ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9):2255-2262

Design, Construction and Analysis of the Gamma-Type Solar Stirling Engine by Parabolic Solar Collector

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Danandeh Oskuei H.[1] *MSc,*
Jalali Vahid D.*[1] *PhD*

How to cite this article
Danandeh Oskuei H, Jalali Vahid D. Design, Construction and Analysis of the Gamma-Type Solar Stirling Engine by Parabolic Solar Collector. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9): 2255-2262.

[1]Mechanical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
Phone: -
Fax: -
davoodjalali@sut.ac.ir

Article History
Received: May 04, 2018
Accepted: February 07, 2019
ePublished: September 01, 2019

ABSTRACT

This paper examines the design, manufacture, and analysis a Gamma-type Stirling engine using the solar parabolic collector. The calculation base for designing is so that the size of the solar parabolic collector needed to start the engine is not too large. After finishing the design and manufacturing of the parts, the assembled Stirling engine was initially initiated by a 550W electric heater tested in two non-insulated and insulated conditions for different input power. In the non-insulated state, the Stirling engine has a maximum power of about 68.69W with an output of 12.66%; and insulated mode of Stirling engine maximum watts with an output of 15.72% was obtained. Then we constructed a solar parabolic collector based on the power of the heater used. Designing the collector is such that it has the ability to reflect around 550W. Thus, the diameter of the collector is 1m and its depth is 12cm. This solar parabolic collector provides the power needed by the engine to work during the day. The maximum output power of the solar Stirling engine is about 30W.

Keywords Renewable Energy; Solar Collector; Stirling Engine

CITATION LINKS

[1] The theory of Lehmann's calorimetric machine [2] Analogue simulation of Stirling engine [3] Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant [4] Sizing a solar dish Stirling micro-CHP system for residential application in diverse climatic conditions based on 3E analysis [5] Stirling engine based solar-thermal power plant with a thermo-chemical storage system [6] Thermodynamic and economic optimization of a solar-powered Stirling engine for micro-cogeneration purposes [7] Stirling cycle engines: Inner workings and design [8] Calculations and experiments on γ-type Stirling engines [Dissertation] [9] Optimization of solar-powered Stirling heat engine with finite-time thermodynamics

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

طراحی، ساخت و آنالیز موتور استرلینگ خورشیدی نوع گاما به‌وسیله کلکتور سهموی خورشیدی

حجت داننده‌اسکوئی MSc
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
داود جلالی‌وحید* PhD
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده
در این مقاله به چگونگی طراحی، ساخت و آنالیز موتور استرلینگ خورشیدی نوع گاما با استفاده از کلکتور سهموی خورشیدی پرداخته شده است. مبنای محاسبات برای طراحی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که اندازه کلکتور سهموی خورشیدی مورد نیاز برای راه‌اندازی موتور بیش از حد بزرگ نباشد. بعد از اتمام مراحل طراحی و ساخت قطعات، موتور استرلینگ مونتاژشده ابتدا توسط یک هیتر الکتریکی ۵۵۰واتی راه‌اندازی شده است که در دو شرایط بدون عایق‌بندی و عایق‌بندی‌شده در توان‌های ورودی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. در حالت بدون عایق‌بندی حداکثر توان خروجی موتور در حدود ۶۹/۶۸وات با بازدهی ۱۲/۶۶% است و در حالتی که موتور عایق‌بندی شده است حداکثر ۸۶/۴۴وات توان با بازده ۱۵/۷۲% به دست آمده است. در ادامه با توجه به توان هیتر مورد استفاده اقدام به ساخت کلکتور سهموی خورشیدی کرده‌ایم. طراحی کلکتور به‌گونه‌ای صورت گرفت که توانایی بازتاب حدود ۵۵۰وات را داشته باشد. بنابراین قطر کلکتور ۱متر و عمق آن ۱۲سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این کلکتور سهموی خورشیدی توان مورد نیاز موتور برای کار در روز را تامین می‌کند. حداکثر توان خروجی موتور استرلینگ خورشیدی حدود ۳۰وات است.
کلیدواژه‌ها: انرژی تجدیدپذیر، کلکتور خورشیدی، موتور استرلینگ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۸
*نویسنده مسئول: davoodjalali@sut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های تمام جوامع بشری محدودیت ذخایر سوخت‌های فسیلی است. آلودگی‌های زیست‌محیطی از جمله گرم‌شدن زمین، آلودگی هوا و سوراخ‌شدن لایه اوزون که نتیجه استفاده از سوخت‌های فسیلی هستند دلیلی افزون برای تغییر رویکرد در تولید و مصرف انرژی بین جوامع پیشرفته و در حال توسعه است. همچنین توسعه صنعتی پایدار با رعایت حفاظت از محیط زیست را می‌توان از اولویت‌های پژوهشگران و محققان در دهه‌های اخیر نام برد. بدیهی است امروزه پشتوانه اقتصادی و سیاسی کشورها، بستگی به میزان بهره‌وری آنها از منابع فسیلی دارد و تهی‌گشتن منابع فسیلی، نه‌تنها تهدیدی است برای اقتصاد کشورهای صادرکننده، بلکه نگرانی عمده‌ای را برای نظام اقتصادی کشورهای واردکننده به وجود آورده است. خوشبختانه، اکثر کشورهای جهان به اهمیت و نقش منابع مختلف انرژی، به‌ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر در تامین نیازهای حال و آینده پی برده‌اند و به‌طور گسترده، در توسعه و بهره‌برداری از این منابع بی‌پایان، تحقیقات وسیع و سرمایه‌گذاری‌های اصولی می‌کنند.

موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی است که همین ویژگی موجب شده محققان در سال‌های اخیر به این موتور نگاه ویژه‌ای داشته باشند چرا که علاوه بر بازده بالا و نداشتن هیچ‌گونه آلودگی، توانایی کارکرد با انواع انرژی را دارد. از زمان اختراع موتور استرلینگ تحقیقات زیادی روی موتور استرلینگ صورت گرفته است که نخستین طرح قابل قبول ریاضی برای تحلیل موتور استرلینگ بعد از پنجاه سال از زمان اختراع موتور استرلینگ توسط *شمیت*[1] ارایه شد. این نظریه با هم دما گرفتن فرآیند انبساط و انقباض گاز ایده‌آل، با برخی ساده‌سازی‌ها روابطی برای محاسبه توزیع فشار به‌عنوان تابعی از زاویه لنگ و همچنین تعیین کار چرخه ارایه می‌دهد (روش مرتبه اول).

فینکن‌اشتاین[2] در سال ۱۹۷۵ تحلیل ترمودینامیکی اشمیت را ارتقا داد و تحلیل‌های اولیه آدیاباتیک را ارایه کرد و در حل آدیاباتیک معادلات، محفظه تراکم و محفظه انبساط را آدیاباتیک در نظر گرفت. با درنظرگرفتن فرض آدیاباتیک معادلات از حالت خطی خارج می‌شوند و برای حل آنها می‌بایست از روش‌های عددی استفاده شود (روش مرتبه دوم).

ردی و همکاران[3] در سال ۲۰۱۱ به آنالیز انرژی و اکسرژی نیروگاه ۵۰مگاواتی خورشیدی موتور استرلینگ پرداختند. آنها نیروگاهی با ۲۰۰۰ واحد ۲۵کیلوواتی طراحی کرده و به مطالعه روی قسمت‌های مختلف آن پرداختند که به بیشترین تلفات انرژی در موتور استرلینگ و بیشترین تلفات اکسرژی در کلکتور را برآورد کردند.

مقدم و همکاران[4] در سال ۲۰۱۳ به بررسی کاربرد خانگی موتور استرلینگ خورشیدی و قطر کلکتور مورد نیاز در پنج شهر ایران پرداختند که در حقیقت آنها استفاده همزمان توان و گرما از این موتور را در نظر گرفته بودند. مورد مطالعه یک آپارتمان ۵ طبقه که در مجموع ۱۰ واحد است. مساحت هر واحد ۹۶مترمربع و ارتفاع هر واحد ۳متر لحاظ شده است که محاسبات بار گرمایش و سرمایش در نرم‌افزار کریر (HAP ۳/۴) صورت گرفته است. آنها با توجه به شدت تابش در هر منطقه قطر کلکتور مورد نیاز را برای یک خانواده با مصرف توان ۳/۴کیلووات پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین توان الکتریکی خروجی و قطر دیش لازم برای هر شهر در سه شرایط مختلف ارایه شده است.

آجریا و *ساهادپ*[5] در سال ۲۰۱۴ مطالعاتی در زمینه موتورهای استرلینگ براساس نیروگاه خورشیدی حرارتی داشتند که به‌جای دیش از لنز فرسنل استفاده کردند. محاسبات انجام‌شده بر مبنای طرح اشمیت برای نوع آلفا بوده است. داده‌های اولیه برای شبیه‌سازی این سیستم حاکی از سطح مقطع ۳مترمربعی برای موتور با حجم جاروب‌شده ۵۰۰سی‌سی برای هر سیلندر است. دمای محفظه گرم ۵۰۰ درجه در نظر گرفته شده است که در انتها نتایج برای عرض‌های جغرافیایی مختلف برای چهار فصل ارایه شده است.

فریرا و همکاران[6] در سال ۲۰۱۶ با مدل‌سازی و تخمین هزینه برای موتور استرلینگ، نوع آلفا را برای کاربردهای تولید گرما و توان انتخاب کردند که شبیه‌سازی بر مبنای آنالیز آدیاباتیک صورت گرفته است. سیال عامل در آنالیز صورت‌گرفته هیلیوم و هیدروژن است. از مهم‌ترین داده‌های ورودی می‌توان به حجم جاروب‌شده ۱۳۰سی‌سی، حجم فضای مرده ۲۵سی‌سی و قطر دیش ۷/۴۱متری و فشار کاری ۵۳بار اشاره کرد که نهایتاً منجر به توان الکتریکی ۳/۶۵کیلووات و ظرفیت گرمایشی ۱۱/۱کیلووات شده است. همچنین برآورد هزینه برای تک‌تک بخش‌ها آورده شده است.

بررسی کارهای صورت‌گرفته به‌خوبی اهمیت استفاده از موتور استرلینگ را نشان می‌دهد چرا که علاوه بر بازده بالا و نداشتن آلودگی، دارای انعطاف‌پذیری بالای این موتور در نوع سوخت مصرفی است. به همین دلیل امروزه چندین کشور به‌طور جدی با ساخت نیروگاه‌های متعدد از موتور استرلینگ خورشیدی برای تامین توان مورد نیاز بهره می‌برند اما متاسفانه این موضوع در ایران علی‌رغم مطالعات عددی بسیاری که صورت گرفته تا به حال در زمینه ساخت مورد استرلینگ خورشیدی مورد غفلت قرار گرفته است. به همین منظور در پژوهش حاضر با درنظرگرفتن این خلا

موجود در کشور به بومی‌سازی و طراحی و ساخت موتور استرلینگ خورشیدی پرداخته شده است.

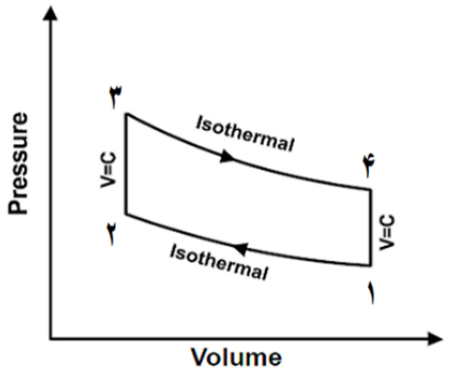
۲- طراحی و ساخت موتور استرلینگ خورشیدی

۲-۱- چرخه و موتور استرلینگ

چرخه استرلینگ (در حالت ایده‌آل) شامل دو فرآیند دما ثابت و دو فرآیند حجم ثابت است که مطابق شکل ۱ که نمودار دما-فشار چرخه استرلینگ در یک سیکل بسته ترمودینامیکی را نشان می‌دهد، کار می‌کند. بازده این چرخه مطابق رابطه ۱ است که در حالت ایده‌آل بازدهی برابر با بازده چرخه کارنو دارد[7]:

(۱)

$$\eta_{cyc} = \frac{W_{\text{out}}}{Q_{\text{h}}} = \left(1 - \frac{T_{\text{C}}}{T_{\text{h}}}\right)$$



شکل ۱) نمودار دما-فشار چرخه استرلینگ[7]

موتورهای استرلینگ رایج به سه نوع آلفا، بتا و گاما تقسیم می‌شوند که وجه مشترک هر ۳ نوع، اختلاف فاز ۹۰درجه در حرکت پیستون‌ها هست. در این پژوهش نوع گاما برای طراحی و ساخت موتور استرلینگ در نظر گرفته می‌شود، که طرح کلی آن مطابق شکل ۲ است. جزئیات هر یک از قطعات نشان‌داده‌شده در شکل ۲ به‌طور کامل در جدول ۱ ذکر شده است.

۲-۲- طراحی و ساخت قطعات موتور استرلینگ

هدف اصلی این پژوهش ساخت موتور استرلیگی است که با استفاده از انرژی خورشیدی راه‌اندازی شود. به همین دلیل در محاسبات و طراحی محدودیت‌های ساخت کلکتور خورشیدی را در نظر گرفته شده است و موتوری برای طراحی و ساخت در نظر گرفته شده است که با استفاده از یک کلکتور نه چندان بزرگ راه‌اندازی شود بر همین مبنای توان خروجی برای پژوهش صورت‌گرفته ۸۰وات در نظر گرفته شده است که بر همین اساس برای به‌دست‌آوردن حجم جاروب‌شده سیلندر جابه‌جایی که نقطه شروع طراحی است از روابط وست (۲) و بیل (۳) استفاده شده است[8]. برای استفاده از روابط ذکرشده دمای محفظه گرم و سرد به‌ترتیب ۲۵۰°C و ۵۰°C، ضریب عدد بیل ۰/۱۱، ضریب عدد وست ۰/۴، دور حدود ۷۰۰rpm و حداکثر فشار ۶بار در نظر گرفته شده است. بدین‌ترتیب حجم سیلندر جابه‌جایی با استفاده از رابطه وست و بیل به‌ترتیب ۱۰۳ و ۱۲۱سی‌سی به دست می‌آید. بر همین مبنا حجم سیلندر انتخابی برای طراحی ۱۰۳سی‌سی در نظر گرفته شده است. با توجه به این حجم قطر داخلی سیلندر جابه‌جایی ۷۵میلی‌متر و طول جاروب‌شده ۲۳میلی‌متر در نظر گرفته شده است. رابطه کارلوکیست (۴) با استفاده از داده‌های بالا بازده موتور مورد نظر برای ساخت را در حدود ۲۲/۱۸%-۱۷/۲۱% پیش‌بینی می‌کند[8]:

(۲)

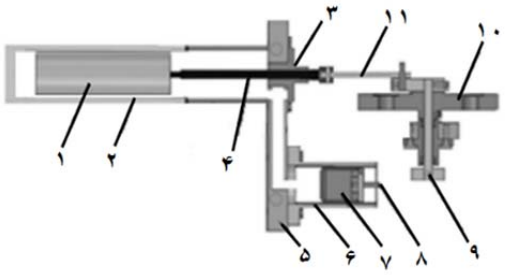
$$W_{out} = F.P.\omega.V_{swd}.\frac{T_h - T_C}{T_h + T_C}$$

(۳)

$$W_{out} = Be.P.\omega.V_{swd}$$

(۴)

$$\eta_{\text{eng}} = \left(1 - \frac{T_{\text{C}}}{T_{\text{h}}}\right).E.\eta_{\text{H}}.\eta_{\text{M}}.Z$$



شکل ۲) طرح موتور استرلینگ نوع گاما

جدول ۱) مشخصات اجزای موتور استرلینگ

شماره قطعه	مشخصات قطعه	جنس قطعه	قطر داخلی (میلی‌متر)	قطر خارجی (میلی‌متر)	طول قطعه (میلی‌متر)	وزن قطعه (گرم)
۱	پیستون جابه‌جایی	آلومینیوم 7075T	۶۳	۷۳	۴۶	۲۳۰
۲	سیلندر جابه‌جایی	آلومینیوم 7075T	۷۵	۱۱۸	۸۸	۷۹۵
۳	بوش سیلندر جابه‌جایی	برنج معمولی	۵	۳۰	۳۰	۷۱
۴	شاتون پیستون جابه‌جایی	فولاد AISI 1005	-	۵	۱۱۰	۱۴
۵	سر سیلندر سیلندر قدرت	فولاد AISI 1005	-	-	۲۰	۲۹۰۷
۶	سیلندر قدرت	فولاد AISI 1005	۵۰	۶۸/۲	۶۹/۵	۹۲۰
۷	پیستون قدرت	فولاد AISI 1005	۴۴/۴	۴۹/۹۵	۵۰	۳۰۸
۸	شاتون قدرت	فولاد AISI 1005	-	-	۱۰۶	۴۰
۹	میل لنگ	فولاد AISI 1005	-	۱۰	۱۱۰	۶۸
۱۰	فلایول	فولاد AISI 1005	-	۱۸۴	۱۲/۲	۹۰۰
۱۱	شاتون سیلندر جابه‌جایی	برنج معمولی	-	-	۵	۶۶

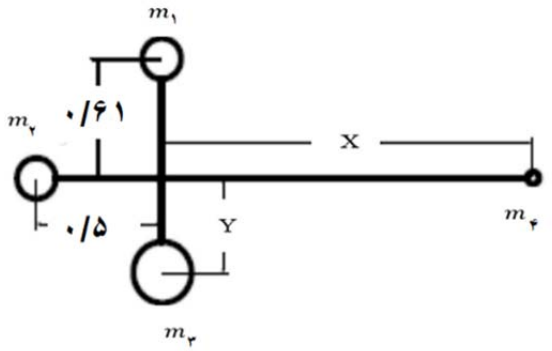
جدول ۲) مشخصات کلی موتور استرلینگ

حجم مرده سیلندر جابه‌جایی	۶۶سی‌سی	حجم جاروب‌شده سیلندر جابه‌جایی	۱۰۳سی‌سی
حجم مرده سیلندر توان	۱۸سی‌سی	حجم جاروب‌شده سیلندر توان	۸۶سی‌سی
وزن کل دستگاه	۹/۵کیلوگرم	نسبت حجم دو سیلندر	یک‌دوم
فشار اولیه	یک‌بار	سیال عامل	هوا

در ادامه و با توجه به طرح شکل ۲ قطعات دیگر طراحی و ساخته شده است. در طراحی تمامی قطعات وزن و هزینه کم، خاصیت ترموفیزیکی مناسب و محدوده دمایی کارکرد قطعه نیز مد نظر قرار گرفته شده که مشخصات اجزای مختلف موتور در جدول ۱ نشان داده شده است. بعد از طراحی و ساخت قطعات مختلف موتور، اقدام به طراحی مجموعه سیلندرهای جابه‌جایی و قدرت شده است که در جدول ۲ مشخصات کلی موتور استرلینگ ساخته شده ذکر شده است.

۲-۳- بالانس موتور

قطعات لنگ قدرت و لنگ جابه‌جایی این موتور دو عامل نابالانسی موتور هستند که در شکل ۳ به‌ترتیب با جرم‌های m_1 و m_2 نشان داده شده است. به‌منظور بالانس‌کردن موتور، باید دو جرم m_1 و m_2 مطابق شکل ۳ به مجموعه میل لنگ موتور استرلینگ اضافه شود.



شکل ۳) اجرام نابالانسی و بالانس کن

برای این کار با دردست‌داشتن مرکز جرم اجرام نابالانسی، جرم و فاصله جرم‌های مجهول از رابطه ۵ برای محور x و از رابطه ۶ برای محور y به دست آورده می‌شود:

(۵)

$$X: \quad m_2.r_2 = m_4.x \quad ، \quad m_4.x = 61$$

(۶)

$$Y: \quad m_1.r_1 = m_3.y \quad ، \quad m_3.y = 60$$

بدین‌ترتیب با درنظرگرفتن x و y جرم‌های بالانس کن m_3 و m_4 به دست آمده است:

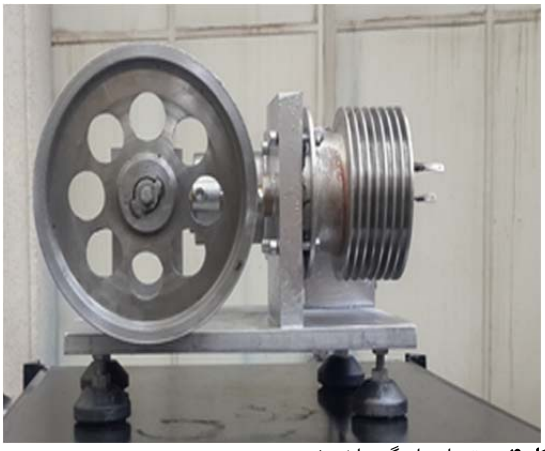
$$m_3 = 190\ gr \quad y = 0.39\ mm,\ m_4 = 44\ gr$$
$$x = 13.65\ mm$$

۲-۴- هیتر الکتریکی

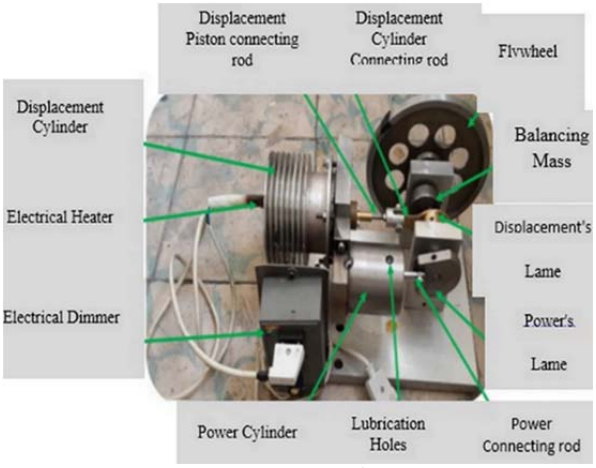
موتور ساخته‌شده ابتدا به‌وسیله هیتر الکتریکی که در داخل سیلندر جابه‌جایی در قسمت انتهایی قرار داده شده است راه‌اندازی شده است. در حقیقت حجم مرده سیلندر جابه‌جایی ذکرشده در جدول ۲، ناشی از وجود این هیتر است. حداکثر توان گرمایشی هیتر در حدود ۵۵۰وات است. همچنین با استفاده از دیمر الکتریکی امکان کاهش توان ورودی به موتور فراهم شده است. شکل نهایی موتور در شکل ۴ و همچنین جزئیات موتور نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.

۲-۵- نیروسنج

برای به‌دست‌آوردن گشتاور خروجی موتور استرلینگ از نیروسنج ۱/۵کیلویی استفاده شده است که شکل ۶ نحوه اتصال آن به موتور را نشان داده است. نیروسنج مورد استفاده قبل از شروع کار توسط وزنه‌های ۲۰۰ و ۱۰۰۰گرمی کالیبره شده است.



شکل ۴) موتور استرلینگ ساخته‌شده



شکل ۵) جزئیات موتور استرلینگ ساخته‌شده

شکل ۶) اتصال نیروسنج به موتور

۲-۶- طراحی و ساخت کلکتور خورشیدی

با توجه به توان ۵۵۰واتی هیتر الکتریکی، طراحی کلکتور به‌گونه‌ای صورت گرفته است که سیلندر جابه‌جایی توانایی جذب حداقل توان لازم برای کارکرد موتور که از طریق تست‌های صورت‌گرفته به دست آمده است را دارد.

به همین منظور با درنظرگرفتن شهر تبریز برای راه‌اندازی، مقدار سطح کلکتور مورد نیاز برای تابش به سیلندر جابه‌جایی از رابطه ۷ به دست آمده است[9]. همچنین با درنظرگرفتن حداقل شدت تابش، حداقل توان تابش‌شده از کلکتور نیز از رابطه ۸ به دست آمده است. مشخصات کلی سیستم کلکتور در جدول ۳ ذکر شده است:

(۸)

$$A_{rf} = \frac{8\Pi f^2}{3}\left\{\left(\left[\frac{D_{cc}}{4f}\right]^2 + 1\right)^{1.5} - 1\right\}$$

(۹)

$$Q_{cc} = I.A_{rf}.\eta_{cc}$$

با توجه به پایین‌بودن ضریب جذب آلومینیوم و تلفات ناشی از همرفت طبیعی، سیلندر جابه‌جایی دیگری برای موتور استرلینگ خورشیدی طراحی و ساخته شد که از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت جلویی آن از شیشه ضدآتش ساخته شده است که علاوه بر عبور تشعشش بازتاب‌شده از کلکتور، تلفات همرفتی طبیعی را به اندازه زیادی کاهش می‌دهد. قسمت دوم سیلندر جابه‌جایی به‌علت اهمیت خنک‌کاری قسمت‌های سرد موتور از آلومینیوم ساخته شده است که به‌منظور تسهیل این امر در جدار خارجی این قسمت سیلندر جابه‌جایی پره‌های حلقوی تعبیه شده است. از ویژگی‌های دوتکه‌ساختن سیلندر جابه‌جایی می‌توان به کاهش تلفات تابشی و ایجاد عایق بین دو قسمت سرد و گرم برای جلوگیری از تلفات رسانشی در طول سیلندر اشاره کرد. طرح مونتاژشده سیلندر جابه‌جایی جدید در شکل ۷ نشان داده شده است. در موتورهای استرلینگ خورشیدی خنک‌کاری موتور به اندازه گرمایش موتور اهمیت دارد به همین دلیل برای کارکرد بهتر و خنک‌کاری سریع‌تر موتور، پیستون سیلندر جابه‌جایی دیگری برای موتور استرلینگ خورشیدی طراحی شده است که تنها تفاوت پیستون جدید با مدل قبلی وجود پره در جدار خارجی پیستون در قسمت ابتدایی پیستون (قسمت سرد) سرد است. این مدل جدید پیستون جابه‌جایی را می‌توان مهم‌ترین نوآوری این پژوهش در نظر گرفت چرا که در آزمایش‌های صورت‌گرفته تاثیر قابل توجهی در کارکرد موتور در مقایسه با پیستون جابه‌جایی ساده قبلی داشته است. این پره‌ها موجب به حرکت درآوردن جریان هوا در قسمت سرد موتور می‌شوند. در حقیقت به‌دلیل وجود این پره‌ها نوسلت افزایش یافته و خنک‌کاری بهتر از حالت قبلی اتفاق می‌افتد. همچنین برای افزایش جذب انرژی خورشیدی تابشی به محفظه گرم موتور، قسمت انتهایی پیستون جابه‌جایی جدید به رنگ سیاه رنگ‌آمیزی شده است. طرح جدید پیستون جابه‌جایی در شکل ۸ نشان داده شده است.

برای ساخت کلکتور ابتدا شیشه مقعر با توجه مشخصات جدول ۳ ساخته شد که در شکل ۹ نشان داده شده است. سپس با جیوه‌زنی شیشه مقعر، کلکتور خورشیدی مطابق شکل ۱۰ ساخته شد. بازده این کلکتور با قراردادن یک‌کیلوگرم آب در مرکز کانونی کلکتور به دست آمده است. طبق این آزمایش طی ۵دقیقه دمای آب ۳۹°C افزایش یافته است که طبق رابطه (۱۰) بازده کلکتور ۸۰% به دست آمده است. سیستم نهایی موتور استرلینگ خورشیدی در شکل ۱۱ نشان داده شده است:

(۱۰)

$$Q_{cc}.\Delta t = I.A_{rf}.\eta_{cc}.\Delta t = m\,.C\,.\Delta T$$

طریقه کاردکرد موتور استرلینگ خورشیدی به این طریق است که با قراردادن قسمت انتهایی سیلندر جابه‌جایی (شیشه ضدآتش) در مرکز کانونی کلکتور خورشیدی، این کلکتور انرژی دریافتی از خورشید را به موتور استرلینگ بازتاب کرده و هوای داخل موتور با جذب انرژی گرمای لازم گرم شده و آماده شروع به کارکردن می‌شود، سپس موتور استرلینگ خورشیدی با استارت اولیه مطابق موتور استرلینگ المنتی شروع به کارکردن می‌کند.

شکل ۷) موتور استرلینگ با سیلندر جابه‌جایی جدید

شکل ۸) پیستون جابه‌جایی موتور استرلینگ خورشیدی

جدول ۳) مشخصات کلکتور خورشیدی

عمق کلکتور	۰/۱۲متر	فاصله کانونی کلکتور	۱/۰۶متر
قطر کلکتور	یک‌متر	سطح بازتابش کلکتور	۷۹۵/مترمربع
شهر مورد بررسی	تبریز	بازده کلکتور	۸۰%
حداقل شدت تابش خورشید	$\frac{W}{m^2}$۸۵۰	حداقل توان تابش کلکتور	۵۴۰وات

شکل ۹) شیشه مقعر

شکل ۱۰) کلکتور سهموی خورشیدی

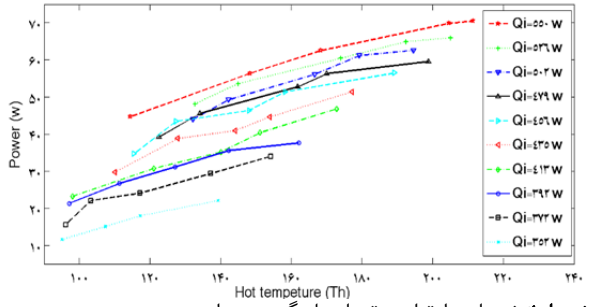
شکل ۱۱) سیستم موتور استرلینگ خورشیدی

۳- نتایج

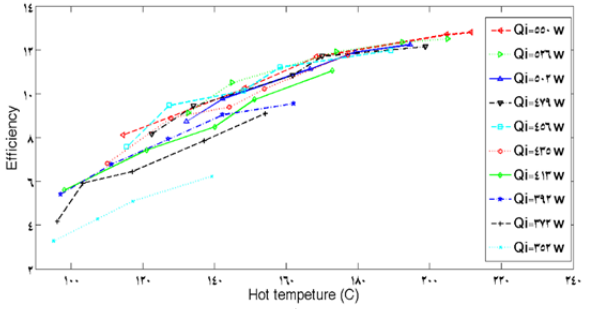
آزمایش‌های انجام‌شده در دو حالت عایق‌بندی و بدون عایق‌بندی محفظه گرم سیلندر جابه‌جایی صورت گرفته است. در هر آزمایش با کاهش ولتاژ ورودی توسط دیمر که موجب کاهش توان گرمایشی هیتر داخل موتور می‌شود، توان خروجی موتور به دست آمده است. در هر آزمایش دمای محفظه سرد، گرم، دور و گشتاور موتور از دستگاه داده‌برداری شده است. حداکثر گشتاور خروجی موتور در این حالت ۱/۲۳N.m در دور ۵۴۱rpm است. در حقیقت بیش‌ترین توان خروجی موتور در حالت بدون عایق‌بندی برابر با ۶۹/۶۸وات است. نمودارهای ۱ و ۲ به‌ترتیب میزان توان خروجی و بازده موتور را برحسب دمای محفظه گرم در شرایط بدون عایق‌بندی نشان می‌دهند.

در حالت بدون عایق‌بندی مقداری از توان ورودی به موتور با انتقال از محفظه گرم سیلندر جابه‌جایی به بیرون تلف می‌شود. بدین‌منظور یک بار دیگر موتور در شرایطی که قسمت گرم سیلندر جابه‌جایی موتور (دو سوم انتهایی سیلندر جابه‌جایی) عایق‌بندی‌شده مورد تست قرار گرفته است که نتایج حاصل از کارکرد موتور در توان‌های مختلف در شرایط عایق‌بندی در نمودارهای ۳ و ۴ ذکر شده است. حداکثر گشتاور موتور در این حالت ۱/۳۴N.m است که در این حالت دور موتور ۶۱۶rpm است بنابراین بیش‌ترین توان خروجی موتور در حالت بدون عایق‌بندی برابر با ۸۶/۴۴وات است. میزان توان و بازده موتور برحسب دمای محفظه گرم در شرایطی که موتور عایق‌بندی شده در نمودارهای ۳ و ۴ نشان داده شده است.

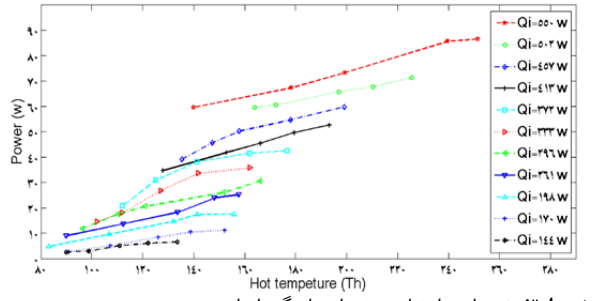
بعد از اتمام آزمایش‌های صورت‌گرفته تمامی نتایج آزمایش‌های به‌دست‌آمده با روش‌های تحلیلی گفته‌شده در قسمت ۲-۲ مقایسه و اعتبارسنجی شده است که دو نمونه از دو حالت عایق‌بندی‌شده و بدون عایق‌بندی موتور برای اعتبارسنجی در جدول ۴ آورده شده است. حالات مقایسه‌شده در جدول ۴ از نتایج حالت پایدار آزمایش صورت گرفته است، که قابلیت استناد بیشتری نسبت به لحظات ابتدایی کارکرد موتور دارند.



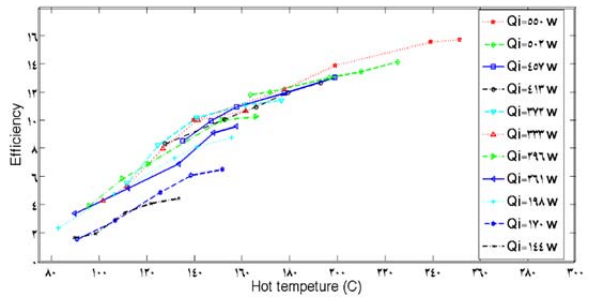
نمودار ۱) نمودار دما-توان موتور استرلینگ بدون عایق‌بندی



نمودار ۲) نمودار دما-بازده موتور استرلینگ بدون عایق‌بندی



نمودار ۳) نمودار دما-توان موتور استرلینگ با عایق‌بندی



نمودار ۴) نمودار دما-بازده موتور استرلینگ با عایق‌بندی

جدول ۴) نتایج آزمایش های تجربی و تحلیلی

حالات	نتایج آزمایش تجربی							نتایج تحلیلی				
	Q_{in} (وات)	T_c (^oC)	T_h (^oC)	n (rpm)	τ (N.m)	W_{out} (وات)	η (%)	W_{out}^{west} (وات)		W_{out}^{beale} (وات)	$\eta^{Carlquist}$ (%)	
								ماکزیمم	مینیمم		ماکزیمم	مینیمم
بدون عایق	۵۵۰	۸۸/۳	۲۱۱/۵	۵۴۱	۱/۲۳	۶۹/۶۸	۱۲/۶۶	۶۸/۵۵	۴۸/۹۵	۶۹/۱۸	۱۱/۴۴	۱۴/۷۴
بدون عایق	۵۲۶	۸۴/۷	۲۰۵/۱	۵۳۸	۱/۱۷	۶۵/۶۹	۱۲/۵۳	۶۶/۴۳	۵۱/۵۴	۶۵/۶۲	۱۱/۳۳	۱۴/۶
با عایق	۵۵۰	۹۸/۲	۲۵۱/۶	۶۱۶	۱/۳۴	۸۶/۴۴	۱۵/۷۲	۹۹/۴۱	۷۰/۹۹	۹۱/۰۴	۱۳/۱۵	۱۶/۹۶
با عایق	۵۲۶	۹۴/۷	۲۳۵/۴۱	۵۸۰	۱/۲۸	۷۷/۷۱	۱۴/۷۷	۸۴/۳۴	۶۰/۲۲	۸۲/۴۵	۱۲/۴۳	۱۶/۰۲

همان‌گونه که در جدول ۴ نشان شده است نتایج گرفته‌شده از آزمایش موتور مطابقت قابل قبولی با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی بیل، وست و کارلوکیست دارند.

در ادامه با توجه به نتایج کامل به‌دست‌آمده از آزمایش‌های صورت‌گرفته موتور در دو شرایط بدون عایق‌بندی و عایق‌بندی محفظه گرم و با داده‌های به‌دست‌آمده در جدول ۵، حداکثر توان خروجی موتوراسترلینگ خورشیدی در حدود ۳۰وات است.

جدول ۵) نتایج موتور استرلینگ خورشیدی

تاریخ	T_a (^oC)	T_c (^oC)	T_h (^oC)	n (RPM)
۱۳۹۶/۵/۷	۳۶/۹	۴۰/۲	۲۷۴/۴	۳۸۱
۱۳۹۶/۵/۱۸	۳۳/۳	۴۴/۷	۲۶۰/۱	۳۲۰
۱۳۹۶/۶/۱۱	۳۴/۳	۴۳/۲	۲۴۷/۵	۳۰۶
۱۳۹۶/۶/۲۷	۳۱/۶	۴۰/۵	۲۲۰/۵	۱۹۱

۴- نتیجه‌گیری

مقایسه دقیق‌تر نتایج به‌دست‌آمده بیانگر اختلاف ناچیز بین مقادیر به‌دست‌آمده برای توان و بازده از آزمایش‌های صورت‌گرفته با مقادیر محاسبه‌شده از روش‌های تحلیلی بیل، وست و کارلوکیست است که اصلی‌ترین عامل این اختلاف ناچیز، کم‌بودن اصطکاک در اجزای مختلف این موتور است.

با توجه به این که موتور استرلینگ با کوچک‌ترین اصطکاک اضافی از کار می‌افتد، بنابرین برای کارکرد بهینه موتور علاوه بر افزایش قطر سیلندر جابه‌جایی که موجب کاهش طول کورس جابه‌جایی می‌شود باید عملیات روان‌کاری به‌صورت مرتب روی سیلندر قدرت صورت گیرد چرا که بیشترین اصطکاک موتور در قسمت تماسی سیلندر قدرت است که در این پژوهش عمل روان‌کاری با تعبیه سوراخی در بالای سیلندر قدرت صورت گرفته است.

از دیگر موارد موثر در کاهش اصطکاک موتور می‌توان به بالانس‌کردن موتور اشاره کرد چرا که اندک نابالانسی باعث جلوگیری از کارکرد موتور می‌شود. بالانس مناسب این موتور موجب کاهش قابل‌توجه ارتعاش موتور در حال کار شده است به‌گونه‌ای که موتور در شرایط کارکرد کمترین حرکتی را نداشته است.

با توجه به نتایج نشان‌داده‌شده در نمودارها، افزایش‌دادن توان گرم‌کن الکتریکی و به‌واسطه آن افزایش‌یافتن دمای محفظه گرم، موجب افزایش فشار می‌شود که نتیجه آن افزایش توان و بازده موتور است. همچنین با جاگذاری هیتر الکتریکی داخل سیلندر جابه‌جایی تلفات حرارتی به محیط، میزان زیادی کاهش می‌یابد چرا که توان خروجی از هیتر بدون واسطه به سیال عامل داخل محفظه گرم سیلندر جابه‌جایی انتقال می‌یابد، که این کار موجب افزایش بازده موتور در شرایط مختلف می‌شود.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد با عایق‌کاری محفظه گرم سیلندر جابه‌جایی موتور، توان خروجی موتور حدود ۱۷وات افزایش پیدا می‌کند. در حقیقت با عایق‌کاری مناسب موتور توان خروجی حدود ۲۰% افزایش پیدا کرده است.

با توجه به حرکت مستمر خورشید در طول روز مرکز کانونی خورشید نیز طی آن متغیر است بنابراین بیشترین توان ورودی به کلکتور در شرایطی صورت می‌گیرد که مرکز کلکتور، نقطه کانونی کلکتور سهموی و خورشید در یک راستا باشند، به عبارت دیگر زاویه بین این سه نقطه برابر با صفر باشد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه‌اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: حجت داننده‌اسکوئی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)؛ داود جلالی‌وحید (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

۵- پی‌نوشت

فهرست علایم

W	توان مکانیکی (وات)
Q	نرخ حرارت (وات)
T	دما (کلوین)
F	ضریب وست
P	فشار (بار)
V	حجم (مترمکعب)
Be	ضریب
E	ضریب تصحیح نسبت به بازده کارنو (۰/۷۵-۰/۶۵)
Z	ضریب تصحیح کمکی (۰/۹۵)
m	جرم (گرم)
r	فاصله مرکز جرم تا محور میل لنگ
A	سطح مقطع (مترمربع)
f	فاصله کانونی (متر)
D	قطر (متر)
I	شدت تابش ($\frac{W}{m^2}$)
C	ظرفیت گرمای ویژه آب ($4.183\ \frac{J}{g.K}$)
n	سرعت دورانی (RPM)
t	زمان (ثانیه)

علایم یونانی

η	بازده
ω	سرعت دورانی (هرتز)
τ	گشتاور خروجی موتور (N.m)

زیرنویس‌ها

out	خروجی
cyc	سیکل
h	گرم
c	سرد
swd	جاروب‌شده سیلندر جابه‌جایی
cyc	موتور
H	گرمایش (۰/۹-۰/۸۵)
M	مکانیکی موتور (۰/۹-۰/۸۵)
rf	بازتابش
cc	کلکتور

منابع

1- Schmidt G. The theory of Lehmann's calorimetric machine. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. 1871;15(2):98-112. [German]

2- Finkellstein T. Analogue simulation of Stirling engine. Simulation. 1975;(2).

3- Siva Reddy V, Kaushik SC, Tyagi SK. Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant. International Journal of Energy Research. 2013;37(11):1287-1301.

4- Shabanpour Moghadam R, Sayyaadi H, Hosseinzade H. Sizing a solar dish Stirling micro-CHP system for

residential application in diverse climatic conditions based on 3E analysis. Energy Conversion and Management. 2013;75:348-365.
5- Acharya Sh, Bhattacharjee S. Stirling engine based solar-thermal power plant with a thermo-chemical storage system. Energy Conversion and Management. 2014;86:901-915.
6- Ferreira AC, Nunes ML, Teixeira JCF, Martins LASB, Teixeira SFCF. Thermodynamic and economic optimization of a solar-powered Stirling engine for micro-cogeneration purposes. Energy. 2016;111:1-17.
7- Organ AJ. Stirling cycle engines: Inner workings and design. Hoboken: Wiley; 2013.
8- Wagner A. Calculations and experiments on γ-type Stirling engines [Dissertation]. Cardiff: University of Wales, Cardiff; 2008.
9- Yaqi L, Yaling H, Weiwei W. Optimization of solar-powered Stirling heat engine with finite-time thermodynamics. Renewable Energy. 2011;36(1):421-427.