



## مدل سازی سیستم تولید همزمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ از دیدگاه مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی

محمود چهارطاقی<sup>1\*</sup>، محمد شیخی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

\* شاهرود، صندوق پستی 3619995161، chahartaghi@shahroodut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 تیر 1396

پذیرش: 02 مهر 1396

ارائه در سایت: 05 آبان 1396

کلید واژگان:

سیستم تولید همزمان گرمایش و برق

موتور استرلینگ

تحلیل آدیاباتیکی

نرم افزار متلب

جی پی یو 3

### چکیده

در این مقاله به مدل سازی سیستم تولید همزمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ پرداخته شده است. سیستم مورد بررسی متشکل از یک موتور استرلینگ نوع بتا به عنوان محرک اولیه، سیستم بازیافت حرارت، ژنراتور برق و بویلر کمکی می باشد. تحلیل بکار برده شده در مورد موتور استرلینگ، تحلیل آدیاباتیکی غیرایده آل می باشد. برای افزایش دقت مدل سازی، تلفات اصطکاکی و حرارتی موتور استرلینگ نسبت به تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار گرفته و تحلیل آدیاباتیکی غیرایده آل با استفاده از کد عددی توسعه داده شده در نرم افزار متلب، انجام شده است. برای اعتبار سنجی مدل، از مشخصات هندسی و عملکردی موتور استرلینگ جی پی یو 3 استفاده شده و نتایج با نتایج آزمایشگاهی و سایر مدل های گذشته مورد مقایسه قرار گرفته است. سپس یک موتور استرلینگ نوع بتا به عنوان محرک اولیه سیستم تولید همزمان جهت کاربردهای ساختمانی پیشنهاد شده است. استفاده از سیستم های تولید همزمان در کاربردهای ساختمانی وقتی متداول تر می شود که سیستم از لحاظ میزان مصرف سوخت و انتشار آلاینده گی در مقایسه با سیستم های تولید انرژی سنتی، مزیت قابل توجهی داشته باشد. بدین منظور تاثیر فرکانس موتور، طول بازیاب و دمای منبع گرم روی درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده گی سیستم مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر مناسب برای پارامترهای طراحی موتور، انتخاب شده است. در نهایت توان الکتریکی و حرارتی به ترتیب برابر با 11263 W و 21653 W و درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده گی به ترتیب برابر با 37% و 42% نسبت به سیستم های متداول تولید انرژی حاصل شدند.

## Modeling of combined heating and power system driven by Stirling engine from the perspective of the fuel consumption and pollution emission

Mahmood Chahartaghi\*, Mohammad Sheykhi

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

\* P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, chahartaghi@shahroodut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 July 2017

Accepted 24 September 2017

Available Online 27 October 2017

Keywords:

Combined heating and power CHP

Stirling engine

Adiabatic analysis

MATLAB software

GPU-3

### ABSTRACT

In this paper the modeling of combined heat and power (CHP) system driven by Stirling engine has been discussed. The system consists of one beta type Stirling engine as the prime mover, heat recovery system, power generator and the auxiliary boiler. The analysis of the Stirling engine is a non-ideal adiabatic analysis. To increase the accuracy of modeling, the frictional and thermal losses of Stirling engine are considered in comparison with other previous studies and the non-ideal adiabatic analysis is performed using a developed numerical code in MATLAB software. For model validation, the operational and geometrical specification of the GPU-3 Stirling engine was used and the results were compared with experimental results and other previous models. Then, one beta-type Stirling engine was proposed as prime mover in cogeneration system for building applications. The use of the cogeneration systems in building applications has become more common, which, from the perspective of the fuel consumption and pollution emission, has a significant advantage in comparison with the other conventional systems. For this purpose, the effects of engine frequency, regenerator length, and heat source temperature on fuel consumption and pollution emission of system were examined and proper engine design parameters were selected. Finally, the electric power and thermal power were achieved 11263 W and 21653 W, respectively, with reduction in fuel consumption and pollution emission of 37% and 42%, respectively.

### 1- مقدمه

به شمار می آیند [1]. همچنین این سیستم ها راه حلی شناخته شده برای حل مشکلات قرن حاضر نظیر کاهش راندمان حرارتی، افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده های زیست محیطی سیستم های متداول تولید انرژی می باشند.

سیستم های تولید همزمان، شکلی از تولید پراکنده انرژی برای تامین گرما و برق و یک جایگزین مناسب و یا مکمل برای سیستم های متداول تولید انرژی

Please cite this article using:

M. Chahartaghi, M. Sheykhi, Modeling of combined heating and power system driven by Stirling engine from the perspective of the fuel consumption and pollution emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 207-216, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

دادند که توان و راندمان خروجی حاصل از این مدل برای موتور جی پی یو 3 دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می باشد. بابالهی و صیادی [12]، تحلیل سیمپل کار اوربیلی و برکوویچ [8]، را توسعه دادند و برای اولین بار اثرات تلفات حرارتی شاتل<sup>7</sup> و ناشی گاز در موتور را به یک فرم دیفرانسیلی به معادلات دیفرانسیل آدیاباتیک اضافه کردند. از این رو معادلات دیفرانسیل تحلیل آدیاباتیک اوربیلی و برکوویچ [8]، تصحیح شد و با در نظرگیری افت فشار در مبدل های حرارتی اثرات ترمودینامیک سرعت محدود و تلفات حرارتی در بازباب، مدل سیمپل<sup>2</sup> را ارائه کردند. در تحلیلی دیگر بابالهی و صیادی [13]، فرایند انبساط و تراکم در موتور استرلینگ را به صورت فرایند پلی تروپیک غیرایده آل<sup>9</sup> در نظر گرفتند. در این مدل فرایند انبساط و تراکم پلی تروپیک، جایگزین مدل های هم دما و آدیاباتیک شد و علاوه بر این اثر، افت های حرارتی و اصطکاکی به منظور نزدیک شدن نتایج مدل به نتایج آزمایشگاهی در نظر گرفته شد.

در رابطه با مدل سازی و بهینه سازی سیستم های تولید همزمان با محرک اولیه موتور استرلینگ تحقیقات زیر انجام شده است:

جهانی کلدی و همکاران [14]، یک چرخه تولید همزمان سرمایش، گرمایش و برق بر پایه موتور استرلینگ نوع آلفا برای هشت اقلیم آب و هوایی مختلف ایران پیشنهاد دادند، نتایج نشان داد تولید سالانه آلاینده های زیست محیطی به دلیل استفاده از چرخه پیشنهادی تا حد زیادی کاهش می یابند. ولنتی و همکاران [15]، یک واحد تولید همزمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ برای تولید 8 kW آب گرم و 1 kW توان الکتریکی در فشارهای کاری مختلف موتور به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی قرار دادند. تحلیل به کار رفته در مورد موتور استرلینگ، اصلاح کار اوربیلی و برکوویچ [8]، (تحلیل سیمپل) می باشد. در این تحلیل تلفات هدایت حرارتی بین گرم کن و سردکن و تلفات اصطکاک مکانیکی بین بخش های متحرک موتور هم در نظر گرفته شد. نتایج آزمایشگاهی مدل نشان داد که راندمان و توان الکتریکی سیستم به شدت تحت تاثیر مستقیم فشار اولیه موتور می باشد. کرمی و صیادی [16]، به بهینه سازی ظرفیت سیستم تولید همزمان سه گانه با محرک موتور استرلینگ برای چهار اقلیم آب و هوایی مختلف ایران به کمک سه تابع هدف: صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش تولید آلاینده ها و صرفه جویی در هزینه های کل سالانه پرداختند. تحلیل به کار رفته در مورد موتور استرلینگ ترکیب مدل آدیاباتیک و سرعت محدود در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که سیستم مورد نظر در آب و هوای خیلی گرم و مرطوب پیشنهاد نمی شود. فریرا و همکاران [17]، به توسعه یک مدل حرارتی سیستم تولید همزمان گرما و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ در مقیاس کوچک با منبع گرمایی خورشیدی پرداختند، تحلیل به کار برده شده در مورد موتور استرلینگ تحلیل سیمپل اوربیلی و برکوویچ [8]، می باشد. آن ها نشان دادند که افت فشار جریان گاز در مبدل های حرارتی موتور استرلینگ در فرکانس های عملکردی بالا، باعث کاهش مقدار زیادی از توان و راندمان خروجی سیستم خواهد شد. دمیرچی و همکاران [18]، از یک موتور استرلینگ گاما جهت تولید همزمان گرما و برق در مقیاس کوچک استفاده کردند. در فشارهای کمتر از 1 MPa توان خروجی موتور به روش آزمایشگاهی و با تحلیل اشمیت مقایسه شد. نتایج آزمایشگاهی و تحلیل اشمیت در فشارهای کم، با هم تطابق خوبی داشتند.

در این مقاله یک سیستم تولید همزمان گرمایش و برق با محرک اولیه

سیستم های تولید همزمان، سیستم هایی هستند که به کمک یک محرک اولیه، به تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف کننده در نزدیکی محل مصرف می پردازند، در نتیجه تلفات موجود در انتقال و توزیع برق را کاهش می دهند و از قسمتی از حرارت اتلافی سیستم، برای تامین نیازهای گرمایشی استفاده می کنند. این کار باعث بالا رفتن راندمان این گونه از سیستم ها شده است. در حال حاضر یکی از رایج ترین محرک های این سیستم ها، موتورهای احتراق داخلی می باشند که مزایایی از جمله سادگی تنظیمات و پایین بودن هزینه های تعمیر و نگهداری را دارند، اما این موتورها معایبی از قبیل محدودیت در راندمان حرارتی، امکان استفاده تنها از بعضی سوخت های فسیلی و انتشار آلاینده گی نسبتا زیاد نیز خواهند داشت [2]. موتور استرلینگ یک موتور حرارتی با منبع حرارت خارجی می باشد. این موتور از نظر تئوری به دلیل داشتن راندمان حرارتی نزدیک به سیکل کارنو<sup>1</sup>، نسبت به موتورهای حرارتی دیگر، راندمان بالاتری دارد [3]. همچنین این موتورها دارای سر و صدای کم، امکان استفاده از تمامی سوخت های فسیلی، زیست توده<sup>2</sup> (مانند تراشه های چوب)، هسته ای و انرژی خورشیدی جهت فراهم کردن منبع گرمایی می باشند [4]. از سویی دیگر موتور استرلینگ جهت تولید قدرت، مقدار قابل توجهی گرما را از دست می دهد که می توان از این گرمای تلف شده جهت مقاصد سودمندی استفاده نمود. از این رو، سیستم های تولید همزمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ اخیرا مورد توجه علاقه مندان زیادی قرار گرفته است. با توجه به مطالب طرح شده و اهمیت مدل سازی موتور استرلینگ در سیستم های تولید همزمان، تحقیقات فراوانی در زمینه مدل سازی و بهینه سازی موتور استرلینگ انجام شده است:

در زمینه تحلیل و مدل سازی عملکرد موتور استرلینگ اولین تحلیل ترمودینامیکی توسط اشمیت [5]، انجام شد. در این مدل، دمای محفظه ی تراکم با سردکن و دمای محفظه انبساط با گرم کن برابر و ثابت در نظر گرفته شد و تحلیل هم دما ارائه شد. با استفاده از فرضیات اشمیت محاسبات اولیه برای اندازه گیری توان و راندمان حرارتی موتور به سادگی صورت گرفت. در سیکل واقعی موتور استرلینگ مخصوصا در فرکانس های بالا، فرایندهای تراکم و انبساط به حالت آدیاباتیک بیشتر از هم دما تمایل دارند [6]. فینکلشتاین [7]، محفظه های تراکم و انبساط را به صورت آدیاباتیک در نظر گرفت. در این تحلیل دمای گاز در طی فرایند تراکم و انبساط تغییر می کند و گرم کن و سردکن به صورت هم دما در نظر گرفته شده اند. اوربیلی و برکوویچ [8]، نظریه آدیاباتیک را کامل تر کردند، در این مدل معادلات دیفرانسیل حاکم بر محفظه ها به صورت عددی با روش رانج کوتاه حل شد و به منظور بهبود پیش بینی حل عددی، اثرات افت فشار اصطکاکی جریان گاز در بازباب، اثر بازیابی غیر ایده آل در بازباب و تصحیح دمای گاز داخل گرم کن و سردکن را در نظر گرفتند و روشی به نام روش سیمپل<sup>3</sup> ارائه کردند. تیمومی و همکاران [9]، مدل آدیاباتیک شبه پایدار<sup>4</sup> ارائه کردند که اثرات افت فشار و تلفات حرارتی در قسمت های مختلف موتور در نظر گرفته شد. ضیاء بشرحق و محمودی [10]، به مدل سازی عددی موتور استرلینگ جی پی یو 3<sup>5</sup> با تحلیل آدیاباتیک و در نظرگیری افت های هدایت خارجی، داخلی و افت فشار بازباب پرداختند. آن ها در یافتند که این تلفات حرارتی و اصطکاکی به طور قابل توجه باعث کاهش توان خروجی و راندمان حرارتی موتور می گردند. حسین زاده و صیادی [11]، مدل ترکیب آدیاباتیک و سرعت محدود<sup>6</sup> را ارائه کردند، آن ها نشان

<sup>1</sup> Carnot

<sup>2</sup> Biomass

<sup>3</sup> Simple

<sup>4</sup> Quasi-Steady

<sup>5</sup> Ground Power Unit (GPU-3)

<sup>6</sup> Combined Adiabatic-Finite Speed (CAFS)

<sup>7</sup> Shuttle

<sup>8</sup> Simple II

<sup>9</sup> Polytropic analysis of Stirling engine with Various Losses (PSVL)



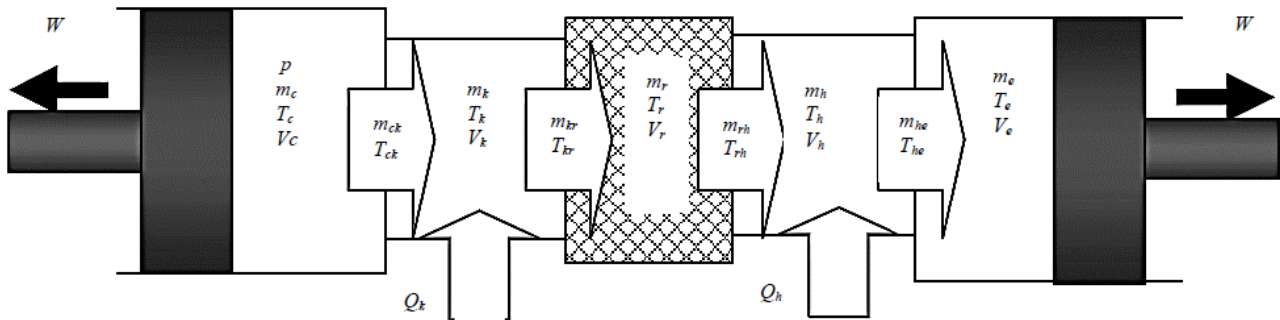


Fig. 2 Schematic model for five compartments of the Stirling engine [10]

شکل 2 نمایش مدل پنج حجمی موتور استرلینگ [10]

فرایند انبساط و تراکم آدیاباتیکی فرض شود.  
 • نشستی گاز، افت فشار و تلفات حرارتی در هیچ یک از قسمت‌های موتور وجود ندارد.  
 • دمای گاز داخل گرم‌کن و سردکن با دمای بدنه‌ی گرم‌کن و سردکن برابر و ثابت باشد.  
 • بازتاب حرارتی ایده‌آل فرض شود.  
 • گاز عامل داخل موتور ایده‌آل فرض گردد.

به دلیل این که فرایند انبساط و تراکم موتور استرلینگ آدیاباتیکی فرض می‌شود، دما در طی فرایند انبساط و تراکم در محفظه انبساط و تراکم ثابت نیست و تغییر می‌کند. در نهایت با در نظرگیری فرضیات ذکر شده معادلات آدیاباتیکی ایده‌آل (1) تا (15) حاصل می‌گردد [8,20,21].  
 معادله فشار:

$$p = \frac{MR}{\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_{ck}}{T_{ck}} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e}} \quad (1)$$

در معادله (1)،  $p$  فشار داخل موتور برحسب پاسکال (Pa)،  $M$  جرم کل گاز عامل برحسب کیلوگرم (kg)،  $R$  ثابت جهانی گاز برحسب (kJ/kgK) و  $V$  نشان‌دهنده حجم در سایر قسمت‌های موتور برحسب (m<sup>3</sup>) می‌باشند. همچنین اندیس‌های  $c, r, h, e$  به ترتیب نشان‌دهنده: محفظه تراکم، سردکن، بازتاب، گرم‌کن و محفظه انبساط می‌باشند.  
 معادله تغییرات فشار:

$$dp = \frac{-\gamma p \left( \frac{dV_c}{T_{ck}} + \frac{dV_e}{T_{he}} \right)}{\frac{V_c}{T_c} + \gamma \left( \frac{V_{ck}}{T_{ck}} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} \right) + \frac{V_e}{T_{he}}} \quad (2)$$

در معادله (2)،  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه،  $T$  دما برحسب کلون (K) و پسوندهای دوگانه نشان‌دهنده محل تداخل پنج حجم کنترل می‌باشند.  
 معادلات جرم:

$$dm_c = \frac{p dV_c + V_c \frac{dp}{\gamma}}{RT_{ck}} \quad (3)$$

$$m_i = \frac{pV_i}{RT_i}, i = k, r, h \quad (4)$$

$$m_e = M - (m_c + m_k + m_r + m_h) \quad (5)$$

$$dm_i = \frac{m_i dp}{p}, i = k, r, h \quad (6)$$

$$m_{ck} = -dm_c \quad (7)$$

$$m_{kr} = m_{ck} - dm_k \quad (8)$$

$$m_{rh} = m_{kr} - dm_r \quad (9)$$

$$m_{he} = m_{rh} - dm_h \quad (10)$$

شرایط مرزی:

اگر  $m_{ck} > 0$  در این صورت:  $T_{ck} = T_c$ ، در غیر این صورت:

$$T_i = \frac{pV_i}{Rm_i}, i = e, c \quad (11)$$

معادلات انرژی:

$$dQ_k = \frac{V_k dp C_v}{R} - C_p (T_{ck} m_{ck} - T_{kr} m_{kr}) \quad (12)$$

$$dQ_r = \frac{V_r dp C_v}{R} - C_p (T_{kr} m_{kr} - T_{rh} m_{rh}) \quad (13)$$

$$dQ_h = \frac{V_h dp C_v}{R} - C_p (T_{rh} m_{rh} - T_{he} m_{he}) \quad (14)$$

$$dW = p(dV_e + dV_c) \quad (15)$$

در معادلات (12) تا (15)،  $Q_k, Q_r, Q_h$  و  $W$  به ترتیب: گرمای دفع شده در سردکن، گرمای مبادله شده در بازتاب، گرمای جذب شده در گرم‌کن و کار خالص خروجی موتور در شرایط تحلیل آدیاباتیکی ایده‌آل می‌باشند.

### 3-2- معادلات تلفات اصطکاکی و حرارتی

در این بخش تلفات اصطکاکی و حرارتی در سایر قسمت‌های موتور استرلینگ معرفی می‌شوند.

#### 3-2-1- افت فشار در مبدل‌های حرارتی

اصطکاک به دلیل جریان سیال در مبدل‌های حرارتی (بازتاب، گرم‌کن و سردکن) باعث افت فشار و کاهش توان خروجی موتور می‌گردد. افت فشار جریان با استفاده از ضریب اصطکاک که با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد محاسبه می‌گردد. افت فشار در مبدل‌های حرارتی از رابطه (16) محاسبه می‌شود [8,10,22].

$$dp_i = \frac{2f_i \mu V_i G L_i}{m_i d_i^2}, i = r, h, k \quad (16)$$

در رابطه (16)،  $f$  ضریب اصطکاک،  $\mu$  لزجت گاز عامل برحسب (kg/m.s)،  $V$  حجم مبدل حرارتی برحسب (m<sup>3</sup>)،  $G$  جریان جرم گاز برحسب (kg/m<sup>2</sup>.s)،  $L$  طول مبدل حرارتی برحسب متر (m)،  $m$  جرم گاز برحسب (kg) و  $d_r$  قطر هیدرولیکی مبدل حرارتی برحسب متر (m) می‌باشند.

ضریب اصطکاک بازتاب، گرم‌کن و سردکن به ترتیب از روابط (17) و (18) حاصل می‌گردد:

$$f_r = 54 + 1.43 \text{Re}^{0.78} \quad (17)$$

$$f_i = 0.0791 \text{Re}^{0.75}, i = h, k \quad (18)$$

افت فشار کل در مبدل‌های حرارتی از رابطه (19) محاسبه می‌گردد:

(NTU) از رابطه (30) حاصل می‌شود:

$$NTU = \frac{St \times A_{wg}}{2A} \quad (30)$$

$A_{wg}$  مقدار سطح تر شده شبکه فلزی بازیاب در برخورد با گاز عامل می‌باشد. عدد استانتون از رابطه (31) قابل محاسبه می‌باشد [8].

$$St = \frac{0.46 \times Re^{-0.4}}{Pr} \quad Pr = 0.7 \quad (31)$$

### 3-2-5- هدایت حرارتی طولی در بازیاب

بازیاب از لحاظ فیزیکی بین گرم‌کن و سردکن قرار گرفته است، اختلاف دمای این دو مبدل حرارتی باعث می‌شود که مقدار حرارت قابل توجهی به صورت ناخواسته با مکانیزم هدایت از بدنه خارجی بازیاب تلف گردد. اتلاف حرارت ناشی از هدایت بدنه خارجی بازیاب از رابطه (32) محاسبه می‌گردد [10].

$$Q_{wrloss} = \frac{kA}{L_r} (T_{wh} - T_{wk}) \quad (32)$$

$k$  ضریب هدایت حرارتی بدنه خارجی بازیاب بر حسب (W/mK)،  $A$  سطح مقطع موثر انتقال حرارت هدایتی بازیاب بر حسب ( $m^2$ )،  $L_r$  طول بازیاب بر حسب متر (m)،  $T_{wh}$  و  $T_{wk}$  دمای بدنه گرم‌کن و سردکن بر حسب درجه حرارت کلونین (K) می‌باشد.

### 3-2-6- اثر شاتل

پیستون جابجا بین محفظه گرم و سرد موتور در حال جابه‌جایی می‌باشد به این دلیل مقداری گرما را از محفظه گرم دریافت کرده و آن را به محفظه سرد انتقال می‌دهد. این اتلاف حرارت به اثر شاتل معروف است و توسط رابطه (33) تعریف می‌شود [19, 22].

$$Q_{sh} = \frac{0.45^2 k_g D_a}{J L_a} (T_e - T_c) \quad (33)$$

$k_g$  ضریب هدایت حرارتی گاز عامل بر حسب (W/mK) و  $J$ ،  $D_a$ ،  $S$  و  $L_a$  به ترتیب کورس پیستون جابجایی، قطر پیستون جابجایی، فاصله حلقوی میان پیستون جابجایی و سیلندر و طول پیستون جابجایی بر حسب متر (m) می‌باشند. همچنین  $T_e$  و  $T_c$  به ترتیب دما در محفظه انبساط و تراکم بر حسب درجه حرارت کلونین (K) است.

با در نظرگیری تلفات حرارتی ذکر شده، حرارت واقعی جذب شده توسط گرم‌کن ( $Q_{ach}$ ) و حرارت واقعی دفع شده در سردکن ( $Q_{ack}$ ) به ترتیب طبق روابط (34) و (35) حاصل می‌شوند:

$$Q_{ach} = (Q_h \cdot fr) + Q_{rloss} + Q_{wrloss} + Q_{sh} \quad (34)$$

$$Q_{ack} = (Q_k \cdot fr) + Q_{rloss} + Q_{wrloss} + Q_{sh} \quad (35)$$

راندمن حرارتی موتور استرلینگ با تحلیل آدیباتیک ایده‌آل و آدیباتیک غیرایده‌آل به ترتیب طبق روابط (36) و (37) تعریف می‌شوند [8].

$$\eta_{adi} = \frac{W}{Q_h} \quad (36)$$

$$\eta_{ac} = \frac{P_{ac}}{Q_{ach}} \quad (37)$$

### 3-2-7- تصحیح دمای گاز داخل گرم‌کن و سردکن

در حالت واقعی دمای گاز داخل گرم‌کن و سردکن با دمای بدنه گرم‌کن و سردکن برابر نخواهد بود و بایستی برای بالا رفتن دقت مدل به درستی تعیین گردند. دمای واقعی گاز داخل گرم‌کن و سردکن از رابطه (38) و (39) تصحیح می‌شود [8].

$$T_{gh} = T_h - \frac{Q_{ach}}{h_h A_{wh}} \quad (38)$$

$$dp = dp_r + dp_h + dp_k \quad (19)$$

توان از دست رفته به دلیل اصطکاک جریان سیال در مبدل‌های حرارتی، برحسب وات (W) از رابطه (20) به دست می‌آید.  $fr$  فرکانس عملکردی موتور برحسب هرتز (Hz) می‌باشد.

$$P_{floss} = \left( \int dp \cdot dv_e \right) \cdot fr \quad (20)$$

### 3-2-2- اصطکاک مکانیکی در اثر حرکت پیستون

افت توان مکانیکی در اثر حرکت پیستون در سیلندر برای موتور استرلینگ جی‌پی‌یو3 توسط مرکز تحقیقاتی ناسا لوئیس به صورت آزمایشگاهی برحسب فرکانس عملکردی و فشار متوسط موتور در چند نقطه برای دو گاز عامل هلیوم و هیدروژن منتشر شده است [19]. تغییرات افت توان به دست آمده خطی بوده و با گذراندن یک معادله خط از روی نقاط، معادلات (21) و (22) حاصل می‌شوند:

$$P_{mech loss} = (0.0168 f_r + 0.17) \cdot 1000 \quad (21)$$

$$P_{mech loss} = (0.0123 f_r + 0.236) \cdot 1000 \quad (22)$$

روابط (21) و (22) به ترتیب افت توان مکانیکی در اثر حرکت پیستون برای موتور استرلینگ جی‌پی‌یو3 برحسب وات (W)، برای گازهای هلیوم و هیدروژن در فشار متوسط 2.76 MPa در فرکانس‌های مختلف می‌باشند.

### 3-2-3- اثر ترمودینامیک سرعت محدود

براساس اصول ترمودینامیک سرعت محدود، فشار روی پیستون در طی فرآیند تراکم از تمامی نقاط دیگر بیشتر و همچنین فشار روی پیستون در طی فرآیند انبساط از سایر نقاط کمتر می‌باشد. در نتیجه کار انبساطی کاهش و کار تراکمی افزایش می‌یابد و در نهایت کار کل کاهش خواهد یافت. افت توان به دلیل اثر ترمودینامیک سرعت محدود به صورت معادله (23) بیان می‌گردد [12].

$$P_{w loss} = \left[ \int \pm \left( p \frac{aw}{c} \right) dv \right] \cdot fr \quad (23)$$

در رابطه (23) علامت مثبت برای فرآیند تراکم و علامت منفی برای فرآیند انبساط است.  $w$  سرعت حرکت پیستون برحسب (m/s) و  $a$  و  $c$  از روابط (24) و (25) به دست می‌آید:

$$a = \sqrt{3\gamma} \quad (24)$$

$$c = \sqrt{3RT} \quad (25)$$

در نهایت با در نظرگیری تلفات اصطکاکی ذکر شده، کل توان اتلافی و توان واقعی خروجی موتور برحسب وات (W) به ترتیب از روابط (26) و (27) محاسبه می‌گردد:

$$P_{tloss} = P_{floss} + P_{mech loss} + P_{w loss} \quad (26)$$

$$P_{ac} = (W \times fr) - P_{tloss} \quad (27)$$

### 3-2-4- اثر بازیابی غیرایده‌آل

در بازیاب غیرایده‌آل، گرمای ذخیره شده توسط بازیاب در زمان انتقال گاز از محفظه انبساط به محفظه تراکم به دلیل هدایت خارجی بازیاب، به گاز عامل در زمان برگشت به طور کامل پس داده نمی‌شود. بنابراین برای بازیاب، پارامتر ضریب تاثیر بازیاب ( $\varepsilon$ ) را در نظر می‌گیرند حرارت اتلافی در اثر بازیابی غیرایده‌آل از رابطه (28) حاصل می‌گردد [8].

$$Q_{rloss} = (1 - \varepsilon) \times (Q_{rmax} - Q_{rmin}) \cdot fr \quad (28)$$

ضریب تاثیر بازیاب از رابطه (29) به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{NTU + 1} \quad (29)$$

اثرات بازیاب غیرایده‌آل با استفاده از تعداد واحدهای انتقال دهنده

$$CO_2ER = \left( \frac{mCO_2^{SP} - mCO_2^y}{mCO_2^{SP}} \right) \cdot 100 \quad (46)$$

#### 5- روش حل و معتبر سازی

جهت تشریح روش حل و معتبر سازی تحلیل موتور استرلینگ، ابتدا به تشریح مدل آدیاباتیکی ایده آل پرداخته می شود، سپس در مرحله بعد با در نظرگیری تلفات اصطکاکی و حرارتی، تشریح مدل آدیاباتیکی غیر ایده آل انجام می شود و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مرکز تحقیقاتی ناسا لوئیس [19] و سایر نتایج تحقیقات گذشته، در شرایط کاری مختلف مورد مقایسه قرار می گیرد.

#### 5-1- روش حل و معتبر سازی مدل آدیاباتیکی ایده آل

روش حل معادلات (1) تا (15)، (معادلات دیفرانسیل آدیاباتیکی ایده آل موتور استرلینگ) روش مقدار اولیه می باشد [10]. بدین ترتیب با قرار دادن مشخصات هندسی و عملکردی موتور در کد عددی توسعه داده شده در نرم افزار متلب، ابتدا شرایط اولیه موتور در  $\theta = 0$  تعیین می گردد، سپس با انتخاب گام زاویه ای مناسب، تغییرات حجم در محفظه تراکم و انبساط و فشار لحظه ای در هر زاویه چرخش موتور محاسبه می شود. در ادامه با استفاده از معادلات جرم و معادله دما، دما در محفظه های تراکم و انبساط در طول چرخش موتور تعیین می گردد و سپس کار خالص، گرمای دفع شده در سردکن و گرمای جذب شده در گرمکن در طی 360 درجه چرخش موتور به دست آمده و این مراحل با جایگذاری مقادیر فشار و دمای محفظه تراکم و انبساط در  $\theta = 360$  به جای زاویه  $\theta = 0$  دوباره تکرار می شود، در صورت اینکه فشار لحظه ای در طی دو تکرار متوالی تغییر نکند (با ارضای شرط همگرایی) این نتایج پذیرفته می شوند.

برای معتبر سازی مدل آدیاباتیکی ایده آل، از مشخصات هندسی و عملکردی موتور استرلینگ جی پی یو 3 استفاده می شود (جدول 1 و 2). در "شکل 3" موتور جی پی یو 3 نشان داده شده است. این موتور استرلینگ از نوع بتا می باشد که پیستون قدرت و جابه جا در یک سیلندر واقع شده است، حرکت دو پیستون در این موتور بر مبنای مکانیزم لوزی شکل است، گرمکن و سردکن از نوع مبدل های حرارتی فشرده می باشند [13]. نتایج به دست آمده از حل عددی مدل آدیاباتیکی ایده آل در "شکل 4" نشان داده می شود. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج منتشر شده توسط اوریلی و برکوویچ [8] و سایر تحقیقات گذشته در حالت آدیاباتیکی ایده آل نشان دهنده صحت مدل سازی صورت گرفته است (جدول 3).

نتایج مدل آدیاباتیکی ایده آل این مطالعه با سایر نتایج مدل های آدیاباتیکی ایده آل در جدول 3، دارای مقدار کمی اختلاف است، که می تواند ناشی از در نظر گرفتن شرایط هندسی و عملکردی متفاوت در مدل سازی آدیاباتیکی ایده آل موتور جی پی یو 3 باشد.

نتایج حل مدل آدیاباتیکی ایده آل با نتایج آزمایشگاهی دارای اختلاف زیادی می باشد به این دلیل برای دستیابی به حل دقیق تر بایستی تلفات اصطکاکی و حرارتی را به حل آدیاباتیکی ایده آل اضافه نمود (جدول 3).

#### 5-2- روش حل و معتبر سازی مدل آدیاباتیکی غیر ایده آل

نتایج حل مدل آدیاباتیکی ایده آل با نتایج آزمایشگاهی دارای اختلاف زیادی می باشد (جدول 3)، به این دلیل برای دستیابی به حل دقیق تر بایستی تلفات اصطکاکی و حرارتی را به حل آدیاباتیکی ایده آل اضافه نمود. برای تحلیل آدیاباتیکی غیر ایده آل موتور، ابتدا تحلیل آدیاباتیکی ایده آل با فرض برابر بودن دمای گاز داخل گرمکن و سردکن با دمای بدنه ی گرمکن و سردکن انجام

$$T_{gk} = T_k - \frac{Q_{ack}}{h_k A_{wk}} \quad (39)$$

در روابط (38) و (39)،  $T_k$  و  $T_h$  دمای گاز داخل گرمکن و سردکن در تحلیل آدیاباتیکی،  $T_{gk}$  و  $T_{gh}$  دمای گاز داخل گرمکن و سردکن بر حسب درجه حرارت کلین (K)،  $h_k$  و  $h_h$  ضریب انتقال حرارت جابه جایی داخل گرمکن و سردکن بر حسب  $(W/m^2K)$  و  $A_{wk}$  و  $A_{wh}$  سطوح انتقال حرارت گرمکن و سردکن به گاز عامل بر حسب  $(m^2)$  می باشند. رابطه ضریب انتقال حرارت جابه جایی داخل گرمکن و سردکن از رابطه (40) حاصل می شود [8].

$$h_{h,k} = \frac{0.0791 \mu_{h,k} \cdot C_p \cdot Re_{h,k}^{0.75}}{2 D_{h,k} \cdot Pr} \quad (40)$$

$Re_{h,k}$ ،  $C_p$ ،  $D_{h,k}$  قطر هیدرولیکی بر حسب متر (m)، گرمای ویژه در فشار ثابت گاز عامل بر حسب  $(kJ/kgK)$  و عدد رینولدز جریان داخل گرمکن و سردکن می باشند.

#### 4- تحلیل میزان صرفه جویی و آلاینده گی

در این قسمت روابط میزان درصد کاهش مصرف سوخت و درصد کاهش انتشار آلاینده ی دی اکسید کربن سیستم تولید همزمان گرمایش و برق در مقایسه با سیستم های سنتی جهت تولید برق، گرمایش آورده شده است.

برای محاسبه درصد کاهش مصرف سوخت، ابتدا میزان سوخت مصرفی توسط سیستم تولید همزمان گرمایش و برق جهت تامین انرژی مورد نیاز و مقدار سوخت مصرف شده توسط سیستم سنتی جهت تولید همان میزان انرژی، با استفاده از روابط (41) و (42) محاسبه می شوند [23].

$$F_y = Q_{ach} \quad (41)$$

$$F^{SP} = \frac{P_{EL}}{\eta_e^{SP}} + \frac{Q_{ack}}{\eta_t^{SP}} \quad (42)$$

$F_y$  و  $F^{SP}$  به ترتیب میزان سوخت مصرفی بر حسب کیلوژول بر ثانیه برای سیستم تولید همزمان و سیستم تامین انرژی سنتی می باشد. همچنین  $\eta_e^{SP}$  و  $\eta_t^{SP}$  به ترتیب راندمان حرارتی نیروگاه تولید برق و راندمان بویلر مورد استفاده در سیستم های تامین انرژی سنتی می باشند. همچنین در رابطه (42)،  $P_{EL}$  توان الکتریکی سیستم تولید همزمان می باشد که از حاصل ضرب توان مکانیکی خروجی موتور در راندمان ژنراتور ( $\eta_g$ ) به دست می آید.

میزان درصد کاهش مصرف سوخت در سیستم های تولید همزمان نسبت به سیستم سنتی تامین انرژی به صورت رابطه (43) محاسبه می شود [23].

$$PES = \left( \frac{F^{SP} - F_y}{F^{SP}} \right) \cdot 100 \quad (43)$$

جهت محاسبه درصد کاهش انتشار آلاینده گی دی اکسید کربن در سیستم تولید همزمان در مقایسه با سیستم سنتی تامین انرژی، ابتدا جرم دی اکسید کربن خروجی از سیستم تولید همزمان جهت تامین انرژی مورد نیاز ساختمان و جرم دی اکسید کربن خروجی از سیستم تامین انرژی سنتی برای تامین همان مقدار انرژی، طبق روابط (44) و (45) محاسبه می گردد [23].

$$mCO_2^y = \mu CO_2^F F_y \quad (44)$$

$$mCO_2^{SP} = \mu CO_2^W (P_{EL}) + \frac{\mu CO_2^F (Q_{ack})}{\eta_t^{SP}} \quad (45)$$

$mCO_2^y$  و  $mCO_2^{SP}$  به ترتیب جرم دی اکسید کربن منتشر شده توسط سیستم تولید همزمان و سنتی می باشند. همچنین  $\mu CO_2^W$  و  $\mu CO_2^F$  به ترتیب شاخص انتشار آلاینده دی اکسید کربن برای گاز طبیعی و برق شبکه می باشند.

میزان درصد کاهش انتشار آلاینده دی اکسید کربن در سیستم تولید همزمان در مقایسه با سیستم سنتی تامین انرژی به صورت رابطه (46) محاسبه می گردد [23].

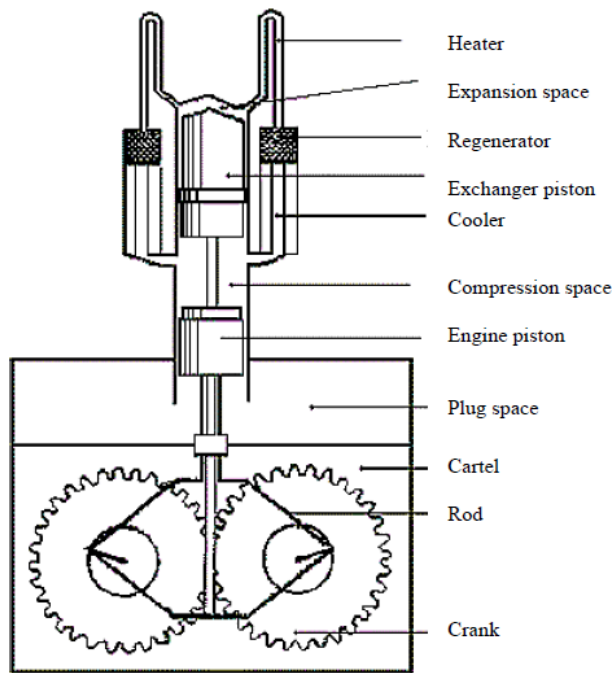


Fig. 3 GPU-3 Stirling engine [9]

شکل 3 موتور استرلینگ جی پی یو 3 [9]

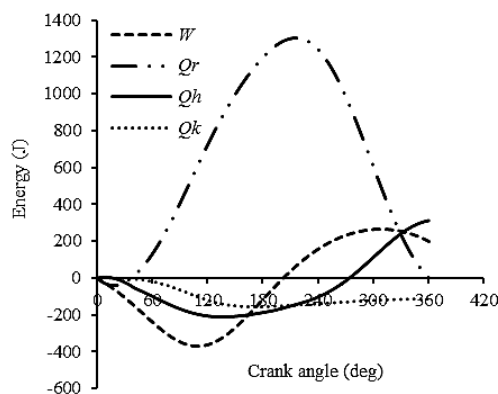


Fig. 4 Results of the numerical solution of ideal adiabatic analysis

شکل 4 نتایج حاصل از حل عددی مدل آدیاباتیک ایده آل

جدول 3 مقایسه نتایج حاصل از مدل آدیاباتیک ایده آل با سایر نتایج تحقیقات گذشته

Table 3 Compare the results obtained in ideal adiabatic model with other previous research results

| $\eta(\%)$ | $P(W)$ | $Q_h(W)$ |                       |
|------------|--------|----------|-----------------------|
| 62.5       | 8300   | 13280    | اوریلی [8]            |
| 62.06      | 8286.7 | 13352.72 | تیمومی [9]            |
| 62.6       | 8279   | 13223    | ضیاء بشرحق [10]       |
| 63.53      | 8242.8 | 12974.65 | تحقیق حاضر            |
| 21.3       | 2650   | 12441.31 | نتایج آزمایشگاهی [19] |

در این قسمت برای معتبرسازی مدل آدیاباتیک غیرایده آل، از مشخصات هندسی موتور استرلینگ جی پی یو 3 استفاده شده و نتایج مدل، با نتایج آزمایشگاهی [19] و سایر مدل های ارائه شده در شرایط عملکردی مختلف برای موتور استرلینگ جی پی یو 3 مورد مقایسه قرار گرفته است. در "شکل های 5 و 6" به ترتیب توان خروجی و راندمان حرارتی مدل این مطالعه (مدل آدیاباتیک غیرایده آل) با گاز عامل هلیوم در فشار 2.76 MPa و دمای

جدول 1 مشخصات هندسی موتور جی پی یو 3 [8]

Table 1 The geometrical specification of the GPU-3 engine [8]

| واحد              | مقدار        | مشخصه هندسی موتور                 |
|-------------------|--------------|-----------------------------------|
| cm <sup>3</sup>   | 28.68        | فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم  |
| cm <sup>3</sup>   | 30.52        | فضای خالی (حجم مرده) محفظه انبساط |
| cm <sup>3</sup>   | 113.14       | حجم جابه جایی محفظه تراکم         |
| cm <sup>3</sup>   | 120.82       | حجم جابه جایی محفظه انبساط        |
| mm                | 46           | طول میله اتصال دهنده              |
| mm                | 13.8         | شعاع لنگ                          |
| mm                | 20.8         | خروج از مرکز                      |
| mm                | 69.9         | قطر پیستون توان                   |
| mm                | 69           | قطر پیستون جابجایی ( $D_d$ )      |
| mm                | 37           | طول پیستون جابجایی ( $L_d$ )      |
| mm                | 31.2         | کورس پیستون جابجایی ( $S$ )       |
| mm                | 69.9         | قطر داخلی سیلندر                  |
| مشخصه های گرم کن  |              |                                   |
| —                 | 40           | تعداد لوله ها                     |
| mm                | 3.02         | قطر داخلی لوله                    |
| mm                | 245.3        | طول لوله ( $L_h$ )                |
| cm <sup>3</sup>   | 70.88        | حجم مرده ( $V_h$ )                |
| مشخصه های سردکن   |              |                                   |
| —                 | 312          | تعداد لوله ها                     |
| mm                | 1.09         | قطر داخلی لوله ها                 |
| mm                | 46.1         | طول لوله ( $L_k$ )                |
| cm <sup>3</sup>   | 13.8         | حجم مرده ( $V_k$ )                |
| مشخصه های باز یاب |              |                                   |
| mm                | 22.6         | قطر                               |
| mm                | 22.6         | طول ( $L_r$ )                     |
| $\mu\text{m}$     | 40           | قطر سیم                           |
| —                 | 0.697        | تخلخل                             |
| —                 | 8            | تعداد                             |
| $\frac{W}{m\ K}$  | 15           | هدایت حرارتی باز یاب ( $k$ )      |
| cm <sup>3</sup>   | 50.55        | حجم مرده ( $V_r$ )                |
| —                 | فولاد ضد زنگ | جنس                               |

جدول 2 مشخصات عملکردی موتور جی پی یو 3 [8]

Table 2 Operational specification of the GPU-3 engine [8]

| واحد | مقدار  | پارامتر عملکردی موتور  |
|------|--------|------------------------|
| —    | هلیوم  | گاز عامل               |
| K    | 977    | دمای منبع گرم (گرم کن) |
| K    | 288    | دمای منبع سرد (سردکن)  |
| MPa  | 4.13   | فشار گاز عامل          |
| gr   | 1.1362 | جرم گاز عامل           |
| Hz   | 41.72  | فرکانس عملکردی موتور   |

می شود، سپس تلفات حرارتی و اصطکاکی وارد کد عددی شده و از رابطه (38) و (39) دمای گاز داخل گرم کن و سردکن اصلاح می گردد. در ادامه کد عددی با دمای اصلاح شده گاز داخل گرم کن و سردکن دوباره تکرار می شود. این تکرار تا زمانی انجام می شود که اختلاف دمای گاز اصلاح شده گرم کن و سردکن در طی دو تکرار متوالی کمتر از 1 K باشد [21]، پس از ارضای این شرط، خروجی کد عددی مورد قبول می باشد.



نظریه کامل تر تلفات اصطکاکی و حرارتی دارای دقت بهتری نسبت به مدل پلی تروپیک غیرایده آل بوده و در فرکانس های بالاتر، خطای مدل حاضر بیشتر می شود (شکل 6).

راندان حرارتی در تحقیقات گذشته با افزایش فرکانس، به صورت خطی کاهش می یابد در نتیجه مدل های قبلی، با تغییر فرکانس قادر به تعیین نقطه بهینه برای راندان حرارتی نمی باشند و فقط در کمترین فرکانس، راندان حرارتی بیشترین مقدار خود را خواهد داشت (شکل 6). مدل این مطالعه به دلیل در نظر گیری تلفات اصطکاکی و حرارتی به صورت کامل تر و دقیق تر نسبت به تحقیقات گذشته، قادر به پیش بینی نقطه بهینه با تغییر فرکانس عملکردی موتور می باشد که با نتایج آزمایشگاهی [19] تطابق بهتری نسبت به نتایج تحقیقات گذشته خواهد داشت. به عبارت دیگر مدل حاضر پیش بینی بهتری در خصوص نحوه رفتار سیستم با نتایج آزمایشگاهی را دارد.

در "شکل های 7 و 8" توان خروجی و خطای تخمین توان خروجی حاصل از مدل، برای موتور جی پی یو 3 برای دو گاز عامل هلیوم و هیدروژن در فشار 2.76 MPa و دمای منبع گرم و سرد به ترتیب برابر با 977 K و 288 K در فرکانس های مختلف با نتایج آزمایشگاهی [19] مقایسه شده است.

خطا کسری است که صورت آن قدر مطلق اختلاف مقادیر پیش بینی شده و آزمایشگاهی و مخرج آن مقادیر آزمایشگاهی می باشد. نتایج حاصل از مدل و نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که هیدروژن در شرایط عملکردی مشابه توان خروجی بیشتری نسبت به هلیوم خواهد داشت (شکل 7).

خطای توان خروجی مدل برای موتور جی پی یو 3 با گاز عامل هیدروژن در فرکانس عملکردی 1500 rpm برابر با 37% و برای گاز عامل هلیوم در همین شرایط برابر با 53% می باشد. همچنین با افزایش فرکانس عملکردی موتور به 3500 rpm خطای توان خروجی مدل برای گاز عامل هیدروژن به 68% و برای گاز عامل هلیوم به 286% خواهد رسید (شکل 8). گاز عامل هیدروژن دارای توان خروجی بیشتر و خطای پیش بینی کمتر نسبت به گاز عامل هلیوم به دلیل لزجت کمتر و داشتن ظرفیت حرارتی بالاتر می باشد.

#### 6- نتایج مدل سازی سیستم تولید همزمان

در این قسمت به مدل سازی سیستم تولید همزمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ در شرایط هندسی و عملکردی مختلف از دیدگاه مصرف سوخت و انتشار آلاینده گی دی اکسید کربن پرداخته می شود.

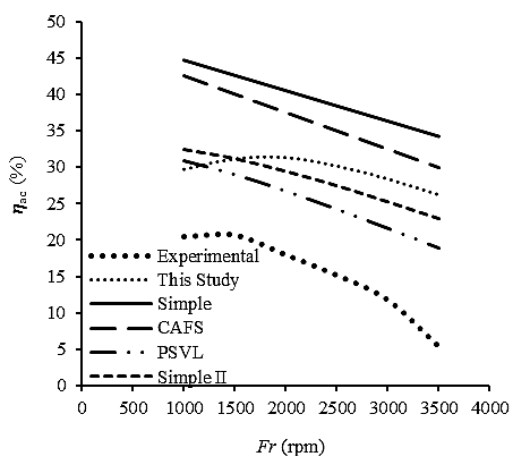


Fig. 6 Comparing thermal efficiency of the current Study with results of previous studies

شکل 6 مقایسه راندان حرارتی مدل حاضر با نتایج تحقیقات گذشته

منبع گرم و سرد به ترتیب برابر با 922 K و 288 K در فرکانس های مختلف با سایر نتایج تحقیقات گذشته مورد مقایسه قرار گرفته است.

مدل این مطالعه در مقایسه با مدل ترکیب آدیاباتیکی و سرعت محدود [11]، به دلیل در نظر گیری روابط آزمایشگاهی تلفات اصطکاکی مکانیکی در اثر حرکت پیستون [19]، در فرکانس های پایین دقت بالاتری در تخمین توان خروجی دارد (شکل 5). برای تخمین راندان حرارتی به دلیل این که در مدل این مطالعه تلفات هدایت حرارتی بازایاب (بین دو منبع گرم و سرد) و اثر شاتل پیستون جابه جا در نظر گرفته شده است، راندان حرارتی حاصل از مدل، از مدل ترکیب آدیاباتیکی و سرعت محدود [11]، به نتایج آزمایشگاهی [19] نزدیک تر می باشد (شکل 6). نتایج تخمین توان خروجی و راندان حرارتی مدل این مطالعه به دلیل در نظر گیری تلفات اصطکاکی مکانیکی در اثر حرکت پیستون، اثر ترمودینامیک سرعت محدود، تلفات حرارتی در اثر شاتل و هدایت حرارتی طولی در بازایاب نسبت به تحلیل سیمپل کار اوربلی و برکوویچ [8]، به نتایج آزمایشگاهی [19] نزدیک تر می باشد.

در مدل سیمپل 2 تلفات حرارتی شاتل به یک فرم دیفرانسیلی به معادلات آدیاباتیکی ایده آل اضافه شده است (شکل 6). در مدل این مطالعه، تلفات حرارتی شاتل به صورت غیر دیفرانسیلی و صریح پس از تحلیل مدل آدیاباتیکی ایده آل، با داشتن دمای متوسط محفظه انبساط و تراکم به مدل آدیاباتیکی ایده آل اضافه می گردد. همچنین در مدل حاضر، در محاسبه تلفات اصطکاکی مکانیکی در اثر حرکت پیستون از روابط دقیق تر نسبت به مدل سیمپل 2 استفاده گردیده و از روابط آزمایشگاهی اصطکاکی مکانیکی در اثر حرکت پیستون [19]، استفاده شده است. در نتیجه در تخمین راندان حرارتی مدل این مطالعه در فرکانس های پایین تر از 1500 rpm دقت بالاتری نسبت به مدل سیمپل 2 [12]، خواهد داشت، اما در فرکانس های بالاتر دقت مدل سیمپل 2 از مدل این مطالعه در تخمین راندان حرارتی بیشتر خواهد بود. در تحلیل پلی تروپیک غیرایده آل [13]، فرآیند انبساط و تراکم پلی تروپیک و غیرایده آل در نظر گرفته شده است، در واقعیت فرایندهای انبساط و تراکم در موتور استرلینگ به فرایند پلی تروپیک در مقایسه با فرایند آدیاباتیکی، نزدیک تر می باشند. به این دلیل مدل توسعه داده شده آدیاباتیکی این مطالعه در تخمین توان خروجی دارای دقت کمتری نسبت به مدل پلی تروپیک غیرایده آل [13] می باشد (شکل 5)، اما در تخمین راندان حرارتی مدل این مطالعه، در فرکانس های پایین تر از 1200 rpm به دلیل در

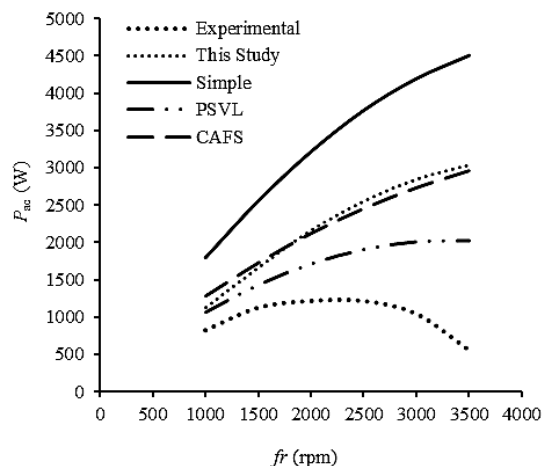


Fig. 5 Comparing output power of the current Study with results of previous studies

شکل 5 مقایسه توان خروجی مدل حاضر با نتایج تحقیقات گذشته



خروجی موتور افزایش یافته و پس از این فرکانس به دلیل این که تلفات اصطکاکی و حرارتی در سایر قسمت‌های موتور به بیشترین مقدار خود خواهد رسید، توان خروجی با افزایش فرکانس، روند نزولی خواهد داشت. همچنین به طور مشابه راندمان حرارتی با افزایش فرکانس از 1000 rpm تا 1500 rpm افزایش خواهد یافت و در فرکانس 1500 rpm، راندمان حرارتی به بیشترین مقدار خود، به 25% خواهد رسید و پس از آن با افزایش فرکانس راندمان حرارتی کاهش می یابد. در "شکل 10" تاثیر فرکانس موتور روی درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده دی اکسید کربن سیستم تولید همزمان در فشار 2.76 MPa و دمای عملکرد منبع گرم و سرد به ترتیب برابر با 866 K و 353 K، نسبت به سیستم‌های متداول تولید انرژی نشان داده شده است.

بخش عظیمی از دلایل افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی سیستم‌های متداول تولید انرژی، به دلیل کاهش راندمان حرارتی و تلفات بخش زیادی از انرژی ورودی به نیروگاه‌ها می باشد. راندمان حرارتی سیستم تولید همزمان گرمایش و برق در فرکانس 1500 rpm برابر با 25% و بیشترین مقدار خود را خواهد داشت. این بدین معنی است که 25% از انرژی ورودی به سیستم تولید همزمان به توان مکانیکی و اکثریت انرژی باقی مانده به صورت حرارت تلف شده از موتور قابل بازیابی و جهت گرمایش ساختمان قابل استفاده می باشد. تغییرات درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی دی اکسید کربن با افزایش فرکانس رفتار مشابهی دارند و در فرکانس 1500 rpm به بیشترین مقدار خود خواهند رسید و در فرکانس‌های بالاتر کاهش می یابند. بیشترین مقدار درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده دی اکسید کربن سیستم تولید همزمان در این حالت به ترتیب برابر با 29.65% و 34.23% خواهد بود. با توجه به نکات ذکر شده فرکانس 1500 rpm برای موتور استرلینگ سیستم تولید همزمان گرمایش و برق پیشنهاد می شود.

افزایش طول بازیاب باعث می شود که افت فشار جریان گاز در بازیاب بیشتر شده و توان خروجی موتور کاهش یابد و از طرفی با افزایش طول بازیاب، مقدار حرارت بازیابی شده بیشتر و تلفات هدایت حرارتی طولی در بازیاب کمتر می شود، در نتیجه گرم کن نیازمند حرارت کمتری خواهد بود. از این رو افزایش طول بازیاب باعث کاهش توان خروجی و به تبع آن کاهش راندمان حرارتی و افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی سیستم تولید همزمان می شود و از سوی دیگر با افزایش طول بازیاب، مقدار حرارت

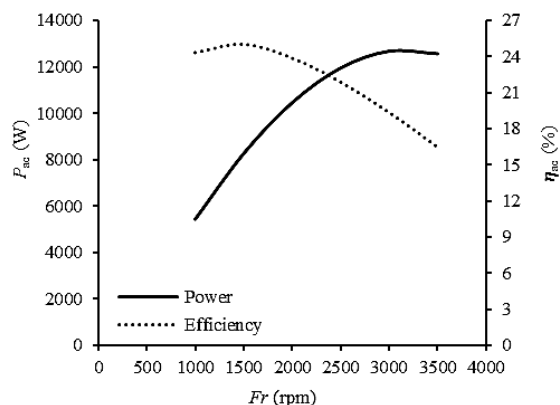


Fig. 9 Influence of the engine frequency on output power and thermal efficiency

شکل 9 تاثیر فرکانس موتور روی توان خروجی و راندمان حرارتی

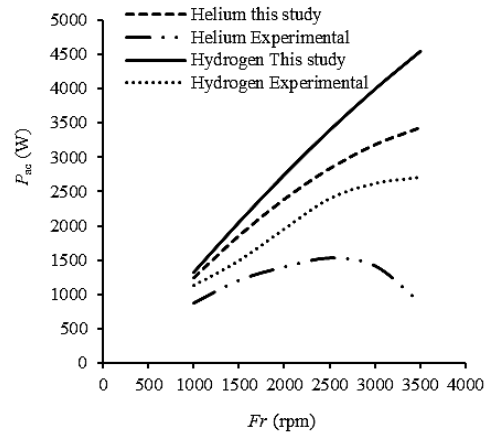


Fig. 7 Comparing output power of the current Study for two working gases of hydrogen and helium, with results experimental

شکل 7 مقایسه توان خروجی مدل حاضر برای دو گاز عامل هیدروژن و هلیوم با نتایج آزمایشگاهی

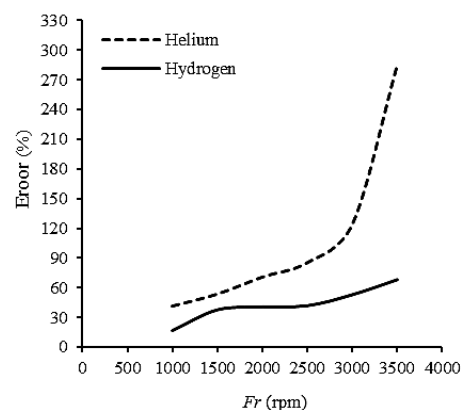


Fig. 8 Comparing output power error of the current Study for two working gases of hydrogen and helium

شکل 8 مقایسه خطای توان خروجی مدل حاضر برای دو گاز عامل هیدروژن و هلیوم

در جدول 4 اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی سیستم آورده شده است.

موتور استرلینگ جی پی یو 3 دارای ابعاد کوچک و توان مکانیکی و حرارتی کمی می باشد و جهت تولید همزمان گرمایش و برق در کاربرد ساختمانی نیاز به استفاده از یک موتور با ابعاد بزرگتر خواهد بود به این دلیل ابعاد طولی موتور جی پی یو 3 به طور یکنواخت به دو برابر افزایش داده می شود. در جدول 5 مشخصات هندسی موتور توسعه داده شده با گاز عامل هیدروژن آورده شده است. در "شکل 9" تاثیر فرکانس موتور روی توان خروجی و راندمان حرارتی موتور استرلینگ سیستم تولید همزمان، در فشار 2.76 MPa و دمای عملکرد منبع گرم و سرد به ترتیب برابر با 866 K و 353 K، نشان داده شده است.

با توجه به "شکل 9" با افزایش فرکانس موتور تا 3000 rpm

جدول 4 متغیرهای ورودی جهت تحلیل درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی [24]

| پارامتر        | مقدار | واحد       |
|----------------|-------|------------|
| $\eta_e^{SP}$  | 0.3   | (-)        |
| $\eta_t^{SP}$  | 0.8   | (-)        |
| $\mu_{CO_2}^F$ | 220   | (gr kWh-1) |
| $\mu_{CO_2}^W$ | 836   | (gr kWh-1) |

جدول 5 مشخصات هندسی موتور استرلینگ نوع بتای توسعه داده شده

| Table 5 The geometrical specification of the developed beta-type Stirling engine |             |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|
| پارامتر هندسی موتور                                                              | مقدار       | واحد                  |
| فضای خالی (حجم مرده) محفظه تراکم                                                 | 229.44      | cm <sup>3</sup>       |
| فضای خالی (حجم مرده) محفظه انبساط                                                | 244.16      | cm <sup>3</sup>       |
| حجم جابه‌جایی محفظه تراکم                                                        | 905.23      | cm <sup>3</sup>       |
| حجم جابه‌جایی محفظه انبساط                                                       | 966.73      | cm <sup>3</sup>       |
| طول میله اتصال دهنده                                                             | 92          | mm                    |
| شعاع لنگ                                                                         | 27.6        | mm                    |
| خروج از مرکز                                                                     | 41.6        | mm                    |
| قطر پیستون توان                                                                  | 139.8       | mm                    |
| قطر پیستون جابجایی ( $D_d$ )                                                     | 138         | mm                    |
| طول پیستون جابجایی ( $L_d$ )                                                     | 74          | mm                    |
| کورس پیستون جابجایی ( $S$ )                                                      | 62.4        | mm                    |
| قطر داخلی سیلندر                                                                 | 139.8       | mm                    |
| مشخصه‌های گرم‌کن                                                                 | —           | —                     |
| تعداد لوله‌ها                                                                    | 40          | —                     |
| قطر داخلی لوله                                                                   | 6.04        | mm                    |
| طول لوله ( $L_h$ )                                                               | 490.6       | mm                    |
| حجم مرده ( $V_h$ )                                                               | 562.27      | cm <sup>3</sup>       |
| مشخصه‌های سردکن                                                                  | —           | —                     |
| تعداد لوله‌ها                                                                    | 312         | —                     |
| قطر داخلی لوله‌ها                                                                | 2.18        | mm                    |
| طول لوله ( $L_k$ )                                                               | 92.2        | mm                    |
| حجم مرده ( $V_k$ )                                                               | 107.37      | cm <sup>3</sup>       |
| مشخصه‌های بازپای                                                                 | —           | —                     |
| قطر                                                                              | 45.2        | mm                    |
| طول ( $L_r$ )                                                                    | 45.2        | mm                    |
| قطر سیم                                                                          | 80          | $\mu$ m               |
| تخلخل                                                                            | 0.697       | —                     |
| تعداد                                                                            | 8           | —                     |
| هدایت حرارتی بازپای ( $k$ )                                                      | 15          | $\frac{W}{m \cdot K}$ |
| حجم مرده ( $V_r$ )                                                               | 404.41      | cm <sup>3</sup>       |
| جنس                                                                              | فولاد ضدزنگ | —                     |

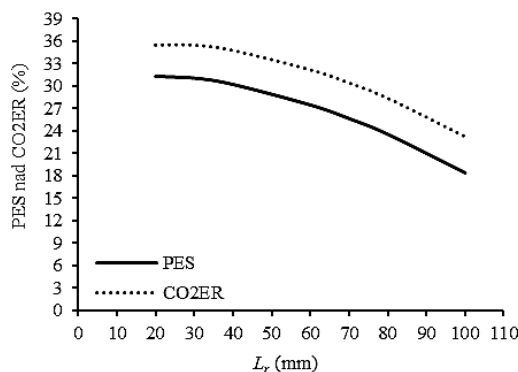


Fig. 11 Influence of the regenerator length on PES and CO2ER

شکل 11 تاثیر طول بازپای روی درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی

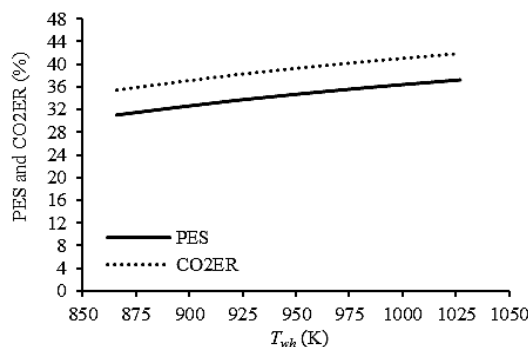


Fig. 12 Influence of the heat source temperature on PES and CO2ER

شکل 12 تاثیر دمای منبع گرم روی درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی

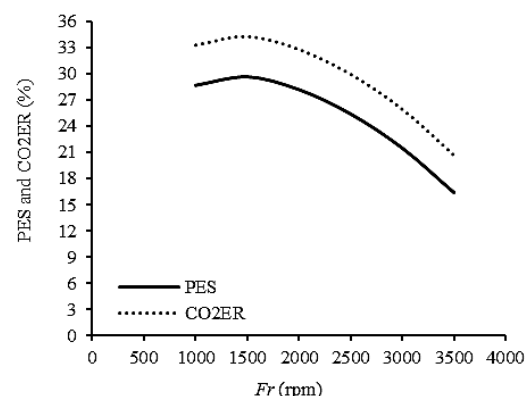


Fig. 10 Influence of the engine frequency on PES and CO2ER

شکل 10 تاثیر فرکانس موتور روی درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی

مورد نیاز در گرم‌کن کاهش یافته و به تبع آن باعث افزایش راندمان حرارتی و کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی سیستم تولید همزمان می‌گردد. به

سیستم‌های متداول تولید انرژی حاصل می‌گردد.

## 7- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم تولید همزمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ نوع بتا جهت کاربردهای ساختمانی پیشنهاد گردید. مدل آدیاباتیکی غیرایده‌آل جهت تحلیل عملکرد موتور استرلینگ با استفاده از کد عددی توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب انجام شد. برای معتبرسازی مدل، از مشخصات هندسی و عملکردی موتور استرلینگ جی‌پی‌یو3 استفاده شد و نتایج با نتایج آزمایشگاهی و سایر مدل‌های گذشته مورد مقایسه قرار گرفت. سپس یک موتور استرلینگ نوع بتا به‌عنوان محرک اولیه سیستم تولید همزمان جهت کاربردهای ساختمانی پیشنهاد گردید. همچنین تاثیر فرکانس موتور، طول بازبای و دمای منبع گرم روی درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی سیستم بررسی شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج پیش‌بینی راندمان حرارتی موتور استرلینگ در تمام تحقیقات گذشته با افزایش فرکانس، به‌صورت خطی کاهش می‌یابد و با تغییر فرکانس قادر به تعیین نقطه بهینه برای راندمان حرارتی نمی‌باشند مدل آدیاباتیکی غیرایده‌آل این مطالعه به‌دلیل در نظرگیری تلفات اصطکاکی و حرارتی به‌صورت کامل‌تر و دقیق‌تر نسبت به تحقیقات گذشته، قادر به پیش‌بینی نقطه بهینه با تغییر فرکانس عملکردی موتور می‌باشد که با نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری نسبت به نتایج تحقیقات گذشته خواهد داشت.
- گاز عامل هیدروژن به دلیل داشتن لزجت کمتر و داشتن ظرفیت حرارتی بالاتر نسبت به هلیوم، در شرایط عملکردی مشابه، دارای توان خروجی بیشتر و خطای تخمین توان خروجی کمتری می‌باشد.
- توان خروجی، راندمان حرارتی، درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی سیستم تولید همزمان مربوطه به شدت به فرکانس عملکردی موتور استرلینگ وابسته است. به‌طوری که با افزایش فرکانس، توان خروجی، راندمان حرارتی، درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی ابتدا افزایش و سپس به دلیل افزایش تلفات اصطکاکی و حرارتی در بخش‌های مختلف موتور کاهش می‌یابند.
- افزایش طول بازبای می‌تواند تاثیر مثبت و منفی در افزایش راندمان حرارتی و به تبع آن درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی سیستم، نسبت به سیستم‌های متداول تولید انرژی داشته باشد.
- با توجه به این‌که افزایش دمای منبع گرم نقش زیادی در افزایش توان خروجی موتور و راندمان حرارتی موتور استرلینگ خواهد داشت، درصد کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌گی به شدت با افزایش دمای منبع گرم افزایش می‌یابد.

## 8- مراجع

- Systems, pp. 1-30, London: Springer, 2015.
- [2] J. Harrod, P. J. Mago, Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by a waste biomass fired Stirling engine, *IMEchE Part C: J. Mechanical Engineering Science*, Vol. 225, No. 1, pp. 420-428, 2010.
- [3] I. Batmaz, S. Ustun, Design and manufacturing of a V-type Stirling engine with double heaters, *Applied Energy*, Vol. 85, No. 11, pp. 1041-1049, 2008.
- [4] S. C. Costa., H. Barrutia, J. A. Esnaola, M. Tutar, Numerical study of the pressure drop phenomena in wound woven wire matrix of Stirling regenerator, *Energy Conversion and Management*, Vol. 67, No. 1, pp. 57-65, 2013.
- [5] G. Schmidt, The theory of Lehmann's calorimetric machine, *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 15, No. 1, 1871.
- [6] Z. Luo, U. Sultan, M. Ni, H. Peng, B. Shi, G. Xiao, Multi-objective optimization for GPU3 Stirling engine by combining multi-objective algorithms, *Renewable Energy*, Vol. 94, No. 1, pp. 114-125, 2016.
- [7] T. Finkelstein, Insights into the thermodynamics of Stirling cycle machines, *Proceeding of 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Monterey, California, pp. 1829-1834, August 7-11, 1994.
- [8] I. Urieli, D. M. Berchowitz, *Stirling Cycle Engine Analysis*, pp. 86-124, Bristol: Adam Hilger LTD, 1984.
- [9] Y. Timoumi, I. Tlili, S. B. Nasrallah, Design and performance optimization of GPU-3 stirling engine, *Energy*, Vol. 33, No. 7, pp. 1100-1114, 2008.
- [10] M. Ziaabasharhagh, M. Mahmoodi, Analysis and optimization of beta-type Stirling engine taking into account the non-ideal regenerator thermal and hydraulic losses effects, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 45-57, 2012. (in Persian)
- [11] H. Hosseinzade, H. Sayyaadi, CAFS: the combined adiabatic-finite speed thermal model for simulation and optimization of stirling engines, *Energy Conversion and Management*, Vol. 91, No. 1, pp. 32-53, 2015.
- [12] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, Simple-II: a new numerical thermal model for predicting thermal performance of Stirling engines, *Energy*, Vol. 69, No. 1, pp. 873-890, 2014.
- [13] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, a new thermal model based on polytropic numerical simulation of Stirling engines, *Applied Energy*, Vol. 141, No. 1, pp. 143-159, 2015.
- [14] B. Jahani Kaldehi, A. Keshavarz, A. Safaei Pirooz, A. Batooei, M. Ebrahimi, Designing a micro Stirling engine for cleaner production of combined cooling heating and power in residential sector of different climates, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 154, No. 1, pp. 502-516, 2017.
- [15] G. Valenti, P. Silva, N. Fergnani, S. Campanari, A. Ravida, G. Marcobberardino, E. Macchi, Experimental and numerical study of a Micro-cogeneration Stirling unit under diverse conditions of the working fluid, *Applied Energy*, Vol. 160, No. 1, pp. 920-929, 2015.
- [16] R. Karami, H. Sayyaadi, Optimal sizing of Stirling-CCHP systems for residential buildings at diverse climatic conditions, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 89, No. 1, pp. 377-393, 2015.
- [17] A. Ferreira, M. Nunes, J. Teixeira, L. Martins, S. Teixeira, Thermodynamic and economic optimization of solar-powered Stirling engine for micro-cogeneration purposes, *Energy*, Vol. 111, No. 1, pp. 1-17, 2016.
- [18] H. Damirchi, G. Najafi, S. Alizadehnia, R. Mamat, W. H. Azmi, M. M. Noor, Micro combined heat and power to provide heat and electrical power using biomass and Gamma-type Stirling engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 103, No. 1, pp. 1460-1469, 2016.
- [19] W. R. Martini, *Stirling Engine Design Manual*, Second Edition, pp. 15-24, Washington: Nasa Lewis Research Center, 1983.
- [20] D. G. Thombare, S. K. Verma, Technological development in the Stirling cycle engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-38, 2008.
- [21] M. Ni, B. Shi, G. Xiao, H. Peng, U. Sultan, S. Wang, Z. Luo, K. Cen, Improved simple analytical model and experimental study of a 100W b-type Stirling engine, *Applied Energy*, Vol. 169, No. 1, pp. 768-787, 2016.
- [22] I. Tlili, Y. Timoumi, S. B. Nasrallah, Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 8, pp. 1911-1921, 2008.
- [23] G. Chicco, P. Mancarella, Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems, Part I: Models and indicators, *Energy*, Vol. 33, No. 3, pp. 410-417, 2008.
- [24] M. Chahartaghi, B. Alizadeh-Kharkeshi, Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by PEM fuel cell at different conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 383-394, 2016. (in Persian)
- [1] G. V. Badea, *Design for Micro-Combined Cooling, Heating and Power*