

تحلیل سازوکار تولید سرما از گرما با استفاده از دو موتور استرلینگ کوپل شده

محمد هادی کتولی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

رضا عسکری مقدم* (استادیار)

احمد حاجی نژاد (استادیار)

دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۳-۳، شماره‌ی ۲، ص. ۱۰۵-۹۹

چرخه‌ی استرلینگ یکی از چرخه‌های ترمودینامیکی است که مزیت‌های فراوان آن باعث شده تا امروزه موتورهای استرلینگ در صنعت و دیگر کاربردهای روزمره مورد استفاده قرار بگیرد. یکی از مزیت‌های موتور استرلینگ قابلیت عملکرد معکوس این چرخه به منظور تولید سرمایش است. در این نوشتار ساختار جدیدی پیشنهاد می‌شود که در آن، با اتصال دو موتور استرلینگ مشابه به یکدیگر می‌توان با استفاده از یک منبع حرارتی، سرمایش تولید کرد. در این نوشتار علاوه بر معرفی و تحلیل این سامانه، شبیه‌سازی‌هایی انجام شده که نشان می‌دهد می‌توان با استفاده از یک آینه‌ی مشترک‌کننده‌ی نور خورشید، در دمای محیطی ۶۰ درجه سانتی‌گراد، سرمایش در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد جهت نگه‌داری مواد غذایی ایجاد کرد. شرایط محیطی بر اساس مقادیر واقعی حاصل از آزمایش و نیاز کاربران در جنوب کشور ایران در نظر گرفته شده است. یادآور می‌شود علاوه بر انرژی خورشیدی به عنوان منبع حرارتی، می‌توان از سایر منابع انرژی تجدیدپذیر یا فسیلی نیز استفاده کرد.

واژگان کلیدی: موتور استرلینگ، تحلیل ریاضی، تبدیل گرما به سرما، سامانه‌ی مکترونیک، تبدیل انرژی.

۱. مقدمه

امروزه با توجه به محدودیت‌هایی که در امر بهسازی موتورهای بنزینی و دیزلی وجود دارد، مهندسمین صنایع موتورسازی مجبور به بررسی و تحقیق پیرامون انواع دیگری از موتورها شده‌اند که بتواند جایگزینی برای موتورهای بنزینی و دیزلی شوند. یکی از گزینه‌ها برای جایگزینی موتوری است که با چرخه‌ی استرلینگ کار می‌کند.^[۱] موتور استرلینگ که در ابتدا با نام موتور هوای گرم شناخته می‌شد در سال ۱۸۱۶ میلادی توسط برادران استرلینگ اختراع شد. سال‌ها پس از ساخت موتور استرلینگ، درک علمی از عملکرد آن حاصل و موجب شناخت چرخه‌ی استرلینگ و تحلیل آن شد. موتورهایی که حداقل گازهای آلاینده را تولید می‌کنند و از نظر آلودگی صدا در مناسب‌ترین وضعیت‌اند، در صورت برخورداری از یک طراحی مناسب امکان دست‌یابی به کم‌ترین ارتعاش و کم‌ترین میزان مصرف سوخت در آن‌ها به‌سادگی عملی است. از آن‌جا که این موتور یک موتور احتراق خارجی است،^[۲] قابلیت استفاده از هرگونه منبع حرارت‌زا به‌عنوان منبع انرژی را دارد. بنابراین محدودیت استفاده از سوخت‌های فسیلی برطرف شده و می‌توان از مواد زاید کشاورزی، زباله، مواد نفتی پالایش شده و پالایش نشده، انرژی خورشیدی و سوخت‌های اتمی^[۳]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۵/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۷/۹/۲۴، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۱۶.

DOI:10.24200/J40.2019.51359.1472

hadi.katoly@ut.ac.ir
r.askari@ut.ac.ir
hajinezhad@ut.ac.ir

برحسب نوع کارکرد برای گرم کردن گاز داخلی استفاده کرد؛ بدون آن که احتراقی داخل سیلندرها می‌توان رخ دهد. از موتور استرلینگ می‌توان به عنوان مولد نیرو در مصارف پزشکی، زمینی، هوایی، دریایی، فضایی استفاده کرد.^[۴] از جمله کاربردهای موتور استرلینگ می‌توان به سیستم‌های تولید هم‌زمان توان و گرما، کاربرد در اتومبیل، اتومبیل هیبریدی با موتور استرلینگ، بخشی از قلب مصنوعی، تهویه‌ی ساختمان و خنک‌کننده استرلینگ اشاره کرد.^[۵] با این‌همه ساخت و تولید انبوه این موتور به دلایل مختلف - از جمله نیاز به درزبندی کامل^[۶] به‌ویژه در جایی که سیال دیگری غیر از هوا کاربرد دارد و نیز رعایت ایمنی وقتی هیدروژن سیال عامل باشد^[۷] - فعلاً رایج نیست و نیاز به مطالعات تکمیلی دارد. در هر کاربردی که نیازمند یک موتور حرارتی باشد، امکان استفاده از موتور استرلینگ وجود دارد. در حقیقت این موتور تقریباً در کاربری‌های مختلفی استفاده شده است. از جمله مزایای استفاده از موتور استرلینگ می‌توان به بازده حرارتی بسیار بالا،^[۸] لرزش کم و بی سروصدا بودن، آلاینده‌ی کم،^[۹] توانایی استفاده از تقریباً هر منبع حرارتی (خورشیدی، زیست‌توده، زمین‌گرمایی، یا حتی گرمای مازاد صنعتی)،^[۱۰] فشار ثابت موتور استرلینگ،^[۱۱] عدم نیاز به منبع هوا، نیاز اندک به نگه‌داری، عملکرد ایمن،^[۱۲] ساختار ساده و قابلیت معکوس شدن چرخه‌ی کاری اشاره کرد. در میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلایل مختلف (از جمله قابلیت تبدیل

مستقیم به برق و حرارت) بیشتر از سایر انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گرفته است.^[۱۳]

با اختراع هر وسیله‌ی همیشه نکات خوب و بدی نیز به همراه آن می‌آید. موتور استرلینگ نیز از این قاعده مستثنی نیست. متأسفانه معایب استفاده از موتورهای استرلینگ مانع از گسترش این نوع موتورها در سطح وسیع - مثلاً در حمل‌ونقل و تولید الکتریسیته - شده است. از جمله معایب موتورهای استرلینگ می‌توان اشاره کرد به کم بودن نسبت توان به وزن، عدم توانایی تغییر گشتاور و توان با سرعت بالا، هزینه‌ی بالا مخصوصاً زمانی که از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع گرمایی استفاده می‌شود، احتمال هدر رفتن انرژی در باز یاب،^[۱۴] نیاز به گرمایش اولیه‌ی منبع حرارتی خارجی، نیاز به مواد مقاوم در برابر دمای بالا^[۱۵] و نیاز به پره‌های خنک‌کننده‌ی بزرگ در این نوع موتورها. با وجود معایب ذکر شده، فناوری موتور استرلینگ به‌طور مداوم در حال گسترش و بهبود است و موتورهای نسل جدید با نسبت توان به وزن بالاتر و توان تولیدی بیشتر و بازده بالاتر در دست تولیدند. همین موضوع می‌تواند در آینده منجر به محبوبیت موتورهای استرلینگ و در نهایت گسترش کاربرد آن شود.^[۱۴]

دانشمندان با استفاده از موتور استرلینگ به دمای ۲۴۳- درجه سلسیوس (۳۰ درجه کلوین) دست یافته‌اند.^[۱۵] در مقیاس صنعتی سال هاست که از این شیوه به‌صورت فراگیر در تولید نیروژن مایع استفاده می‌شود. اولین یخچال استرلینگ در سال ۱۹۵۴ در شرکت فیلیپس به بهره‌برداری رسید و به‌صورت تجاری در واحدهای تولید نیروژن مایع مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از خنک‌کن‌های کوچکی که با فناوری استرلینگ کار می‌کنند برای کاهش دما تا ۱۷۳- درجه‌ی سلسیوس (۱۰۰ درجه کلوین) در پردازنده‌های مادون قرمزی که در دوربین‌های دید در شب کاربرد دارند، استفاده می‌شود.^[۱۶] از جمله مزایای خنک‌کننده‌هایی که از چرخه‌ی استرلینگ برای تولید سرمایش استفاده می‌کنند می‌توان اشاره کرد به: بالاترین کارایی ممکن، قابلیت اعتماد بالای خنک‌کننده، توانایی کنترل خودکار، کنترل با استفاده از PLC و نیاز به نگه‌داری پایین.^[۱۷]

خنک‌کننده‌ی استرلینگ با ظرفیت خنک‌کنندگی بالا دارای هزاران وات توان خنک‌کنندگی در دمای نیروژن مایع است. ژو و همکاران یک خنک‌کننده‌ی استرلینگ با ظرفیت بالا را که با سازوکار میل‌لنگ ساخته شده بررسی کرده‌اند.^[۱۸] توان ورودی این سیستم ۱۰/۹ kW و سرعت چرخشی موتور ۱۴۵۰ rpm است. توان خنک‌کاری سیستم ۷۰۰ W، دمای سیستم ۱۹۶- درجه سلسیوس و بازدهی نسبی کارنو سیستم خنک‌کننده ۲/۴۶ است. همچنین نسبت فشار در فضای اقباضی نیز گزارش شده است.

تابع هدف ترمواقصدی بی‌بعد و خروجی توان بی‌بعد با استفاده از الگوریتم NSGA-II و با در نظر گرفتن زمان محدود برای یک سیستم موتور استرلینگ با انرژی خورشیدی بهینه‌سازی شده است.^[۱۹]

در تحقیق دیگری که در تونس انجام شده، پتانسیل بالای استفاده از سیستم ترکیبی موتور استرلینگ با انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، عملکرد میکروتوربین استرلینگ برای مناطق روستایی امکان‌سنجی شده است.^[۲۰]

فناوری‌های مختلف در محدوده‌ی ۲ مگاوات برای نیروگاه‌های ترکیبی CHP با تمرکز بیشتر روی موتور استرلینگ در مقاله دیگری بررسی شده است. یک نیروگاه چرخه‌ی ترکیبی با توان ۳۵ کیلووات الکتریکی به وسیله‌ی موتور استرلینگ با سوخت باومس در سال ۲۰۰۲ طراحی شده است.^[۲۱] از موتورهای استرلینگ برای سرمایش در دماهای بسیار پایین نیز استفاده می‌شود،^[۲۲] از جمله کاربردهای موتور استرلینگ می‌توان به تولید نیروژن مایع، موتورهای ابرسانایی، کابل‌ها یا

پمپ‌های سرمایشی ابرسانایی اشاره کرد. خنک‌کننده‌های استرلینگ، در مقایسه با سایر خنک‌کننده‌ها، بازده بالاتر و ساختار فشرده‌تری دارند. برای بهبود تولید سرمایش توسط موتورهای استرلینگ آنالیز CFD یک نمونه موتور استرلینگ از نوع آلفا نیز انجام شده است.^[۲۳] ونگ و همکاران یک سیستم خنک‌کننده‌ی استرلینگ دومرحله‌ی را طراحی کرده‌اند.^[۲۴] مرحله‌ی اول سیستم طوری طراحی شده که در دمای نیروژن مایع عمل کند و خروجی سرمایشی ۱۰۰ W را تولید کند. مرحله دوم نیز هم‌زمان توان ۵۰ W را تولید می‌کند. برای دست‌یابی به بهترین بازده سیستم، یک مدل عددی بر اساس مدل ترموآکوستیک برای بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری سیستم ارائه شده است.

با افزایش نرخ رشد مصرف انرژی در حال حاضر و همچنین به دلایل مشکلات زیست‌محیطی، لازم است با بررسی منابع انرژی، به انرژی با صرفه‌تری دست یافت.^[۲۵] از آن‌جا که کشور ایران جزو مناطق گرم و خشک دنیا به حساب می‌آید، ضرورت استفاده از تجهیزات که بتوان به‌واسطه‌ی آن‌ها از منابع تجدیدپذیر گرما تولید سرما کرد، بسیار محسوس است. ایران یکی از کشورهایی است که نرخ تابش انرژی خورشیدی بسیار خوبی دارد و می‌توان از این انرژی برای مقاصد گوناگون استفاده کرد.^[۲۶] طبق تحقیقات انجام شده توسط نگارندگان، تاکنون مطالعه‌ی در خصوص کوپل کردن دو موتور استرلینگ جهت تولید سرمایش از منبع گرمایشی تجدیدپذیر انجام نشده است. در این مقاله ایده‌ی کوپل کردن دو موتور استرلینگ برای تولید سرمایش از منابع انرژی گرمایی تجدیدپذیر خورشیدی ارائه می‌شود. می‌توان از نتایج این تحقیق برای توسعه‌ی کاربردهای موتور استرلینگ در کشور و توسعه‌ی پایدار، که از مسائل مهم امروزه کشور است، استفاده کرد.

۲. روابط تحلیلی و شبیه‌سازی

در این مقاله از یک الگوی دینامیکی ترمودینامیکی که در مقالات گذشته نگارندگان برای حالت گرمایش موتور استرلینگ نوشته و اعتبارسنجی شده استفاده می‌شود.^[۲۷] همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، یکی از مزیت‌های استفاده از موتور استرلینگ قابلیت معکوس شدن چرخه‌ی کاری است به‌طوری‌که می‌توان از آن برای تولید سرمایش هم استفاده کرد.

۱.۲. معادلات دینامیکی حاکم بر الگو

۱.۱.۲. روابط سینماتیک اتصالات موتور

سینماتیک پارامترهای موتور در شکل ۱ نشان داده شده است. $c_1, c_2, d, l_1, l_2, r_c, \varphi, a_1$ تا a_3 پارامترهای ساختاری موتور و همگی مقادیر ثابتی هستند. معادلات ۱ و ۲ این پارامترها را به b_1 و b_2 (فاصله عمودی گزینین در هر لحظه تا راستای میل‌لنگ) مربوط می‌سازند.

$$l_1^2 = r_c^2 + b_1^2 + 2r_cb_1 \cos \theta \quad (۱)$$

$$l_2^2 = r_c^2 + b_2^2 + 2r_cb_2 \cos(\theta + \varphi) \quad (۲)$$

با حل معادلات بالا برای b_1 و b_2 ، این پارامترها به‌عنوان تابعی از زاویه‌ی میل‌لنگ بیان می‌شوند که در معادلات ۳ و ۴ نشان داده شده است.

$$b_1 = (r_c^2 \cos^2 \theta + l_1^2 - r_c^2)^{\frac{1}{2}} - r_c \cos \theta \quad (۳)$$

$$b_2 = \left(\frac{r_c^2 \cos^2(\theta + \varphi) + l_2^2 - r_c^2}{\varphi} \right)^{\frac{1}{2}} + r_c \cos(\theta + \varphi) \quad (۴)$$

مجموع انرژی‌های جنبشی تمامی اجزای متحرک موتور در متغیر T_θ و مجموع انرژی پتانسیل اجزا در متغیر V_θ قرار خواهد گرفت. لاگرانژین با تفاضل انرژی جنبشی کل از انرژی پتانسیل کل به دست می‌آید و نهایتاً با قرار دادن لاگرانژین در معادله اصلی لاگرانژ (معادله ۱۷) و انجام مشتق‌گیری‌های لازم، معادله دیفرانسیل دینامیکی موتور استرلینگ حاصل می‌شود. متغیر I در معادله لاگرانژ نشان‌دهنده مقدار گشتاور معادل وارد شده به میل‌لنگ خواهد بود در حالی که θ نشان‌دهنده زاویه میل‌لنگ است.

$$T_\theta = \sum_{I=n_1} \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_1} \frac{1}{2} J_i \dot{\theta}_i^2 \quad (14)$$

$$V_\theta = \sum_{I=n_s} \frac{1}{2} k_i x_i^2 \quad (15)$$

$$L_\theta = T_\theta - V_\theta = \sum_{I=n_1} \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_1} \frac{1}{2} J_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=n_s} \frac{1}{2} k_i x_i^2 \quad (16)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial L_\theta}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_\theta}{\partial \theta} = I \quad (17)$$

با توجه به تعداد متغیرهای در نظر گرفته شده، لاگرانژین به صورت معادله ۱۸ دست می‌آید:

$$L_\theta = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (18)$$

با جایگذاری روابط ۱۰ و ۱۱ در معادله ۱۸، نهایتاً معادله ۱۹ حاصل می‌شود:

$$L_\theta = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \left(m_1 \left(\frac{dx_1}{d\theta} \right)^2 + m_2 \left(\frac{dx_2}{d\theta} \right)^2 + J \right) \quad (19)$$

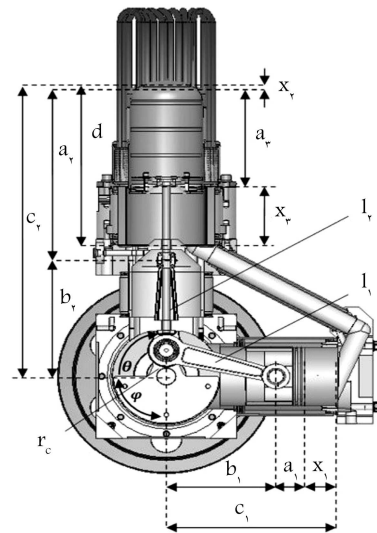
مشتقات محاسبه شده در معادلات ۸ و ۹ در معادله ۱۹ قرار داده شده و لاگرانژین برحسب زاویه میل‌لنگ و سرعت زاویه‌ی میل‌لنگ مطابق معادله ۲۰ حاصل می‌شود. بنابراین چنانچه مشتقات معادله لاگرانژین اعمال شود، یک واحد به درجه‌ی مشتق در معادلات اضافه می‌شود و بخش سمت چپ معادله لاگرانژ به فرم تابعی از زاویه، سرعت و شتاب میل‌لنگ بدل خواهد شد:

$$L_\theta = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \left(m_1 \left(\frac{r_c^r \sin(\varphi\theta)}{2(l_1^r - r_c^r \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin \theta \right)^2 + m_2 \left(\frac{r_c^r \sin(\varphi\theta + \varphi)}{2\left(\frac{r_c^r \cos(\varphi\theta + \varphi)}{2} + l_2^r - \frac{r_c^r}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\theta + \varphi) \right)^2 + J \right) \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_\theta}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_\theta}{\partial \theta} = f(\dot{\theta}, \ddot{\theta}, \theta) \quad (21)$$

۳. کد Nlog

چنان‌که پیش‌تر توضیح داده شد در این مقاله از کدی استفاده می‌شود که در گذشته توسط نگارندگان نوشته شده است. [۲۹-۲۷] کد Nlog در محیط برنامه‌نویسی متلب نوشته شده است و برای تحلیل ترمودینامیکی موتور استرلینگ استفاده می‌شود. این برنامه یک کد تحلیل چرخه‌ی موتور استرلینگ است که از معادلات درجه سوم در آن استفاده شده است. این کد گرمای خروجی و توان تولیدی موتور استرلینگ را محاسبه می‌کند. پارامترهای تأثیرگذار موتور در کد Nlog عبارت است از:



شکل ۱. پارامترهای سینماتیک موتور استرلینگ ST5° نوع گاما. [۲۹]

به این ترتیب متغیرهای x_1 (طول محفظه‌ی تراکم)، x_2 (طول محفظه‌ی گرم) و x_3 (طول محفظه‌ی سرد) برحسب توابعی از زاویه‌ی میل‌لنگ به دست می‌آید:

$$x_1 = c_1 - a_1 - b_1 \quad (5)$$

$$x_2 = c_2 - a_2 - b_2 \quad (6)$$

$$x_3 = d - a_3 - x_2 \quad (7)$$

مشتقات متغیرهای x_1, x_2 نسبت به زاویه‌ی میل‌لنگ نیز در روابط ۸ و ۹ نشان داده شده است. این روابط در بخش محاسبه‌ی روابط دینامیک مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

$$\frac{dx_1}{d\theta} = \frac{r_c^r \sin(\varphi\theta)}{2(l_1^r - r_c^r \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin \theta \quad (8)$$

$$\frac{dx_2}{d\theta} = \frac{r_c^r \sin(\varphi\theta + \varphi)}{2\left(\frac{r_c^r \cos(\varphi\theta + \varphi)}{2} + l_2^r - \frac{r_c^r}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\theta + \varphi) \quad (9)$$

مشتقات زمانی اول متغیرهای x_1 و x_2 نیز که نشان‌دهنده‌ی سرعت حرکت اجزای موتور است با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ و مشتقات دوم آن‌ها که نشان‌دهنده‌ی شتاب آن‌هاست از روابط ۱۲ و ۱۳ مطابق قوانین مشتق زنجیری محاسبه می‌شوند.

$$\dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_1}{d\theta} \quad (10)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_2}{d\theta} \quad (11)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_1}{d\theta} \quad (12)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{d^2 x_2}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_2}{d\theta} \quad (13)$$

۲.۱.۲ روابط سینماتیک مدل

در این بخش به دنبال آن هستیم که معادله‌ی دیفرانسیلی بیابیم که با حل آن، سرعت و زاویه‌ی لحظه‌ی میل‌لنگ به دست آید؛ بدین منظور از روش دینامیک لاگرانژ استفاده می‌شود. فرم کلی معادلات لاگرانژ مطابق معادلات ۱۴ تا ۱۷ است.

۱. مشخصات هندسی تمام کانال‌های انتقال گاز، لوله‌ها و محفظه‌های انبساط و تراکم؛

۲. هندسه‌ی اتصالات بین بخش‌های متحرک موتور؛

۳. فشار اولیه‌ی موتور و دماهای اولیه در هر نقطه؛

۴. دمای دیواره‌ی مبدل حرارتی (که با گذشت زمان ثابت در نظر گرفته می‌شود).

کد Nlog تمامی کانال‌ها و لوله‌های انتقال گاز در موتور را به حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌کند و پارامترهای دینامیکی و ترمودینامیکی برای هرکدام از حجم کنترل‌ها را با حل کردن معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی تعیین می‌کند.

۴. سامانه‌ی استرلینگ پیشنهادی

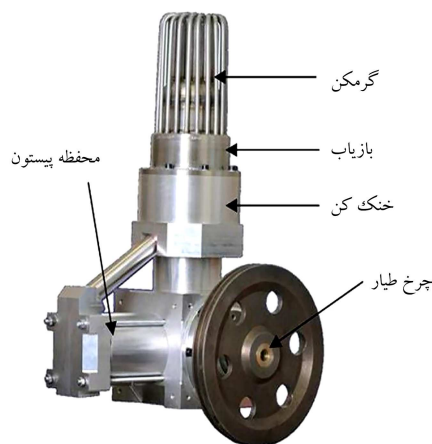
در این پژوهش از دو موتور استرلینگ ST500 مشابه ساخت شرکت ایپکو استفاده می‌شود. مشخصات فنی این موتورها در جدول ۱ آورده شده است. دو موتور استفاده شده در این پژوهش کاملاً یکسان و دارای توان نامی 500 W هستند.

در شکل ۲ نمای موتور استرلینگ ST500 مورد استفاده در آزمایش نشان

جدول ۱. مشخصات نامی فنی موتور استرلینگ 500 وات گرم مورد استفاده در این پژوهش.

ردیف	مشخصه فنی موتور	مقدار
۱	نوع	گاما
۲	میزان شارژ استاندارد دستگاه	۸ بار
۳	سیال عامل	هلیوم
۴	سوخت	گاز طبیعی - انرژی خورشیدی
۵	ماده‌ی خنک کاری	آب
۶	طول پیستون قدرت	۷۵mm / °
۷	طول جابه‌جا کننده ^۱	۷۵mm / °
۸	زاویه‌ی فاز	۹۰ deg
۹	نوع گرم‌کننده	تیوب ۲۰ × (۶ mm dia.)
۱۰	نوع خنک‌کن	۱۴۴ × (۱۳ mm ^۲ section area)
۱۱	جنس بازیافت	استیل (۰/۹۶ تخلخل)

^۱Displacer



شکل ۲. نمای خارجی موتور استرلینگ ST500 مورد استفاده در آزمایش. [۲۹]

داده شده است. در این شکل بخش‌های مختلف موتور استرلینگ، شامل گرم‌کن، خنک‌کن، بازباب، چرخ‌طیار و محفظه‌ی پیستون نشان داده شده است.

چنان‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این سیستم از دو موتور استرلینگ تشکیل شده است. موتور اول با استفاده از یک آینه‌ی متمرکزکننده‌ی خورشیدی گرم می‌شود؛ برای راه‌اندازی و استارت اولیه‌ی موتور از یک دینام استفاده می‌شود که به چرخ‌طیار موتور اول متصل است و با استفاده از یک ژنراتور موتور اول راه‌اندازی می‌شود. راه‌اندازی و استارت موتور اول با استفاده از یک دستگاه ژنراتور با ولتاژ ۴۴/۸ ولت و جریان ۰/۱ آمپر است. پس از راه‌اندازی موتور اول موتور دوم نیز توسط تسمه حرکت می‌کند و در نتیجه چرخ‌طیار موتور دوم نیز به حرکت در می‌آید. با چرخش موتور دوم، طبق چرخه‌ی موتور استرلینگ، موتور دوم سرما تولید می‌کند. موتور استرلینگ سمت چپ را «موتور استرلینگ گرم» و موتور استرلینگ سمت راست «موتور استرلینگ خنک‌کننده» نامیده‌اند. قسمت بالایی موتور گرم مشعل است که برای گرم کردن موتور گرم به‌کار گرفته می‌شود و می‌توان از منبع انرژی خورشیدی برای گرم کردن آن استفاده کرد.

هدف از پژوهش پیش رو استفاده از گرمای انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی، زیست‌توده، زمین‌گرمایی، انرژی‌های اتلافی در سیستم‌های حرارتی یا حتی گرمای مازاد صنعتی) و تولید سرما با استفاده از این انرژی است. به‌طور مثال می‌توان سرمای مورد نیاز برای خنک کردن یک واحد منزل مسکونی را از این طریق تأمین کرد. بدین ترتیب که می‌توان از یک آینه متمرکزکننده‌ی خورشیدی به عنوان منبع حرارتی موتور استرلینگ اول استفاده کرد. دمای میانگین متمرکزکننده‌ی خورشیدی طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف در شرکت تحقیق و توسعه‌ی موتور ایران خودرو (ایپکو) در تابستان در ایران 785°C در نظر گرفته می‌شود.

۵. نتایج و بحث

چنان‌که گفته شد، الگوریتم دینامیکی - ترمودینامیکی در گذشته برای گرمایش موتور استرلینگ نوشته و اعتبارسنجی شده است. روابط به کار رفته در این الگوریتم و نتایج حاصل از آن در مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش نیز در مقالات پیشین [۲۹-۳۱] ارائه شده است. با تغییر الگوریتم گرمایشی، الگوریتم جدیدی به دست آمده است که برای حالت سرمایشی استفاده شده است. روابط مورد استفاده در این تحلیل نیز بسیار مشابه روابط به کار رفته در موتور گرم است. نتایج نظری حاصل از این تحقیق با استفاده از یک الگوی دینامیکی

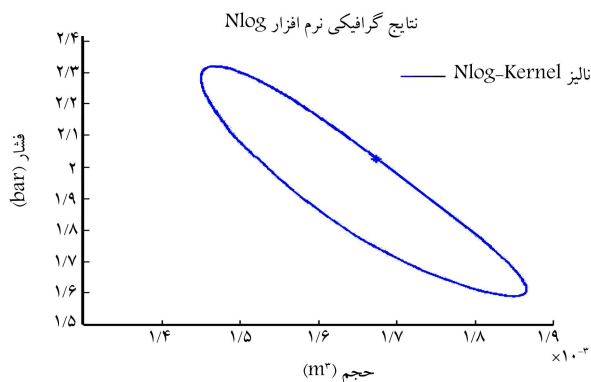


شکل ۳. نمای کولینگ پیشنهادی با استفاده از دو موتور استرلینگ گاما از نوع ST500 جهت تولید سرمایش.

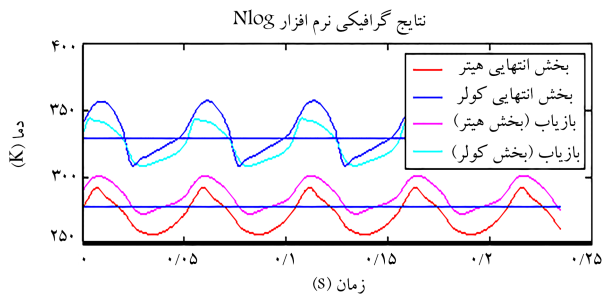
موتور گرم ثابت و برابر دمای متمرکز کننده‌ی نور خورشید باشد و دمای بخش گرم موتور سرد نیز برابر با دمای محیط باشد، محاسبات مکرراً انجام شده است به طوری که بتوان دمای بخش سرد موتور سرد را به ۵ درجه برسانیم. برای رسیدن به این هدف لازم است دمای بخش سرد موتور گرم به حدود ۱۱۰ درجه برسد که این کار را می‌توان با کنترل فرایند خنک کردن موتور گرم انجام داد. تمامی محاسبات فوق بر اساس شرایط محیطی اعمال شده به سیستم و دمای مطلوب ۵ درجه در بخش سرد موتور سرد انجام شده است.

بنابراین موتور دوم (خنک‌کننده) با مقدار کار ۵۵/۳۱ ژول که از طریق موتور اول تأمین می‌شود می‌تواند دمای محیط $T_{L1} = 60^{\circ}C$ را به دمای $T_{Lr} = 5^{\circ}C$ تبدیل کند. نمودار خروجی P-V موتور استرلینگ برای حالت سرمایشی با استفاده از کد مورد نظر مطابق شکل ۵ است.

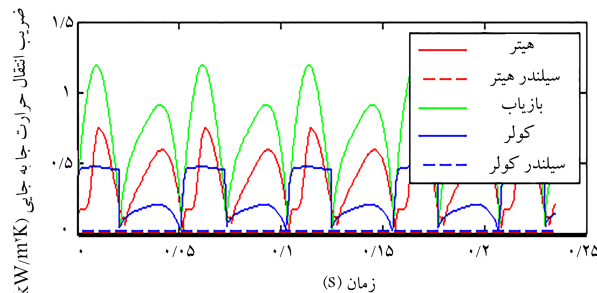
در شکل ۶ الف نمودار تغییرات دما برحسب زمان برای بخش‌های مختلف موتور خنک‌کننده (گرم‌کننده، خنک‌کننده، بخش گرم بازایاب و بخش سرد بازایاب) نشان داده شده است. گرم‌کننده و خنک‌کننده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار خروجی P-V برای موتور استرلینگ دوم (موتور خنک‌کننده).



الف) نمودار تغییرات دما بر حسب زمان برای بخش‌های مختلف موتور خنک‌کننده؛



ب) تغییرات ضریب انتقال حرارت جا به جایی بر حسب زمان برای بخش‌های مختلف موتور خنک‌کننده.

شکل ۶. تغییرات دما و ضریب انتقال حرارت در موتور خنک‌کننده.

ترمودینامیکی جدید که برای حالت سرمایشی نوشته شده به دست آمده است.

شماتیک کوپلینگ موتور در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل موتور سمت چپ موتور گرم نام‌گذاری شده که با دریافت انرژی گرمایی از منبع حرارتی مثل خورشید ایجاد کار می‌کند. در سمت راست نیز موتور استرلینگ دیگری مشاهده می‌شود که موتور خنک‌کننده نام‌گذاری شده است. این موتور کار را دریافت کرده و تولید سرما می‌کند.

با این فرض که از یک متمرکز کننده‌ی خورشیدی برای گرم کردن موتور استرلینگ گرم استفاده می‌شود، دمای بخش ورودی موتور اول را براساس نتایج آزمایشگاهی حاصل، برابر دمای کانون متمرکز کننده‌ی خورشیدی در نظر گرفته‌ایم که برابر $T_{H1} = 785^{\circ}C$ است. همچنین برای موتور دوم فرض بر این است که دمای محیط (مثلاً در شهر اهواز) $T_{L1} = 60^{\circ}C$ است و قصد داریم دمای یک محفظه را به $T_{Lr} = 5^{\circ}C$ برسانیم. با توجه به این دماها کد مربوط به حالت گرمایشی برای موتور اول (موتور گرم) و کد مربوط به حالت سرمایشی برای موتور دوم (موتور خنک‌کننده) نیز اجرا شده است.^[۲۹،۲۷] اگر دمای بخش‌های مختلف سیستم را چنین فرض کنیم:

$$T_{H1} = 785^{\circ}C, T_{Hr} = 110^{\circ}C$$

$$T_{L1} = 60^{\circ}C, T_{Lr} = 5^{\circ}C$$

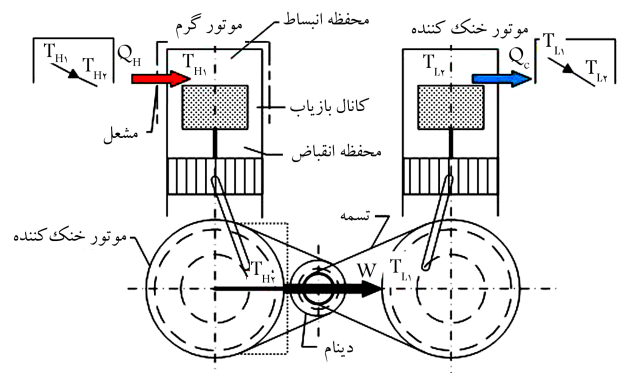
مقدار بازده و خروجی کار و توان برای موتور اول (موتور گرم) عبارت خواهد بود از:

$$Efficiency = 60.896\%, Work = 55.31J$$

با توجه به دمای بخش‌های مختلف داده شده برای موتور دوم (موتور خنک‌کننده) مقدار بازده، کار و توان برای این حالت نیز عبارت است از:

$$Efficiency = 22.525\%, Work = -55.321J$$

چنان‌که مشاهده می‌شود کار خروجی از موتور اول تقریباً برابر با کار ورودی به موتور دوم است. این بدان معناست که موتور اول کار مورد نیاز برای موتور دوم را با توجه به این تغییر دما تأمین می‌کند. لازم به ذکر است که مقدار مفروض برای $T_{Hr} = 110^{\circ}C$ را بعد از چندین بار اجرای کد برای دماهای مختلف به دست آورده‌ایم. البته این مقدار با توجه به این که دمای بخش گرم ۷۸۵ درجه است و با این فرض که سامانه‌ی کوپل شده در شرایط محیطی جنوب ایران استفاده می‌شود، عددی منطقی و مناسب است. به عبارت دیگر با این فرض که دمای بخش گرم



شکل ۴. شماتیک کوپلینگ دو موتور استرلینگ از نوع ST50 جهت تولید سرما از گرما.

شده و سپس با توجه به دمای هدف ۵ درجه سانتی‌گراد، حالت بهینه به دست آمده است. در شکل ۷ نیز ورودی و خروجی‌های مورد استفاده در نرم‌افزار Nlog و نیز متغیرهای ورودی در این شکل نشان داده شده است. لازم به ذکر است که می‌توان در نرم‌افزار Nlog سایر پارامترهای موتور را نیز تغییر داد، اما چون پارامترهای هندسی و سایر مشخصات موتور در این تحقیق یکسان است نیازی به تغییر این پارامترها در شبیه‌سازی آزمایش پیش رو نیست.

۶. نتیجه‌گیری

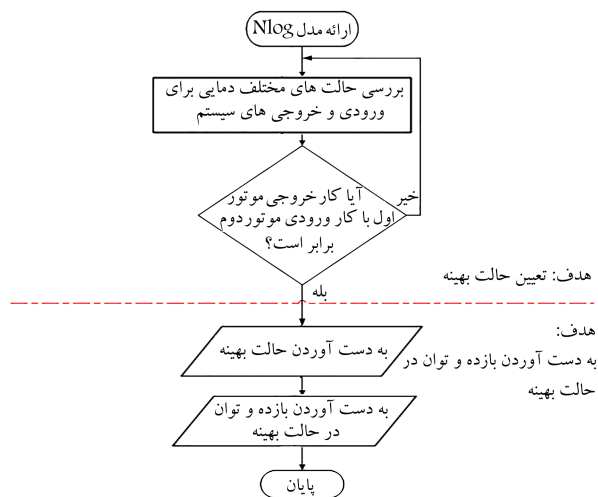
در این پژوهش دو موتور استرلینگ ST50° از نوع گاما برای تولید سرما با یکدیگر کوپل شده‌اند. موتور استرلینگ اول (گرم) با استفاده از انرژی خورشیدی و از طریق یک متمرکزکننده نور خورشید، گرم شده است؛ در نتیجه با توجه به چرخه‌ی موتور، چرخ طیار موتور اول به حرکت درمی‌آید. سپس با استفاده از تسمه این حرکت چرخشی به چرخ طیار موتور استرلینگ دوم (خنک‌کننده) منتقل می‌شود. با توجه به این که چرخه‌ی استرلینگ در جهت عکس تولید سرما می‌کند، موتور استرلینگ دوم در اینجا سرما تولید می‌کند.

در این نوشتار برای ساختار ارائه شده، با استفاده از کدی که قبلاً توسط نویسندگان برای موتور استرلینگ نوشته شده است، تحلیل و شبیه‌سازی‌ها انجام شده است. با فرض این که کار خروجی از موتور اول (موتور گرم) به‌طور کامل به موتور دوم منتقل شود، مقدار کار ورودی به موتور دوم (موتور خنک‌کننده) دقیقاً برابر با کار تولیدی موتور اول فرض شد. نتایج شبیه‌سازی‌های نشان می‌دهد که برای شرایط عملکردی مشروح، مقدار کار خروجی از موتور گرم برابر با ۵۵/۳۱ ژول و کار ورودی مورد نیاز موتور خنک‌کننده ۵۵/۳۲۱ - ژول است تا بتوان دمای محیطی ۶۰ درجه را به دمای مطلوب ۵ درجه رساند. اعداد مفروض در این مقاله بر اساس داده‌های واقعی حاصل از آزمایش‌ها و مقادیر واقعی موجود برای شهرهای جنوبی ایران در نظر گرفته شده است. بنابراین چنین سامانه‌ی در فصل تابستان در شهری مانند اهواز با دمای محیط حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد قادر خواهد بود با یک آینه‌ی متمرکزکننده‌ی خورشیدی، دمای مناسب ۵°C را برای نگه‌داری مواد غذایی تأمین کند.

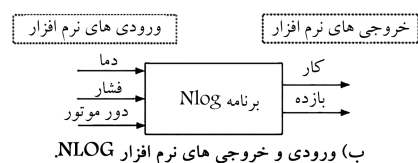
هدف این نوشتار صرفاً معرفی سازوکار تبدیل گرما به سرما با استفاده از دو موتور استرلینگ کوپل شده و ارائه‌ی نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی برای دمای خروجی ۵°C است. همچنین این مطالعه قابل توسعه برای دماهای پایین‌تر با استفاده از روش ذکر شده است. از جمله مزایای یخچال استرلینگ امکان دست‌یابی به دماهای پایین است و بنابراین برای کاربردهای دمایی می‌تواند بسیار مناسب باشد.

منابع (References)

- Mekhilef, S., Saidur, R. and Safari, A. "A review on solar energy use in industries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(4), pp. 1777-1790 (2011).
- Kongtragool, B. and Wongwises, S. "A review of solar-powered stirling engines and low temperature differential stirling engines", *Renewable and Sustainable Energy Re-*



الف) دیگرام روند شبیه‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر؛



ب) ورودی و خروجی های نرم افزار NLOG.

شکل ۷. فلوجارت شبیه‌سازی و نحوه‌ی کاربرد برنامه Nlog.

چنان‌که مشاهده می‌شود، دمای بخش گرم‌کننده کم‌تر از دمای بخش خنک‌کننده است. از آن‌جا که موتور استرلینگ در این پژوهش به‌عنوان خنک‌کننده مود استفاده قرار گرفته است، گرم‌کننده نقش «خنک‌کننده» و خنک‌کننده نقش «گرم‌کن» را دارد. چون دو بخش خنک‌کننده و گرم‌کننده توسط یک جابه‌جاگر به یکدیگر مرتبط‌اند، دما در این دو بخش به یک شکل تغییر می‌کند و کم یا زیاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ الف مشاهده می‌شود، دمای بخش‌های مختلف ابتدا افزایش پیدا می‌کند و سپس به دلیل جابه‌جایی جابه‌جاگر و افت فشار، دما کاهش می‌یابد. در شکل ۶ ب تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برحسب زمان نشان داده شده است. افزایش سطح یکی از عوامل تأثیرگذار بر افزایش ضریب انتقال حرارت است و پس از گذشت مدت زمان مشخص به دلیل کاهش سطح مؤثر ضریب انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. همین روند در طول آزمایش ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۷ الف مراحل انجام شده در پژوهش حاضر نشان داده شده است. چنان‌که در نمودار توضیح داده شده، ابتدا چند حالت برای شبیه‌سازی در نظر گرفته

views, **7**(2), pp. 131-154 (2003).

- Puech, P. and Tishkova, V. "Thermodynamic analysis of a stirling engine including regenerator dead volume", *Renewable Energy*, **36**(2), pp. 872-878 (2011).
- Kirkconnell, C., Hon, R., Perella, M. and et al. "Development of a miniature stirling cryocooler for LWIR small satellite applications", in *Tri-Technology Device Refrigeration (TTDR) II*, International Society for Optics and Photonics (2017).

5. Kaufmann, A. and Ylinen, H. "Preliminary thermodynamic design of a stirling cooler for mobile air conditioning systems: Technical report", Seinajoki University of Applied Sciences (2015).
6. Tsoutsos, T., Gekas, V. and Marketaki, K. "Technical and economical evaluation of solar thermal power generation", *Renewable Energy*, **28**(6), pp. 873-886 (2003).
7. Scarpete, D. and Uzuneanu, K. "Stirling engines in generating heat and electricity for micro-CHP systems", in *Proceedings of the 11th WSEAS international conference on robotics, control and manufacturing technology, and 11th WSEAS international conference on Multimedia systems & signal processing*. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) (2011).
8. Ahmadi, M.H., Sayyaadi, H., Mohammadi, A.H. and et al. "Thermo-economic multi-objective optimization of solar dish-Stirling engine by implementing evolutionary algorithm", *Energy Conversion and Management*, **73**, pp. 370-380. (2013).
9. Cinar, C. and et al. "Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure", *Applied Energy*, **81**(4), pp. 351-357 (2005).
10. Tlili, I., Timoumi, Y. and Nasrallah, S.B. "Analysis and design consideration of mean temperature differential stirling engine for solar application", *Renewable Energy*, **33**(8), pp. 1911-1921 (2008).
11. Katooli, M.H., Askari Moghadam, R. and Hajinezhad, A. "Simulation and experimental evaluation of stirling refrigerator for converting electrical/mechanical energy to cold energy", *Energy Conversion and Management*, **184**, pp.83-90 (2019).
12. Chen, W.-L., Wong, K.-L. and Chen, H.-E. "An experimental study on the performance of the moving regenerator for a γ -type twin power piston stirling engine", *Energy Conversion and Management*, **77**, pp. 118-128 (2014).
13. Yousefi, H. and et al. "A Review of the criteria for locating of solar power plants in iran", *Geospatial Engineering Journal*, **8**(2), pp. 25-38 (2017).
14. Thombare, D.G. and Verma, S.K. "Technological development in the stirling cycle engines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**(1), pp. 1-38 (2008).
15. Wang, X., Zhu, J. Chen, S. Dai, W. and et al. "Study on a high capacity two-stage free piston Stirling cryocooler working around 30 K", *Cryogenics*, **80**, pp. 193-198 (2016).
16. Veprik, A., Vilenchik, H. Riabzev, S. and et al. "Micro-miniature linear split Stirling cryogenic cooler for portable infrared imagers", in *Infrared Technology and Applications XXXIII*, International Society for Optics and Photonics (2007).
17. Lean, S., Yuanyang, Z., Liansheng, L. and et al. "Performance of a prototype stirling domestic refrigerator", *Applied Thermo Engineering*, **29**(2-3), pp. 210-215, (2009).
18. Xu, Y., Sun, D., Qiao, X. and et al. "Operating characteristics of a single-stage Stirling cryocooler capable of providing 700W cooling power at 77K", *Cryogenics*, **83**, pp. 78-84 (2017).
19. Hooshang, M., Toghyani, S. Kasaeian, A. and et al. "Enhancing and multi-objective optimising of the performance of stirling engine using third-order thermodynamic analysis", *International Journal of Ambient Energy*, **39**(4), pp. 382-391 (2018).
20. Kadri, Y. and Abdallah, H.H. "Performance evaluation of a stand-alone solar dish stirling system for power generation suitable for off-grid rural electrification", *Energy Conversion and Management*, **129**, pp. 140-156 (2016).
21. Obernberger, I., Carlsen, H. and Biedermann, F. "State of the art and future developments regarding small scale biomass CHP systems with a special focus on ORC and Stirling engine technologies", in *Proceedings International Nordic Bioenergy Conference*, Jyväskylä, Finland. Citeseer, (2003).
22. Li, R. and Grosu, L. "Parameter effect analysis for a stirling cryocooler", *International Journal of Refrigeration*, **80**, pp. 92-105 (2017).
23. Ahmed, H., Almajri, A.K., Mahmoud, S. and et al. "CFD modelling and parametric study of small scale Alpha type Stirling Cryocooler", *Energy Procedia*, **142**, pp. 1668-1673 (2017).
24. Wang, X., Dai, W. Zhu, J. and et al. "Design of a two-stage high-capacity stirling cryocooler operating below 30K", *Physics Procedia*, **67**, pp. 518-523 (2015).
25. Mehrpooya, M., Sharifzadeh, M.M.M. and Katooli, M.H. "Thermodynamic analysis of integrated LNG regasification process configurations", *Progress in Energy and Combustion Science*, **69**, pp. 1-27 (2018).
26. Hajinezhad, A. and Katooli, M.H. "Thermodynamical analysis of dry cooling tower and solar chimney power plant combination", *International Journal of Ambient Energy*, pp. 1-7 (2018).
27. Hooshang, M., Askari Moghadam, R. Nia, S.A. and et al. "Optimization of stirling engine design parameters using neural networks", *Renewable Energy*, **74**, pp. 855-866 (2015).
28. Hooshang, M., Askari Moghadam, R. and AlizadehNia, S. "Dynamic response simulation and experiment for gamma-type Stirling engine", *Renewable Energy*, **86**, pp. 192-205 (2016).
29. Hooshang, M., Askari Moghadam, R. Tale Masouleh, M. and et al. "Dynamic-thermodynamic mathematical model of stirling engine to improve efficiency and power", *The Journal of Engine Research*, **23**(23), pp. 72-85 (2011).