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 قبـل از انبـساط و كمـي قبـل از تـراكم) نـشان مي‌دهد. همانطوريكه از شـكل (۲ و۳) مـشاهده مـي‌گـردد، ايـن موتـور از يـك سـيلندر و پيـستون قـدرت، يك سيلندر و پيـستون جابجـاگر و مجموعـه‌اي از يـك هيتـر برقـي و كويـل خنـك كننـده كـه توسـط دو دريچه يك طرفه مـسير سـيال عامـل سـيكل در آنهـا تنظـيم مـي‌شـود، تـشكيل شـده اسـت. جـنس ايـن دريچه‌ها از ورقه ميكا تشكيل شـده اسـت كـه تـا $1500\,^\circ C$ مقـاوم مـي‌باشـد. عملكـرد ايـن دريچـه‌هـا بـر اسـاس خاصـيت ارتجـاعي ايـن ورقـه‌هـا مـي‌باشـد (مـسير سـيال عامـل در ايـن مجموعـه در دو حالـت Q_{in} و Q_{out} در شـكل نـشان داده شـده اسـت بطوريكـه قـسمت آبـي يـا قـسمت كـم رنـگ‌تـر، منطقـه سرد و قسمت قرمز يا پر رنگ‌تر، منطقه گـرم را نـشان مـي‌دهـد). لازم بـه ذكـر اسـت كـه بـا توجـه بـه در دسـترس بـودن هـوا و كـم خطـر بـودن آن، در اثـر گـرم شـدن و نـشتي بـه بيـرون از موتـور، از ايـن گـاز به عنوان سيال عامـل اسـتفاده شـده اسـت. هـر چنـد گازهـايي نظيـر هيـدروژن و هليـوم بـازده بزرگتـري 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 فشارP 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:

$$P_c v_c = R_{air} . T_c \tag{۱}$$

$$P_h v_h = R_{air} . T_h \tag{۲}$$

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

$$P_c = P_h \tag{۳}$$

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:

$$s_c(\theta) = s_c(\theta - 1) \tag{٤}$$

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:

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

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

قانون بقاي جرم كل سيستم عبارتست از:

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

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 داريم:

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

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:

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

بـا تـوجه بــه ۸ معـادلــه بــدست آمــده و ۸ مجـــهول 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 مقـادير 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.

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

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

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

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

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.

$$V_c=S_d-[\frac{S_d}{2}(1-\cos\theta)+nS_d(\frac{\sin^2\theta}{8n^2})]A_d+V_{coil}$$

$$+V_{\text{حجم مرده جابجاگر در قسمت سرد}}+V_{\text{لوله‌ها و اتصالات قسمت سرد}}$$

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

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

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 و k 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:

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

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:

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

$Z_2 = z_1 + \gamma$

اين فرآيند تا حـصول به مقادير نهايي x_n و y_n و z_n و ... با خطاي مشخص ε، ادامه مي‌يابد بطوري كه:

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

مي‌باشد برنامه كامپيوتري محاسبات شبيه سازي سيكل 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 حركت ميل لنگ بروش سعي و خطا، مطابق آنچه ذكر 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 سيكل استرلينگ را نشان مي‌دهد. در نمودار مشابه در يك سيكل ايده‌آل، دو فرآيند حجم ثابت وجود دارد كه اين فرآيندها در موتورهاي واقعي بطور كامل وجود ندارند. فرآيند حجم ثابت در زمان رسيدن پيستون، به دو انتهاي سيلندر قدرت، كه سرعت پيستون تقريباً نزديك صفر مي‌باشد، در نظر گرفته مي‌شود. سطح محصور شده در بين اين منحني ميزان كار خروجي را نشان مي‌دهد. و همانطور كه در شكل (۵) مشاهده مي‌شود دو نوك تيز نمودار در حقيقت دو مرحله حجم ثابت مي‌باشد. اين تغييرات كاملاً مشابه تغييرات بدست آمده در ساير مراجع براي سيكل واقعي موتور استرلينگ است[۱] .

به كمك طرح شماتيك ارائه شده براي موتور استرلينگ، طراحي قسمتهاي مختلف انجام پذيرفته است. شاتون، پيستون و سيلندر قدرت در شكلهاي (۱-۶) تا (۴-۶) و پيستون و سيلندر جابجاگر در شكلهاي (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.

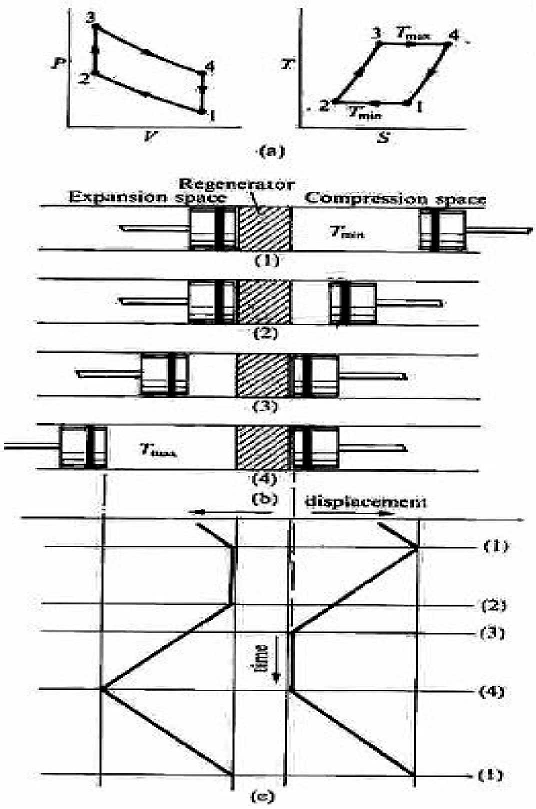
ميزان لقي سيلندر و پيستون قدرت خيلي كمتر از سيلندر و پيستون جابجاگر مي‌باشد. زيرا در واقع عمل تراكم و يا انبساط تنها بوسيله پيستون قدرت انجام مي‌شود و پيستون جابجاگر در واقع فقط هوا را جابجا مي‌نمايد و براي بدست آوردن لقي مورد نظر، سطوح آن آبكاري و سختكاري شده‌اند.

منابع

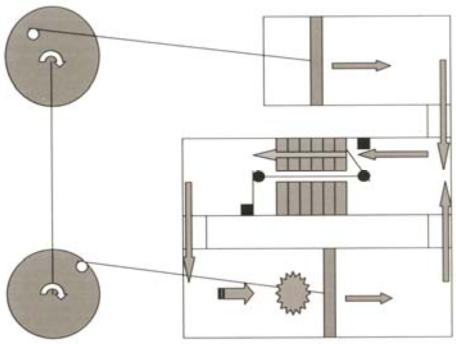
1- G. Walker, Stirling Engines, Oxford University Press 1980.
2- S. Kakac, H.Liu, Heat exchangers, selection, Rating, and Thermal Design, CRC Press, 1998.
3- J. H. Mathews, Numerical Methods for Mathematics, Science, and Engineering, Prentice- Hall International Inc., 1992.
4- J. B. Heywood, Internal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

جدول ۱- مشخصات فني موتور استرلينگ پيشنهادي

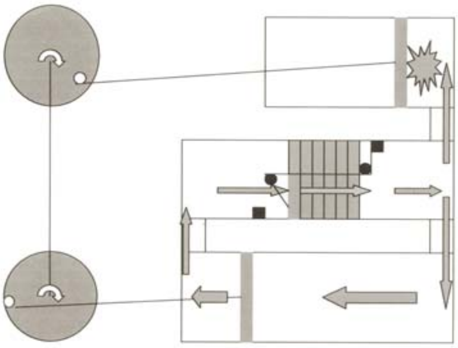
کورس پیستون قدرت	51 mm
کورس پیستون جابجاگر (Displacer)	33 mm
قطر داخلي سيلندر قدرت	51 mm
قطر داخلي سيلندر جابجاگر (Displacer)	65 mm
حجم مرده سیلندر قدرت	2.042 cm^3
حجم مرده سیلندر جابجاگر در هر طرف	3.318 cm^3
حجم لوله و اتصالات در قسمت گرم	15.19 cm^3
حجم لوله و اتصالات در قسمت سرد	17.14 cm^3
حجم هیتر	13.85 cm^3
حجم هواي موجود در کویل	30 cm^3
حداکثر توان خروجي هيتر	1200 watt
تعداد لوله‌هاي کویل ۱۸ عدد لوله	6 mm
نوع سیال عامل سیکل	air
اختلاف فاز بین پیستون جابجاگر و پیستون قدرت	80°
طول شاتون پیستون قدرت	102 mm
طول شاتون پیستون جابجاگر	64 mm
نسبت طول شاتون به طول کورس	2



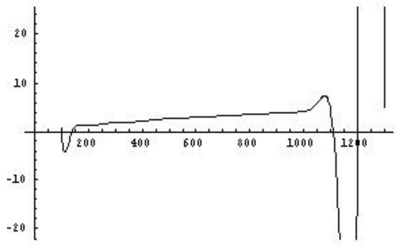
شکل ۱- تغییرات فشار بر حسب حجم
و آنتروپي بر حسب دما در سیکل
ایده‌آل استرلینگ با دو پیستون [۱]



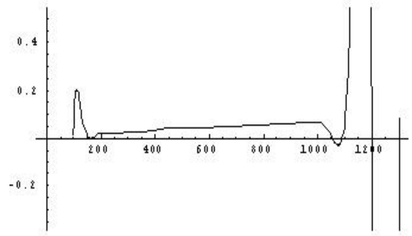
شکل ۲- مکانیزم کارکرد در حالت Q_{in}



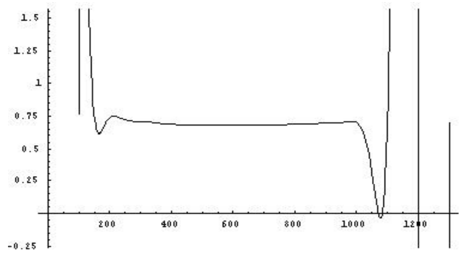
شکل ۳- مکانیزم کارکرد در حالت Q_{out}



تغييرات لزجت هوا با تغييرات دما



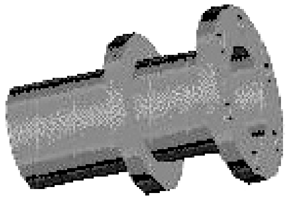
تغييرات ضريب هدايت گرمايي هوا با تغييرات دما



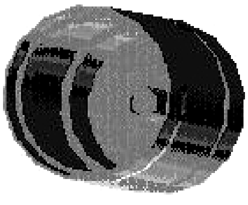
تغييرات عدد پرانتل هوا با تغييرات دما

شکل ٤- تغييرات خصوصيات ترموفيزيکي هوا با تغييرات دما

شکل ٥- تغييرات حجم بر حسب فشار

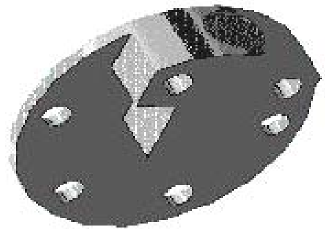


شکل ۱-٦- سیلندر قدرت

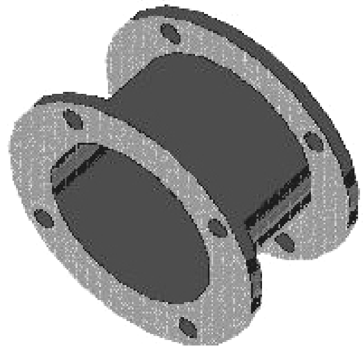


شکل ۲-٦- پیستون قدرت

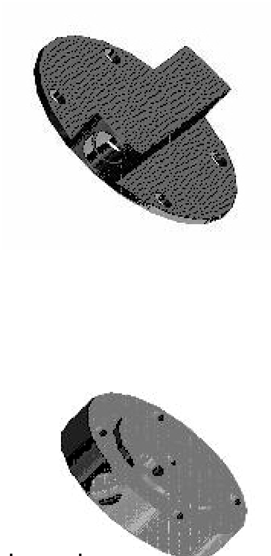
شکل ۳-٦- شاتون پیستون قدرت



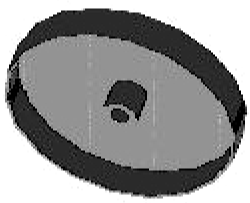
شکل ٤-٦- سرسیلندر قدرت



شکل ۱-۷- سیلندر جابجاگر



شکل ۲-۷- دو عدد سرسیلندر جابجاگر



شکل ۳-۷- پیستون جابجاگر