



مطالعه عملکرد یک موتور هوایی استرلینگ مینیاتوری با سوخت بیوگاز

سجاد آقامحمدی سندانی - دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
کمال عباسپورثانی - استادیار گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: Parand_mc@yahoo.com

چکیده: موتور استرلینگ، نوعی موتور احتراق خارجی است و همانند ماشین کارنو، بر پایه انبساط و تراکم متناوب گازهایی از قبیل هوا، هلیوم در دو سطح دمایی مختلف کار می‌کند. این موتور، برای تامین انرژی منبع گرم (جاذب موتور) و توان، از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر (بیوگاز) استفاده می‌نماید. از مزایای این موتور نسبت به موتورهای احتراق داخلی، احتراق ایمن، آلاینده‌گی کمتر و مقرون به صرفه بودن آن است. هدف این مقاله مطالعه عملکرد یک موتور استرلینگ مینیاتوری با سوخت بیوگاز تولیدی از پسماند و هدف از انجام این آزمایش، تعیین حداقل دمای جاذب برای راه-اندازی موتور و شبیه‌سازی عملکرد موتور در حالات مختلف استقرار آن در حالت افقی و زاویه‌دار در ظهر خورشیدی است. پس از انجام آزمایش، نتایج نشان می‌دهد به علت عدم برخی ملاحظات طراحی و عملکردی از قبیل گرمایش یکنواخت جاذب در اثر شعله گاز و تا حدی تلفات جابه‌جایی شعله در حالت سوخت گازی، مقادیر به دست آمده با مقادیر آرمانی مغایرت دارد.

واژه های کلیدی: موتور استرلینگ، سوخت بیوگاز، انرژی و احتراق.

Performance Study of a mini Scale Sterling Air Engine with Bio Gas Fuel

S. Agha-Mohammadi, Ms. Student, Dept. of Energy Conversion, the Faculty of Mech. Eng., TIAU
K. Abbaspourani, Ass. Prof., Dept. of Energy Conversion, the Faculty of Mech. Eng., TIAU

E-mail: k.abbaspour@tiau.ac.ir

Abstract: The Sterling Engine is an ECE which is working similar to the Carnot engine on the base of expansion and compression of gases such as Helium and air at different level of teperature. This engine uses renewables such as solar and biogas for providing the heat of hot source. In comparision with ICE's the reiable combustion, low emissions, and its economics are the most advantages of this engine. The aim of this paper is the performance study of a mini scale Sterling engine with biogas fuel produced from waste and also determination the minimum temperature for the engine absorber for start up the engine. The experimental results show that ignoring some design features such as uniform heat of absorber by flame and convection losses to environment, the obtained results coincide with theoretical results

Keywords: Sterling Engine, biogas fuel, Energy and combustion.

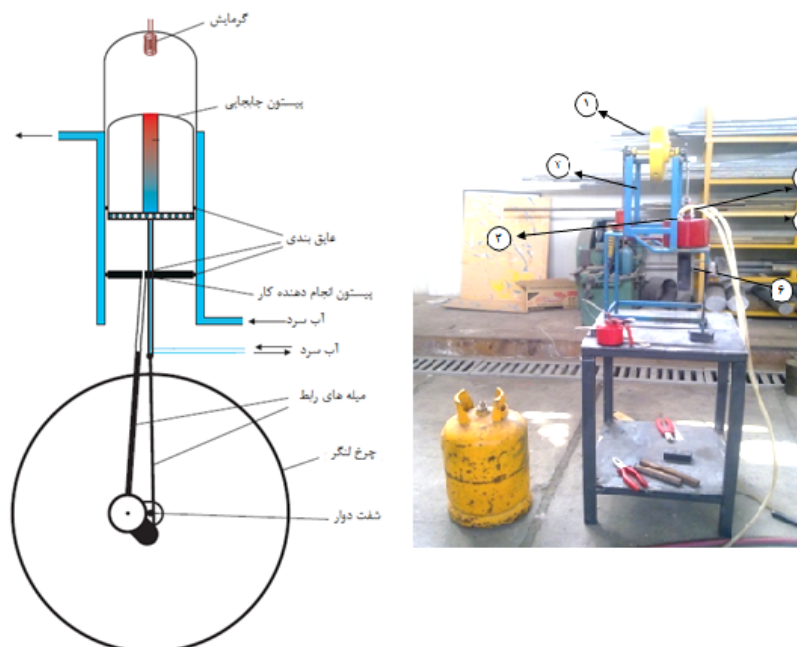
۱- مقدمه

موتور استرلینگ نخستین بار در ۲۷ سپتامبر ۱۸۱۶ توسط رابرت استرلینگ در اسکاتلند اختراع شد. او قصد داشت که این موتور، انتخاب مطمئن تری نسبت به دیگ‌های بخار باشد. او با استفاده از فولاد بسمر (Bessmer Steel)، کارآیی و ایمنی دیگ‌های بخار را به گونه‌ای افزایش داد که موتور استرلینگ فرصت خودنمایی پیدا نکرد. نخستین نمونه قابل توجه موتور استرلینگ در سال ۱۸۵۰ توسط رنکین ارایه شد و ۱۰۰ سال بعد موتور استرلینگ به انواع موتورهای گازی با چرخه بسته اطلاق شد. در خلال سال‌های ۱۸۲۴ تا ۱۸۴۰ اصلاحاتی توسط برادران استرلینگ بر طرح موتور استرلینگ اعمال شد. نخستین موتور استرلینگ در ایران در سال ۱۹۶۷ توسط جعفر زرین چرخ در دانشگاه شیراز طراحی و ساخته شد. نمونه‌های دیگری نیز که بیشتر آموزشی و یا مربوط به پایان‌نامه دانشجویان بود در این دانشگاه طراحی و ساخته شدند. از دیگر تحقیقات صورت گرفته، می‌توان به ساخت موتور استرلینگ دما بالا در سال ۲۰۰۷ در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران اشاره نمود [۲].

۲- شرح آزمایش

ابزار مورد نیاز آزمایش: بارومتر، تاکومتر، تورکمتر، دماسنج لیزری، رطوبت‌سنج و زمان‌سنج.

شرح دستگاه: دستگاه مورد آزمایش عبارت از یک موتور هوایی استرلینگ از نوع (۷) در مقیاس مینیاتوری می‌باشد که قرار است بر روی متمرکز کننده سهموی بشقاب مستقر در پارک فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر پژوهشگاه نصب شود. نمای دستگاه بر روی میز آزمایش در کارگاه در شکل (۱) نشان داده شده است. این موتور دارای دو پیستون می‌باشد که باهم اختلاف فاز زاویه‌ای 90° داشته و دارای دو منبع گرم و سرد مطابق شکل می‌باشد.

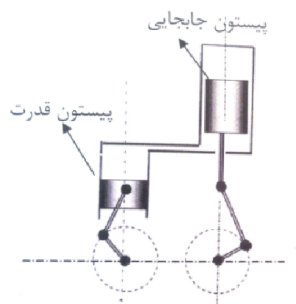


شکل (۱): نمای موتور استرلینگ مورد آزمایش (۱- چرخ لنگر، ۲- قاب نگهدارنده موتور، ۳- پیستون قدرت، ۴- منبع سرد، ۵- پیستون

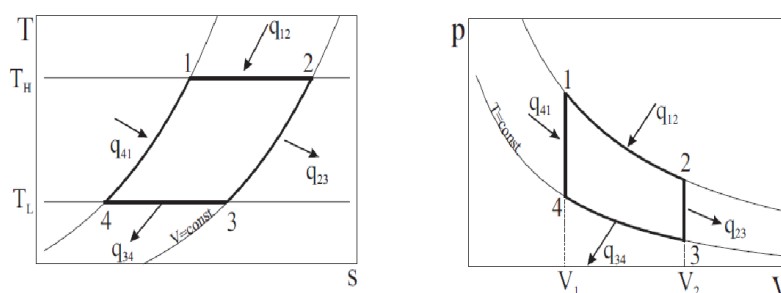
جابجایی ۶- منبع گرم (جاذب حرارت))

۴- تئوری آزمایش

طرحواره موتور در شکل (۲) و دیاگرام چرخه عملکرد آن در مختصات T-s و P-v در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به چرخه نشان داده شده در شکل، می توان عملکرد موتور استرلینگ را بطور خلاصه بشرح ذیل بیان نمود:



شکل (۲): طرحواره موتور استرلینگ نوع (۲)



شکل (۳): دیاگرام چرخه آرمانی استرلینگ در مختصات T-s و P-v

فرآیند (۱-۲): در این فرآیند به دلیل انتقال حرارت محفظه با منبع سرد (هَب خنک کاری)، گاز بصورت دما ثابت متراکم شده و حرارت به آب انتقال می یابد و در حالیکه آنتروپی گاز کاهش می یابد، انرژی داخلی آن ثابت می ماند. حرارت انتقال یافته در این فرآیند خواهد بود با:

$$Q_{12} = mRT_C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (1)$$

فرآیند (۲-۳): در این فرآیند حجم ثابت حرارت به گاز داده شده و دمای آن افزایش می یابد. به دلیل ثابت بودن حجم در این فرآیند کاری انجام نمی شود ولی انرژی داخلی و آنتروپی گاز افزایش می یابد. در این فرآیند انرژی جذب شده توسط گاز برابر است با:

$$Q_{23} = mC_V(T_H - T_C) \quad (2)$$

فرآیند (۳-۴): در این فرآیند گاز در دمای ثابت انبساط یافته و گرما از منبع گرم (جاذب حرارت) به گاز انتقال می یابد و در حالیکه آنتروپی گاز افزایش می یابد، انرژی داخلی آن ثابت می ماند. حرارت انتقال یافته در این فرآیند خواهد بود با:

$$Q_{34} = mRT_H \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = \dot{m}_f \cdot \text{HCV} \quad (3)$$

فرآیند (۴-۱): در این فرآیند حجم ثابت حرارت از گاز انتقال یافته و دمای آن کاهش می یابد. به دلیل ثابت بودن حجم در این فرآیند کاری انجام نمی شود ولی انرژی داخلی و آنتروپی گاز هر دو کاهش می یابد. در این فرآیند انرژی دفع شده توسط گاز برابر است با:

$$Q_{4l} = mC_v(T_C - T_H) = \dot{m}_w C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

بازده چرخه استرلینگ بصورت ذیل بیان می شود:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (5)$$

بنابراین راندمان حرارتی چرخه استرلینگ با راندمان حرارتی چرخه کارنو با دمای یکسان منبع گرم و سرد برابر است. ولی به لحاظ اینکه در عمل اجزای موتور استرلینگ (بعنوان مثال پیستون قدرت، محفظه سرد) بصورت آرمانی کار نمی کنند، راندمان حرارتی موتور از حالت آرمانی کارنو دور می شود. براساس نتایج تجربی انجام شده راندمان حرارتی موتور استرلینگ را می توان در حدود ۵۰٪ راندمان آرمانی آن (رابطه (۵) در نظر گرفت:

$$\eta_{th} = 0.5 \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right) \quad (6)$$

۵- روش آزمایش

ابتدا موتور مطابق شکل (۱) بر روی میز آن قرار داده می شود. اتصال های آب خنک کاری به منبع سرد موتور وصل می شود و شعله گاز مصرفی در زیر استوانه جاذب قرار داده می شود. سپس شعله گاز را روشن و اجازه داده می شود تا جاذب به آرامی بوسیله شعله گرم شود. در فاصله زمانی دو دقیقه دمای جاذب و دمای خروجی آب از منبع سرد قرائت می شود. پس از حصول به یک دمای تقریباً برابر با دمای شعله گاز، چرخ لنگر موتور بطور دستی به راه انداخته می شود ولی درحین آزمایش ملاحظه می شود که عملاً پس از مدتی، چرخ لنگر می ایستد. این عمل آنقدر ادامه می یابد تا چرخ لنگر با سرعت ثابتی به حرکت مداوم خود برسد. در این حالت حداقل دمای جاذب برای راه اندازی موتور قرائت می شود. لازم به یادآوری است بعلت ثابت بودن دمای ورودی آب، دمای محیط، دبی جرمی آب خنک کاری و نیز جریان گاز میتوان آنها را در شروع و یا خاتمه آزمایش قرائت نمود. بعلت ثابت بوئن جریان گاز، عملاً سرعت چرخشی موتور ثابت بوده و می توان آنرا با شمارش تعداد دور چرخ لنگر در یک فاصله زمانی معین تعیین نمود. آزمایش با شرایط ذیل در روز ۸۹/۳/۱۶، ساعت ۱۵:۲۶ انجام یافت:

جدول (۱): شرایط محیطی و کار آزمایش موتور

ردیف	شرایط کار و محیطی	مقدار
۱	رطوبت نسبی محیط	٪۱۶/۱
۲	دمای هوای محیط	۳۱/۸°C
۳	دمای آب ورودی به موتور	۲۲/۱°C
۴	دبی گاز مصرفی	۲Kg/h
۵	دمای شعله (در ابتدای آزمایش):	۲۵۰°C
۶	نوع گاز مصرفی	بوتان
۷	ارزش حرارتی گاز	۴۰۶۳۶Kj/Kg
۸	دبی آب خنک کاری	۲Kg/min
۹	فشار محیط آزمایش	۹۱/۷Kpa

۶- نتایج آزمایش

الف) حالت افقی: در این حالت موتور بطور افقی بر روی میز قرار داشته، بطوریکه امتداد مرکز ثقل آن در امتداد قائم محل قرار دارد. در فواصل زمانی دو دقیقه آزمایش‌ها تکرار که نتیجه مطابق جدول (۲) می‌باشد:

جدول (۲): نتایج آزمایش موتور در حالت افقی

دور چرخشی (rpm)	وضعیت موتور	دمای جاذب (°C)	دمای خروجی آب (°C)	زمان (min)	ردیف
-	بدون چرخش	۲۵۰	۳۰	۲	۱
-	-	۲۳۶	۳۰	۴	۲
-	-	۳۵۰	۳۰	۶	۳
-	-	۳۶۴	۳۰	۸	۴
۱۹۵	در حال چرخش	۲۹۵	۳۱	۱۰	۵
-	-	۲۹۴	۳۱	۱۲	۶
-	-	۳۱۲	۳۲	۱۴	۷
-	-	۳۵۱	۳۳	۱۶	۸
۲۸۲	-	۳۴۰	۳۴	۱۸	۹
-	-	۳۶۴	۳۵	۲۰	۱۰

ب) حالت مورب: بمنظور شبیه‌سازی موتور در موقع استقرار آن بر روی متمرکز کننده، موتور را به اندازه زاویه شیب آن در ظهر خورشیدی ($\beta = 55^\circ$) نسبت به افق مائل نگهداشته و سپس آزمایش‌ها را تکرار می‌کنیم. نتایج آزمایش در این حالت در جدول (۳) نشان داده شده است. در اینحالت پس از گذشت ۲۲ دقیقه از شروع آزمایش موتور حرکتی از خود نشان نداد. بمنظور بررسی علت در اینحالت، به تدریج موتور بحالت افقی برگردانده شد و ملاحظه گردید که به محض بازگشتن به حالت افقی، موتور شروع به حرکت می‌نماید. مجدداً موتور از حالت افقی به تدریج به حالت شیب‌دار متمایل به سمت مخزن آب، برگردانده می‌شود. در اینحالت ملاحظه می‌شود که به تدریج سرعت موتور کند شده و در حالت زاویه شیب 50° کاملاً موتور از حرکت باز می‌ایستد. برای بررسی بیشتر، موتور از حالت افقی، مجدداً بحالت شیب‌دار متمایل به سمت پیستون قدرت برگردانده می‌شود. در اینحالت ملاحظه می‌شود که باز سرعت موتور بتدریج کمتر ولی در اینحالت در زاویه شیب 25° کاملاً از حرکت می‌ایستد.

۷- بحث و نتایج

با استفاده از اطلاعات آزمایش موتور در حالت افقی (جدول (۲))، مقادیر اختلاف دمای آب خنک‌کاری، دمای متوسط جاذب و دمای متوسط هوا در داخل موتور را تعیین می‌شود. به کمک این پارامترها می‌توان راندمان حرارتی موتور را تعیین و نتایج را با مقدار آرمانی آن که از رابطه (۵) تعیین می‌شود، مقایسه نمود. نتایج محاسبات در جدول (۴) ارائه شده است. منحنی تغییرات راندمان موتور در دو حالت آرمانی و تجربی برحسب دمای منبع گرم (جاذب) در شکل (۴) نشان داده شده است. بطوریکه از این شکل مشاهده می‌شود در سرعت

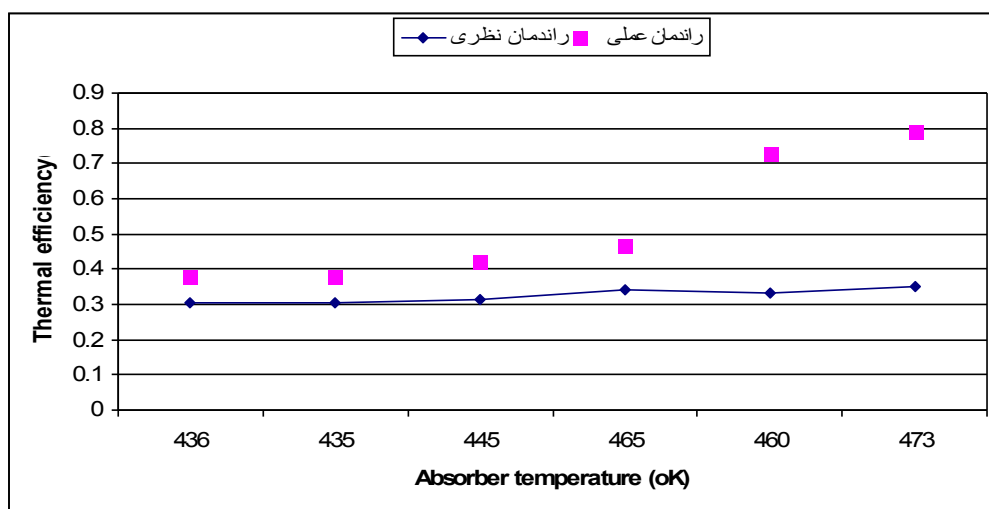
چرخشی پائین مقادیر تجربی با مقادیر آرمانی مطابقت داشته ولی در سرعت چرخشی بالا، مقادیر تجربی تقریباً دو برابر مقادیر آرمانی است که در عمل ممکن نیست. علت این امر تا حد زیادی به دلیل عدم آببندی کامل پیستون قدرت سیلندر، عدم یکنواختی گرم شدن جاذب در اثر شعله گاز و تا حدی مربوط به تلفات جابجائی شعله به محیط می باشد. دیاگرام چرخه موتور در سرعت چرخشی rpm ۱۹۵ در مختصات T-S و P-v در شکل (۵) نشان داده شده است. محاسبات مربوط به حالات مختلف هوا در چرخه استرلینگ به ضمیمه این گزارش می باشد.

جدول (۳): نتایج آزمایش موتور در حالت افقی

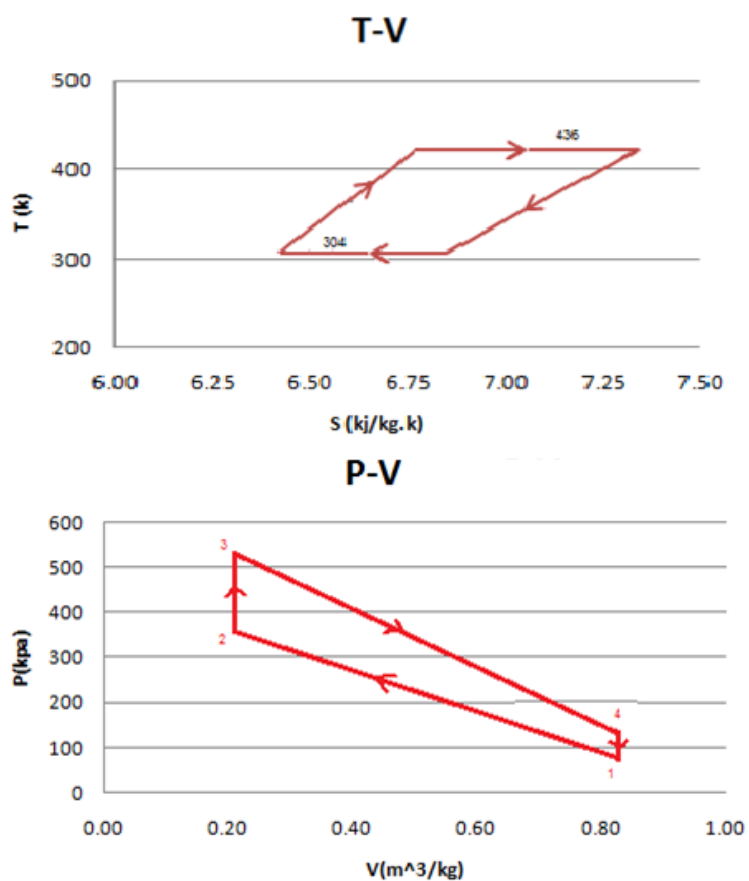
دور چرخشی (rpm)	وضعیت موتور	دمای جاذب (°C)	دمای خروجی آب (°C)	زمان (min)	ردیف
۰	بدون چرخش	۲۵۰	۳۰	۲	۱
۰	-	۲۳۶	۳۰	۴	۲
۰	-	۳۵۰	۳۰	۶	۳
۰	-	۳۶۴	۳۰	۸	۴
۰	-	۲۹۵	۳۱	۱۰	۵
۰	-	۲۹۴	۳۱	۱۲	۶
۰	-	۳۳۳	۳۲	۱۴	۷
۰	-	۳۸۵	۳۳	۱۶	۸
۰	-	۳۵۷	۳۳	۱۸	۹
۰	-	۳۷۶	۳۳	۲۰	۱۰
۰	-	۳۵۸	۳۴	۲۲	۱۱

جدول (۴): نتایج محاسبه راندمان موتور در حالت افقی و مقایسه آن با مقادیر آرمانی

راندمان حرارتی (%)		دمای منبع گرم (K)	دمای منبع سرد (K)	اختلاف دمای آب (°C)	سرعت (rpm)	ردیف
آرمانی	تجربی					
۰/۳۰۳	۰/۳۸۰	۴۳۶	۲۵۰	۹	۱۹۵	۱
۰/۳۰۳	۰/۳۸۰	۴۳۶	۲۳۶	۹	۱۹۵	۲
۰/۳۱۵	۰/۴۲۲	۴۴۵	۳۵۰	۱۰	۱۹۵	۳
۰/۳۴۲	۰/۴۶۵	۴۶۵	۳۶۴	۱۱	۱۹۵	۴
۰/۳۳۳	۰/۷۳۰	۴۶۰	۲۹۵	۱۲	۲۸۲	۵
۰/۳۴۹	۰/۷۹۰	۴۷۳	۲۹۴	۱۳	۲۸۲	۶



شکل (۴): روند تغییرات راندمان موتور استرلینگ با دمای منبع گرم و مقایسه آن با مقدار آرمانی



شکل (۵): دیاگرام چرخه آرمانی استرلینگ در مختصات T-s و P-v

۸- نتیجه گیری

در این آزمایش نحوه تعیین راندمان حرارتی یک موتور استرلینگ میناتورى به روش تجربى ارائه شد. نتایج نشان می دهد در سزعت چرخشى پائین مقادیر تجربى با مقادیر آرمانى مطابقت داشته ولى درت سرعت چرخشى بالا، به علت عدم برخى ملاحظات طراحی و شرایط آزمایش از قبیل آب بندی کامل پیستون قدرت سیلندر، یکنواختی گرم شدن جاذب در اثر شعله گاز و تا حدی تلفات جابجائی شعله، نتایج با مقادیر آرمانى مغایرت دارد. با انجام این آزمایش برخى از پارامترهاى کارکردى موتور بر روی متمرکزکننده خورشیدى حاصل می شود که در جدول (۵) ارائه شده است:

ردیف	شرایط کارکردى موتور	مقدار
۱	حداقل دمای جاذب موتور	۲۹۵ (°C)
۲	دور اولیه موتور در هنگام به کارافتادن	۱۹۵rpm
۳	حداکثر دور موتور	۲۸۲ rpm
۴	حداقل زمان به کارافتادن موتور	۱۰ دقیقه
۵	حداکثر زمان چرخش موتور پس از قطع شعله	۲ min

۹- مراجع

- [۱] ملک زاده، ر.، کاشانی حصار، م.ح. و معتمدی، م.، ترمودینامیک کلاسیک، ترجمه، انتشارات نما، مشهد، ۱۳۸۰.
- [۲] مرتضوی، ح.ر. و سرانجام، ب.، موتور استرلینگ، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۵۹.
- [۳] فرد، گ.ک.، آزمایشگاه ترمودینامیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، ۱۳۸۸.