مدلسازي و طراحي موتور استرلينگ

سپهر صنايع - غلامرضا شهرياري - محمد پور ناظري - نيما شعباني
آزمايشگاه بهينه سازي سيستمهاي انرژي - دانشكده مهندسي مكانيك- دانشگاه علم و صنعت ايران

چكيده

سيكل استرلينگ به لحاظ تئوري، داراي بازده‌اي معادل با بازده سيكل كارنو مي‌باشد و موتور استرلينگ بواسطه اين بالاترين بازده، بعنوان يك ماشين حرارتي مورد توجه است.

در اين مقاله، مدلسازي و تحليل سيكل استرلينگ انجام شده است. بكمك اين مدلسازي، تغييرات پارامترهاي موثري نظير حجم سيلندر، حجم جابجايي و نسبت تراكم، اختلاف فاز دو پيستون، كار خروجي و بازده واقعي بررسي شده‌اند. روابط ترموديناميكي و معادلات بقاء جرم و انرژي، دستگاهي از معادلات غير خطي را تشكيل مي‌دهند كه به روش عددي نيوتن- رافسن، در هر درجه از زاويه چرخش محور لنگ، اين معادلات حل مي‌گردند.

بر مبناي نتايج حاصله و انتخاب مكانيزمي مشخص از بين مكانيزمهاي مختلف،نمونه‌اي از موتور استرلينگ و قطعات مربوطه، به كمك نرم افزار Mechanical Desktop طراحي، و سپس ساخته شده است كه در حال انجام تست مي‌باشد.

واژه‌هاي كليدي: *سيكل استرلينگ، موتور استرلينگ، شبيه سازي، طراحي*

۱- مقدمه

موتور استرلينگ در سال ۱۸۱٦ ميلادي توسط رابرت استرلينگ اختراع شده است[۱]. مزاياي اين موتور در مقايسه با موتورهاي با سيكل اتو و يا ديزل، راندمان بزرگ اين سيكل (به لحاظ تئوري معادل با سيكل كارنو) و آلودگي بسيار كم اين موتورهاست[۱]. علت آن است كه در موتورهاي استرلينگ، گرما از يك منبع به سيال عامل سيكل انتقال مي‌يابد و در اصطلاح اين نوع موتورها، موتورهاي احتراق خارجي هستند كه در آنها سوخت بعلت احتراق كاملتر از موتورهاي احتراق داخلي، آلاينده‌هاي كمتري ايجاد مي‌نمايند. طراحي‌هاي انجام شده تاكنون نتواسته است بازده واقعي اين سيكل را به بازده ايده‌آل آن (بازده سيكل كارنو) برساند.

از جمله تحقيقات انجام شده در اين زمينه مي‌توان به ساخت موتور استرلينگ براي استفاده در اتومبيلها كه توسط دو اتحاديه استرلينگ سوئد و مؤسسه MTI ساخته شده است اشاره كرد. اين موتور كه داراي ٤ سيلندر دو زمانه بود كه براي مصارف در كمپرسور يخچال و پمپ آب بكار مي‌رفت. اين موتور توسط كامپيوتر شبيه سازي شده و سپس تست شده است.

موتور استرلينگ با پيستون آزاد كه توسط مركز تحقيقات دانشگاه اهيو بين سالهاي ۱۹٦۸ و ۱۹۷۲ ساخته شده است نيز نوعي مدل بهينه سازي شده موتور استرلينگ بود كه گزارش شده است.

در بررسي سيكل و موتور استرلينگ مروري بر اجزاء و واژه‌هاي زير مفيد است.

سيكل ايده‌آل استرلينگ:

اين سيكل شامل دو فرآيند حجم ثابت و دما ثابت مي‌باشد كه در شكل (۱) تغييرات P برحسب V و T بر حسب S (آنتروپي) نشان داده شده است. هر چند اين فرآيندهاي ايده‌آل، در عمل محقق نمي‌گردند.

موتور استرلينگ:

موتور استرلينگ بر مبناي سيكل استرلينگ كار مي‌كند.

سيلندر قدرت:

يكي از اجزاي اصلي موتور استرلينگ، سيلندر و پيستون قدرت مي‌باشد كه عمل تراكم و انبساط توسط آنها انجام مي‌گردد.

سيلندر و پيستون جابجاگر (**Displacer**):

وظيفه اين پيستون و سيلندر جابجا كردن هوا از منطقه سرد به منطقه گرم و بالعكس مي‌باشد. و حجم سيال عامل در دو منطقه سرد و گرم را كاهش و افزايش مي‌دهد و سيال عامل را براي عمل تراكم و يا انبساط آماده مي‌نمايد. بين اين پيستون و پيستون قدرت معمولاً از °۸۰ تا °۹۰ اختلاف فاز وجود دارد.

مبدل حرارتي:

در موتور استرلينگ طراحي شده براي سرد كردن گاز قبل از مرحله تراكم، از يك مبدل گرمايي كويل‌دار استفاده شده است.

۲- طرح پيشنهادي مكانيزم عملكرد موتور استرلينگ:

طرح ارائه شده مكانيزم عملكرد موتور استرلينگ در شكل (۲) و (۳) نشان داده شده است. اين شكل موقعيت موتور را در دو حالت Q_{in} و Q_{out} (كمي قبل از انبساط و كمي قبل از تراكم) نشان مي‌دهد. همانطوريكه از شكل (۲ و۳) مشاهده مي‌گردد، اين موتور از يك سيلندر و پيستون قدرت، يك سيلندر و پيستون جابجاگر و مجموعه‌اي از يك هيتر برقي و كويل خنك كننده كه توسط دو دريچه يك طرفه مسير سيال عامل سيكل در آنها تنظيم مي‌شود، تشكيل شده است. جنس اين دريچه‌ها از ورقه ميكا تشكيل شده است كه تا $1500\ ^\circ C$ مقاوم مي‌باشد. عملكرد اين دريچه‌ها بر اساس خاصيت ارتجاعي اين ورقه‌ها مي‌باشد (مسير سيال عامل در اين مجموعه در دو حالت Q_{in} و Q_{out} در شكل نشان داده شده است بطوريكه قسمت آبي يا قسمت كم رنگ‌تر، منطقه سرد و قسمت قرمز يا پر رنگ‌تر، منطقه گرم را نشان مي‌دهد). لازم به ذكر است كه با توجه به در دسترس بودن هوا و كم خطر بودن آن، در اثر گرم شدن و نشتي به بيرون از موتور، از اين گاز به عنوان سيال عامل استفاده شده است. هر چند گازهايي نظير هيدروژن و هليوم بازده بزرگتري را بخصوص در سرعتهاي بالاتر در اين موتورها ايجاد مي‌كند.

شكل (۳)، شكل شماتيك موتور استرلينگ طراحي شده در حالت Q_{out} را نشان مي‌دهد. در اين مرحله پيستون قدرت به طرف سرسيلندر حركت كرده و هوا در اين ناحيه منقبض مي‌گردد و در همين هنگام نيز پيستون جابجاگر، هواي قسمت گرم را از لابه لاي كويل سرد با پيش فاز ۸۰ درجه نسبت به پيستون قدرت عبور داده و در نتيجه هوا براي مرحله تراكم آماده شده است.

شكل (۲)، شكل شماتيك موتور استرلينگ طراحي شده در حالت Q_{in} را نشان مي‌دهد. در شكل پيستون قدرت در ابتداي مرحله انبساط قرار دارد و پيستون جابجاگر نيز با پيش فاز ۸۰ درجه هوا را از ناحيه سرد به ناحيه گرم انتقال است و در نتيجه شرايط را براي انبساط آماده ساخته است.

مشخصات موتور طراحي شده در جدول (۱) آورده شده است. اختلاف فاز $\varphi = 80^\circ$، به عنوان اختلاف زاويه ميل‌لنگ بين پيستون جابجاگر و پيستون قدرت در نظر گرفته شد و با تغيير اين اختلاف فاز در برنامه شبيه ساز، ميزان تغيير در كار خروجي تجزيه و تحليل شد. لازم به توجه است كه پيستون جابجاگر بايد همواره نسبت به پيستون قدرت، تقدم فاز داشته باشد تا سيال عامل قبل از مرحله تراكم، سرد شده و قبل از مرحله انبساط، گرم گردد.

۳- تحليل ترموديناميكي فرآيندهاي انجام شده در طرح موتور پيشنهادي:

براي تحليل فرآيندهاي انجام شده در موتور پيشنهادي، اين فرآيندها را به دو حالت دسته بندي مي‌گردند:

الف) حالت Q_{in} ب) حالت Q_{out} .

در حالت (الف) هوا از روي هيتر برقي عبور كرده و به منطقه گرم وارد مي‌شود.

در حالت (ب) هوا از روي كويل خنك كننده عبور كرده و وارد منطقه سرد مي‌شود.

براي تحليل ترموديناميكي، كل سيستم به دو حجم كنترل سرد و گرم تقسيم مي‌گردد و در هر حالت (الف و يا ب) هر دو حجم كنترل بررسي مي‌شوند و اين در حاليست كه فشار P در اين دو حجم كنترل، مساوي است.

در بررسي حالت الف (شكل۲) و شرايطي كه ميل لنگ در زاويه θ قرار دارد. در هر دو حجم كنترل، قانون گازهاي كامل برقرار است و بنابراين:

$$P_c v_c = R_{air}.T_c \quad (۱)$$

$$P_h v_h = R_{air}.T_h \quad (۲)$$

با توجه به آنكه هر دو حجم كنترل به هم مربوط مي‌باشند لذا:

$$P_c = P_h \quad (۳)$$

از آنجا كه در حالت Q_{in}، انتقال حرارت از حجم كنترل بخش سرد صورت نمي‌گيرد، و جرمي نيز به آن وارد يا خارج نمي‌گردد لذا آنتروپي در حجم كنترل سرد تغييري نمي‌كند و:

$$s_c(\theta) = s_c(\theta - 1) \quad (٤)$$

و با توجه به رابطه تغييرات انتروپي در گاز كامل بصورت:

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{cp}{T}\, dT - \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP$$

داريم:

$$0 = s_c(\theta) - s_c(\theta - 1) = cp \ln\frac{T_2}{T_1} - R_{air} \ln\frac{P_2}{P_1}$$

$$0 = cp \ln\frac{T_c(\theta)}{T_c(\theta - 1)} - R_{air} \ln\frac{P_c(\theta)}{P_c(\theta - 1)} \quad (۵)$$

قانون بقاي جرم كل سيستم عبارتست از:

$$m_{total} = m_{cold-c.v} + m_{hot-c.v} = \frac{V_c}{v} + \frac{V_H}{v_h} \quad (٦)$$

و از آنجا که:

$$S_2 - S_1 = \int \frac{dQ}{T_{ave}} + S_{gen,sys}$$

با فرض فرآیند برگشت پذیر ($S_{gen,sys} = 0$)، بنابراین:

$$S_2 - S_1 = \int \frac{dQ}{T_{ave}}$$

با توجه به تغییراتي كه در آنتروپي كل حجم كنترل قسمت گرم در حالت Q_{in} ایجاد ميشود داریم:

$$S_h(\theta) - S_h(\theta - 1) = \int \frac{dQ}{T_{ave}} + \Delta m_h \times s_c(\theta)$$

به عنوان تخمين اوليه و با خطي سازي تغييراتT در يك بازه زماني بسيار كوچك:

$$T_{ave} = \frac{T_h(\theta) + T_h(\theta - 1)}{2} \Rightarrow \frac{dQ}{T_{ave}} = \frac{2Q_{in}}{T_h(\theta) + T_h(\theta - 1)}$$

$$\Delta m_H = m_h(\theta) - m_h(\theta - 1) = \frac{V_h(\theta)}{v_h(\theta)} - \frac{V_h(\theta - 1)}{v_h(\theta - 1)}$$

يا

$$S_h(\theta) - S_h(\theta - 1) = \frac{2Q_{in}}{T_h(\theta) + T_h(\theta - 1)} + \left(\frac{V_h(\theta)}{v_h(\theta)} - \frac{V_h(\theta - 1)}{v_h(\theta - 1)}\right). s_c(\theta) \qquad (۷)$$

با توجه به رابطه (۵) براي حجم كنترل گرم داريم:

$$\begin{aligned} s_h(\theta) - s_h(\theta - 1) &= \frac{S_h(\theta).v_h(\theta)}{V_h(\theta)} - \frac{S_h(\theta - 1).v_h(\theta - 1)}{V_h(\theta - 1)} \\ &= c_p \ln \frac{T_h(\theta)}{T_h(\theta - 1)} - R_{air} \ln \frac{P_h(\theta)}{P_h(\theta - 1)} \end{aligned} \qquad (۸)$$

با توجه به ۸ معادله بدست آمده و ۸ مجهول P_h، P_c، v_h، v_c، T_h، T_c، S_c و S_h، دستگاه معادلات بدست آمده قابل حل ميباشد.

توضيح آنكه مقادير V_h و V_c بكمك روابط سينماتيكي بدست آمده در مرجع[٤] محاسبه شده‌اند:

$$x = \frac{S}{2}(1 - \cos\theta) + nS\left(\frac{\sin^2\theta}{8n^2}\right)$$

$n=\frac{L}{S}$ مي‌باشد كه L، طول شاتون، S، كورس و θ، زاويه ميل لنگ است. مقدار طراحي n حدود ۲ مي‌باشد[٤].

در بررسي حالت (ب) (شكل۳)، معادلات اين حالت كاملاً شبيه به معادلات مربوط به قسمت Q_{in} مي‌باشد با اين تفاوت كه جايh و c عوض شده، Q_{in} به Q_{out} تبديل مي‌گردد.

مقاديـــر V_h ، V_c [٤]، $\dot{m}_c$ ، Q_{out} ، Q_{in} ، c_p و R_{air} بشرح زير بدست آمده‌اند:

$$c_p=\frac{1}{29}[28/11+0/1967\times10^{-2}\times T(\theta)+0/4802\times10^{-5}\times T^2(\theta)-1/96\times10^{-9}\times T^3(\theta)]$$

$$V_{hot}=[\frac{S_d}{2}(1-Cos\theta)+nS_d(\frac{Sin^2\theta}{8n^2})]A_d+[\frac{S_p}{2}(1-Cos(\theta-\varphi)$$
$$+nS_p(\frac{Sin^2(\theta-\varphi)}{8n^2})]A_p+V_{element}$$

$$+V_{\text{لوله‌ها و اتصالات قسمت گرم}}+V_{\text{حجم مرده سيلندر جابجاگر در طرف گرم}}+V_{\text{حجم مرده سيلندر قدرت}}+$$

كه S كورس پيستونها و انديسهايd وp بترتيب مربوط به پيستون جابجايي (displace piston) و پيستون قدرت (Power piston) مي‌باشند. φ، اختلاف فاز بين حركت پيستون جابجا كننده و پيستون قدرت مي‌باشد كه طراحي حاضر، معادل با 80° انتخاب شده است.

$$V_c=S_d-[\frac{S_d}{2}(1-Cos\theta)+nS_d(\frac{Sin^2\theta}{8n^2})]A_d+V_{coil}$$
$$+V_{\text{لوله‌ها و اتصالات قسمت سرد}}+V_{\text{حجم مرده جابجاگر در قسمت سرد}}+$$

$$\dot{V}_c=\frac{-\pi\times S_d\times rpm}{60}[Sin\theta+\frac{1}{2n}Sin\theta Cos\theta]A_d$$

$$\dot{m}_c(\theta)=\frac{\dot{V}_{cold}}{v_c(\theta)}$$

كه rpm تعداد دور ميل لنگ در دقيقه است.

براي محاسبه Q_{out} بكمك هندسه مبدل پوسته‌اي و لوله‌اي بكار رفته، كه در آن هوا از داخل18 لوله با قطر داخلي 6 mm و آب با دماي $291^\circ K$ در پوسته عبور مي‌كند، داريم[۲]:

$$Q_{out}=(\frac{T_h(\theta)+T_c(\theta)}{2}-T_{wall}).h.A_{tubes}.\Delta t\times\frac{1}{1000}\quad(kj)$$

$$Nu = 5 + 0/025 \times (Pr \times Re)^{0/8}$$

$$h = \frac{Nu.k}{D}$$

که پارامترهاي بكار رفته عبارتند از:

k : ضريب هدايت حرارتي گاز

Nu : عدد نوسلت

D : قطر داخلي هر لوله (0.006 m)

h : ضريب انتقال حرارت جابجايي داخل لوله‌ها

T_{wall} دماي ديواره است كه بعلت كوچكي مبدل، بطور تقريبي معادل با دماي آب فرض شده است.

علت استفاده از رابطه Nu انتخابي، رنج نسبتاً گسترده‌اي از عدد رينولدز است كه اين رابطه مي‌تواند در آن بكار رود. در اين مبدل عدد رينولدز عبارتست از:

$$Re = \frac{4\,\dot{m}_c}{18\mu\pi D}$$

براي بررسي تغييرات μ وk و Pr بر حسب دما و جايگذاري آنها در روابط فوق، مقادير اين خصوصيات (با استفاده از برنامه Mathematica و دستورinterpolating polynomial) ميانيابي شده و نمودار تغييرات آنها در محدوده كاربرد در مسئله حاضر، بدست آمده است (شكل٤). از بررسي اين تغييرات ملاحظه مي‌شود كه با دقت قابل قبولي مي‌توان از تغييرات خصوصيات هوا در محدوده ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتي گراد صرف نظر نمود.

٤- حل معادلات در مدل موتور استرلينگ:

در مدلسازي انجام شده، روش نيوتن- رافسن براي حل دستگاه معادلات غير خطي بكار رفته است[۳]. در اين روش ابتدا همه معادلات بشكل كلي $f(x, y, z,...) = 0$ ، $g(x, y, z,...) = 0$ ، و... درآمده و سپس مشتقات جزئي آنها نسبت به پارامترهاي مجهول (بعنوان مثال $\frac{\partial f}{\partial x}$ ، $\frac{\partial f}{\partial y}$ و...، $\frac{\partial g}{\partial x}$ ، $\frac{\partial g}{\partial y}$ و...) بدست آورده مي‌شوند. تخمين اوليه براي مقادير متغيرهاي مجهول، شرايط اوليه معلوم دستگاه است، سپس با استفاده از روابط زير، معادلات غير خطي حل مي‌گردند:

$$0 = g(x_1, y_1, z_1,...) + \left.\frac{\partial g}{\partial x}\right|_{x_1, y_1, z_1,...} \times \alpha + \left.\frac{\partial g}{\partial y}\right|_{x_1, y_1, z_1,...} \times \beta + ... \qquad (۹)$$

مقادير α، β، γ و... را مي‌توان از حل دستگاه معادلات خطي بدست آورد. و تخمين دوم با استفاده از مقادير α و β و... بدست آمده، بصورت زير محاسبه مي‌گردد:

$$X_2 = x_1 + \alpha$$
$$Y_2 = y_1 + \beta$$

$$Z_2 = z_1 + \gamma$$

این فرآیند تا حصول به مقادیر نهایي x_n و y_n و z_n و ... با خطاي مشخص ε، ادامه مي‌يابد بطوري که:

$$\varepsilon = [f(x_n, y_n, z_n, ...)]^2 + [g(x_n, y_n, z_n, ...)]^2 + ...$$

مي‌باشد برنامه کامپيوتري محاسبات شبيه سازي سيکل استرلينگ، در نرم افزار Mathlab-6.0 نوشته شده است.

بحث و نتايج

با اجراي برنامه شبيه سازي تهيه شده با شرايط اوليه $P = 100$ kPa و $T = 298.15^{\circ}K$ و با حل دستگاه معادلات براي هر درجه حرکت ميل لنگ بروش سعي و خطا، مطابق آنچه ذکر شده است و با استفاده از مقادير نتايج مراحل قبلي در شروع سعي و خطاي مرحله بعدي، تغييرات فشار- حجم و دما- آنتروپي بدست آمده است.

نمودارهاي (۵)، تغييرات فشار بر حسب حجم، در طي يك سيکل استرلينگ را نشان مي‌دهد. در نمودار مشابه در يك سيکل ايده‌آل، دو فرآيند حجم ثابت وجود دارد که اين فرآيندها در موتورهاي واقعي بطور کامل وجود ندارند. فرآيند حجم ثابت در زمان رسيدن پيستون، به دو انتهاي سيلندر قدرت، که سرعت پيستون تقريباً نزديك صفر مي‌باشد، در نظر گرفته مي‌شود. سطح محصور شده در بين اين منحني ميزان کار خروجي را نشان مي‌دهد. و همانطور که در شکل (۵) مشاهده مي‌شود دو نوك تيز نمودار در حقيقت دو مرحله حجم ثابت مي‌باشد. اين تغييرات کاملاً مشابه تغييرات بدست آمده در ساير مراجع براي سيکل واقعي موتور استرلينگ است[۱] .

به کمك طرح شماتيك ارائه شده براي موتور استرلينگ، طراحي قسمتهاي مختلف انجام پذيرفته است. شاتون، پيستون و سيلندر قدرت در شکلهاي (۱-۶) تا (۴-۶) و پيستون و سيلندر جابجاگر در شکلهاي (۱-۷) تا (۳-۷) ديده مي‌شوند.

پس از مرحله طراحي، قسمتهاي مختلف اين موتور استرلينگ ساخته و مونتاژ شدند.

در ساخت قسمتهايي چون سيلندر و پيستون قدرت و سيلندر و پيستون جابجاگر از VCN150 استفاده شده است و در ساخت قسمتهايي چون شاتونها و سر شاتونها (محل اتصال شاتون و پيستون) از آلومينيم استفاده شده است و بقيه قسمتها از فولاد St 37- مي‌باشد.

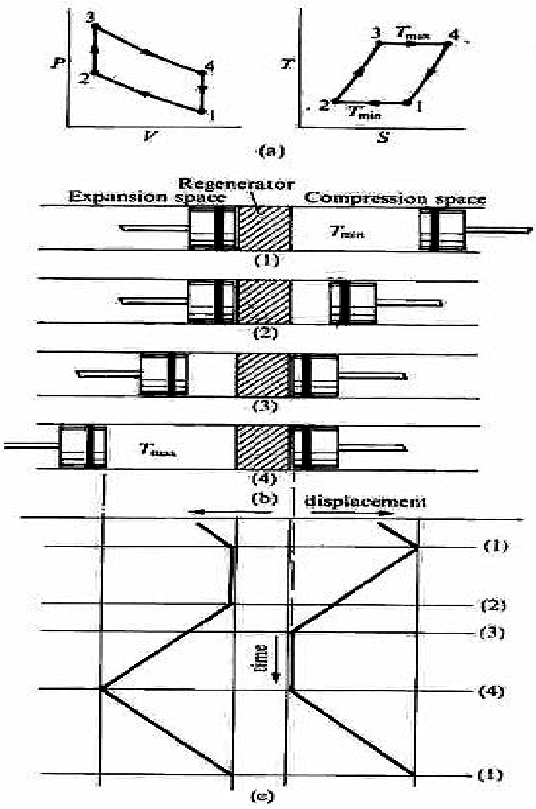
ميزان لقي سيلندر و پيستون قدرت خيلي کمتر از سيلندر و پيستون جابجاگر مي‌باشد. زيرا در واقع عمل تراکم و يا انبساط تنها بوسيله پيستون قدرت انجام مي‌شود و پيستون جابجاگر در واقع فقط هوا را جابجا مي‌نمايد و براي بدست آوردن لقي مورد نظر، سطوح آن آبکاري و سختکاري شده‌اند.

منابع

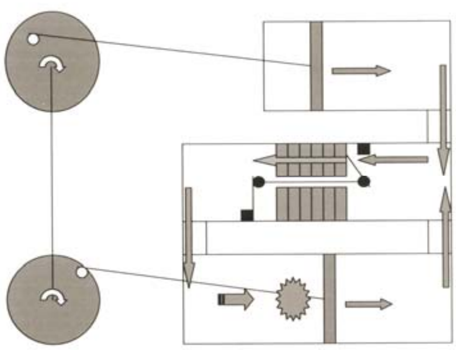
1- G. Walker, Stirling Engines, Oxford University Press 1980.
2- S. Kakac, H.Liu, Heat exchangers, selection, Rating, and Thermal Design, CRC Press, 1998.
3- J. H. Mathews, Numerical Methods for Mathematics, Science, and Engineering, Prentice- Hall International Inc., 1992.
4- J. B. Heywood, Internal combution Engine Fundumentals, New York, Mc Graw-Hill 1988.

جدول ۱- مشخصات فني موتور استرلينگ پيشنهادي

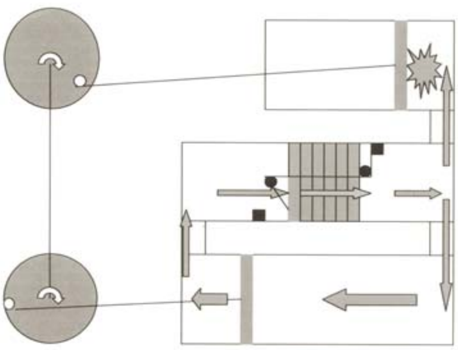
كورس پيستون قدرت	51 mm
كورس پيستون جابجاگر (Displacer)	33 mm
قطر داخلي سيلندر قدرت	51 mm
قطر داخلي سيلندر جابجاگر (Displacer)	65 mm
حجم مرده سيلندر قدرت	2.042 cm^3
حجم مرده سيلندر جابجاگر در هر طرف	3.318 cm^3
حجم لوله و اتصالات در قسمت گرم	15.19 cm^3
حجم لوله و اتصالات در قسمت سرد	17.14 cm^3
حجم هيتر	13.85 cm^3
حجم هواي موجود در كويل	30 cm^3
حداكثر توان خروجي هيتر	1200 watt
تعداد لوله‌هاي كويل ۱۸ عدد لوله	6 mm
نوع سيال عامل سيكل	air
اختلاف فاز بين پيستون جابجاگر و پيستون قدرت	80°
طول شاتون پيستون قدرت	102 mm
طول شاتون پيستون جابجاگر	64 mm
نسبت طول شاتون به طول كورس	2



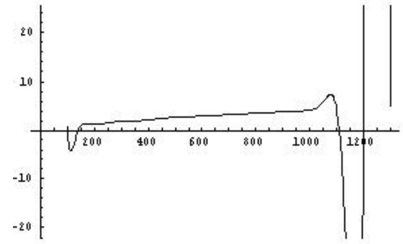
شکل ۱- تغییرات فشار بر حسب حجم
و آنتروپی بر حسب دما در سیکل
ایده‌آل استرلینگ با دو پیستون [۱]



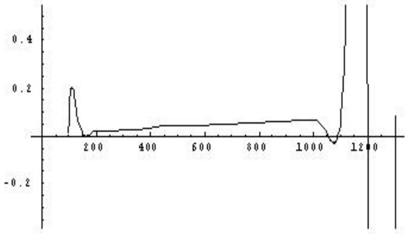
شکل ۲- مکانیزم کارکرد در حالت Q_{in}



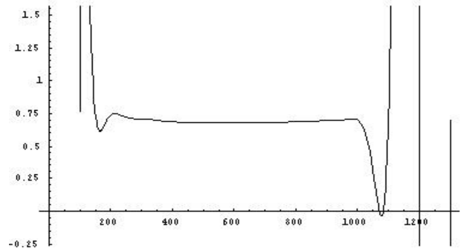
شکل ۳- مکانیزم کارکرد در حالت Q_{out}



تغییرات لزجت هوا با تغییرات دما

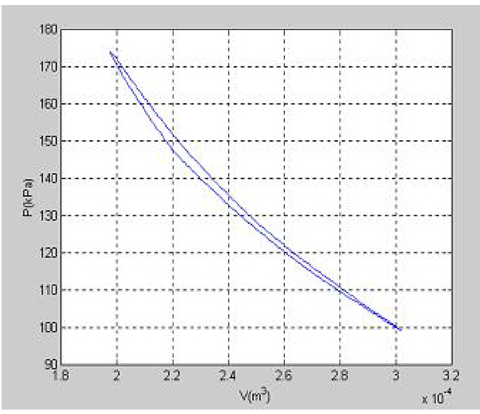


تغییرات ضریب هدایت گرمایي هوا با تغییرات دما

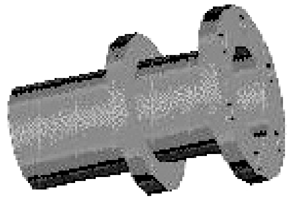


تغییرات عدد پرانتل هوا با تغییرات دما

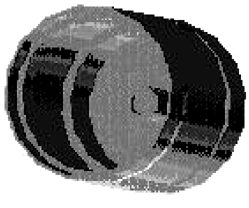
شکل ٤- تغییرات خصوصیات ترموفیزیکي هوا با تغییرات دما



شکل ٥- تغییرات حجم بر حسب فشار

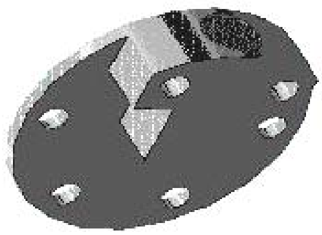


شکل ۱-٦- سیلندر قدرت

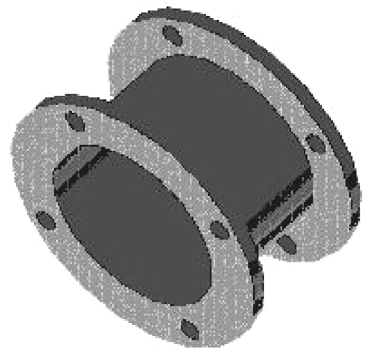


شکل ۲-٦- پیستون قدرت

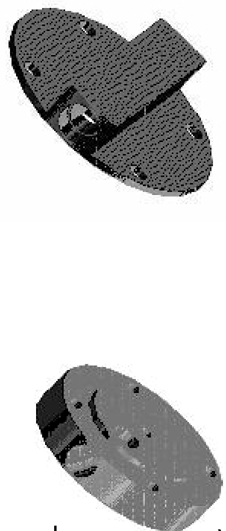
شکل ۳-٦- شاتون پیستون قدرت



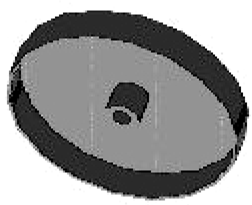
شکل ٤-٦- سرسیلندر قدرت



شکل ۱-۷- سیلندر جابجاگر



شکل ۲-۷- دو عدد سرسیلندر جابجاگر



شکل ۳-۷- پیستون جابجاگر