۸۷/۱/۱۰۶۲۹۹
۱۹_۱۲_۱۷

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

طراحی و ساخت یک‌دستگاه موتور استرلینگ نوع گاما به منظور استفاده در کاربردهای خورشیدی

توسط
امین یارمحمودی

استاد راهنما
دکتر علی‌اکبر گل‌نشان

۱۳۸۷/۱۲/۱۰۹۵

مهرماه ۱۳۸۷

۱۰۸۸۹۴

به نام خدا

طراحی و ساخت یک‌دستگاه موتور استرلینگ نوع گاما به منظور استفاده در کاربردهای خورشیدی

به وسیله‌ی:

امین یارمحمودی

پایان‌نامه
ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان‌نامه با درجه: عالی

دکتر علی‌اکبر گل‌نشان، استادیار بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز (رئیس کمیته).....

دکتر جعفر زرین‌چنگ، دانشیار بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز.....

دکتر محمود یعقوبی، استاد بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز.....

مهرماه ۱۳۸۷

۱۰۸۸۹۹

تقدیم به:

پدر و **مادر**

فداکارم که با مهر و درایت، همواره همراه من بوده‌اند

سپاسگزاری

ملاصدرا می‌فرماید:

خداوند بی‌نهایت است و لامکان و بی‌زمان

اما به قدر فهم تو کوچک می‌شود

به قدر نیاز تو فرود می‌آید

به قدر آرزوی توگسترده

و به قدر ایمان تو کارگشا می‌شود.

شکر خدای را که هستی‌ام بخشید و خلقت و نعمتش را در لحظه لحظه زندگی‌ام نو به نو زنده کرد. اکنون که با یاری خداوند متعال پایان نامه تحصیلی خود را به پایان رسانده‌ام، لازم می‌دانم تا از یک یک اعضای خانواده‌ام، خصوصا پدر و مادرم، که با عشق و دلسوزی من را همراهی و یاری کردند تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از کمک‌های همه جانبه جناب آقای دکتر علی‌اکبر گل‌نشان به عنوان استاد راهنمای این پایان نامه و جناب آقای دکتر محمود یعقوبی به دلیل حمایت ها و مشاورت های ایشان به عنوان استاد مشاور، سپاسگزاری می نمایم، و سپاس بر انسانهای والایی که یاور و راهنمای من در راه تحصیل علم بودند:

استاد دکتر جعفر زرین‌چنگ

آقای مهندس کورش عضدی

در پایان بر خود واجب می دانم تا از جناب مهندس صباحی، آقایان جمال مهارلویی، یادگار، کرم زاده، جنگجو، شهیدی نژاد و مهندس علی مردوار، به خاطر کمک‌ها و دل گرمی‌های مفید و موثرشان سپاسگزاری نمایم.

چکیده

طراحی و ساخت یک دستگاه موتور استرلینگ نوع گاما به منظور استفاده در کاربردهای خورشیدی

توسط:

امین یارمحمودی

کاهش سریع منابع طبیعی انرژی باعث توجه بیشتر جهت یافتن منابع جدید انرژی و ابزارهای موثر حفظ آن شده است. یکی از این ابزارها موتور استرلینگ می باشد. این موتور که در زمره موتورهای برون‌سوز قرار می گیرد در سال ۱۸۱۶ میلادی، حدود ۸۰ سال قبل از اختراع موتورهای احتراق داخلی، توسط رابرت استرلینگ در اسکاتلند اختراع شد.

موتور استرلینگ بر اساس یک سیکل ترمودینامیکی چهار مرحله ای با همین نام کار می کند که شامل دو مرحله دما ثابت و دو مرحله حجم ثابت می باشد. در حین کارکرد موتور سیال کاری به طور متناوب در دو سطح دمایی مختلف تحت تراکم و انبساط قرار می گیرد و تولید کار مکانیکی می کند. بازده گرمایی بالا، کارکرد با صدای کم و توانایی استفاده از بسیاری از سوختها، عواملی است که بکارگیری این موتور را چه از نظر مسایل انرژی و چه از نظر مسایل زیست محیطی موجه می نماید. به طور کلی همه منابع انرژی گرمایی می توانند برای موتور استرلینگ مورد استفاده قرار گیرند اما در این میان انرژی خورشیدی به عنوان یکی از قابل توجه ترین منابع انرژی تجدید پذیر است که می تواند به عنوان یک منبع انرژی ورودی برای موتور استرلینگ مورد استفاده قرار گیرد.

در پایان نامه حاضر، یک موتور استرلینگ سبک وزن از نوع گاما با حجم جاروب تراکم ۱۳۰ سانتی متر مکعب طراحی، ساخته و آزمایش شده است. روش ترمودینامیک بعد محدود و نرم افزار SolidWorks برای مدل سازی و شبیه سازی موتور و تئوری اشمیدت در طراحی اولیه موتور مورد استفاده قرار گرفته اند. در این موتور از هوا به عنوان گاز کاری و از یک المنت برقی به عنوان منبع گرم جهت آزمایش موتور استفاده شده است. مشخصه های عملکردی موتور در محدوده دمای منبع گرم ۵۵۰-۷۳۰ درجه سانتی گراد و توان ورودی ۳۵۰-۶۰۰ وات که معادل میزان انرژی تابشی خورشیدی داده شده به موتور توسط یک کلکتور با قطر تقریبی ۲ متر می باشد، بوده است. بیشترین توان خروجی حاصله در دمای منبع گرم ۷۳۰ درجه سانتی گراد و دمای منبع سرد ۴۰ درجه سانتی گراد در دور موتور ۸۵ دور بر دقیقه، معادل ۳±۰/۵ وات اندازه گیری شده است.

نتایج حاصله از پایان نامه‌ی حاضر بیانگر این موضوع می باشند که علی رغم تمامی مشکلات امکان ساخت موتورهای استرلینگ با توان های بالا موجود می باشد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: معرفی موتور استرلینگ	۱
۱.۱ مقدمه	۲
۱.۱.۱ سیال عامل	۲
۲.۱.۱ مبدل های حرارتی در موتور استرلینگ	۳
۱.۲.۱.۱ گرم کننده	۴
۲.۲.۱.۱ کولر	۴
۳.۲.۱.۱ بازیاب	۴
۲.۱.۲ دسته بندی موتورهای استرلینگ	۵
۲.۲ تاریخچه و پیشینه تحقیق	۱۰
۲.۳ هدف پروژه	۱۴
فصل دوم: تئوری و روابط حاکم	۱۵
۱.۲ تحلیل سیکل ایده آل استرلینگ	۱۶
۲.۲ تحلیل دما ثابت سیکل استرلینگ	۲۱
۳.۲ تئوری اشمیدت	۲۴
۱.۳.۲ معادلات برای محاسبه حجم ها	۲۵
۲.۳.۲ دمای موثر حجم مرده	۲۶
۳.۳.۲ دمای موثر گاز در بازیاب	۲۷
۴.۳.۲ فشار به عنوان تابعی از زاویه لنگ	۲۷
۴.۲ مدل ترمودینامیک بعد محدود	۲۸
فصل سوم: طراحی و ساخت موتور	۳۳

عنوان | صفحه

۱.۳ مراحل طراحی و ساخت موتور ۳۴
۲.۳ ساخت قسمت های مختلف موتور ۳۹
۱.۲.۳ سیلندر و پیستون قدرت ۴۰
۲.۲.۳ چرخ طیار ۴۰
۳.۲.۳ شاتون و میله رابط ۴۱
۴.۲.۳ سیلندر و پیستون جابجایی ۴۲
۵.۲.۳ بازیاب ۴۳
۶.۲.۳ قطعه رابط بین محفظه تراکم و انبساط ۴۳
۷.۲.۳ سر سیلندر جابجایی ۴۴
۸.۲.۳ کویل آب سرد ۴۴
۳.۳ آماده سازی جهت انجام آزمایشات ۴۶
۱.۳.۳ سنسور سنجش دور ۴۹
۲.۳.۳ فشار سنج نسبی ۵۰
۳.۳.۳ سنسورهای دمایی ۵۰
۴.۳.۳ منبع تغذیه توان ورودی به گرم کننده ۵۱
۵.۳.۳ آمپرمتر دیجیتال ۵۲
۶.۳.۳ ولت متر دیجیتال ۵۲
۴.۳ کنترل سرعت و توان در موتور استرلینگ ۵۲
۱.۴.۳ کنترل دمای سیال کاری ۵۳
۲.۴.۳ کنترل فشار متوسط سیکل ۵۳
۳.۴.۳ تغییرات حجم مرده ۵۳
۴.۴.۳ تغییرات زاویه فاز ۵۴
۵.۴.۳ تغییرات کورس جابجایی ۵۴
فصل چهارم: نتایج و بحث در نتایج ۵۵
۱.۴ مدل سازی کامپیوتری موتور ۵۶

عنوان | صفحه

۱.۱.۴ اثر نسبت حجم جاروب های تراکم به انبساط بر بازده و کار خروجی بدون بعد موتور ۵۶
۲.۱.۴ اثر نسبت حجم های مرده به جابجایی انبساط بر بازده و کار خروجی بدون بعد موتور ۵۸
۳.۱.۴ اثر دمای منبع گرم بر بازده و کار خروجی بدون بعد موتور ۵۹
۴.۱.۴ اثر استفاده از بازیاب بر بازده و کار خروجی بدون بعد موتور ۶۱
۲.۴ آزمایش و تست تجربی موتور ۶۳
۱.۲.۴ اثر افزایش توان ورودی بر دمای منبع گرم ۶۳
۲.۲.۴ اثر افزایش دمای منبع گرم بر توان خروجی موتور ۶۴
۳.۲.۴ اثر افزایش توان ورودی بر سرعت دورانی موتور ۶۵
۴.۲.۴ اثر افزایش سرعت دورانی موتور بر توان خروجی آن ۶۵
۵.۲.۴ اثر افزایش دبی آب خنک کن بر دمای منبع سرد ۶۶
۶.۲.۴ اثر اختلاف دمای منابع سرد و گرم بر سرعت دورانی موتور ۶۷
۷.۲.۴ اثر اختلاف دمای منابع سرد و گرم بر توان خروجی موتور ۶۷
۳.۴ مقایسه مقدار توان حاصله از موتور با روابط تحلیلی موجود ۶۸
۱.۳.۴ محاسبه توان خروجی موتور بر اساس فرمول بیل ۶۸
۲.۳.۴ محاسبه توان خروجی موتور بر اساس فرمول اشمیدت ۶۹
۳.۳.۴ محاسبه توان خروجی موتور بر اساس فرمول توان فشار متوسط ۶۹
پیشنهادات ۷۰
فهرست منابع و مراجع ۷۱
پیوست الف ۷۳
الف.۱ مقدمه ای بر انرژی خورشیدی ۷۴
الف.۲ نحوه ارتباط موتور استرلینگ با کلکتور خورشیدی ۷۶
الف.۳ استفاده از موتور استرلینگ خورشیدی برای تولید الکتریسیته ۷۸
الف.۱.۳ قسمت های یک مجموعه استرلینگ خورشیدی ۷۹
الف.۲.۳ سیستم های رد یابی خورشید ۸۰

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱.۳ مشخصات فنی موتور	۳۵
جدول ۲.۳ ابعاد موتور	۳۵
جدول ۱.۴ مقایسه نتایج مربوط به سه مدل با نتیجه تجربی	۶۹

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان	صفحه
شکل ۱.۱ مبدل های حرارتی در موتور استرلینگ	۳
شکل۲.۱ موتور استرلینگ نوع آلفا	۶
شکل۳.۱ موتور استرلینگ نوع بتا	۷
شکل۴.۱ موتور استرلینگ نوع گاما	۷
شکل۵.۱ طرح شماتیک نحوه عملکرد سیکل استرلینگ	۸
شکل۶.۱ دیاگرام سیکل ایده آل استرلینگ	۸
شکل۷.۱ نقشه جهانی میزان تابش خورشید	۱۴
شکل۱.۲ طرح شماتیک و دیاگرام مرحله (الف)	۱۷
شکل۲.۲ طرح شماتیک و دیاگرام مرحله (ب)	۱۷

عنوان | صفحه

شکل۳.۲ طرح شماتیک و دیاگرام مرحله (ج) ۱۸
شکل۴.۲ طرح شماتیک و دیاگرام مرحله (د) ۱۹
شکل۵.۲ سیکل استرلینگ وسیکل کارنو ۲۰
شکل۶.۲ مدل ایده آل دما ثابت ۲۱
شکل۷.۲ مدل عمومی برای یک فضای کاری ۲۲
شکل۸.۲ منحنی حرکت ایده آل موتور استرلینگ نوع گاما ۲۴
شکل۹.۲ منحنی حرکت سینوسی موتور استرلینگ نوع گاما ۲۵
شکل۱۰.۲ طرح شماتیک نشان دهنده حجم های مختلف ۲۶
شکل ۱۱.۲ شماتیک مدل ترمودینامیک بعد محدود ۲۹
شکل ۱۲.۲ سیکل مدل ترمودینامیک بعد محدود ۲۹
شکل ۱.۳ سیلندر و پیستون قدرت به همراه چرخ طیار و شاتون ۳۶
شکل ۲.۳ نمای برش خورده سیلندر و پیستون قدرت به همراه چرخ طیار و شاتون ۳۶
شکل ۳.۳ قطعه رابط فضاهای تراکم و انبساط ۳۶
شکل ۴.۳ نمای برش خورده قطعه رابط فضاهای تراکم و انبساط ۳۷
شکل ۵.۳ نمای برش خورده مجموعه جابجایی به همراه بازیاب ۳۷
شکل ۶.۳ میله رابط پیستون جابجایی و شاتون ۳۷
شکل ۷.۳ نمای چرخ طیار ۳۸
شکل ۸.۳ نمای کلی موتور ۳۸
شکل ۹.۳ نمای سیلندر قدرت به همراه پیستون ۳۹
شکل ۱۰.۳ نمای چرخ طیار ۴۰
شکل ۱۱.۳ نمای نهایی چرخ طیار ۴۰
شکل ۱۲.۳ نمای میله رابط ۴۱
شکل ۱۳.۳ نمای پیستون جابجایی و بازیاب ۴۱
شکل ۱۴.۳ نمای سیلندر جابجایی ۴۲
شکل ۱۵.۳ استفاده از ورقه های آلومینیومی به عنوان بازیاب ۴۲

عنوان | صفحه

شکل ۱۶.۳ نمای قطعه رابط ۴۳
شکل ۱۷.۳ نمای سر سیلندر جابجایی (گرم کننده) ۴۳
شکل ۱۸.۳ نمای کویل آب سرد (کولر) ۴۴
شکل ۱۹.۳ نمای مجموعه قطعات موتور ۴۴
شکل ۲۰.۳ نمای کلی از موتور ۴۵
شکل ۲۱.۳ نمای کلی نصب موتور روی میز به همراه تجهیزات اندازه‌گیری ۴۶
شکل ۲۲.۳ پولی انتقال دهنده توان ۴۶
شکل ۲۳.۳ منبع گرم کننده موتور ۴۶
شکل ۲۴.۳ عایق حرارتی قسمت گرم کننده موتور ۴۷
شکل ۲۵.۳ کویل آب سرد (کولر) و شیلنگ های ورود و خروج آب ۴۷
شکل ۲۶.۳ مولد الکتریکی و مدار مصرف کننده ۴۸
شکل ۲۷.۳ قطعات نصب شده روی سطح پولی ۴۸
شکل ۲۸.۳ صفحه نمایشگر دور موتور ۴۸
شکل ۲۹.۳ دستگاه فشار سنج نسبی ۴۹
شکل ۳۰.۳ سنسور دمای منبع گرم ۴۹
شکل ۳۱.۳ سنسور دمای ورودی منبع سرد ۵۰
شکل ۳۲.۳ سنسور دمای خروجی منبع سرد ۵۰
شکل ۳۳.۳ نمایشگر های سنسورهای دمایی ۵۰
شکل ۳۴.۳ منبع تغذیه متغیر توان ورودی به گرم کننده ۵۰
شکل ۳۵.۳ آمپر متر و ولت متر دیجیتال جهت خواندن ولتاژ و شدت جریان تولیدی ۵۱
شکل ۳۸.۳ شیر تعبیه شده جهت تنظیم فشار گاز کاری موتور ۵۲
شکل ۳۹.۳ سوراخ های تعبیه شده روی چرخ طیار جهت تغییر کورس ۵۳
نمودار ۱.۴ اثر تغییرات ξ بر بازده موتور ۵۶
نمودار ۲.۴ اثر تغییرات ξ بر کار خروجی بدون بعد موتور ۵۶
نمودار ۳.۴ اثر تغییرات σ بر بازده موتور ۵۷

عنوان | صفحه

نمودار ۴.۴ اثر تغییرات σ بر کار خروجی بدون بعد موتور ۵۸
نمودار ۵.۴ اثر تغییرات T_h بر بازده موتور ۵۹
نمودار ۶.۴ اثر تغییرات T_h بر کار خروجی بدون بعد موتور ۵۹
نمودار ۷.۴ اثر تغییرات T_h و T_c بر بازده موتور ۶۰
نمودار ۸.۴ اثر تغییرات T_h و T_c بر کار خروجی بدون بعد موتور ۶۰
نمودار ۹.۴ اثر استفاده از بازیاب بر بازده موتور به ازای ξ های مختلف ۶۱
نمودار ۱۰.۴ اثر استفاده از بازیاب بر کار خروجی بدون بعد موتور به ازای ξ های مختلف ۶۲
نمودار ۱۱.۴ تغییرات T_h به ازای افزایش توان ورودی ۶۳
نمودار ۱۲.۴ تغییرات توان خروجی موتور به ازای افزایش دمای منبع گرم ۶۳
نمودار ۱۳.۴ تغییرات دور موتور به ازای افزایش توان ورودی ۶۴
نمودار ۱۴.۴ تغییرات توان خروجی موتور به ازای افزایش دور موتور ۶۵
نمودار ۱۵.۴ تغییرات دمای منبع سرد به ازای افزایش دبی آب خنک کن ۶۵
نمودار ۱۶.۴ تغییرات دور موتور به ازای افزایش اختلاف دمایی منابع سرد و گرم ۶۶
نمودار ۱۷.۴ تغییرات توان خروجی موتور به ازای افزایش اختلاف دمایی منابع سرد و گرم ۶۷
شکل الف.۱ کلکتور سهموی خطی ۷۳
شکل الف.۲ دریافت کننده مرکزی ۷۴
شکل الف.۳ کلکتور سهموی (بشقابی) ۷۴
شکل الف.۴ پارامترهای موثر در نسبت تمرکز ۷۵
شکل الف.۵ نصب موتور استرلینگ در نقطه کانونی ۷۶
شکل الف.۶ نصب مخزن گرمایی در نقطه کانونی ۷۶
شکل الف.۷ نصب آینه مقعر در نقطه کانونی ۷۷
شکل الف.۸ قسمت های مختلف یک واحد تولید توان استرلینگ خورشیدی ۷۸
شکل الف.۹ شبکه موتورهای استرلینگ خورشیدی ۷۸

فصل اول

معرفی موتور استرلینگ

۱.۱ مقدمه

۲.۱ تاریخچه و پیشینه تحقیق

۳.۱ هدف پروژه

۱.۱ مقدمه:

کاهش سریع منابع سوختهای فسیلی و نیاز روز افزون جامعه بشری به انرژی، توجه بشر را به یافتن منابع جدید انرژی و ابزارهای موثر در تبدیل آن جلب کرده است. یکی از این ابزارها موتور استرلینگ[۱] می باشد[۱]. این موتور توسط رابرت استرلینگ[۲] اسکاتلندی در سال ۱۸۱۶ میلادی اختراع شد[۲]. از آن زمان تاکنون موتورهای استرلینگ براساس همان اختراع در ابعاد و اشکال مختلف ساخته شده، دستخوش تغییرات گشته و به مرور بهبود یافته اند[۳]. موتورهای استرلینگ در زمره موتورهای برون سوزند، از نظر مسایل زیست محیطی، تولید آلودگی پایینی دارند و از نظر تئوری دارای راندمان بسیار بالا می باشند[۱]. همه موتورهای استرلینگ دارای پنج مولفه اصلی می باشند که عبارتند از:

۱. سیال عامل[۳] یا گاز موجود در موتور، که با انبساط و تراکم متوالی تولید کار می کند.
۲. سیستم های گرم کننده[۴] و کولر[۵].
۳. بازیاب[۶] که وجود آن در موتور الزامی نبوده و سبب افزایش بازده حرارتی می شود.
۴. مکانیزم جابجا کننده[۷] که پیستون جابجایی هم نامیده می شود و صرفا وظیفه جابجایی گاز بین محفظه های گرم و سرد را به عهده دارد و در سیلندر جابجایی حرکت می کند.
۵. مکانیزم تراکم[۸] که پیستون کار یا به اختصار پیستون نیز نامیده می شود و با متراکم کردن سیال عامل تولید کار مکانیکی می کند. این پیستون در سیلندر قدرت حرکت می کند و به کمک چرخ طیار و یک مکانیزم رابط به پیستون جابجایی متصل می گردد.

۱.۱.۱ سیال عامل:

یکی از موارد موثر در طراحی یک موتور استرلینگ انتخاب سیال کاری مناسب است. از آنجا که این موتورها در یک سیکل بسته کار می کنند، از گازهای مختلفی به عنوان سیال کاری[۹] می توانند استفاده کنند. هر چند هوا به علت سهولت دسترسی و هزینه کم در طول سالیان دراز بعنوان سیال کاری مورد استفاده بوده است ولی در موتورهای با طراحی مدرن کمتر از آن استفاده می شود. به طور کلی یک سیال کاری مناسب برای موتور استرلینگ بایستی خواص ترمودینامیکی، انتقال حرارتی و دینامیک گازی زیر را دارا باشد[۴]:

---

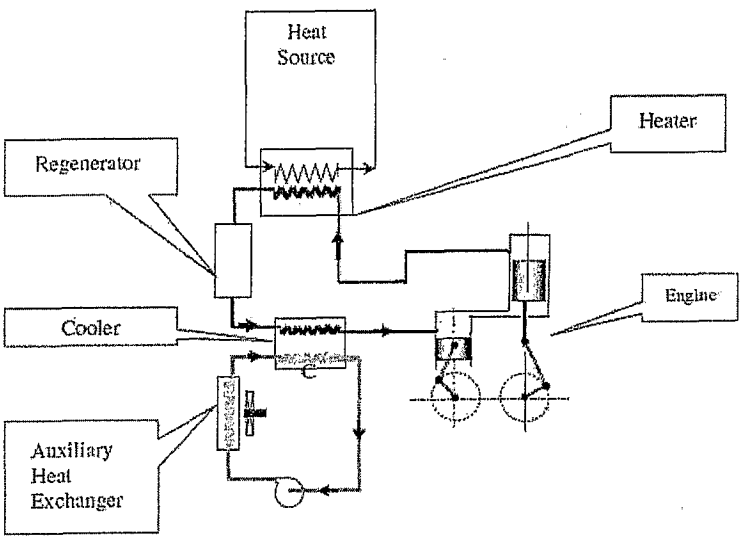
[1] Stirling Engine
[2] Robert Stirling(1790-1878)
[3] Working fluid
[4] Heater
[5] Cooler
[6] Regenerator
[7] Displacer
[8] Piston
[9] Working Fluid

۱- رسانایی گرمایی بالا
۲- ظرفیت گرمایی بالا
۳- لزجت پایین
۴- چگالی پایین

البته برای عملکرد بهتر علاوه بر موارد فوق مواردی نظیر سهولت دسترسی، هزینه، عملکرد ایمن و تجهیزات ذخیره سیال از جمله ویژگی های مهم قلمداد می شوند. به عنوان مثال مقدار ثابت گاز برای هوا $۲۷۸\ J/kg\ K$ و برای هیدروژن بعلت سبکی در حدود ۱۴ برابر بیشتر، یعنی $۴۱۲۴ J/kg\ K$ است، و با توجه به اینکه توان خروجی با ثابت گازی که به عنوان سیال کاری مورد استفاده قرار می گیرد رابطه مستقیم دارد[۵]، لذا انتظار می رود که استفاده از هیدروژن به جای هوا توان خروجی را تا ۱۴ برابر افزایش دهد، بنابراین در صورت در دسترس بودن این گاز استفاده از آن مناسب خواهد بود. لازم به ذکر است که با توجه به این که همواره مقداری نشتی در سیستم وجود دارد گاز موجود در موتور به تدریج خارج شده و باید بعد از مدت زمان معینی دوباره جایگزین شود[۶]. ولی علیرغم این موضوع به طور معمول موتورهای استرلینگ با دما و فشار کاری بالا از هیدروژن به عنوان سیال کاری استفاده می کنند[۳].

۲.۱.۱ مبدل های حرارتی در موتور استرلینگ:

مبدل های حرارتی در موتور استرلینگ که شامل سه یا چهار نوع می باشند نقش کلیدیی دارند، و شامل گرم کننده، کولر، بازیاب و یکسری مبدل های کمکی نظیر پیش گرم کن که البته وجود دسته آخر اختیاری و بر حسب نیاز است، می باشند. طرح شماتیک آنها در شکل (۱.۱) آمده است[۴].



شکل ۱.۱ مبدل های حرارتی در موتور استرلینگ

۱.۲.۱.۱ گرم کننده:

گرم کننده در موتور وظیفه انتقال گرما از منبع خارجی با دمای بالا به سیال کاری را بر عهده دارد. در حالت کلی طراحی گرم کننده فرآیند نسبتا مشکلی دارد ولی به شدت تحت تاثیر انتخاب نوع منبع حرارتی خارجی است. پدیده انتقال حرارت در گرم کننده به صورت زیر می باشد:

۱. فرآیند انتقال حرارت از منبع خارجی به سطح گرم کننده
۲. فرآیند انتقال حرارت درون گرم کننده
۳. فرآیند انتقال حرارت از گرم کننده به سیال کاری

که البته بسته به نوع منبع حرارتی، نوع و جنس گرم کننده، نحوه ارتباط آن با سیال کاری و سایر قیود و محدود کننده ها ترکیب بندی گرم کننده متفاوت خواهد بود.

۲.۲.۱.۱ کولر:

عملکرد کولر عکس گرم کننده است، به این ترتیب که در کولر گرما از سیال کاری گرفته شده و به محیط با دمای پایین داده می شود. در کل، موتورهای استرلینگ یا هوا- خنک[10] هستند و به واسطه هوا خنک می شوند، یا آب-خنک[11] می باشند و به کمک جریان آب عمل خنک کاری صورت می پذیرد. طبق گزارش Thombare و Verma تقریبا در اکثر موتورهای ساخته شده از سیستم آب- خنک به منظور کاهش دما استفاده شده است[۴].

۳.۲.۱.۱ بازیاب:

بازیاب در موتور به صورت یک اسفنج گرمایی عمل می کند، به این ترتیب که در یک مرحله گرما را از سیال کاری گرفته و در مرحله ای دیگر آن را به سیال پس می دهد. به عبارت دیگر بخشی از گرمایی که توسط گرم کننده به سیال کاری داده می شود به کار مفید تبدیل می گردد، در ادامه، زمانی که سیال گرم از فضای انبساط خارج می شود قبل از ورود به کولر از بازیاب عبور می کند و مابقی گرمای سیال در بازیاب ذخیره می گردد. بعد از خنک شدن سیال در کولر و تراکم آن در محفظه تراکم دوباره سیال از بازیاب می گذرد و با عبور از بازیاب گرمای ذخیره شده در آن به سیال پس داده می شود و سیال دوباره به سمت گرم کننده می رود. به این ترتیب با بازیافت بخشی از گرمای موجود بازده موتور افزایش می یابد. در حالت تئوری فرض بر آن است که بازیاب به صورت ایده آل عمل می کند، یعنی سیال با دمای محفظه تراکم

[10] Air-cooled
[11] Water-cooled

T_c به بازیاب وارد و با دمای محفظه انبساط T_E از آن خارج می شود و توزیع دما در طول آن خطی است. در حالیکه بازیاب موتورهای واقعی تحت شرایطی متفاوت با حالت ایده آل عمل می کنند، بدین معنی که دمای سیال کاری به دلیل تغییر فشار، چگالی، سرعت جریان و سایر موارد ثابت نبوده و بنابراین سیال با دمای T_c به بازیاب وارد و با دمای T_E از آن خارج نمی شود.

۳.۱.۱ دسته بندی موتورهای استرلینگ:

با توجه به وجود اجزای مختلفی موتور استرلینگ، نوع و شکل آنها، همچنین نحوه ارتباط و اتصال آنها با یکدیگر این موتورها را از جنبه های مختلفی دسته بندی می کنند. در حالت کلی سه سطح دسته بندی برای این موتور به شرح زیر موجود است[۷]:

۱. شکل و نحوه کارکرد[۱۲]
۲. ترکیب بندی سیلندر[۱۳]
۳. ترکیب بندی پیستون[۱۴]

البته هر یک از این دسته بندی ها خود شامل زیر مجموعه هایی است که گذرا به آن اشاره خواهد شد. این موتورها از نظرشکل و نحوه کارکرد به چند دسته تقسیم می شوند که مهمترین آنها عبارتند از:

۱. Double-acting
۲. Single-acting

در موتورهای Single-acting سیال عامل تنها با یک طرف پیستون در تماس است. بنابر این سیال بین دو سیلندر جابجا می شود و از یکی به دیگری می رود. موتور اختراعی رابرت استرلینگ نیز از همین نوع می باشد.

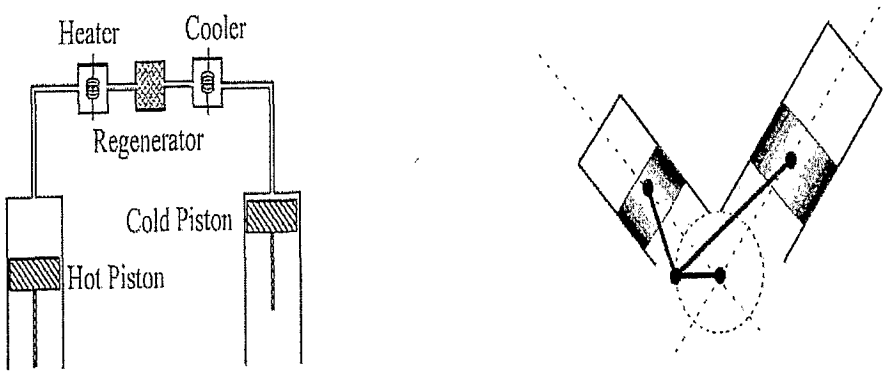
در نوع Double-acting که اولین بار توسط Babcock در سال ۱۸۸۵ ساخته شد، از دو سمت پیستون برای جابجایی سیال عامل از یک محفظه به دیگری استفاده می شود. پیستون جابجایی علاوه بر جابجایی سیال عامل تولید کار نیز می کند یعنی هر دو پیستون موتور در تولید توان نقش دارند لذا این نوع از موتور نسبت به نوع Single-acting مشابه توان بیشتری تولید می کند. با وجود این مزیت به دلیل نوع خاص ترکیب بندی، پیچیدگی زیادی در ساخت آن وجود دارد. این دسته از موتورها بیشتر در موتورهای چند سیلندر کاربرد دارند و اصولا حداقل وجود سه پیستون (دو سیلندر) برای کارکرد آن ضروری است[۷].

---

[12] Mode of operation
[13] Form of cylinder coupling
[14] Form of piston coupling

یکی از مهمترین روش های دسته بندی، دسته بندی از نظر نوع ترکیب بندی سیلندر می باشد که به طور کلی شامل سه نوع عمده است و عبارتند از، نوع آلفا[15]، نوع بتا[16] و نوع گاما[17]. هر سه نوع فوق تحت یک سیکل ترمودینامیک کار می کنند با این تفاوت که مشخصه های طراحی مکانیکی آنها با یکدیگر متفاوت می باشند[۳].

نوع آلفا: موتورهای نوع آلفا دارای دو پیستون به نام، پیستون سرد و پیستون گرم در دو سیلندر مجزا تحت همین نام ها می باشند و به صورت سری توسط گرم کننده، بازیاب و یک کولر به هم متصل شده اند. این پیستون ها برای تامین انتقال حرارت در حجم ثابت به طور یکنواخت در جهت یکسان با اختلاف فاز حرکت می کنند. کار ناشی از انبساط توسط پیستون گرم و کار تراکم توسط پیستون سرد صورت می پذیرد. به طور کلی موتور آلفا ساده ترین ترکیب موتور استرلینگ می باشد، هرچند دارای این عیب می باشد که هر دو پیستون نیازمند آب بندی کامل برای نگهداری گاز کاری می باشند و با توجه به این که توان مخصوص[18] بالایی دارند بیشتر مناسب صنعت خودرو می باشند. در زیر، شکل مربوط به این ترکیب از موتور آمده است:

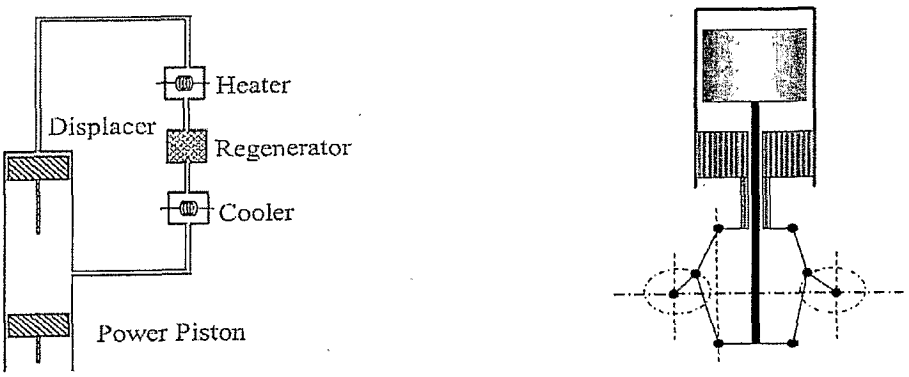


شکل۲.۱ موتور استرلینگ نوع آلفا

نوع بتا: همانطور که در شکلهای زیر مشخص می باشد موتورهای نوع بتا از ترکیب پیستون قدرت- جابجاکننده[19] تشکیل شده اند. پیستون قدرت وظیفه متراکم کردن سیال کاری را بر عهده دارد در حالی که جابجایی سیال بین فضاهای گرم و سرد و بازیاب به عهده پیستون جابجاکننده می باشد. ساختار موتور به گونه ای است که هم پیستون قدرت و هم جابجاکننده در سیلندر یکسانی تعبیه شده اند. پیستون قدرت و جابجاکننده توسط اتصالات جداگانه ای به میل لنگ متصل شده اند تا به این ترتیب زاویه فاز مورد نیاز تامین شود.

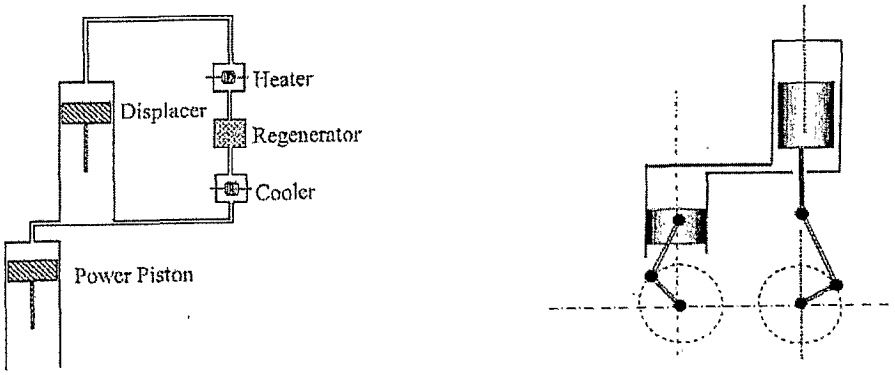
---

[15] Alpha
[16] Beta
[17] Gamma
[18] Specific power
[19] Displacer



شکل۳.۱ موتور استرلینگ نوع بتا

نوع گاما: در نوع گاما نیز همانند بتا از ترکیب پیستون قدرت و جابجاکننده استفاده شده است با این تفاوت که این دو جزء هر کدام در سیلندر جداگانه ای قرار دارند. وظایف پیستون های قدرت و جابجایی همانند نوع بتا می باشد و پیستون قدرت هم عمل تراکم را انجام می دهد و هم عمل انبساط. مهمترین مزیت این نوع ترکیب آن است که دارای مکانیزم لنگ[۲۰] ساده و روانی هستند.

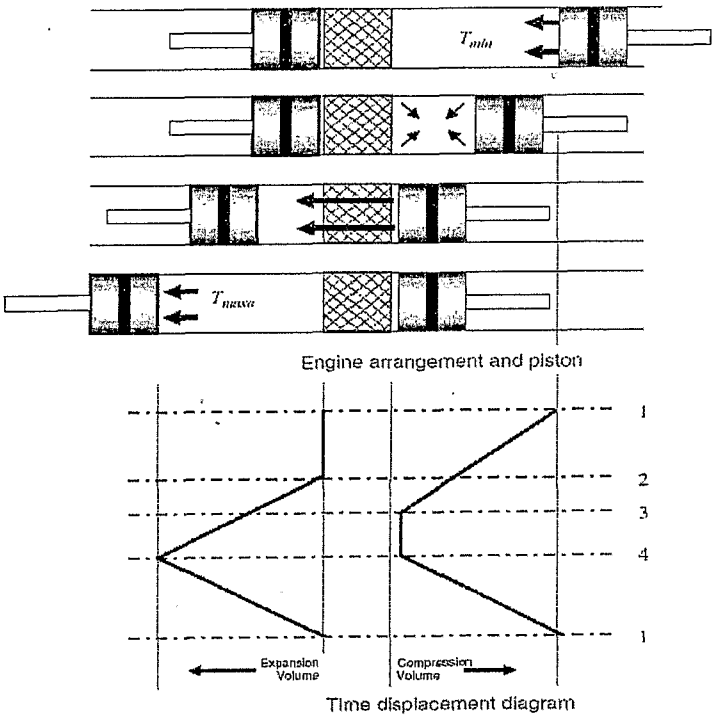


شکل۴.۱ موتور استرلینگ نوع گاما

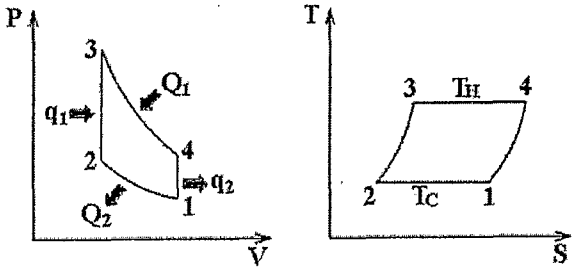
از لحاظ نوع ترکیب بندی پیستون، موتورهای استرلینگ به دو دسته پیستون آزاد[۲۱] و اتصال سخت[۲۲] تقسیم می شوند. در نوع پیستون آزاد که خود بر دو نوع اتصال گاز و اتصال مایع می باشد وابستگی حرکتی اجزای مختلف از طریق یک سیال تامین می شود و بیشتر در کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار می گیرد. ولی در نوع اتصال سخت این وابستگی حرکتی توسط اتصالات مکانیکی ایجاد می گردد.

[20] Crank Mechanism
[21] Free piston
[22] Rigid connection

موتورهای استرلینگ ایده آل از نظر ترمودینامیکی متشکل از دو فرآیند دما ثابت و دو فرآیند حجم ثابت می باشند. شکل (۵.۱) توالی این چهار فرآیند را نشان می دهد[۴]. در مرحله شروع پیستون سمت راست که پیستون محفظه تراکم یا به اختصار پیستون تراکم نامیده می شود در نقطه مرگ بیرونی یعنی در دورترین فاصله نسبت به بازیاب و پیستون سمت چپ که پیستون محفظه انبساط یا به اختصار پیستون انبساط نامیده می شود در نقطه مرگ داخلی یعنی در نزدیکترین فاصله نسبت به بازیاب قرار دارد، همه سیال کاری در محفظه تراکم قرار دارد، حجم تراکم یا همان فضای محبوس بین پیستون تراکم و بازیاب بیشترین مقدار خود و فشار و دما در کمترین مقادیر خود می باشند. این حالت با نقطه ۱ در نمودار p-v و T-S در شکل (۶.۱) مشخص شده است.



شکل۵.۱ طرح شماتیک نحوه عملکرد سیکل استرلینگ



شکل۶.۱ دیاگرام سیکل ایده آل استرلینگ