

## طراحی یک سیستم کنترل قدرت برپایه دما، فشارمتوسط سیکل و سرعت پیستون جابه‌جایی جهت بهبود سرعت پاسخ موتور استرلینگ

علی غفاری<sup>۱</sup>، عباس علی‌آبادی<sup>۲</sup> و مسعود ضیاءبشرحق<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

### چکیده

در موتورهای استرلینگ، علت اصلی کندی عکس‌العمل موتور نسبت به تأمین توان مورد نیاز آن است که تأمین انرژی سیستم به وسیله انتقال انرژی حرارتی از طریق پوسته گرمکن به گاز عامل داخل سیلندر انجام می‌شود. چون انتقال انرژی حرارتی از طریق پوسته به کندی انجام می‌شود، برخلاف اکثر سیستمهای کنترلی، در موتورهای استرلینگ عملکرد سیستم خود دارای بیشترین تأخیر زمانی است. در این مقاله، به منظور افزایش سرعت عکس‌العمل موتور استرلینگ به تغییرات توان مورد نیاز، علاوه بر ورودیهای کنترلی دما و فشار، سرعت پیستون جابه‌جایی نیز در نظر گرفته شده‌است. به این ترتیب، سیستم کنترلی نخست در شرایط دما ثابت، بر اساس توان مورد تقاضا، از جداول سرعت-توان، سرعت مناسب موتور را انتخاب می‌نماید. این سرعت در ابتدا توسط یک موتور الکتریکی کمکی DC تأمین می‌شود. سپس، با مقایسه سیگنال خروجی، توان حاصله با توان مورد نیاز، فرامین کنترلی برای تنظیم فشار و دمای گاز عامل تعیین می‌شوند. در مدل‌سازی موتور استرلینگ فرض ایزوترم بودن فرایند حذف شده است تا رفتار مدل به موتور واقعی نزدیک‌تر باشد. نتایج شبیه‌سازی سیستم مدار بسته با کنترلر طراحی شده نشان‌دهنده افزایش مؤثر سرعت عکس‌العمل موتور است. همچنین، نشان داده شده که سیستم کنترلی در مقابل اغتشاشات خارجی و داخلی نیز مقاوم است. این اغتشاشات به‌صورت تغییر در دمای منبع سرد و تغییر در پارامترهای سیستم اعمال شده‌است. به دلیل ثابت بودن گشتاور موتورهای استرلینگ در محدوده وسیعی از سرعت، در سیستم کنترلی فرض شده راندمان موتور کمتر دستخوش تغییر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: موتور استرلینگ، شبیه‌سازی دینامیکی، کنترل قدرت

## Design of a Control Power System Based on Temperature, Mean Effective Cycle Pressure, and Piston Speed for Speed Response Improvement of Stirling Engines

A. Ghafari, A.B. Aliabadi, and M. Ziabasharhagh  
Mech. Eng. Department, Khajeh-Nasir Toosi Univ. of Tech.

### ABSTRACT

The main reason for the slow response of stirling engine with respect to power requirement supply is that the system energy supply is provided from wall to the working gas inside the cylinder. On contrary to most control systems, in stirling engines, actuator has the highest lag time, since energy transfer from the wall is taking place very slowly. In this article, increasing the reaction speed of stirling engine with respect to the required power is considered. Also, besides the temperature and pressure control inputs, a piston speed is also taken into account. As a result, control system is considered as a constant pressure and based on needed demand, the required parameters are calculated first from power-speed tables. At first, this speed is provided by an auxiliary electrical DC motor. Then, by comparing the output signal with the required output, the controlling commands are specified for pressure and gas temperature adjustments. In stirling engine modeling, the isothermal assumption is eliminated in order to have a real behavior. The simulation of closed loop system and the designed controller show the effective increase in engine response speed. In this article, it is also shown that the control system is resistant, subjected to internal as well as external disturbances. These disturbances are in the form of changes in heat sink and system parameters. Since, torque is considered constant in a large speed interval, the engine efficiency will not be much affected.

Key Word: Stirling Engine, Dynamical Simulatin, Power Control

۱ - دانشیار

۲ - دانشجوی دکترا: ALIABADI @ mut.ac.ir

۳ - استادیار

## فهرست علائم

$R$ : ثابت عمومی گاز داخل سیلندر	$i_1$ : ضخامت مؤثر دیواره منطقه گرم
$T_{ch}$ : دمای شعله با دمای منبع گرم	$K_h$ : ضریب هدایت حرارتی دیواره منطقه گرم
$T_H$ : دمای منطقه گرم موتور	$X_{dh}$ : طول حجم مرده منطقه گرم
$h_{oh}$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی منطقه گرم	$X_{dc}$ : طول حجم مرده منطقه سرد
$h_{ih}$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی داخلی منطقه گرم	$A_d$ : سطح مقطع پیستون جابجایی
$T_C$ : دمای منطقه سرد موتور	$V_{dh}$ : حجم مرده منطقه گرم
$T_{cc}$ : دمای منبع سرد (رادیاتور)	$\dot{q}_c$ : نرخ انتقال حرارت از داخل به خارج منطقه سرد
$h_{oc}$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی منطقه سرد	$A_{cc}$ : سطح مؤثر انتقال حرارت در منطقه سرد
$h_{ic}$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی داخلی منطقه سرد	$i_c$ : ضخامت مؤثر دیواره منطقه سرد
$m_H$ : جرم گاز در منطقه گرم	$K_c$ : ضریب هدایت حرارتی دیواره منطقه سرد
$m_c$ : جرم گاز در منطقه سرد	$C_v$ : ظرفیت حرارتی حجم ثابت گاز داخل سیلندر
$m_f$ : جرم گاز داخل بازیاب	$X_{di}$ : موقعیت پیستون جابجایی
$T_d$ : دمای پیستون جابجایی	$X_{dp}$ : موقعیت پیستون کار
$V_H$ : حجم منطقه گرم	$V_{dc}$ : حجم مرده منطقه سرد
$V_c$ : حجم منطقه سرد	$A_p$ : سطح مقطع پیستون کار
$V_f$ : حجم بازیاب	$P_R$ : فشار محفظه برگشت دهنده (زیرپیستون کار)
$T_f$ : دمای گاز داخل بازیاب	$V_{OR}$ : حجم اولیه محفظه برگشت دهنده
$M$ : جرم کل گاز (سیال عامل)	$P_{OR}$ : فشار اولیه محفظه برگشت دهنده
$\dot{m}$ : نرخ جرم گاز خارج شده از منطقه گرم	$P$ : فشار داخلی موتور
$\dot{q}$ : نرخ گرمای مبادله شده در بازیاب	$\gamma$ : $C_p/C_v$ گاز محفظه برگشت دهنده
$m_d$ : جرم مؤثر پیستون جابجایی	$m_p$ : جرم پیستون کار
$C_p$ : ظرفیت حرارتی فشار ثابت گاز داخل سیلندر	$L_D$ : طول بازیاب یا طول پیستون جابجایی
$C_{pd}$ : ظرفیت حرارتی فشار ثابت پیستون جابجایی	$d$ : قطر بازیاب
$h_d$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل بازیاب	$d_R$ : قطر محور پیستون جابجایی
$R$ : مقاومت حرارتی	$A_R$ : مساحت محور پیستون جابجایی
$\dot{q}_h$ : نرخ انتقال حرارت از خارج به داخل منطقه گرم	$D_p$ : ضریب استهلاک برای پیستون کار
$A_{ch}$ : سطح مؤثر انتقال حرارت در منطقه گرم	$A_{PR}$ : مساحت زیر پیستون کار
	$D_d$ : ضریب استهلاک پیستون جابجایی

## ۱- مقدمه

موتورهای درون سوز، باعث شده که تحقیقات گسترده‌ای برای توسعه فناوری موتورهای استرلینگ و ساخت آنها صورت پذیرد [۵-۶]. استفاده از موتور استرلینگ برای کاربردهای ایستگاهی، به‌ویژه در شرایطی که تغییرات سریع توان مد نظر نباشد، امروزه میسر شده و نمونه‌های صنعتی آن به تولید رسیده‌است [۷-۸]. یکی از معایب موتور استرلینگ کندی عکس‌العمل آنها در مقابل تغییرات سریع توان مورد نیاز است [۹]. تلاشهای فراوانی در سالهای اخیر جهت رفع این نقصه به عمل آمده، ولی توفیق اندکی حاصل شده‌است [۱۰-۱۱]. روشهای معمول اصلاح ساختار کنترلی در مورد موتورهای استرلینگ پاسخ

موتور استرلینگ یک موتور برون سوز است که هر نوع انرژی حرارتی را به انرژی مکانیکی تبدیل میکند [۱-۳]. گرچه ایده اولیه این موتور توسط رابرت استرلینگ در اوائل قرن نوزدهم ارائه گردید [۴]، ولی محدودیتهای مختلف تکنولوژیکی در آن دوره‌ها و ظهور موتورهای احتراق داخلی، مانند دیزل و اتو باعث توقف پیشرفت و توسعه مناسب موتورهای استرلینگ در یک دوره طولانی شد. در چند دهه اخیر، محدودیتهای ناشی از کمبود منابع سوختهای فسیلی به ویژه نفت و توجه جهانی به خطرات زیست محیطی ناشی از فرآیند احتراق در

یک مبدل حرارتی احیاء کننده (بازیاب) نیز در داخل پیستون جابجایی قرار دارد. حرکت پیستون جابجایی در داخل سیلندر توسط موتور الکتریکی، موجب جابجایی گاز عامل از مسیر بازیاب شده و به دلیل تغییر دما، فشار داخلی موتور تغییر می کند. در حالتی که پیستون جابجایی در منطقه سرد قرار دارد، گاز عامل دز تبادل حرارت با گرم کن، انرژی دریافت کرده و فشار داخلی موتور بالا می رود. در این وضعیت، سیلندر کار به طرف پایین رانده شده و سیستم کار انجام می دهد. هنگامی که پیستون جابجایی در منطقه گرم قرار می گیرد، گرمای گاز از طریق کولر به محیط داده شده و فشار داخلی کاهش می یابد. در این وضعیت، فنر گازی بر روی سیستم کار انجام داده و پیستون کارراه موقعت اولیه باز می گرداند. گاز عامل حین عبور از بازیاب که از جنس توری برنجی (به صورت مش) است، گرمای خود را در بازیاب داده و در بازگشت (در حالت ایده ال) این گرما را پس می گیرد. این عمل باعث افزایش راندمان شده و عملکرد موتور را بهبود می بخشد.

### ۳- تحلیل ترمودینامیکی

تحلیل ترمودینامیکی موتور مورد نظر قبلاً بصورت آیزوترم و به منظور ساده سازی معادلات انجام گرفته است [۱۴ و ۱۵]. در این مقاله به منظور بهبود کیفیت مدل ریاضی و نزدیک ساختن رفتار مدل به سیستم واقعی، تحلیل معادله انرژی در مبدل های حرارتی انجام شده و فرض آیزوترم را حذف نموده ایم.

#### ۱-۳- بازیاب

فرآیند عبور گاز از بازیاب موجب ایجاد یک گرادیان دما در بازیاب می شود. باید توجه داشت که چون بازیاب از یک طرف به محفظه گرم و از طرف دیگر به محفظه سرد متصل است، چنانچه در تحلیل ترمودینامیکی جریان انرژی درست انتخاب نشود، شرایط مرزی این مناطق بر یکدیگر تطبیق نمی کنند و به دلیل عدم تطابق معادلات بقای انرژی، حل معادلات دچار مشکل می شود. یک فرض معقول برای رفع این مشکل این است که دمای بازیاب را در تمام طول آن به صورت یکسان و در دمای  $T_d(t)$  که با

مناسب نمی دهند. در طراحی سیستم های کنترلی به طور اصولی فرض می شود که عملگرها، یعنی منابع تأمین انرژی ورودی به سیستم دارای ثابت های زمانی بسیار کوتاهتری از سیستم اصلی هستند. به این خاطر، در سیستم های کنترلی معمولاً عملگرها، را به صورت اجزاء استاتیکی در نظر می گیریم. در مدارهای کنترل بازخورد، نیز، معمولاً بلوک عملگر ظاهر نمی شود و خروجی کنترلر، ورودی به سیستم اصلی است. در موتورهای استرلینگ، تأمین انرژی مورد نیاز سیستم به وسیله انتقال انرژی حرارتی از طریق پوسته گرم کن انجام می شود. عبور انرژی حرارتی از طریق پوسته به گاز عامل داخل سیلندر به کندی انجام می شود و به این ترتیب عملگر سیستم دارای تأخیر زمانی است. به عبارت دیگر از زمان دریافت فرمان کنترلی مبنی بر تغییر توان، علیرغم آنکه عملگر بلافاصله شروع به تغییر انرژی ورودی می نماید ولی بدیهی است تغییر توان به تدریج انجام می شود. در موتورهای احتراق داخلی چون انرژی به صورت انفجاری به سیستم داده می شود. توان نیز به سرعت قابل تغییر است.

موتورهای استرلینگ دارای انواع مختلفی می باشند [۱۲]. یکی از انواع موتورهای تک زمانه استرلینگ با کاربردهای وسیع صنعتی، موتور نوع گاما است. در این موتور با استفاده از یک موتور الکتریکی کمکی و جداسازی پیستون کار از پیستون جابجایی می توان به یک موتور استرلینگ با پیستون نیمه آزاد دست پیدا کرد [۱۳]. این سیستم که نمای شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده است، علاوه بر تبدیل موتور به یک سیستم هایبرید، امکان استفاده مستقیم از حرکت رفت و برگشتی پیستون کار را فراهم می کند که تلفات مکانیکی اصطکاکی کمتری دارد. در این مقاله به منظور بهبود سرعت پاسخ موتور به تغییرات توان مورد نیاز، یک سیستم کنترلی مرکب بر مبنای تنظیم سه عامل دما، فشار و سرعت پیستون جابجایی طراحی و ارائه گردیده است.

#### ۲- نحوه عملکرد موتور

مطابق شکل (۱)، موتور مورد نظر از یک مبدل حرارتی گرم (گرم کن) و یک مبدل حرارتی سرد (کولر) که در دو انتهای سیلندر جابجایی قرار گرفته اند تشکیل شده است.

$$\dot{q} = m_d C_{pd} \frac{dT_d}{dt} \quad (7)$$

برای یک المان  $dX$  از جابه‌جا کننده داریم:

$$d\dot{q} = p_s h_d \left[ T_A + \frac{X}{L_D} (T_B - T_A) - T_d \right] dX, \quad (8)$$

که در آن، با در نظر گرفتن بازیاب به صورت لوله بدون مش،  $p_s dX$  مساحت ماتریس در یک المان  $dX$  است به نحوی که  $p_s = \pi d$  محیط جانبی لوله خواهد بود. لذا، پس از انتگرال گیری داریم:

$$\dot{q} = \pi d h_d \left[ \frac{T_A + T_B}{2} - T_d \right] L_D. \quad (9)$$

با جاگذاری  $\dot{q}$  از معادله (7) در معادله (9) خواهیم داشت:

$$T_d = -\frac{m_d C_{pd} \dot{T}_d}{\pi d L_D h_d} + \frac{T_A + T_B}{2} \quad (10)$$

با جاگذاری  $\dot{q}$  از معادله (7) در معادله (6) داریم:

$$\Rightarrow T_B = -\frac{m_d C_{pd} \dot{T}_d}{\dot{m} C_p} + T_A \quad (11)$$

در نتیجه، با جاگذاری معادله (11) در معادله (10) نتیجه می‌شود:

$$T_d = -\frac{m_d C_{pd} \dot{T}_d}{\pi d L_D h_d} + T_A - \frac{m_d C_{pd} \dot{T}_d}{2 \dot{m} C_p} \quad (12)$$

در فرایند  $\dot{m} > 0$ ، بازیاب از گاز در حال عبور گرما می‌گیرد و لذا  $T_d$  افزایش می‌یابد. و در فرایند  $\dot{m} < 0$ ، بازیاب نسبت به زمان به گاز گرما می‌دهد و لذا  $T_d$  کاهش می‌یابد. بنابراین، در  $\dot{m} < 0$ ، به جای  $T_A - T_B$ ، باید  $T_B - T_A$  قرار دهیم. بنابراین داریم:

$$T_A = T_B + \frac{m_d C_{pd} \dot{T}_d}{\dot{m} C_p}, \quad (13)$$

$$T_d = -\frac{m_d C_{pd} \dot{T}_d}{\pi d L_D h_d} + T_B + \frac{m_d C_{pd} \dot{T}_d}{2 \dot{m} C_p} \quad (14)$$

زمان تغییر می‌کند در نظر بگیریم. هرچه ضریب انتقال حرارت هدایت ماتریس و دیواره به مقدار واحد نزدیک‌تر و یا طول بازیاب کوتاه‌تر باشد، این فرض معقول‌تر است. با توجه به فرض فوق، به سادگی می‌توان دمای بازیاب را در هر قسمت از طول آن، از رابطه زیر به دست آورد [۱۶]:

$$T_r = T_A + \frac{X}{L_D} (T_B - T_A). \quad (1)$$

بدین ترتیب، جرم گاز داخل بازیاب نیز از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\int_0^{m_r} dm = \int_0^{V_r} \frac{P dV_r}{RT_r}, \quad (2)$$

$$m_r = \frac{PV_r \ln \frac{T_B}{T_A}}{R(T_B - T_A)} \quad (3)$$

اکنون با در نظر گرفتن اصل بقا جرم و فرض صحت قانون عمومی گازها، برای مناطق گرم و سرد خواهیم داشت:

$$M = m_H + m_C + m_r, \quad (4)$$

$$P \approx \frac{MR}{\frac{V_H}{T_H} + \frac{V_C}{T_C} + \frac{V_r}{T_B - T_A} \ln \frac{T_B}{T_A}} \quad (5)$$

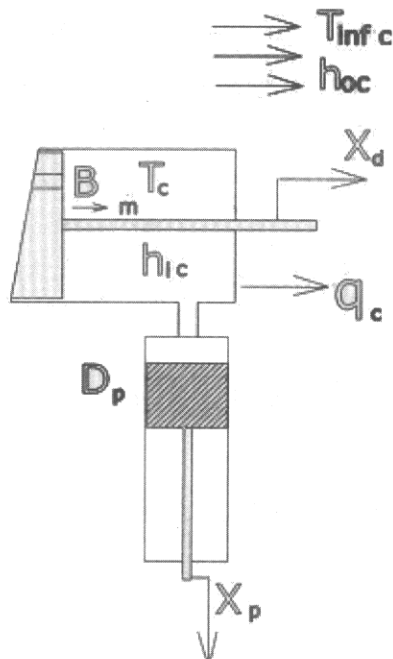
علامت تقریب به آن جهت است که فضاهای مرده و تغییرات حجم ناشی از اثر حرکت پیستون کار - که خود ناشی از تغییرات فشار  $P$  می‌باشد - در اینجا در نظر گرفته نشده است.

با توجه به شکل (۲)، هنگامی که گاز از سمت چپ به راست جریان می‌یابد ( $\dot{m} > 0$ )،  $T_H$  برابر  $T_A$  می‌شود و  $T_B$  مجهول است همچنین، نیز هنگامی که گاز از سمت راست به سمت چپ جریان می‌یابد ( $\dot{m} < 0$ )،  $T_B$  برابر  $T_C$  می‌شود و  $T_A$  مجهول است.

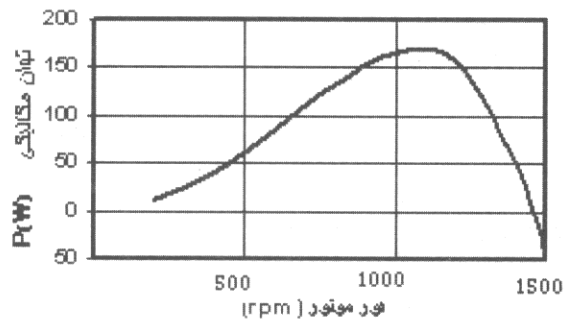
اکنون برای حالتی که  $\dot{m} > 0$  است، قانون بقای انرژی را به صورت زیر می‌نویسیم.

$$\dot{q} = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e = \dot{m} C_p (T_A - T_B). \quad (6)$$

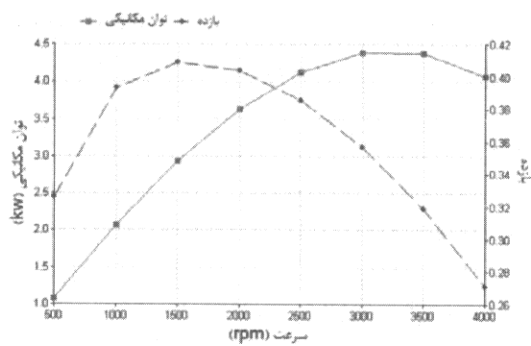
از طرفی می‌دانیم که:



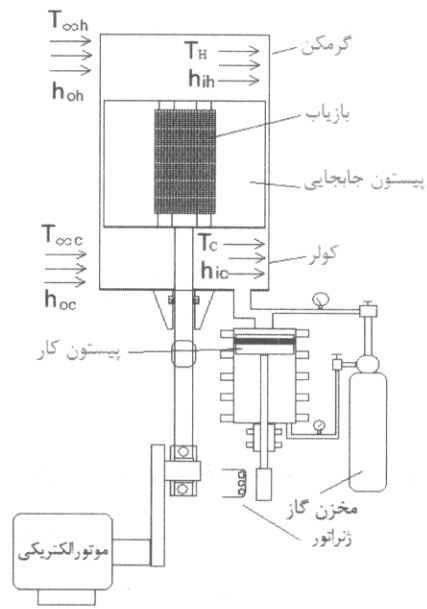
شکل ۴- شماتیک منطقه سرد.



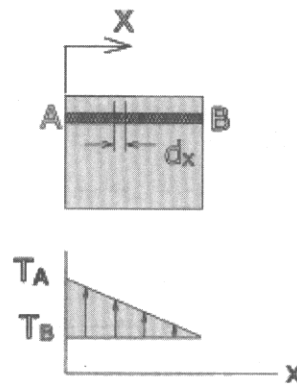
شکل ۵- نمودار قدرت- سرعت موتور نیمه پیستون آزاد [۵].



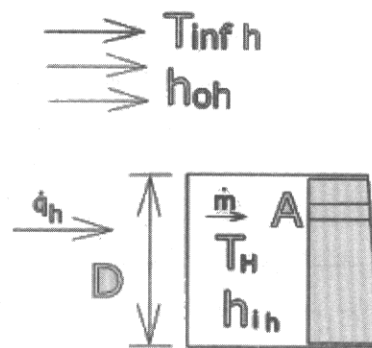
شکل ۶- نمودار قدرت- سرعت- راندمان موتور GPU-3.



شکل ۱- نمای شماتیک موتور نیمه پیستون آزاد.



شکل ۲- شماتیک بازتاب و توزیع دما در آن.



شکل ۳- شماتیک منطقه گرم.

$$V_c = V_{dc} + (L_D - X_d)A_d + X_p A_p, \quad (26)$$

$$\dot{m} = \frac{d}{dt} \left( -\frac{PV_H}{RT_H} \right). \quad (27)$$

تحلیل دینامیکی اجزاء سیستم و اعمال تلفات مکانیکی با استفاده از تحلیل و آزمونهای تجربی انجام گرفته [۱۵] و از نتایج آن در تهیه مدل ریاضی موتور جهت استفاده در طراحی کنترلر استفاده شده است.

### ۴- تأثیر دور در عملکرد موتور استرلینگ

#### نیمه پیستون آزاد

پارامترهای متعددی در میزان قدرت خروجی موتور موثرند. برخی از این پارامترها همانند کورس پیستون کار، شکل میدلهای حرارتی، مشخصات بازیاب و ... ثابت و غیر قابل تغییرند، ولی برخی دیگر از آنها را می توان در حین کار موتور تغییر داد. از جمله این پارامترها دما، فشار و دور موتور می باشد که دو پارامتر اول قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. در اینجا به بحث پیرامون تأثیر دور در عملکرد موتور نیمه پیستون آزاد می پردازیم. بدین منظور، علاوه بر مدل ریاضی تهیه شده و به منظور مقایسه رفتار موتور مورد نظر با موتور استرلینگ پیستون درگیر نوع بتا، موتور آزمایشگاهی GPU-3 (Ground Power unit) مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور، از نرم افزار PROSA [۱۷] استفاده شده است. موتور آزمایشگاهی GPU-3 با فشار ۶۹۰ اتمسفر، سیال هیدروژن و مجموع حجم جاروب شده ۱۲۳ سانتی متر مکعب قادر به تولید حداکثر توان ترمزی ۷/۵ کیلو وات است.

توان خروجی موتور استرلینگ همانند همه موتورهای گرمایی تابعی از سرعت و گشتاور تولید شده توسط موتور است. در موتورهای درون سوز، گشتاور ماگزیم در نوار باریکی از سرعت تولید می شود. لذا، محدوده عملکرد بهینه موتور و حداکثر توان تولیدی در همین نوار باریک قرار دازد.

### ۳-۲- تجزیه و تحلیل معادله انرژی در منطقه گرم

مطابق شکل (۳) انتقال حرارت از منبع گرم به گاز داخل سیلندر، تحت تأثیر مقاومت های حرارتی، جابه جایی و هدایت قرار دارد:

$$\dot{q}_h = \frac{T_{\infty h} - T_H}{R}, \quad (28)$$

$$\dot{q}_h = (T_{\infty h} - T_H) \left[ \frac{1}{h_{oh} A_{eh}} + \frac{t_h}{K_h A_{eh}} + \frac{1}{h_{ih} A_i} \right] \quad (16)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (X_{dh} + X_d). \quad (17)$$

بر اساس قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$Q_{cv} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{E}_{cv} + \sum \dot{m}_e h_e \pm \dot{W}_{cv}. \quad (18)$$

بنابراین داریم:

$$\dot{q}_H = \frac{d}{dt} (m_H C_V T_H) + \dot{m} C_p T_A + P A_d \dot{X}_d, \quad (19)$$

$$m_H = \frac{PV_H}{RT_H}. \quad (20)$$

و در نتیجه داریم:

$$\dot{q}_h = \frac{d}{dt} \left( PV_H \frac{C_V}{R} \right) + \dot{m} C_p T_A + P A_d \dot{X}_d, \quad (21)$$

$$V_H = V_{dh} + A_d X_d. \quad (22)$$

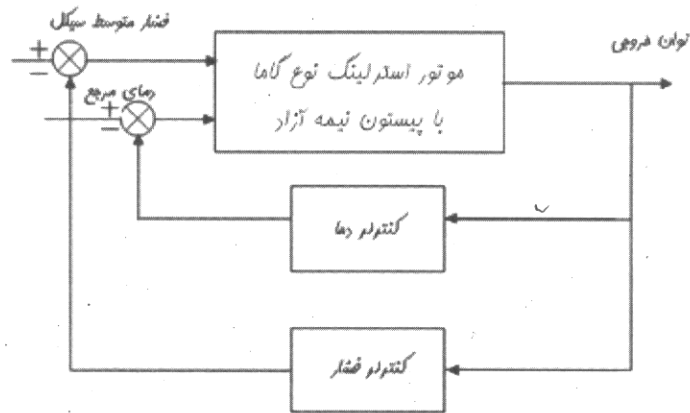
### ۳-۳- تجزیه و تحلیل معادله انرژی در منطقه سرد

مطابق شکل (۴) در اینجا نیز همانند منطقه گرم معادلات به صورت زیر به دست می آیند:

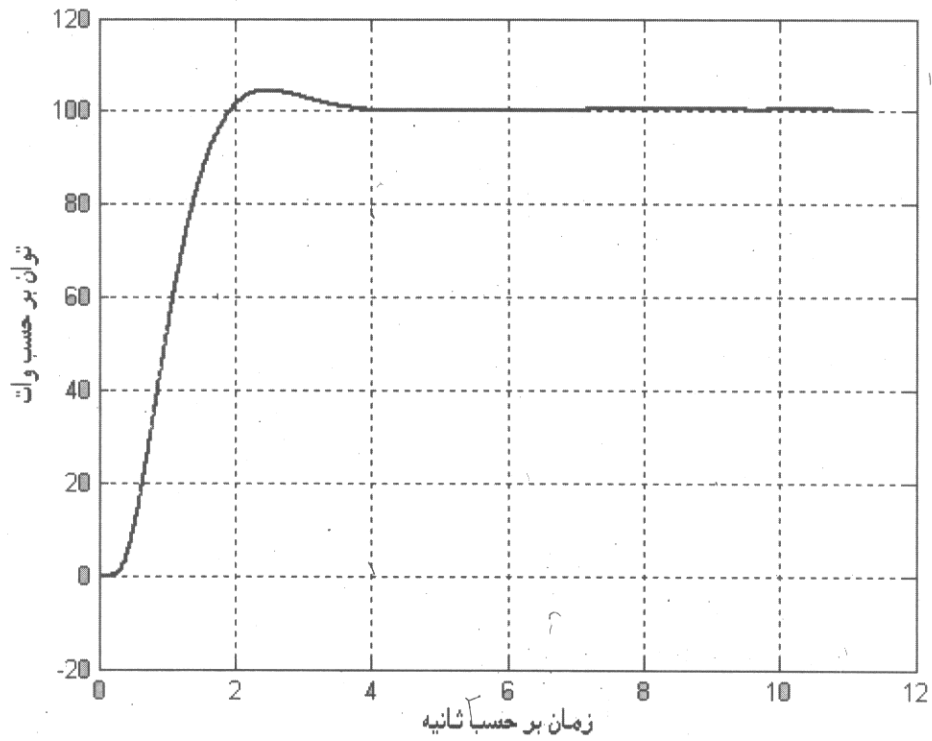
$$\dot{q}_c = (T_c - T_{\infty c}) \left[ \frac{1}{h_{oc} A_{ec}} + \frac{t_c}{\pi_c A_{ec}} + \frac{1}{h_{ic} A_{ec}} \right], \quad (23)$$

$$A_{ec} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D (L_D - X_d + X_{dc}) \quad (24)$$

$$-\dot{q}_c + \dot{m} C_p T_B = \frac{d}{dt} \left( PV_c \frac{C_V}{R} \right) + P (A_p \dot{X}_p - A_d \dot{X}_d), \quad (25)$$



شکل ۷- نمایش بلوکی کنترل کننده ترکیبی دما-فشار.



شکل ۸- نمایش رفتار سیستم کنترل کننده ترکیبی دما-فشار به ورودی پله‌ای توان.

توسط سیستم کنترلی جبران شود. از سوی دیگر، چنانچه سیستم کنترل دما صرفاً دمای گرمکن را در اندازه حداکثر حفظ کند، دامنه تغییرات توان محدود می‌شود. همچنین، چون سیگنال ورودی به کنترل کننده دما از عکس‌العمل موتور به نتیجه سیگنال فرمان کنترل کننده فشار حاصل می‌شود، سرعت پاسخ موتور اندکی کاهش می‌یابد. بنابراین، در این سیستم کنترلی، با استفاده از سیگنال خروجی توان فیلتتر شده، دو کنترلر مجزای کلاسیک PID قبلاً محاسبه شده است [۱۵]. شکل (۷) نمایش بلوکی کنترل کننده دما-فشار طراحی شده و شکل (۸)، نمایش رفتار یا پاسخ سیستم به ورودی پله‌ای را نشان می‌دهد.

## ۲-۵- کنترل قدرت خروجی از طریق تنظیم سرعت پیستون جابجایی

همانگونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در موتور استرلینگ نوع  $\gamma$  با پیستون نیمه آزاد، پیستون جابجایی توسط یک موتور الکتریکی به حرکت درمی‌آید که توان مورد نیاز خود را از باتری تأمین می‌کند. این حرکت باعث جابجایی گاز عامل در مناطق گرم و سرد و در نتیجه تغییر فشار سیکل و تولید کار خروجی می‌گردد. سرعت پیستون جابجایی (سرعت موتور الکتریکی) یکی از عوامل تغییر در توان خروجی است. با تغییر سرعت، راندمان مبدل‌های حرارتی و نیز تلفات مکانیکی موتور تغییر می‌کند. مضافاً اینکه قدرت خروجی مستقیماً تابعی از سرعت حرکت پیستون کار می‌باشد که آن نیز خود تابعی از سرعت پیستون جابجایی است. لیکن، رفتار موتور نسبت به تغییرات سرعت کاملاً غیر خطی است. لذا، با مطالعه رفتار سیستم مورد بررسی، جداول تغییرات قدرت خروجی نسبت به سرعت موتور، برای دماها و فشارهای مختلف تهیه گردید تا با فرمت Look Up Table و در محدوده راندمان قابل قبول بصورت مدار باز در سیستم کنترلی مورد استفاده قرار گیرد.

ولی، در موتور استرلینگ، گشتاور تولید شده توسط موتور در محدوده نسبتاً وسیعی از سرعت، به دلیل تضارب مشخصه‌های ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی ثابت می‌ماند. بنابراین، با تغییر سرعت در این محدوده قدرت موتور در حالی تغییر می‌کند که راندمان تقریباً ثابت می‌ماند. شکل (۵) نمودار قدرت-سرعت موتور نیمه پیستون آزاد و شکل (۶) نمودار قدرت-سرعت-راندمان موتور GPU-3 برای  $T_c=300$  و  $T_h=700$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مشاهده می‌شود که افزایش سرعت، نخست موجب افزایش قدرت و راندمان و سپس باعث کاهش آنها می‌شود و این دلیل بیشتر بودن نرخ افزایش تلفات مکانیکی از افزایش نرخ انتقال حرارت در سرعت‌های بالا است. همچنین مشاهده می‌شود که در موتور GPU-3، در محدوده سرعت‌های ۱۰۰۰ تا ۲۲۵۰ دور بر دقیقه، راندمان موتور تقریباً ثابت است، ولی توان موتور تغییر می‌کند.

## ۵- طراحی کنترلر

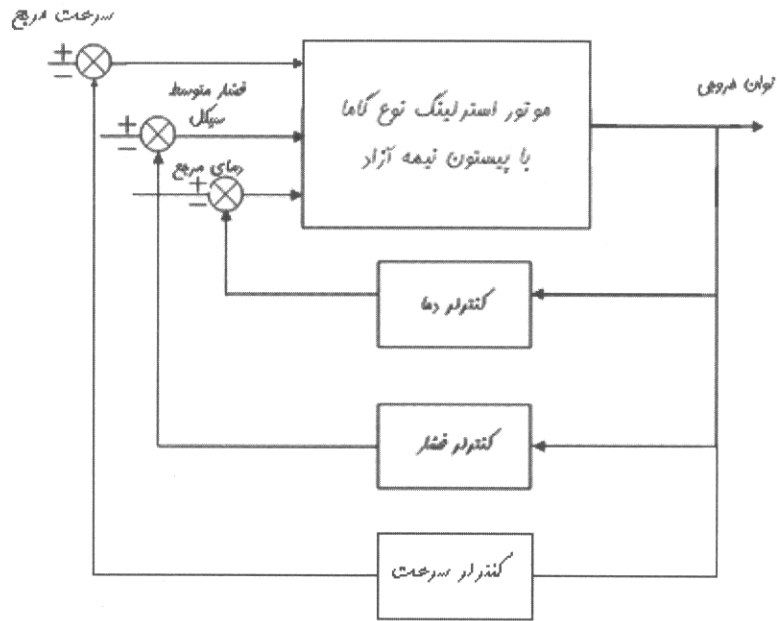
هر سه متغیر دما، فشار و سرعت در توان خروجی مؤثرند. اکنون بر پایه دو متغیر ترمودینامیکی دما و فشار، یک کنترلر مرکب طراحی می‌گردد. سپس، با اضافه کردن متغیر دینامیکی سرعت پیستون جابجایی (دور موتور الکتریکی DC)، کنترلر پیشنهادی طراحی و ارائه می‌شود.

## ۵-۱- طراحی کنترلر بر مبنای تنظیم دما و فشار

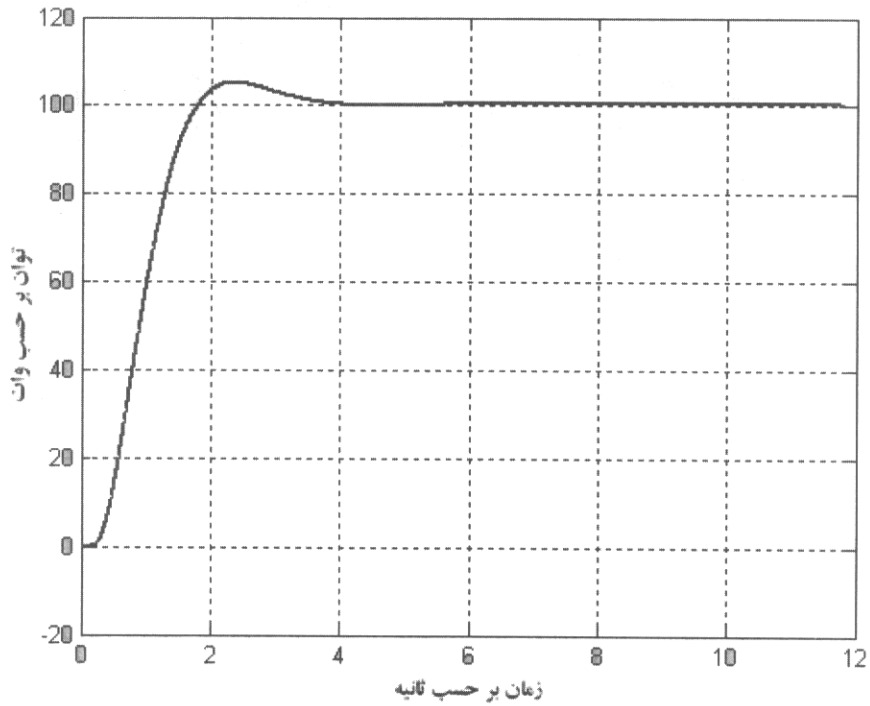
در موتور استرلینگ، به منظور دستیابی به راندمان حداکثر، لازم است دما در حد بالای تحمل موتور قرار داشته باشد و فشار در محدوده طراحی ثابت نگه داشته شود. اما، اگر تغییرات توان مورد نیاز باشد، این دو عامل می‌توانند در ترکیب با یکدیگر در یک سیستم کنترلی، شرایط مناسبی را برای پاسخگویی سریع به تغییرات توان مورد نیاز فراهم کنند.

گرچه تغییر فشار متوسط سیکل از طریق تنظیم مقدار گاز عامل در سیکل، به تنهایی عکس‌العمل سریع موتور را به دنبال دارد. ولی، این بدان سبب است که افزایش دانسیته گاز موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه جذب گرمای بیشتر از دیواره گرمکن می‌گردد. بنابراین، دمای دیواره گرمکن به سرعت کاهش یافته و باید

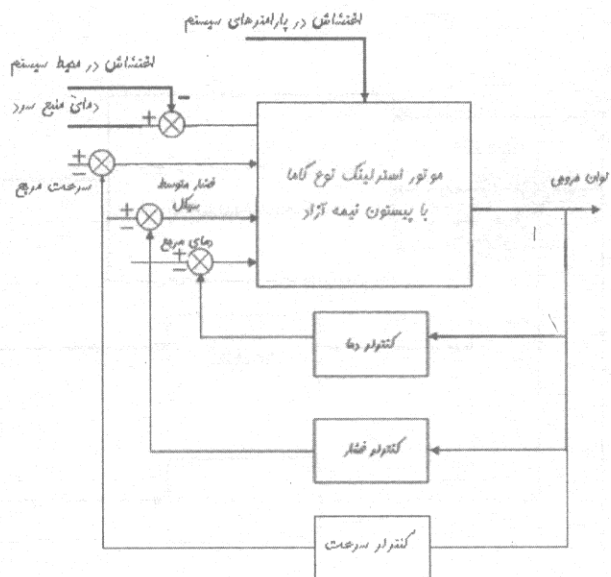




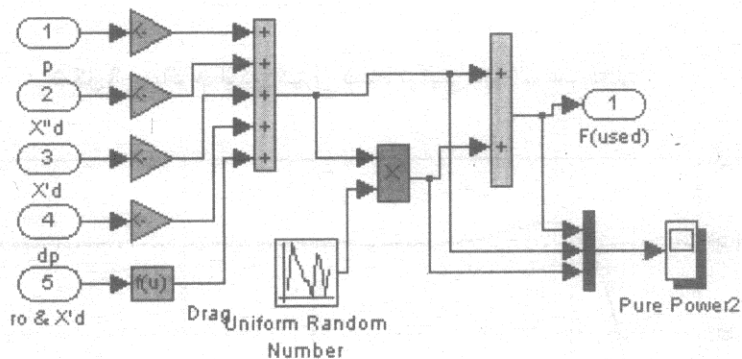
شکل ۹- دیاگرام بلوکی کنترل کننده ترکیبی دما-سرعت-فشار.



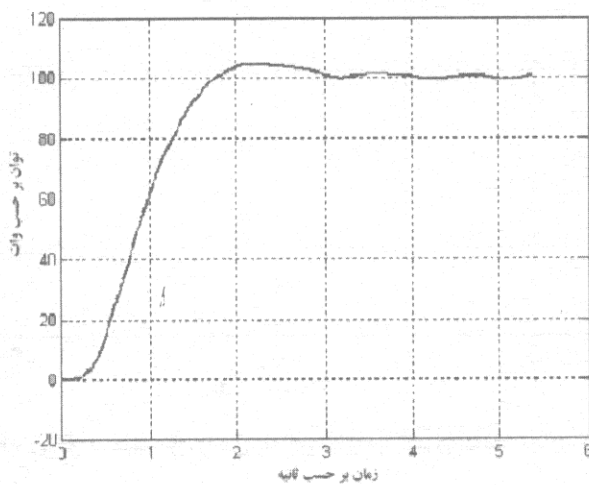
شکل ۱۰- پاسخ سیستم به ورودی پله ای توان در کنترل کننده دما-سرعت-فشار.



شکل ۱۱- اعمال تابع اغتشاش به ورودی دما.



شکل ۱۲- اعمال تابع نویز در پارامترهای سیستم.



شکل ۱۳- نمایش پاسخ سیستم به ورودی پله‌ای در حضور اغتشاشات.

نتیجه این بررسی نشان داد که سیستم طراحی شده در مقابل اغتشاشات کاملا مقاوم می باشد. شکل (۱۳) پاسخ سیستم را در حضور اغتشاشات اعمال شده در ورودی منبع سرد و پارامترهای سیستم نشان می دهد.

#### ۶- بحث و نتیجه گیری

هر دو سیستم طراحی شده قادرند در محدوده مشخصی توان خروجی مورد نیاز را تأمین نمایند. در سیستم کنترل توان با تنظیم دما و فشار، اشکال اساسی اعمال تأثیر بر راندمان موتور می باشد. در این سیستم، چون افزایش فشار متوسط سیکل یا تعداد مولهای گاز عامل، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت داخلی موتور می گردد. لذا، توان خروجی به سرعت تغییر می کند ولی این امر مشروط به ثابت بودن دمای منبع گرم است که نیاز به کنترل دما دارد. چنانچه سیستم کنترل دما نتواند دمای منبع گرم ( $T_{ch}$ ) را بگونه ای تغییر دهد که دمای منطقه گرم موتور ( $T_h$ )، تغییر نکند، خروجی موتور بسرعت دچار افت می شود. از سوی دیگر در این سیستم چنانچه کنترل توان با تغییر فشار و تنظیم دما حول مقدار حداکثر صورت گیرد، چون محدوده مجاز برای تغییر جرم گاز عامل در موتور زیاد نیست (زیرا علاوه بر محدودیت تحمل فشار موتور، افزایش جرم گاز عامل موجب افزایش تلفات مکانیکی نیز می گردد)، دامنه تغییرات توان محدود می شود. لذا، از کنترلر هم زمان دما استفاده شده است. در این سیستم، چون فرمان های کنترلی دما و فشار بطور هم زمان صادر می شوند و کنترل کننده های مربوطه، مستقل از یکدیگر و متناسب با سیگنال خطای ورودی به کنترلر عمل می کنند، واکنش موتور سریعتر است. همچنین، در این سیستم محدوده توان خروجی از موتور نسبت به حالت های قبلی بیشتر می شود و پیاده سازی این سیستم عملی است.

به این ترتیب، با تنظیم دو عامل ترمودینامیکی دما و فشار در یک ساختار کنترلی بازخورد که از هر دو عامل مذکور استفاده شود، در محدوده قابلیت های موتور می توان سرعت عکس العمل سیستم را افزایش داد. سیستمی که با این مشخصات طراحی می شود علیرغم مزایای ذکر شده دارای معایبی نیز هست. گرچه با طراحی ارابه شده برای

در اینجا یک سیستم کنترلی مرکب طراحی شده که نخست در شرایط دما ثابت، براساس توان مورد تقاضا، از جداول سرعت - توان، سرعت مناسب موتور را انتخاب می نماید. این سرعت در ابتدا توسط یک موتور الکتریکی کمکی DC تأمین می شود. سپس، از مقایسه سیگنال خروجی توان فیلتر شده و توان مورد نیاز، سیگنال لازم به کنترلرهای فشار و دما اعمال و خروجی این کنترل کننده ها بصورت فرمان کنترلی، جرم گاز عامل و دمای مشعل را برای تدقیق توان مورد نیاز تنظیم می نماید. شکل (۹) دیاگرام بلوکی این کنترل کننده و شکل (۱۰) پاسخ سیستم را به ورودی توان پله ای نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در این حالت سرعت پاسخ سیستم نسبت به سیستم کنترلی مبتنی بر فشار و دما بهبود یافته و راندمان موتور دستخوش تغییر کمتری می شود.

#### ۵- تحلیل مقاوم بودن سیستم کنترلی

به منظور بررسی و تحلیل مقاوم بودن سیستم کنترلی طراحی شده باید اثر اغتشاشات در ورودی های تأثیر پذیر مدار باز سیستم بررسی گردد. در این طراحی، ورودی های دمای منطقه گرم، جرم گاز عامل و سرعت پیستون جابجایی به صورت مدار بسته کنترل و تنظیم می شوند. بنابراین، تنها ورودی باقیمانده که می تواند از اغتشاشات محیطی تأثیر پذیرفته و در رفتار و خروجی سیستم اثر بگذارد، دمای منبع سرد می باشد. برای حصول اطمینان از مقاوم بودن سیستم کنترلی، یک تابع اغتشاش اتفاقی با دامنه تغییر  $100 + 20$  - درجه کلون انتخاب و مطابق شکل (۱۱) در سیستم اعمال گردید.

همچنین، جهت بررسی اثر تغییر در پارامترهای سیستم، در بلوک مربوط به تلفات مکانیکی ناشی از اصطکاک و افت فشار بازیاب و ... نیز به وسیله یک تابع نویز رندم، با دامنه تغییر مثبت و منفی ۳۰ درصد مطابق شکل (۱۲) تأثیر تغییر در پارامترهای سیستم شبیه سازی گردید.

8. Kinnersly, R.F., and Hislop, D.W. "The Commercial Stirling Engine: Its Absence and the Need for a New Design Approach", The 10<sup>th</sup> Int. Stirling Engine Conf., Osnabrueck, 2001.
9. Wolfgang Stanzel, K. "Business Plan for a Stirling Engine (1KW) Integrated Into a Pellent Stove", The 11<sup>th</sup> Int. Stirling Engine Conf., Italy, 2003.
10. West, C.D. "Principles and Applications of Stirling Engines ", Van Nostrand, 1986.
11. Paradissis, E.A. "A New Power Control Method for Beta Type Stirling Engines", The 11<sup>th</sup> Int. Stirling Engine Conf., Italy, 2003.
12. Ziph, B. "Speed and Power Control of an Engine by Modulation of the Load Torque", US Patent No. 5-864-770, 1999.
۱۳. علی آبادی، ع.، غفاری، ع. و ضیابشرحق، م. "موتورهای استرلینگ، گذشته، حال، آینده" مجله انجمن مهندسان مکانیک ایران، سال ۱۳، شماره ۳۵، صص ۱۸-۹، ۱۳۸۳.
۱۴. علی آبادی، ع.، غفاری، ع. و ضیابشرحق، م. "طراحی و ساخت موتور استرلینگ گاما" هشتمین کنفرانس بین-المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
۱۵. علی آبادی، ع. و آقایی، ا. "شبیه سازی دینامیکی موتور استرلینگ نوع گاما با پیستون نیمه آزاد جهت استفاده در ربات ماهی ها، هشتمین کنفرانس بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
۱۶. غفاری، ع.، علی آبادی، ع. و ضیابشرحق، م. "طراحی کنترل کننده ترکیبی دما و فشار برای موتور استرلینگ نوع گاما با پیستون نیمه آزاد"، نشریه علمی پژوهشی انجمن مهندسی مکانیک ایران، مهرماه ۱۳۸۳.
17. Urieli, I. and Berchowitz, D.M. "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger LTD., Bristol, 1984.
18. Thomas, B. "PROSA-Software for Evaluation of Stirling Cycle Engines", The 10th Int. Stirling Engines Conf., Osnabrueck, 2001.
19. Franklin, G.F., "Digital Control of Dynamic Systems", 2<sup>nd</sup> Ed., Addison-Wesley, 1990.

سیستم کنترلی موتور استرلینگ توانایی پاسخ سریع به تغییرات بار را دارد، ولی این تغییرات بار عملاً باعث تغییرات سریع فرامین کنترلی دما و فشار می گردد. این تغییرات سریع، موتور را از شرایط عملکرد بهینه خارج کرده و باعث کاهش راندمان موتور می شود.

اما، در سیستم کنترل ترکیبی دما- فشار-سرعت، با توجه به ویژگی مهم ثابت ماندن گشتاور در محدوده وسیعی از سرعت در موتور استرلینگ، علاوه بر تأثیر کمتر بر راندمان، سرعت پاسخ باز هم بهبود خواهد یافت. زیرا، سهم قابل توجهی از توان مورد نیاز که باید صرف تغییر سرعت پیستون جابجایی گردد، سریعاً از باطری خانه تأمین و سپس از محل توان تولیدی جبران می شود. این مسئله باعث می گردد که مقداری از تأخیر زمانی ناشی از ظرفیت حرارتی مبدل های حرارتی جبران شود. این در حالی است که تغییر سرعت که توسط موتور DC سریعاً انجام می شود، موجب افزایش توان می گردد.

#### مراجع

1. Palsson, M. "Development of a Wood Powder Fuelled 35 KW Stirling CHP Unit", The 11<sup>th</sup> Int. Stirling Engine Conf., Italy, 2003.
2. Servis, W. and Medica, V. "LGiSE (Liquid Gas Injection Stirling Engine) A New Stirling Engine Concept", The 11<sup>th</sup> Int. Stirling Engine Conf., Italy, 2003.
3. Brignoli, V., "One Year of Operation of a Solo 161 Stirling Solar Unit in Italy", The 11<sup>th</sup> Int. Stirling Engine Conf., Italy, 2003.
4. Walker, G. "Stirling Engines", Clarendon Press, Oxford, 1980.
5. Iwamoto, S. "Performance of Stirling Engines (Arrangement for Experimental Results and Performance Prediction Method)", Transactions of Japan Society of Mech. Engineers, Vol. 635, No. 65, pp. 361-368, 1999.
6. Kagawa, N. "Performance of New Matrix for Stirling Engine Regenerator", The 11<sup>th</sup> Int. Stirling Engine Conf., Italy, 2003.