اختراع رابرت استرلینگ به عنوان اولین موتور استرلینگ دارای ساختمان بتا بوده است [۵].

موتورهای نوع بتا از ترکیب پیستون قدرت و جابجا کننده استفاده می‌کنند. ساختمان موتور به این گونه است که هر دو پیستون در یک سیلندر به طور خطی قرار گرفته‌اند. موتور استرلینگ نوع گاما همانند موتور نوع بتا دارای ترکیب پیستون جابجا کننده می‌باشد. در این نوع موتور پیستون و جابجا کننده در دو سیلندر مجزا قرار دارند [۵].

موتور استرلینگ نوع گاما، نسبت به نمونه‌های آلفا و بتا دارای نسبت تراکم کمتری می‌باشد. اما به دلیل این که تنها پیستون قدرت آن نیاز به آب‌بندی دارد و همچنین سیلندرها مجزا هستند، از لحاظ مکانیکی ساده‌ترین آرایش را در میان سایر چیدمان‌ها دارد [۵].



شکل۱-۲- انواع موتور استرلینگ

همچنین با توجه به دمای منبع گرم موتورهای استرلینگ به سه گروه دما بالا (HTD)، دما متوسط (MTD) و دما پایین (LTD) طبقه بندی می‌گردند.

۱- اختلاف دمای پایین LOW TEMPERATURE DIFFERENTIAL (LTD)

۲- اختلاف دمای متوسط MODERATE TEMPERATURE DIFFERENTIAL (MTD)

۳- اختلاف دمای بالا HIGH TEMPERATURE DIFFERENTIAL (HTD)

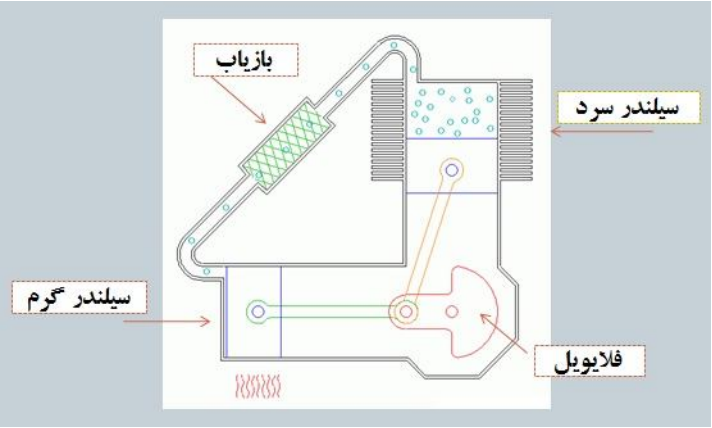
۱-۳- نحوه عملکرد انواع موتور استرلینگ

اساس عملکرد موتور استرلینگ، سرد و گرم کردن یک گاز در یک حجم بسته است. مانند اشکال زیر اگر به یک گاز حرارت دهیم منبسط و اگر از آن حرارت بگیریم منقبض می‌شود.

شکل ۱-۳- انبساط و انقباض یک حجم بسته با تبادل حرارت

۱-۳-۱- نحوه عملکرد موتور استرلینگ نوع آلفا

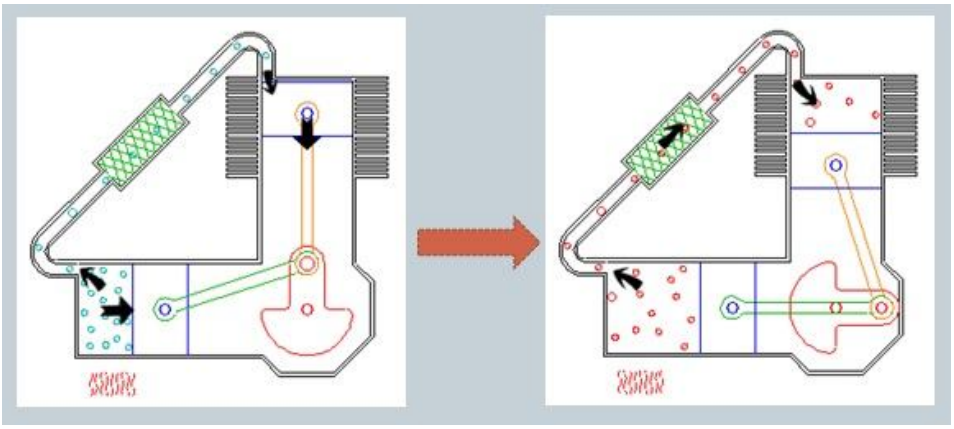
شماتیک موتور استرلینگ نوع آلفا و اجزای اصلی آن در شکل۱-۴ نمایش داده شده است.



شکل۱-۴- موتور استرلینگ نوع آلفا

آلفا- مرحله اول ـ انبساط:

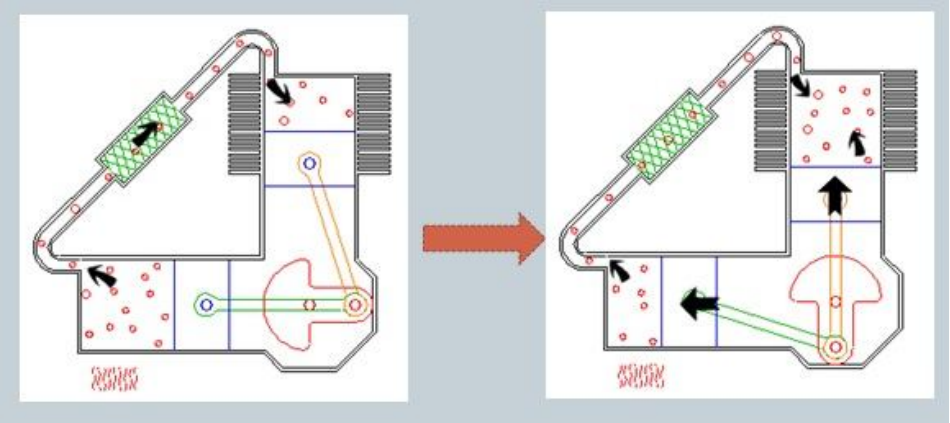
در این مرحله اکثر گاز موجود در سیستم در قسمت گرم موتور قرار دارد و با دادن حرارت، گاز موجود در سیستم منبسط شده و هر دو پیستون را به حرکت در می‌آورد، این عمل باعث می‌شود که فلایویل ۹۰ درجه بچرخد (شکل۱-۵).



شکل۱-۵- آلفا - مرحله اول- انبساط

آلفا- مرحله دوم ـ انتقال:

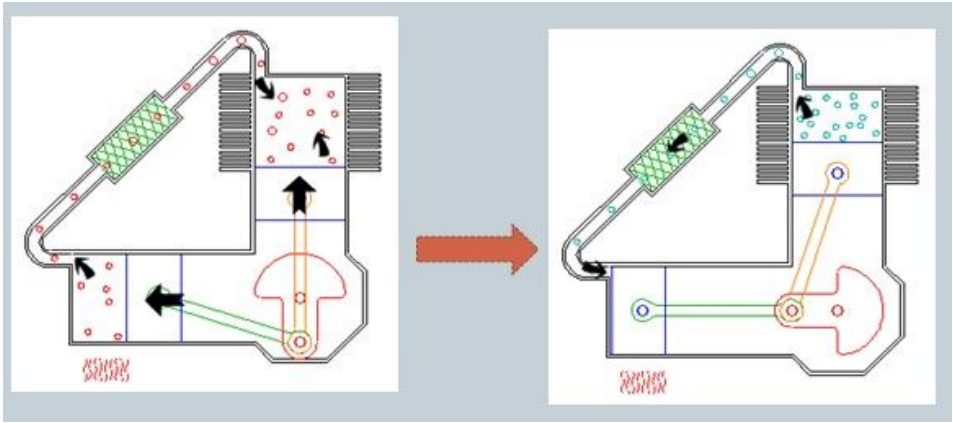
در این مرحله چرخ طیار (فلایویل) انرژی ذخیره شده در مرحله ی اول را به سیستم پس می‌دهد و باعث می‌گردد شافت خروجی موتور به اندازه ۹۰ درجه حرکت کند، از طرفی باعث انتقال گاز از قسمت گرم به قسمت سرد موتور می‌شود (شکل۱-۶).



شکل۱-۶- آلفا - مرحله دوم- انتقال

آلفا- مرحله سوم-تراکم:

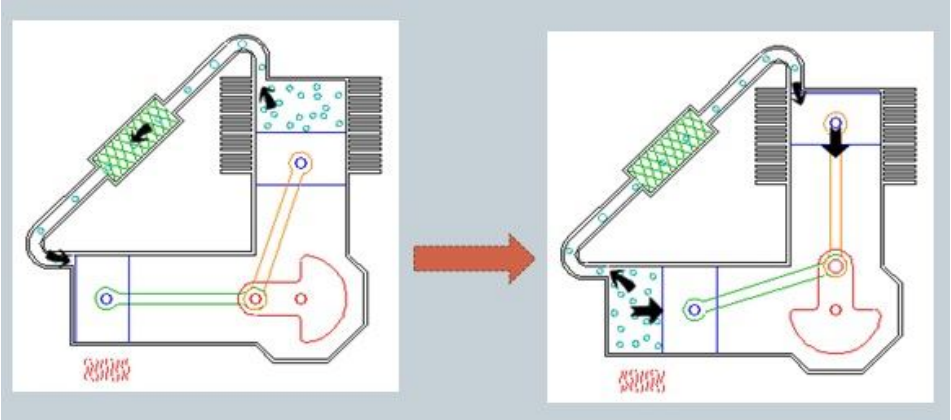
در این مرحله اکثر گازِ موجود در سیستم، در قسمت سرد موتور قرار دارد و با انتقال حرارت به بیرون از سیستم، گاز موجود در سیستم متراکم شده و هر دو پیستون را به حرکت در می‌آورد، این عمل باعث می‌شود که فلایویل ۹۰ درجه دیگر بچرخد (شکل۱-۷).



شکل۱-۷- آلفا - مرحله سوم- تراکم

آلفا- مرحله چهارم ـ تعویض سیال

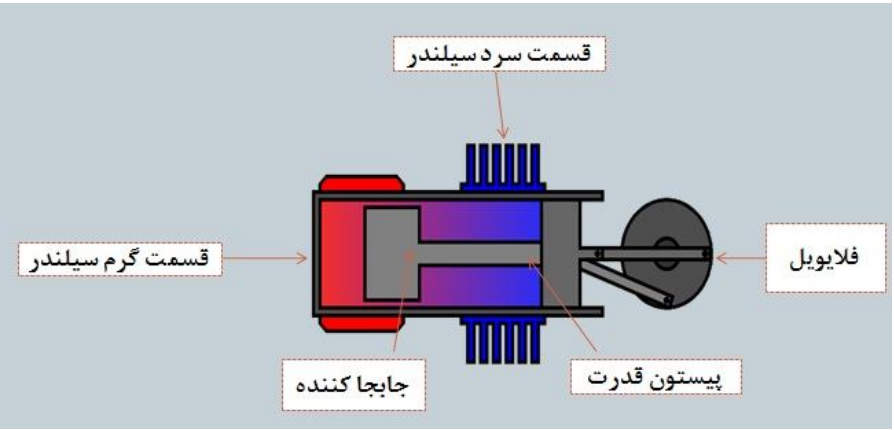
در این مرحله چرخ طیار (فلایویل) انرژی ذخیره شده در مرحله ی سوم را به سیستم پس می‌دهد و باعث می‌گردد شافت خروجی موتور به اندازه ۹۰ درجه حرکت کند، از طرفی باعث انتقال گاز از قسمت سرد به قسمت گرم موتور می‌شود (شکل۱-۸).



شکل۱-۸- آلفا - مرحله چهارم- انتقال

۱-۳-۲- نحوه ی عملکرد موتور استرلینگ نوع بتا

شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا و اجزای اصلی آن در شکل۱-۹ نمایش داده شده است.



شکل۱-۹- موتور استرلینگ نوع بتا