

تحلیل گذرای گرمایی و مکانیکی سوپاپ دود با استفاده از المان محدود

محمد حسن شجاعی فرد استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران
 امیر باقری دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه
 علم و صنعت ایران

چکیده

ساختار این مقاله بر شبیه‌سازی و تحلیل حرارتی و مکانیکی، سوپاپ دود موتور XU7 در دو مرحله استوار گردیده است. در ابتدا از خاصیت تقارن محوری استفاده شده و سوپاپ، نشیمنگاه، راهنما و فنر مدل گردیده است. در مرحله اول با در نظر گرفتن جریان گاز خروجی از سوپاپ با نرم‌افزار FLUENT تحلیل حرارتی سوپاپ انجام می‌شود. تحلیل حرارتی با شروع از شرایط اولیه تا رسیدن به شرایط یکنواخت حرارتی انجام شده که بیشینه دما ۷۰۰ درجه سانتیگراد به دست می‌آید. در مرحله دوم با نرم‌افزار ANSYS و توزیع دمای به دست آمده از مرحله قبل تحلیل تنش حرارتی انجام می‌شود که بیشینه تنش در جهت محیطی و در لبه سوپاپ و به اندازه تقریبی ۱۰۰ مگاپاسکال به دست می‌آید. در تحلیل گذرای سازه‌ای که در طول یک سیکل انجام گرفت، مشخص گردید که مقادیر تنش سازه‌ای کمتر از تنش‌های حرارتی است.

کلمات کلیدی: سوپاپ دود، المان محدود، تحلیل حرارتی، جریان گاز خروجی، موتور احتراق داخلی

Transient Thermal and Mechanical Analysis of the Exhaust Valve Using Finite Element Method

M.H. Shojaei-fard Professor, Mechanical Department, Iranian University of Science and Technology

A. Bagheri M.s.c Student, Mechanical Department, Iranian University of Science and Technology

Abstract

Internal combustion engines produce exhaust gases at extremely high temperatures and pressures. As these hot gases pass through the exhaust valve, temperatures of the valve, valve seat, and stem increase. To void any damage to the exhaust valve, heat is transferred from the exhaust valve through different parts, especially the valve seat contact. Because of exposure to hot exhaust gases, the valve burning of an internal combustion engine is a critical issue. In this study, for thermal analysis the exhaust valve of the XU7 engine at the maximum power is considered. Modeling and analysis is performed using axisymmetric, at two steps in FLUENT and ANSYS software and the exhaust valve, seat, guide and spring are modeled. At first step taking into consideration exhaust gas flow from exhaust valve, transient thermal analysis using FLUENT software is performed from an initial conditions and followed until the steady state condition. The maximum temperature of the valve is obtained in steady state condition and its value is 700 °C. At two steps using ANSYS software and temperature distribution as a result of previous step, thermal stress analysis is performed and the result shows that the maximum stress happened at the edge of the head, and with the value of more than 100 MPa. Also, the structural analysis is done where the structural stresses is smaller than the thermal stresses.

Keywords: Exhaust valve, Finite element, Thermal analysis, Exhaust gas, Internal combustion engine.

۱- مقدمه

نظر نگرفت و فرض کرد که سوپاپ همواره با نشیمنگاه در تماس است [۴ و ۵].

هایونگ و هو در سال ۱۹۹۳ با روش تحلیل (قرار دادن مقاومت معادل به جای اجزا) دمای سوپاپ را پیدا کردند و همچنین ضریب انتقال گرما بین سوپاپ و نشیمنگاه آن را به صورت چرخه‌ای به دست آوردند [۸]. یانگ و هامادا با شبیه-سازی سوپاپ دمای سوپاپ را پیدا کردند و همچنین اثر پارامترهای کارکرد موتور را بر دمای سوپاپ بررسی نمودند [۹]. رنجان با استفاده از المان محدود و نرم‌افزار ANSYS توزیع دمای سوپاپ را در شرایط یکنواخت پیدا کرد و سپس تنش‌های حرارتی را نیز بدست آورد [۱۰]. در پروژه‌های دیگر عبدلی با المان محدود و نرم‌افزار ANSYS توزیع دمای سوپاپ را در شرایط گذرا پیدا کرد و همچنین تنش‌های حرارتی را نیز بدست آورد. اما او اثر جریان خروجی را در نظر نگرفت [۱۱].

در این مقاله، تحلیل گذرای گرمایی و تنش با استفاده از المان محدود انجام می‌شود و بر خلاف کار پراساد که حرکت سوپاپ را در نظر نگرفت، جابجایی و حرکت سوپاپ در نظر گرفته می‌شود. همچنین بر خلاف کار عبدلی تاثیر حرارتی دود در هنگام عبور از مجرای خروجی بر روی سوپاپ مدنظر قرار خواهد گرفت.

۲- مشخصات مسأله

در این تحقیق سوپاپ دود موتور XU7 مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به این سوپاپ از شرکت ایپکو اخذ شده است [۶]. سوپاپ موتور XU7 از دو قسمت سر و ساقه تشکیل شده و از دو جنس متفاوت می‌باشد. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی قسمت سر و ساقه سوپاپ نشان داده شده است. هندسه سوپاپ در شکل ۱ آورده شده است. همچنین خواص مکانیکی و گرمایی سوپاپ دود در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول T دما، S_{II} استحکام کششی، S_y استحکام تسلیم، S_e استحکام خستگی، ν نسبت پواسون، α ضریب انبساط گرمایی، K رسانش گرمایی، C گرمای ویژه و ρ چگالی می‌باشد.

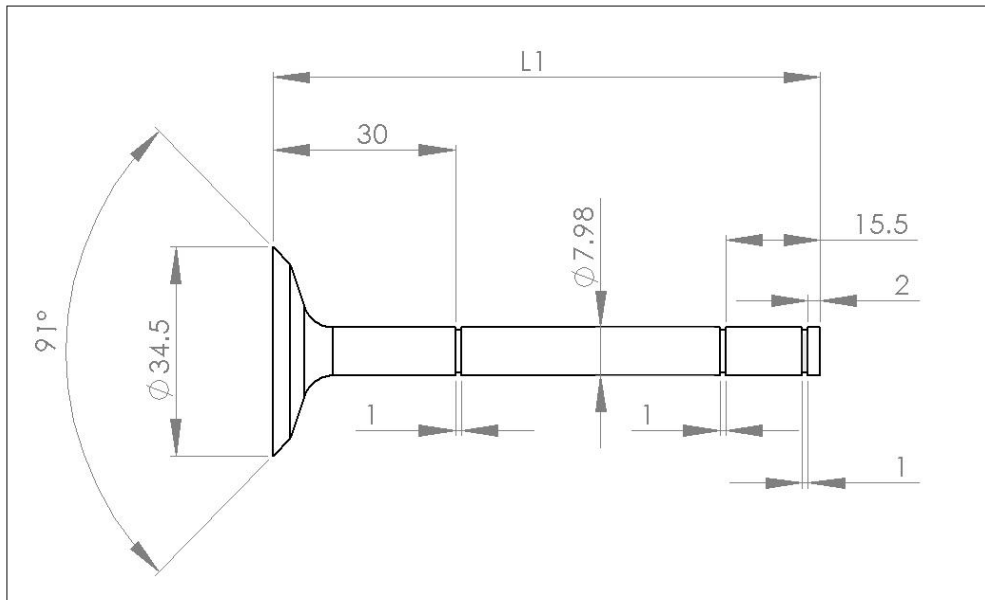
موتورهای احتراق داخلی گازهای خروجی را در دما و فشار بالا تولید می‌کنند، به طوری که این گازهای گرم شده از سوپاپ دود خارج می‌شوند و سبب افزایش دمای سوپاپ می‌شوند. برای جلوگیری از صدمه دیدن سوپاپ، حرارت تولید شده از قسمت-های مختلف سوپاپ بویژه تماس سوپاپ با نشیمنگاه منتقل می‌شود. با در نظر گرفتن این که سوپاپ همواره در معرض گازهای داغ ناشی از احتراق قرار دارد، مشکل سوختن سوپاپ از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. مسائل دیگری از قبیل ایجاد پدیده کوبش، افزایش مصرف سوخت و آلودگی از دیگر دلایل اهمیت تحلیل میدان دما در سوپاپ دود می‌باشد. سوپاپ دود تحت بارهای مکانیکی و حرارتی بالایی قرار دارد. در طراحی یک سوپاپ دود فاکتور مهم دمای کاری سوپاپ می‌باشد. توزیع دمای بالای سوپاپ علاوه بر گرادیان شدید حرارتی که به نوبه خود تنش‌های حرارتی بالایی ایجاد می‌کند، به خواص فیزیکی و مکانیکی مواد سوپاپ تاثیرگذار است [۱، ۲، ۳، ۴ و ۵]. استحکام فلزات در دمای بالا پایین می‌آید و مقاومت خوردگی آنها نیز افت می‌کند. اگر تنش‌های ناشی از بارهای مکانیکی سوپاپ را به تنش‌های حرارتی اضافه کنیم، اهمیت موضوع بیشتر مشخص می‌شود. بنابراین گام مهم و اولیه در مورد طراحی، تحلیل و مطالعه بر روی سوپاپ دود، تحلیل حرارتی آن و پیدا کردن توزیع دما در سوپاپ می‌باشد [۱ و ۶].

یافتن دمای سوپاپ به دو روش عددی و تجربی انجام می‌گیرد. در سال ۱۹۹۷، آلکیداز دمای یک سوپاپ ورودی را در شرایط یکنواخت گرمایی با استفاده از اندازه‌گیری به‌دست آورد. او این کار را در دو نقطه از سوپاپ ورودی انجام داد و پارامترهای موثر بر آن را بررسی کرد [۲ و ۳]. در سال ۱۹۹۹، کوارت و چنگ دمای سوپاپ ورودی را در شرایط گذرا با اندازه‌گیری مستقیم پیدا کردند [۷].

پراساد در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۸۹ توزیع دمای سوپاپ ورودی و تنش‌های حرارتی را با روش اختلاف محدود پیدا کرد و همچنین تاثیر عایق‌گذاری سر سوپاپ را بررسی نمود. او در این بررسی‌ها حرکت سوپاپ و همچنین جریان خروجی دود را در

جدول ۱- ترکیب شیمیایی قسمت های مختلف سوپاپ [۶ و ۱۲]

قسمت	نوع فولاد	شماره UNS	آهن	کربن	منگنز	فسفر	گوگرد	سیلیسیم	کرم
سر سوپاپ	استنیتی	S63019/ X50CrMnNiNbN219	عنصر پایه	۰/۴-۰/۵	۸-۱۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۴۵	۲۰-۲۲
ساقه سوپاپ	مارتنزیتی	S65007/ X45crsi93	عنصر پایه	۰/۴-۰/۵	۰/۸	۰/۴	۰/۳	۲/۷-۳/۳	۸-۱۰



شکل ۱- هندسه سوپاپ دود موتور XU7 [۶]

جدول ۲- خواص مکانیکی و گرمایی سوپاپ دود [۶ و ۱۲]

سر سوپاپ								
T [°C]	Su [MPa]	Sy [MPa]	Se [MPa]	ν	α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	K [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]	C [$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$]	ρ [kg/m^3]
۲۵	۱۱۹۰	۸۸۰	۲۵۰	۰/۲۸	۱۵/۵	۱۴/۵	۴۵۰	۷۷۰۰
۱۰۰	۱۰۰۰	۷۰۰	۲۰۰	۰/۲۸	—	—	۴۵۰	۷۷۰۰
۲۰۰	۹۲۰	—	—	۰/۲۸	—	—	—	۷۷۰۰
۳۰۰	۸۵۰	—	—	۰/۲۸	۱۷/۵	—	—	۷۷۰۰
۴۰۰	۷۸۰	—	—	۰/۲۸	—	—	—	۷۷۰۰
۵۰۰	۷۵۰	—	—	۰/۲۸	۱۸/۵	۱۴/۷	—	۷۷۰۰
۶۵۰	۷۲۰	۵۷۰	—	۰/۲۸	—	—	—	۷۷۰۰
۷۶۰	۳۴۰	۲۸۰	۹۰	۰/۲۸	۱۸/۸	۱۴/۹	—	۷۷۰۰
۸۰۰	۳۱۰	—	—	۰/۲۸	—	۱۵/۱	—	۷۷۰۰
ساقه سوپاپ								
T [°C]	Su [MPa]	Sy [MPa]	Se [MPa]	ν	α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	K [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]	C [$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$]	ρ [kg/m^3]
۲۵	۹۵۰	۷۰۰	۲۰۰	۰/۲۸	۱۲/۹	۲۱	۴۳۰	۷۷۰۰
۱۰۰	۹۰۰	۶۶۰	۱۷۰	۰/۲۸	—	—	۴۳۰	۷۷۰۰
۲۰۰	۸۰۰	—	—	۰/۲۸	—	—	—	۷۷۰۰
۳۰۰	۷۳۰	—	—	۰/۲۸	۱۳/۲	—	—	۷۷۰۰
۴۰۰	۶۷۰	—	—	۰/۲۸	—	—	—	۷۷۰۰
۵۰۰	۴۰۰	۳۱۰	—	۰/۲۸	۱۳/۶	۲۲/۵	—	۷۷۰۰
۶۵۰	۳۳۰	۱۶۰	—	۰/۲۸	—	—	—	۷۷۰۰
۷۶۰	۲۳۰	۸۰	۶۰	۰/۲۸	۱۴	۲۲/۸	—	۷۷۰۰
۸۰۰	۱۰۰	—	—	۰/۲۸	—	۲۳/۲	—	۷۷۰۰

۳- شرایط مرزی

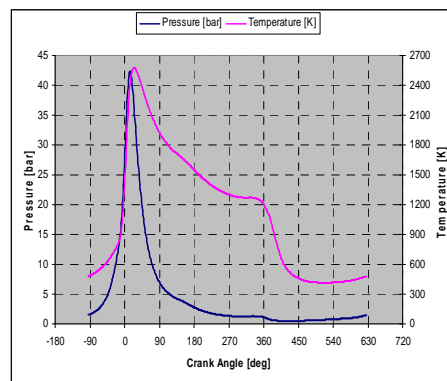
معادله حاکم بر توزیع دما در سوپاپ دود معادله پخش گرما است که مانند زیر بیان می‌شود [۱]:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن k ضریب رسانش گرمایی، T دما، \dot{q} آهنگ تولید انرژی در واحد حجم و $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ ضریب پخش گرمایی نامیده می‌شود. از حل معادله فوق می‌توان به تابع توزیع دما دست یافت. با توجه به اینکه انتخاب صحیح دستگاه مختصات به هندسه مساله بستگی دارد و شکل هندسی سوپاپ دارای تقارن محوری است، بنابراین بیان معادله انرژی در دستگاه مختصات استوانه ای مناسبتر بوده و باعث سادگی تحلیل می‌شود [۱].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[kr \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

فشار و دمای داخل سیلندر در هر درجه از چرخش میل‌لنگ در شکل ۲ نشان داده شده است. برای تحلیل از بارگذاری بیشینه استفاده می‌شود. بنابراین در شکل ۲ فشار و دمای داخل سیلندر در دور موتور ۶۰۰۰ rpm می‌باشد.



شکل ۲- نمودار تجربی توزیع فشار و دمای داخل سیلندر موتور XU7 بر حسب زاویه گردش میل‌لنگ در دور موتور ۶۰۰۰ rpm [۶]

سرعت میانگین پیستون از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱ و ۱۳]:

$$V_p = \frac{2 S n}{60} \quad (3)$$

در این رابطه $S = 0.081$ کورس پیستون بر حسب m و n دور میل‌لنگ که در بیشینه توان این موتور ۶۰۰۰ rpm می‌باشد. بنابراین سرعت متوسط پیستون $\frac{m}{s}$ ۱۴/۲ به دست می‌آید. در طول یک سیکل (۷۲۰ درجه از چرخش میل‌لنگ) سرسوپاپ در حال تبادل گرما با گازهای داخل سیلندر می‌باشد. همچنین در هنگام خروج گازهای حاصل از احتراق از داخل سیلندر تبادل گرما بین گازهای خروجی و قسمتی از سر و ساقه سوپاپ انجام می‌گیرد. در تحلیل حرارتی با توجه به زاویه گردش میل‌لنگ در طول هر سیکل می‌توان دمای داخل سیلندر را در زاویه مورد نظر اعمال کرد.

ضریب انتقال حرارت جابجایی گازهای داخل سیلندر در هر درجه از چرخش میل‌لنگ (h_g) از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱ و ۱۳]:

$$h_g(\theta) = 3.26(p(\theta))^{0.8} (6.18 \times V_p)^{0.8} b^{-0.2} (T(\theta))^{-0.55} \quad (4)$$

در این رابطه $h_g(\theta)$ ضریب انتقال حرارت جابجایی بر حسب W/m^2C ، $p(\theta)$ فشار داخل سیلندر بر حسب KPa ، V_p سرعت متوسط پیستون بر حسب m/s ، b قطر پیستون بر حسب m و $T(\theta)$ دما بر حسب $^{\circ}C$ است.

دمای منتج گاز (T_{gr}) و ضریب انتقال حرارت جابجایی (h_{gm}) عبارتند از [۴، ۵، ۱۱ و ۱۳]:

$$T_{gr} = \frac{(h_g T_g)_m}{h_g} \quad (5)$$

$$h_{gm} = \frac{1}{720} \int_0^{720} h_g(\theta) d\theta \quad (6)$$

در روابط بالا θ زاویه میل‌لنگ، $h_g(\theta)$ و $T_g(\theta)$ مقادیر ضریب انتقال حرارت و دما بر حسب زاویه چرخش میل‌لنگ عبارت است از [۱۱ و ۱۳]:

$$(h_g T_g)_m = \frac{1}{720} \int_0^{720} h_g(\theta) T_g(\theta) d\theta \quad (7)$$

با استفاده از فشار و دمای داخل سیلندر و رابطه (۴) $h_g(\theta)$ در چند زاویه محاسبه می‌شود. به همین ترتیب و با محاسبه

$$h_{f0} = 1.448(57.3451(1 - \cos(\theta - 30)))$$

(۱۱)

$$30^\circ \leq \theta \leq 42.122^\circ$$

$$h_{f2} = 1.448(16.5 \cos(59 - (\theta - 30)) - 10)$$

(۱۲)

$$42.122^\circ \leq \theta \leq 89^\circ$$

$$h_{f2} = 1.448(16.5 \cos((\theta - 30) - 59) - 10)$$

$$89^\circ \leq \theta \leq 135.88^\circ$$

$$h_{f1} = 1.448 \left(\frac{57.3451}{1 - \cos(118 - (\theta - 30))} \right)$$

$$135.878^\circ \leq \theta \leq 148^\circ$$

$$h_{f0} = 1.448 \left(-\frac{\Delta S}{30^2} (178 - \theta) + \frac{2\Delta S}{30} (178 - \theta) \right)$$

$$148^\circ \leq \theta \leq 178^\circ$$

ΔS لقی بین اسبک و سوپاپ می باشد که در اینجا ۰/۵ میلی-متر در نظر گرفته می شود. θ بر حسب درجه است و مقادیر h بر حسب mm به دست می آید.

سوپاپ دود در حدود ۱۱۸ درجه از دوران میل بادامک باز و در ۲۴۲ درجه باقیمانده بسته می شود. زمان مورد استفاده در تحلیل دما و شرایط مرزی مسئله به صورت زیر می باشد [۱۱]:

$$t = \frac{D}{6.M}$$

(۱۶)

که در اینجا t زمان بر حسب ثانیه، D زاویه گردش میل بادامک بر حسب درجه و M سرعت دوران میل بادامک بر حسب دور بر دقیقه می باشد. یک سیکل کاری موتور که سوپاپ در آن یکبار باز و بسته می شود، زمانی است که محور میل لنگ دو دور می زند و میل بادامک یک دوران می کند و زاویه D به اندازه ۳۶۰ درجه تغییر می کند.

با توجه به اینکه تحلیل در بیشینه توان موتور انجام می گیرد و دور موتور در این توان ۶۰۰۰ دور بر دقیقه می باشد، مقدار M در روابط ۳۰۰۰ دور بر دقیقه ثابت می باشد. بنابراین زمان یک

پارامترهای دیگر مقادیر (T_{gr}) و (h_{gm}) بدست آمده به ترتیب عبارتند از، $867^\circ C$ و $523 W/m^2 C$.

شرایط حاکم بر دود:

دمای متوسط دود را با توجه به شکل (۲) (بین زوایای ۱۸۰ تا ۳۷۰) حدوداً $1000^\circ C$ می توان در نظر گرفت. ضریب انتقال حرارت جابجایی دود (h_e) با تعریف و بدست آوردن دو عدد بدون بعد Re و Nu طبق روابط زیر به دست می آید [۴، ۵، ۱۱] و [۱۳]:

$$Nu = \frac{h_e D}{K_e} = 0.18(Re)^{0.62}$$

(۸)

$$Re = \frac{\rho_e V_e D}{\mu}$$

(۹)

که در این روابط D قطر سوپاپ، K_e ضریب انتقال حرارت رسانایی دود، V_e سرعت دود در اطراف سوپاپ، ρ_e چگالی دود و μ لزجت دود می باشد. سرعت دود را با توجه به حجم و سرعت متوسط پیستون و قطر معادل سطح مقطع دهانه خروجی می توان مقدار $115 m/s$ در نظر گرفت. مقادیر ρ_e ، K_e و μ در دمای متوسط دود به ترتیب عبارتند از $1.0 \times 10^{-7} \text{ Kg/m}^3$ ، 0.73578 Kg/m^3 و $437 \times 10^{-7} \text{ Kg/m} \cdot \text{s}$.

با استفاده از مقادیر فوق و رابطه (۸) ضریب انتقال حرارت جابجایی دود $385 W/m^2 C$ بدست می آید. دما و ضریب انتقال حرارت هوای انتهایی سوپاپ با توجه به انتقال حرارت طبیعی به ترتیب عبارتند از، $30^\circ C$ و $12 W/m^2 C$. دمای راهنما و نشیمنگاه در محل تماس با سرسیلندر به ترتیب $300^\circ C$ و $100^\circ C$ می باشد [۴، ۵ و ۶]. ضرایب انتقال حرارت بین سوپاپ و نشیمنگاه و سوپاپ و راهنما به ترتیب عبارتند از، $500 W/m^2 C$ و $180 W/m^2 C$ [۴ و ۵].

شرایط حاکم بر مرزهای متحرک:

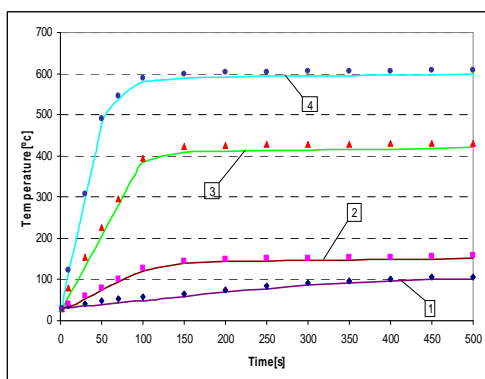
روابط خیز سوپاپ در قسمت بلند شدن از سرسیلندر (پایین رفتن) بر حسب زاویه دوران میل بادامک θ عبارتند از [۱۱ و ۱۴]:

$$h_{f0} = 1.448 \left(-\frac{\Delta S}{30^2} (\theta) + \frac{2\Delta S}{30} (\theta) \right) \quad 0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$$

(۱۰)

۵- مدل ارزیابی

مدل ایجاد شده در بخش قبل فقط یک مدل اولیه است و درستی نتایج حاصل از آن مشخص نیست. برای اثبات درستی مدل کار ارزیابی لازم است. ارزیابی با استفاده از ابعاد مدل، شرایط مرزی و نتایج محققین دیگر انجام شده است [۴، ۵ و ۱۱]. به طوریکه ابعاد، خواص مواد و شرایط مرزی استفاده شده توسط آنها مشابه با این تحقیق می باشد. مقایسه دما در چهار نقطه از مدل بر حسب زمان در شکل ۶ نشان داده شده است. نقطه ۱ در انتهای سوپاپ، نقطه ۲ در محل تماس با راهنما، نقطه ۳ در ساقه سوپاپ (پایین تر از راهنما) و نقطه ۴ در مرکز سر سوپاپ قرار دارد. با دقت در شکل ۶ مشاهده می شود که اختلاف بین نتایج ناچیز است.



شکل ۶- تغییرات دما بر حسب زمان: (--) نتایج محققین دیگر [۴، ۵، ۱۱، (•) نتایج حاصل از تحلیل

۶- روش تحلیل

شروع تحلیل از زاویه ۳۷۱ درجه دوران میل لنگ در لحظه بسته شدن سوپاپ دود انجام می گیرد. از آنجا که فشار و دمای داخل سیلندر بر حسب درجه می باشد (شکل ۲)، با توجه به رابطه (۱۶) درجه دوران میل لنگ به زمان تبدیل می شود و فشار و دمای داخل سیلندر بر حسب زمان مرتب می شود و تحلیل گرمایی با نرم افزار FLUENT انجام می گیرد.

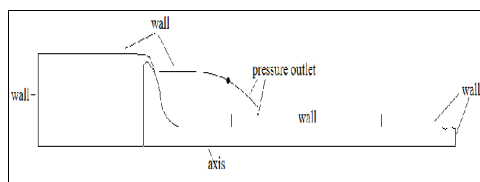
مدلی که انتخاب می شود، متقارن محوری و دوبعدی و المان متحرک و توربولانس و ناپایدار می باشد. مدل توربولانس انتخاب شده مدل $k-\epsilon$ RNG می باشد. این مدل به دلیل مناسب بودن برای جریانهای پیچیده، گذرا، جداشونده، چرخشی و ثانویه انتخاب می شود. همچنین برای پیش بینی انتقال جرم و حرارت دیواره مناسب می باشد.

از آنجا که بین سوپاپ و نشیمنگاه المان وجود دارد، در هنگام بسته شدن سوپاپ حجم این المان ها کم می شود اما صفر نمی شود و در واقع فاصله کمی بین سوپاپ و نشیمنگاه ایجاد می شود که سبب خروج گازهای ناشی از احتراق از داخل سیلندر

سیکل با توجه به رابطه (۱۶) برابر 0.02 ثانیه می باشد. همچنین در طول یک سیکل در دور موتور ۶۰۰۰، سوپاپ به مدت 0.01345 ثانیه بسته و بعد از آن به مدت 0.00655 ثانیه باز می باشد و دود از داخل سیلندر خارج می شود.

۴- شبیه سازی

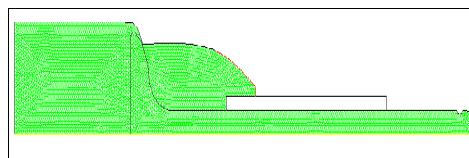
هندسه ساده شبیه سازی سوپاپ و اجزای مرتبط با آن مثل راهنما، نشیمنگاه و ... در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به تقارن محوری سوپاپ بهتر است شبیه سازی به صورت تقارن محوری صورت گیرد و مدل هندسی سوپاپ، راهنما و نشیمنگاه ایجاد شود. از آنجا که فنر در تحلیل حرارتی نقشی ندارد، در این بخش آن را مدل نمی کنیم.



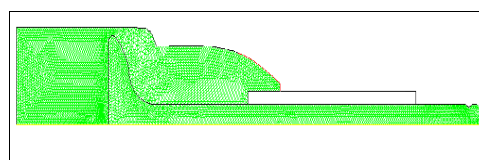
شکل ۳- هندسه ساده شبیه سازی سوپاپ و اجزای مرتبط با آن

برای شبیه سازی ابتدا با نرم افزار GAMBIT سوپاپ و اجزای مرتبط با آن مدل می شود. برای ایجاد حرکت سوپاپ از سیستم المان بندی متحرک (moving mesh) استفاده می شود. همچنین بین سوپاپ و نشیمنگاه و بین سوپاپ و راهنما المان بندی می شود.

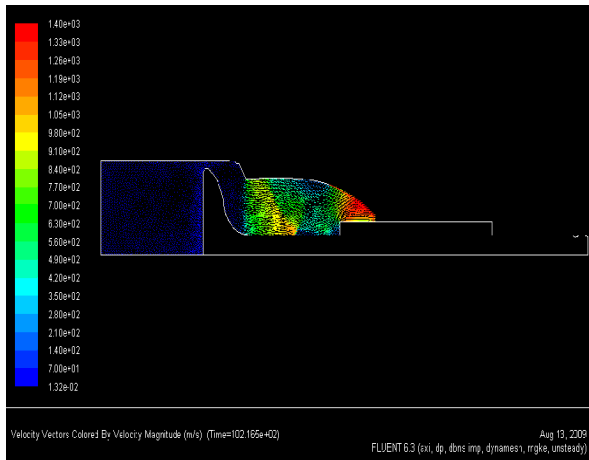
شکل ۴ مدل کلی المان بندی را در لحظه بسته بودن سوپاپ و شکل ۵ مدل کلی المان بندی را در لحظه باز بودن سوپاپ نشان می دهد. تعداد کل المان ها ۹۳۹۰ می باشد که از این تعداد ۶۱۱۰ المان برای محیط جامد و ۳۲۸۰ المان برای محیط سیال می باشد.



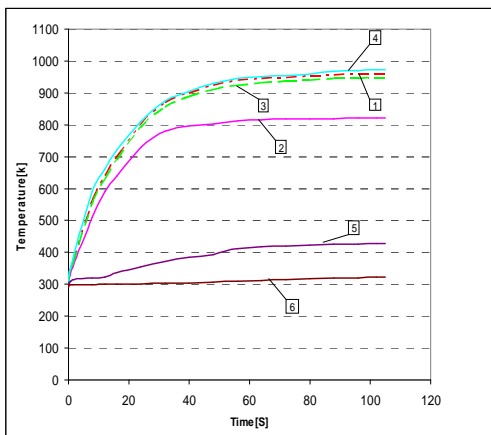
شکل ۴- مدل کلی المان بندی در لحظه بسته بودن سوپاپ



شکل ۵- مدل کلی المان بندی در لحظه باز بودن سوپاپ



شکل ۸- بردار سرعت گازهای خروجی در هنگام باز بودن سوپاپ



شکل ۹- نمودار تغییرات دما نسبت به زمان در نقاط داده شده شکل ۷

۸- روش تحلیل تنش حرارتی

به دلیل اینکه نرم افزار FLUENT قادر به محاسبه تنش نمی باشد، بنابراین برای محاسبه تنش باید از نرم افزار ANSYS استفاده کرد. به همین منظور هندسه نشان داده شده در شکل ۳ (سوپاپ و اجزای مرتبط با آن) را در نرم افزار ANSYS مدل می کنیم. همچنین علاوه بر آن فنر و رینگ آن نیز مدل می شود، زیرا در تحلیل تنش موثر می باشد. برای المان بندی مدل هندسی از المان PLANE82 برای سوپاپ، نشیمنگاه و راهنما استفاده می شود. این المان یک المان دوبعدی مرتبه بالا می باشد که دارای ۸ گره و دو درجه آزادی جابجایی در هر گره است [۱۶]. برای شبیه سازی سطوح تماس از المان های تماس CONTA172 و هدف TARGE169 استفاده می شود. این المان ها بین سطوح در تماس با هم مثل سوپاپ و نشیمنگاه و سوپاپ و راهنما قرار می گیرند. المان CONTA172 بر روی سطح سوپاپ در محل تماس و المان TARGE169 بر روی سطح نشیمنگاه و راهنما در محل تماس قرار می گیرد. در تحلیل

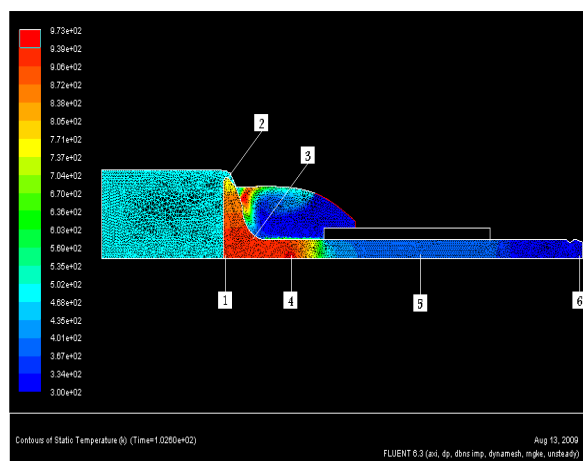
در هنگام بسته بودن سوپاپ می شود. برای جلوگیری از این مشکل لزجت سیال در این ناحیه زیاد می شود. همچنین برای بالابردن انتقال گرمای رسانشی در این ناحیه ضریب هدایت زیاد می شود [۱۵]. دمای بین سوپاپ و نشیمنگاه $300^{\circ}C$ و دمای بین سوپاپ و راهنما $100^{\circ}C$ قرار داده می شود.

فشار و دمای داخل سیلندر بر حسب زمان، روابط حرکت سوپاپ بر حسب زمان و خواص مواد سوپاپ و اجزای مرتبط با آن به صورت تابع تعریف شده توسط کاربر^۱ برای نرم افزار FLUENT تعریف می شود.

تحلیل حرارتی از یک شرایط اولیه آغاز می شود و تا یکنواخت شدن جریان گرما در سوپاپ ادامه می یابد. شرایط یکنواخت و پایا زمانی حاصل می شود که ورود و خروج گرما به داخل سوپاپ برابر شود. در این حالت دمای سوپاپ افزایش نمی یابد.

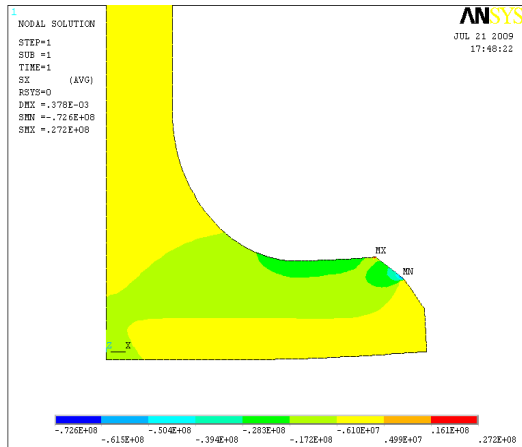
۷- نتایج تحلیل حرارتی

توزیع دمای سوپاپ در شرایط یکنواخت در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بیشینه دمای سوپاپ در نقطه ۴ اتفاق می افتد و در حدود $973k$ ($700^{\circ}C$) می باشد. در شکل ۸ بردار سرعت گازهای خروجی را در هنگام باز بودن سوپاپ نشان می دهد. نمودار تغییرات دما نسبت به زمان در نقاط داده شده شکل ۷، در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود شرایط بعد از حدود ۱۰۰ ثانیه یا ۵۰۰۰ سیکل بعد از روشن شدن موتور یکنواخت می شود، بطوریکه با توجه به زمان کارکرد موتور بعد از روشن شدن که ساعت ها طول می کشد زمان بسیار کمی است. در نتایج محققین دیگر نیز این محل به عنوان داغترین محل سوپاپ دود موتور نشان داده شده است [۲، ۴، ۵ و ۱۵].

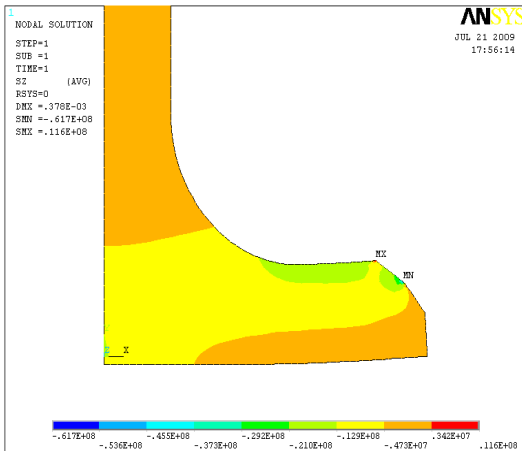


شکل ۷- توزیع دمای سوپاپ در شرایط یکنواخت بر حسب کلونین (k)

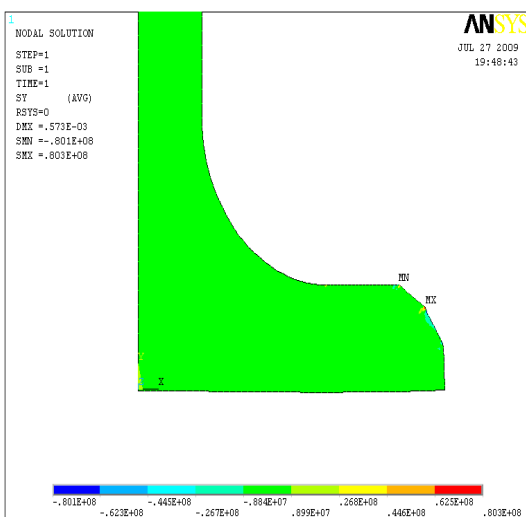
^۱ UDF (User Define Function)



شکل ۱۱- توزیع تنش حرارتی (Pa) در جهت شعاعی در شرایط یکنواخت

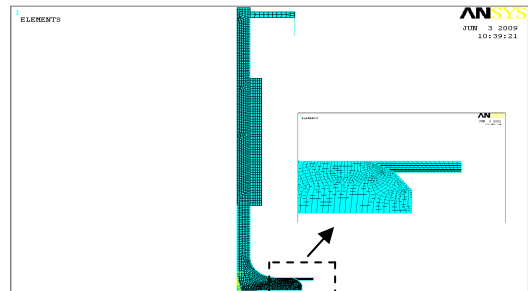


شکل ۱۲- توزیع تنش حرارتی (Pa) در جهت محوری در شرایط یکنواخت



شکل ۱۳- توزیع تنش حرارتی (Pa) در جهت محیطی در شرایط یکنواخت

تنش درجه آزادی این المان‌ها جابجایی در دو جهت می‌باشد که در مقابل نفوذ به داخل هم مقید شده‌اند. همچنین در هنگام تحلیل، فنر با المان COMBINE14 با سختی 42 N/m مدل می‌شود. خواص مواد نیز بر حسب دما طبق جدول ۲ تعریف می‌شود. در شکل ۱۰ مدل کلی المان‌بندی سوپاپ و اجزای مرتبط با آن نشان داده شده است [۱۶ و ۱۷].



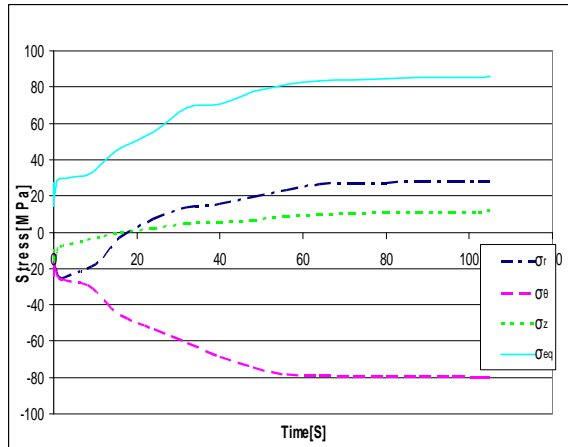
شکل ۱۰- مدل کلی المان‌بندی سوپاپ و اجزای مرتبط با آن

برای تحلیل تنش حرارتی باید فنر، نشیمنگاه و راهنما در جای خود ثابت باشند، بنابراین گره‌های انتهایی آنها در دو جهت گیردار می‌شود. گره‌های آزاد فنر نیز در دو جهت گیردار می‌شود.

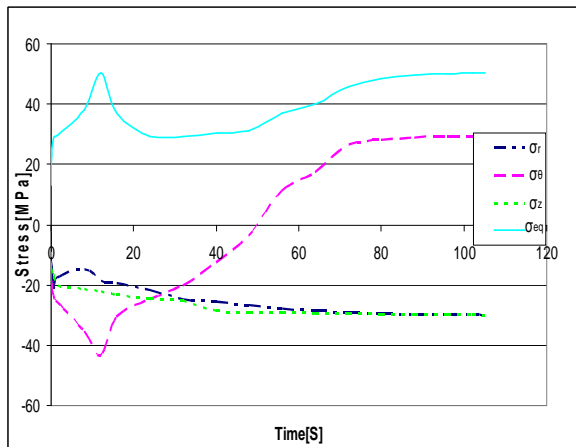
بارگذاری حرارتی چیزی جز اعمال توزیع دمایی حاصل از تحلیل حرارتی نمی‌باشد. لذا برای انتقال دمایی بدست آمده از تحلیل حرارتی در نرم‌افزار FLUENT به مدل ایجاد شده در نرم‌افزار ANSYS یک برنامه کامپیوتری نوشته می‌شود. بنابراین پس از تحلیل حرارتی در هر سیکل دماهای بدست آمده به این کد برنامه داده می‌شود و این کد دماهای موجود را به گره‌های متناظر آنها در نرم‌افزار ANSYS انتقال می‌دهد. پس در هر سیکل دماهای خروجی از نرم‌افزار FLUENT به عنوان داده‌های ورودی نرم‌افزار ANSYS مورد استفاده قرار می‌گیرد و در نهایت تنش‌های حرارتی به دست می‌آیند.

۹- نتایج تحلیل تنش حرارتی

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ به ترتیب توزیع تنش حرارتی در جهت شعاعی، محوری، محیطی و تنش معادل (فون میسز) در شرایط یکنواخت (دائم) نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود بیشترین تنش حدود 100 MPa می‌باشد که در محل نشیمنگاه و در جهت محیطی ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه دما در مرکز سوپاپ از کناره‌های آن بیشتر است بنابراین این نقاط بیشتر منبسط می‌شوند که این موضوع باعث ایجاد تنش مثبت بالایی در جهت محیطی در لبه‌های سرسوپاپ می‌شود. نتایج تجربی نیز این موضوع را تأیید می‌کند [۱۰ و ۱۱].



شکل ۱۶- نمودار تنش حرارتی بر حسب زمان در نقطه ۲ (شکل ۱۴). تنش شعاعی، σ_θ ، تنش محیطی، σ_z ، تنش محوری و σ_{eq} تنش معادل فون میسز

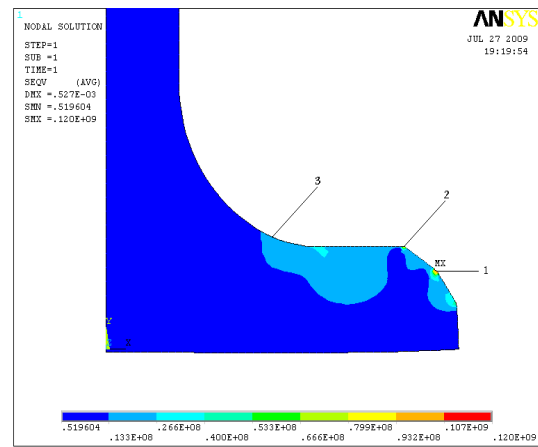


شکل ۱۷- نمودار تنش حرارتی بر حسب زمان در نقطه ۳ (شکل ۱۴). تنش شعاعی، σ_θ ، تنش محیطی، σ_z ، تنش محوری و σ_{eq} تنش معادل فون میسز

۱۰- روش تحلیل تنش سازه‌ای

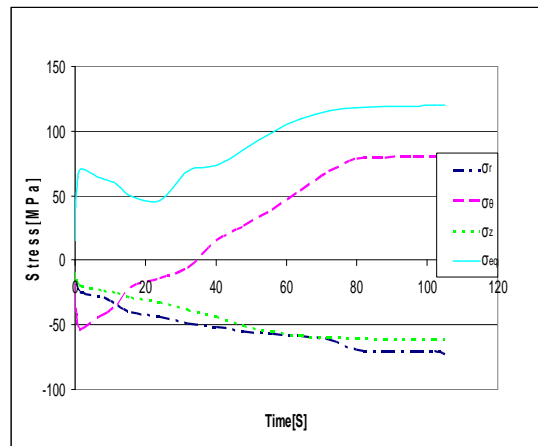
بارهای سازه‌ای وارده بر سوپاپ عبارتند از نیروی فنر، بار ضربه‌ای حاصل از برخورد اسبک به انتهای سوپاپ، بارهای دینامیکی در هنگام حرکت سوپاپ، بارهای ناشی از برخورد سوپاپ به نشیمنگاه و بالاخره فشار حاصل از گازهای داخل سیلندر و دود. برای تحلیل تنش سازه‌ای تمام این پارامترها باید در نظر گرفته شوند. برای تحلیل از همان مدل ایجاد شده در تحلیل تنش حرارتی استفاده می‌شود.

برای حرکت سوپاپ از روابط (۱۰) تا (۱۵) استفاده می‌شود و چون این روابط بر حسب زاویه می‌باشند، از رابطه (۱۶) روابط حرکت سوپاپ بر حسب زمان بدست می‌آید. این روابط در نرم-افزار ANSYS برای حرکت سوپاپ تعریف می‌شود. همچنین

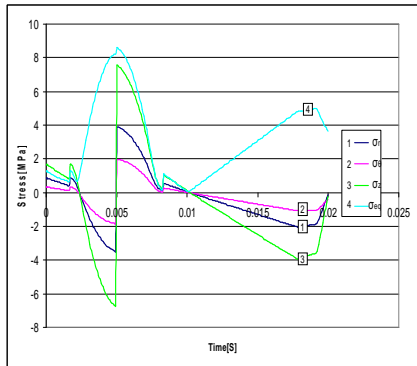


شکل ۱۴- توزیع تنش حرارتی (Pa) معادل (فون میسز) در شرایط یکنواخت

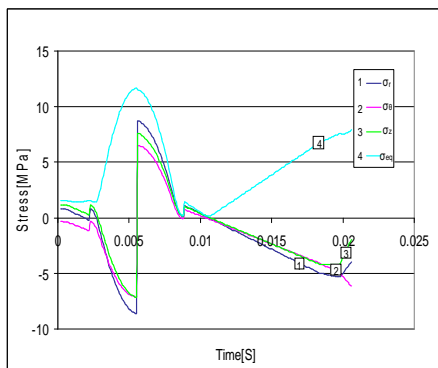
در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نمودار تنش حرارتی بر حسب زمان در نقاط ۱، ۲ و ۳ مربوط به شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که این شکل‌ها نشان می‌دهند در ثانیه‌های اول در تمام نقاط این تنش‌ها منفی می‌باشند. این موضوع به این علت است که چون این نقاط در سطح بیرونی سوپاپ می‌باشند در ثانیه‌های اول داغتر می‌باشند. بنابراین بیشتر تمایل به انبساط دارند که با عدم انبساط نقاط اطراف مواجه شده و باعث ایجاد تنش منفی (فشار) در نقاط یاد شده می‌شود. با گرم شدن نقاط داخل سوپاپ این موضوع عکس می‌شود. با یکنواخت شدن جریان حرارت در سوپاپ تنش‌ها ثابت می‌مانند.



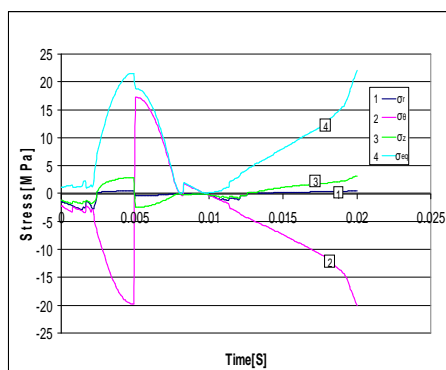
شکل ۱۵- نمودار تنش حرارتی بر حسب زمان در نقطه ۱ (شکل ۱۴). تنش شعاعی، σ_θ ، تنش محیطی، σ_z ، تنش محوری و σ_{eq} تنش معادل فون میسز



شکل ۲۰- نمودار تنش سازه‌ای بر حسب زمان در نقطه ۲ (شکل ۱۸). σ_r تنش شعاعی، σ_θ تنش محیطی، σ_z تنش محوری و σ_{eq} تنش معادل فون میسز



شکل ۲۱- نمودار تنش سازه‌ای بر حسب زمان در نقطه ۳ (شکل ۱۸). σ_r تنش شعاعی، σ_θ تنش محیطی، σ_z تنش محوری و σ_{eq} تنش معادل فون میسز



شکل ۲۲- نمودار تنش سازه‌ای بر حسب زمان در نقطه ۴ (شکل ۱۸). σ_r تنش شعاعی، σ_θ تنش محیطی، σ_z تنش محوری و σ_{eq} تنش معادل فون میسز

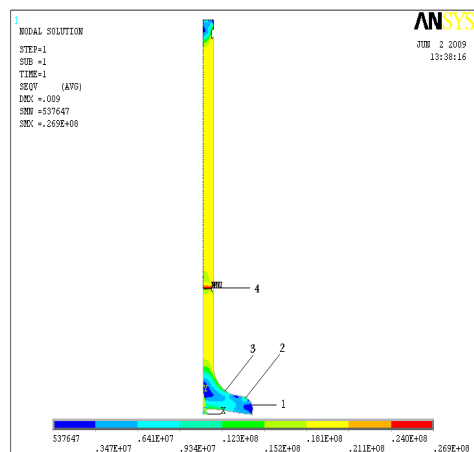
۱۲- بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تحلیل حرارتی و مکانیکی سوپاپ دود موتور XU7 در شرایط بیشینه توان موتور به روش المان محدود

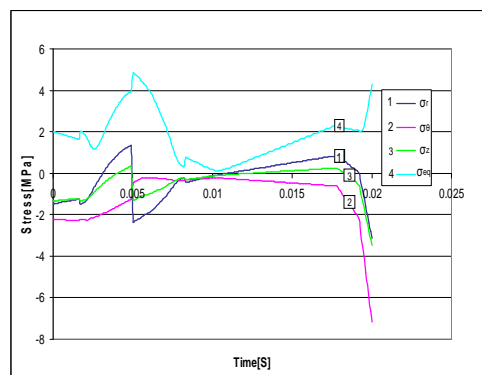
فشار داخل سیلندر بر حسب زمان به مدل اعمال می‌شود. با توجه به اینکه در هنگام کارکرد سوپاپ بیشترین دمای آن $700^\circ C$ است، بنابراین در تحلیل تنش سازه‌ای از خواص مکانیکی مربوط به این دما استفاده می‌شود.

۱۱- نتایج تحلیل تنش سازه‌ای

تحلیل تنش سازه‌ای برای یک سیکل انجام می‌گیرد که نتیجه آن در انتهای سیکل در شکل ۱۸ نشان داده شده است. نمودار تنش سازه‌ای بر حسب زمان برای چهار نقطه شکل ۱۸ در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ نشان داده شده است. در هنگام برخورد سوپاپ به نشیمنگاه اندکی تنش‌ها بیشتر می‌شوند. در این هنگام به علت تاثیر نیروی فنر مقدار میانگین تنش‌ها تقریباً برابر تنش حاصل از فشردگی اولیه سوپاپ می‌باشد. بیشینه تنش معادل در حدود $25MPa$ می‌باشد که در نقطه ۴ بدست می‌آید. تنش بیشینه در این نقطه به این علت است که در این نقطه خواص ماده سوپاپ تغییر می‌کند. گفتمنی است که نقاط ۱، ۲ و ۳ شکل ۱۸ همان نقاط شکل ۱۴ می‌باشند.



شکل ۱۸- توزیع تنش سازه‌ای (Pa) معادل (فون میسز) در انتهای سیکل



شکل ۱۹- نمودار تنش سازه‌ای بر حسب زمان در نقطه ۱ (شکل ۱۸). σ_r تنش شعاعی، σ_θ تنش محیطی، σ_z تنش محوری و σ_{eq} تنش معادل فون میسز

[5] Prasad. R, Samria. N.K, "Transient heat transfer studies on a diesel engine valve", International Journal of Mechanical Science, Vol. 33, No. 3, pp 179-195, 1991.

[۶] مجموعه اطلاعات دریافتی از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو.

[7] Cowart. J, and Cheng. W, "Intake valve thermal behavior during steady-state and transient engine operation", SAE Paper 1999-01-3643.

[8] Huang. C.H, Ju. T.M, "Inverse problem of determination the periodic thermal contact conductance between exhaust valve and seat in an internal combustion engine", SAE Paper 1993-12-6734.

[9] Yang. L.C, Hamada. A, "Engine Valve Temperature simulation system", SAE Paper 2000-01-0564, 2000.

[10] Ranjan. P, "Stresses in exhaust valves", Project report,

www.unix.ecs.umass.edu/~psahay/VALVES.htm.

[۱۱] عبدلی بزچلویی. د، "تحلیل حرارتی- مکانیکی سوپاپ خروجی موتور احتراق داخلی به روش المان محدود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.

[۱۲] ساعتچی. ادریس. ح، "کلید فولاد"، نشر ارکان، اصفهان، ۱۳۷۶.

[13] Ferguson. C.R, Kirkpatrick. A.T, "Internal Combustion Engines", John Wiley & Sons, NewYork, 2001.

[14] Kolcin. A, Demidov. V, "Design of automotive engines", Translated from Russian by Zabolotny. P, MIR publication, Moscow, 1984.

[15] Johan. Z, Moraes. A, "In-cylinder cold flow simulation using a finite element method", SAE Paper 94068, 2001.

[16] ANSYS, user manual, SAS, Inc, 2002.

[۱۷] شعبانعلی. م، "تحلیل المان محدود به کمک ANSYS"، نشر نص، تهران، ۱۳۸۰.

صورت گرفته و نتایج خوبی حاصل شده است. بیشینه دمای سوپاپ در حدود $700^{\circ}C$ می باشد. به طوری که محل بیشینه دما بر روی ساقه سوپاپ است. نتایج محققین دیگر نیز این محل را به عنوان داغترین محل سوپاپ دود نشان داده اند. در بارگذاری حداکثر موتور که دور موتور 6000rpm است، حدود ۱۰۰ ثانیه طول می کشد تا شرایط گرمایی یکنواخت شود. این زمان در مقابل زمان کل کارکرد موتور که ساعتها ممکن است طول بکشد بسیار اندک می باشد. لذا در لحظه روشن شدن موتور بهتر است از افزایش دور موتور که به دنبال آن دور سوپاپ افزایش می یابد، خودداری شود. زیرا احتمال بروز شوک حرارتی بدلیل اختلاف دمای ناگهانی در سوپاپ افزایش می یابد. بیشینه تنش حرارتی در سطح نشیمنگاه سوپاپ در جهت محیطی ایجاد می شود که مقدار آن حدود 100MPa است. این تنش به علت داغتر بودن نقاط داخلی سوپاپ و انبساط بیشتر این نقاط نسبت به نقاط خارجی ایجاد می شود. با توجه به مثبت بودن تنش حرارتی در جهت محیطی در سرسوپاپ در شرایط بد خنک کاری یا اعوجاج نشیمنگاه این تنش موجب ایجاد ترک های شعاعی در سرسوپاپ می شود. بیشینه تنش معادل سازه ای در حدود 25MPa می باشد که در نقطه اتصال دو قسمت سوپاپ که دارای جنس های مختلف هستند، به دست می آید. تنش بیشینه در این نقطه به این علت است که در این نقطه خواص ماده سوپاپ تغییر می کند.

مراجع

- [۱] نبوی.م، "طراحی موتورهای پیستونی- جلد دوم"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۸.
- [2] Crouse. W.H, "Automotive engine design", McGraw-Hill, NewYork, 1970.
- [3] Alkidas. A.C, "Intake-valve temperature and the factors affecting it", SAE Paper 971729, 1997.
- [4] Prasad. R, Samria. N.K, "Heat transfer and stress fields in the inlet and exhaust valves of a semi-adiabatic diesel engine", Computers & Structures, Vol. 34, No. 5, pp765-777, 1990.