



## اثر گالری روغن بر تنش‌های ترمومکانیکی پیستون

حجت عاشوری<sup>۱\*</sup>، افشین افشاری<sup>۲</sup>

۱. گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد ورامین‌پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*ایمیل نویسنده مسئول: ashouri1394@gamil.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵

### چکیده

پیستون یکی از مهمترین قطعات یک موتور است که تحت بارگذاری حرارتی و مکانیکی قرار داشته و با توجه به اینکه نوسانات شدید دما و فشار گاز را تحمل می‌کند، قطعه‌ای بسیار بحرانی محسوب می‌شود. هدف این پژوهش، ارزیابی اثر گالری روغن بر تنش‌های ترمومکانیکی پیستون موتور است. برای این منظور ابتدا از نرم‌افزار سالیدورکس جهت مدل‌سازی پیستون موتور استفاده گردید. گالری روغن در قسمت سر پیستون نیز طراحی گردید. سپس از نرم‌افزار انسیس جهت تحلیل تنش‌های ترمومکانیکی پیستون استفاده شد. در نهایت اثر گالری روغن بر توزیع تنش‌های ترمومکانیکی پیستون مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. شرایط مرزی در تحلیل حرارتی و مکانیکی از شبیه‌سازی یک بعدی در نرم‌افزارهای جی‌تی‌پاور و متلب استخراج گردید. نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که گالری روغن باعث کاهش دمای پیستون موتور در حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌شود. نتایج تحلیل مکانیکی نشان داد که تنش فون مایز در پیستون اصلاح شده در حدود ۱۳ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. برای بررسی صحت نتایج تحلیل ترمومکانیکی، نتایج شبیه‌سازی شده با نمونه واقعی پیستون آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی، مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونه واقعی دارد.

**کلمات کلیدی:** پیستون، گالری روغن، تحلیل اجزای محدود و تنش‌های ترمومکانیکی

### مقدمه

پیستون یکی از مهم‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین قطعات موتور احتراق داخلی است که تحت بارگذاری‌های پیچیده‌ای قرار می‌گیرد. به دلیل اینکه در معرض تغییرات شدید دما و فشار گاز قرار دارد، قطعه‌ای بسیار بحرانی است. امروزه، تحقیقات فراوانی در زمینه هندسه پیستون، استحکام، مواد و تکنولوژی ساخت آن انجام می‌شود اما در عین حال پیستون‌های زیادی در حین کارکرد موتور آسیب می‌بینند. مهم‌ترین دلایل آسیب در پیستون، خوردگی، گرادیان دما، خستگی و سایش آن است. به‌علاوه برای کاهش زمان، هزینه طراحی و انجام تست‌های کمتر باید از ابزارهای مناسب شبیه‌سازی در تحلیل و بهینه‌سازی استفاده نمود. روش المان محدود امروزه به عنوان یک ابزار قدرتمند در طراحی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود. با استفاده از این ابزار در پیش‌بینی دما و توزیع تنش در یک قطعه می‌توان نواحی بحرانی آن را تعیین کرد و پارامترهای هندسی را مورد مطالعه و بهبود قرار داد. در نتیجه، بدست آوردن پاسخ دقیق تنش و کرنش پیستون موتور از طریق شبیه‌سازی المان محدود در مراحل طراحی موتور و نیز در تحلیل خرابی‌های آن امری ضروری است. همچنین گرادیان دما یکی از مهم‌ترین عامل اعمال تنش‌های حرارتی بر پیستون و کاهش عمر خستگی آن است. بنابراین محاسبه میدان دما در پیستون لازم و ضروری است. متأسفانه با استفاده از جت روغن<sup>۱</sup> یا پاشش روغن نمی‌توان به کاهش مطلوب دمای پیستون دست یافت. گالری روغن مجرای است که در سر پیستون طراحی شده و روغن می‌تواند داخل آن گردش نماید. استفاده از گالری روغن یک روش موثر در کاهش دمای پیستون و تنش‌های حرارتی اعمالی بر آن است. با استفاده

<sup>1</sup>Oil Jet



از گالری روغن می‌توان شار حرارتی اعمالی بر تاج پیستون را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. در نتیجه تنش‌های حرارتی پیستون به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت [۱].

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه اثر گالری روغن بر توزیع دما، تنش‌های ترمومکانیکی و خستگی در پیستون انجام شده است. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ابعاد هندسی گالری روغن پیستون یک موتور احتراق داخلی به وسیله ژو و همکاران [۲] انجام شد. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که بهینه‌سازی گالری روغن پیستون باعث کاهش دمای پیستون در حدود ۸ درجه سانتی‌گراد می‌شود. بهینه‌سازی موقعیت گالری روغن در یک موتور دیزل به وسیله دنگ و همکاران [۳] مورد بررسی قرار گرفت. در این موتور فاصله مطلوب بین تاج پیستون و گالری روغن ۱۲/۵ میلی‌متر تعیین شد. بیندر و همکاران [۴] ضریب انتقال حرارت در گالری روغن را به صورت تجربی تعیین کردند. تحقیقات آنها نشان داد که انطباق بسیار مناسبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده ضریب انتقال حرارت در گالری روغن وجود دارد. بهینه‌سازی ابعاد هندسی گالری روغن پیستون یک موتور دیزل به وسیله دنگ و همکاران [۵] مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که گالری روغن باید تا حد امکان به سطح تاج پیستون نزدیک باشد. ونگ و همکاران [۶] اثر افزودن نانو ذرات را بر ضریب انتقال حرارت گالری روغن پیستون یک موتور احتراقی را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که افزودن نانو ذرات اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب انتقال حرارت گالری روغن دارد. تحقیقات آنها نشان داد که انطباق مناسبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده ضریب انتقال حرارت در گالری روغن وجود دارد. نسبت پرشدن روغن در داخل گالری روغن پیستون یک موتور احتراق داخلی با تغییر دور موتور و فشار روغن به وسیله چن و همکاران [۷] شبیه‌سازی گردید، که انطباق مناسبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده وجود داشت. هان و همکاران [۸] اثر گالری روغن بر توزیع دما در پیستون یک موتور بنزینی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که گالری روغن نقش مهمی در تعیین و توزیع دمای پیستون ایفا می‌کند. بهینه‌سازی ابعاد هندسی گالری روغن باعث کاهش بیشتر دمای پیستون خواهد شد. انتقال حرارت در گالری روغن پیستون یک موتور احتراق داخلی به وسیله ونگ و همکاران [۹] شبیه‌سازی گردید. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش دور موتور افزایش می‌یابد. لوف و همکاران [۱۰] اثر گالری روغن بر عملکرد موتور را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایشات آنها نشان داد که گالری روغن باعث کاهش گازهای آلاینده اکسیدهای نیتروژن و مونواکسید کربن موتور به ترتیب در حدود ۳ و ۵-۱۰ درصد می‌شود. تحلیل گسیختگی پیستون یک موتور دیزل دارای گالری روغن به وسیله کالدر و همکاران [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات آنها نشان داد که علت گسیختگی پیستون تنش‌های ترمومکانیکی اعمالی بر آن است. ونگ و همکاران [۱۱] اثر افزودن نانو ذرات را بر نسبت پرشدن روغن و ضریب انتقال حرارت گالری روغن یک موتور احتراقی را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که افزودن نانو ذرات اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب انتقال حرارت گالری روغن دارد. عاشوری [۱۲] اثر گالری روغن بر عمر خستگی پرچرخه پیستون یک موتور اشتعال جرقه‌ای موتور را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج شبیه‌سازی ایشان نشان داد که گالری روغن باعث افزایش عمر خستگی پرچرخه پیستون به ترتیب در حدود ۳۳ و ۳۷ درصد در دور موتور ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ دور بر دقیقه می‌شود. اثر پوشش حائل حرارتی بر توزیع تنش‌های ترمومکانیکی پیستون به وسیله عاشوری [۱۳] مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های او نشان داد که پوشش حایل حرارتی باعث کاهش تنش‌های ترمومکانیکی پیستون بترتیب ۲/۴ و ۸/۵ مگاپاسکال در دور موتور ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ دور بر دقیقه می‌شود. بهینه‌سازی طراحی و علت گسیختگی یک پیستون فولادی موتور دیزل به وسیله لیو و همکاران [۱۴] مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که تنش‌های ناشی از فشار گاز علت گسیختگی پیستون است. پراکش و همکاران [۱۵] اثر پیستون پوشش داده شده را بر بازده موتور را ارزیابی کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که پیستون پوشش داده شده باعث افزایش بازده مصرف سوخت ویژه می‌شود. مدل‌سازی و تحلیل حرارتی پیستون با استفاده از نرم‌افزار انسیس به وسیله سونی و همکاران [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی آنها نشان داد که تنش ترمومکانیکی اعمالی بر پیستون از تنش تسلیم آن کمتر است. داگرا و همکاران [۱۷] طراحی و تحلیل پیستون آلومینیومی و کامپوزیتی را انجام دادند. پژوهش‌های آنها نشان داد که احتمال گسیختگی در پیستون آلومینیومی بیشتر است. پیستون تحت تاثیر فشار و درجه حرارت بالای ناشی از احتراق قرار می‌گیرد که شار و درجه حرارت به طور

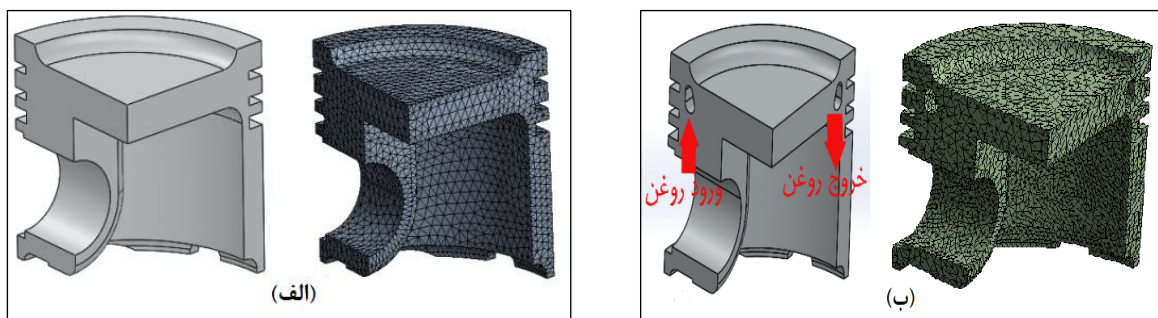


متناوب تغییر کرده و موجب ترک و در نتیجه گسیختگی در پیستون موتور می‌شود. بنابراین تحلیل تنش‌های وارد بر پیستون، بسیار ضروری است. براساس مطالبی که در قسمت مقدمه ذکر شد، گالری روغن یک روش موثر جهت کاهش دمای پیستون و در نتیجه کاهش تنش‌های ترمومکانیکی آن است. بنابراین لازم است اثر گالری روغن بر تنش‌های ترمومکانیکی آن مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. هدف این پژوهش ارزیابی اثر گالری روغن بر توزیع دما و تنش‌های ترمومکانیکی پیستون موتور XU7JP/L3 در دور بحرانی آن است. دور بحرانی این موتور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه است. برای این منظور ابتدا از نرم‌افزار سالدورکس<sup>۱</sup> جهت مدل‌سازی پیستون این موتور استفاده گردید. گالری روغن در قسمت سر پیستون نیز طراحی گردید. شرایط مرزی در تحلیل حرارتی و مکانیکی از شبیه‌سازی یک بعدی در نرم‌افزارهای جی‌تی‌پاور<sup>۲</sup> و متلب<sup>۳</sup> استخراج گردید. سپس از نرم‌افزار انسیس جهت تحلیل تنش‌های ترمومکانیکی پیستون استفاده شد. در نهایت اثر گالری روغن بر توزیع تنش‌های ترمومکانیکی پیستون مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### مدل اجزای محدود و خواص مواد

در گذشته بهینه‌سازی قطعات مختلف موتور از جمله پیستون بر اساس ساخت نمونه‌های اولیه و انجام تست‌های مختلف بر روی آنها بود. متأسفانه این روش وقت‌گیر بوده و ساخت نمونه اولیه در مراحل اولیه طراحی مشکل است. به منظور دستیابی به طراحی دقیق، لازم است نمونه‌های زیادی ساخته شده و تست گردد که این فرایند را پرهزینه می‌کند. این مشکلات با استفاده از روش تحلیل المان محدود به منظور ارزیابی اثربخشی طراحی‌های مختلف برطرف گردیده است [۱۸-۲۰]. این تکنیک برای طراحی و توسعه قطعات دارای هندسه پیچیده موتور مثل پیستون در زمان کوتاه و با حداقل هزینه پذیرفته شده است. پیستون یکی از قطعات پیچیده و چالش برانگیز موتور است که تحلیل المان محدود نقش مهمی در بهینه‌سازی آن دارد. امروزه جهت کاهش هزینه و زمان تولید محصول از تکنیک‌های شبیه‌سازی به جای آزمون‌های اعتبارسنجی استفاده می‌شود. پیستون مورد بررسی در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: الف- پیستون مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سالدورکس و پیستون شبکه‌بندی شده، ب- پیستون اصلاح شده و دارای گالری روغن و پیستون شبکه‌بندی شده با گالری روغن

به‌علت تقارن یک‌چهارم پیستون مدل‌سازی شده است. مشخصات این موتور در جدول (۱) آورده شده است. پیستون از جنس آلیاژ AISI ساخته شده که هدایت حرارتی آن  $155 \text{ W/m}^{\circ\text{C}}$ ، چگالی  $2700 \text{ kg/m}^3$ ، مدول یانگ آن  $90 \text{ GPa}$  و نسبت پواسون  $0.3$  است [۱۲]. مدل اجزای محدود از  $43571$  المان و  $66231$  گره جهت افزایش دقت نتایج تحلیل اجزای محدود تشکیل شده است. جهت مش‌بندی پیستون از المان‌های چهار وجهی و دارای  $10$  گره استفاده شده است.

<sup>1</sup> SolidWorks

<sup>2</sup> GT-Power

<sup>3</sup> Matlab



جدول ۱: مشخصات موتور XU7JP/L3

خاصیت	مقدار	واحد
قطر سیلندر	۸۳	(mm)
کورس پیستون	۸۱/۴	(mm)
طول شاتون	۱۵۰/۵	(mm)
حجم موتور	۱۷۶۱	(cc)
نسبت تراکم	۹/۳	(-)
حداکثر قدرت	۷۰/۸	(kW)

## شرایط مرزی در تحلیل حرارتی

شرایط مرزی صحیح باعث افزایش دقت تحلیل اجزای محدود خواهد شد. شرایط مرزی در تحلیل حرارتی پیستون شامل چهار ناحیه است.

- ۱- شرط مرزی ناحیه احتراق
- ۲- شرط مرزی پیرامون پیستون و شیار رینگ‌ها
- ۳- شرط مرزی نواحی درونی پیستون
- ۴- شرط مرزی ناحیه پین پیستون

برای محاسبه شرط مرزی احتراق، ابتدا می‌بایستی دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل سیلندر را برای یک سیکل کامل محاسبه نمود. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۱]:

$$h_g = 3.26P^{0.8}U^{0.8}b^{-0.2}T_g^{-0.55} \quad (1)$$

در این رابطه  $h_g$  ضریب انتقال حرارت،  $P$  فشار درون سیلندر،  $T_g$  دمای درون سیلندر،  $U$  سرعت متوسط پیستون و  $b$  قطر سیلندر است. برای محاسبه مقادیر متوسط ضریب انتقال حرارت و دما از روابط زیر استفاده می‌شود [۲۱]:

$$\bar{T}_g = \frac{1}{4\pi h_g} \int_0^{4\pi} T_g h_g d\theta \quad (2)$$

$$\bar{h}_g = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g d\theta \quad (3)$$

از روش مدار حرارتی برای مدل‌سازی انتقال حرارت در ناحیه پیرامون پیستون و شیار رینگ‌ها استفاده می‌شود. مقاومت‌ها با توجه به شکل (۲) به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۲]:

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi H_1 k_{ring}} \quad \text{مقاومت رینگ} \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi H_2 k_{oil}} \quad \text{مقاومت فیلم روغن} \quad (5)$$

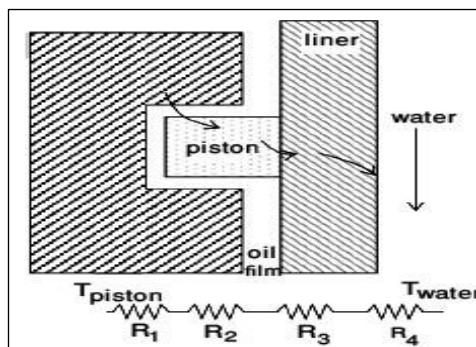
$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi H_3 k_{block}} \quad \text{مقاومت بلوک سیلندر} \quad (6)$$

$$R_4 = \frac{1}{h_{water} A_s} \quad \text{مقاومت آب خنک‌کاری} \quad (7)$$



در این روابط  $T_1, T_2, T_3$  و  $T_4$  به ترتیب شعاع داخلی رینگ، شعاع خارجی رینگ، شعاع سیلندر و شعاع داخلی راهگاه آب است.  $H_1, H_2$  و  $H_3$  عرض مسیره‌های انتقال است و  $A_s$  سطح معادل انتقال حرارت در تماس با آب است. ضریب انتقال حرارت در رینگ اول با محاسبه هریک از مقاومت‌های مذکور و استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$h_{eff} = \frac{1}{R_{total} A_{eff}} \quad (8)$$



شکل ۲: مدار مقاومت حرارتی [۲۲]

لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی سایر رینگ‌ها، روند فوق تکرار می‌شود. نواحی درون پیستون به وسیله ترشح روغن خنک می‌شود. این ناحیه را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. در ناحیه بالا و پایین این قسمت ضریب انتقال حرارت به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) بدست می‌آید [۲۳]:

$$h_{uc1} = 900 \left( \frac{N}{4600} \right)^{0.35} \quad (9)$$

$$h_{uc1} = 240 \left( \frac{N}{4600} \right)^{0.35} \quad (10)$$

پیستون در ناحیه بین تاج پیستون و سیلندر، با سیلندر تماس ندارد. گاز داخل سیلندر باعث انتقال حرارت می‌شود. انتقال حرارت در این ناحیه از نوع رسانایی است. انتقال حرارت در این ناحیه به صورت زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$k \frac{T_{piston} - T_{wall}}{\delta} = h(T_{piston} - T_{wall}) \quad (11)$$

در این رابطه  $\delta$  لقی بین پیستون و سیلندر و  $k$  ضریب انتقال حرارت رسانایی گاز است.

#### شرایط مرزی در تحلیل مکانیکی

با توجه به دینامیک موتور، حرکت رفت و برگشتی پیستون باعث تولید نیروی اینرسی می‌شود که جهت آن مخالف جهت حرکت پیستون است. شتاب پیستون با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است [۲۴]:

$$a = -R\omega^2 (\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha) \quad (12)$$

در این رابطه  $R$  شعاع میل‌لنگ،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای و  $\lambda$  نسبت شعاع میل‌لنگ به طول شاتون است. دامن پیستون در حین کارکرد موتور با جداره سیلندر در تماس است. در نتیجه نیروی جانبی به پیستون وارد خواهد شد که به وسیله معادله زیر بیان می‌شود [۲۴]:

$$F_c = (F_{gac} - F_j) \tan\beta \quad (13)$$



در این رابطه  $F_{gac}$  نیروی حاصل از احتراق،  $F_j$  نیروی اینرسی و  $\beta$  زاویه شاتون است. نیروی اینرسی از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن  $m_j$  جرم قطعات دارای حرکت رفت و برگشتی است [۲۴]:

$$F_j = m_j a \quad (14)$$

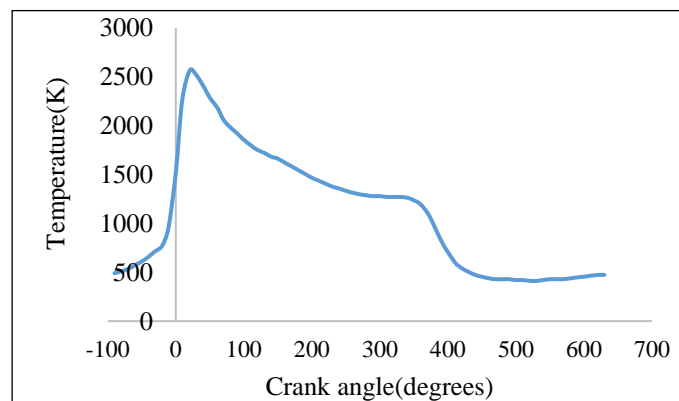
#### روند تحلیل

روند تحلیل اثر گالری روغن بر تنش‌های ترمومکانیکی پیستون به صورت زیر است:

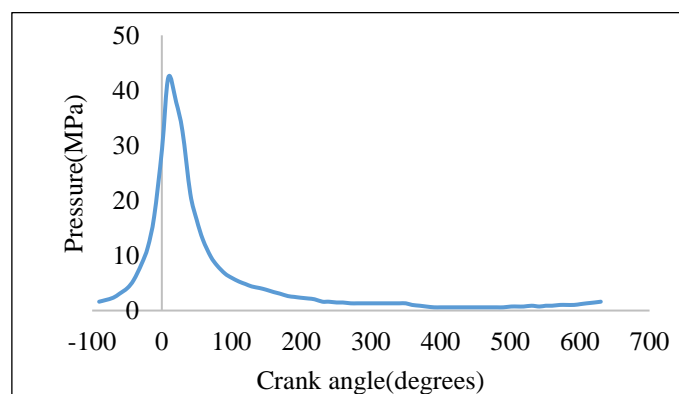
- ۱- مدل‌سازی پیستون
- ۲- مش‌بندی پیستون
- ۳- محاسبه شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی
- ۴- تحلیل ترمومکانیکی پیستون

#### نتایج و بحث

دمای گاز و ضریب انتقال حرارت برای تاج پیستون به دلیل تبادل حرارت بین تاج پیستون و گاز باید محاسبه شود. برای این منظور از نرم‌افزار جی‌تی‌پاور برای شبیه‌سازی تک‌بعدی فرآیند احتراق موتور استفاده شده است. در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نمودارهای دما و فشار درون سیلندر نشان داده شده است. دمای متوسط گاز و ضریب انتقال حرارت متوسط بر اساس روابط (۲) و (۳) با استفاده از نرم‌افزار متلب محاسبه گردیده است که در شکل (۵) نشان داده شده است.



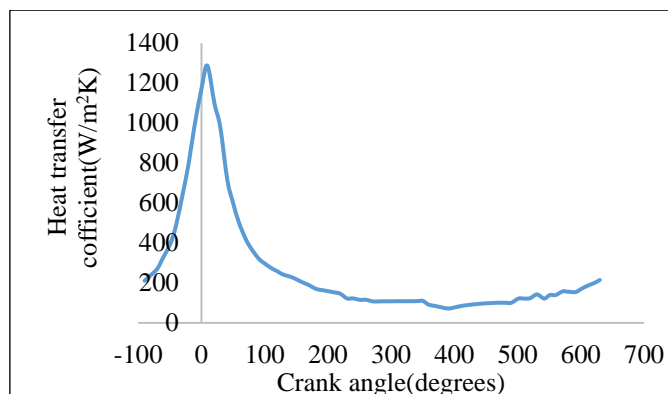
شکل ۳: دمای گاز درون سیلندر بر حسب زاویه لنگ



شکل ۴: فشار گاز درون سیلندر بر حسب زاویه لنگ

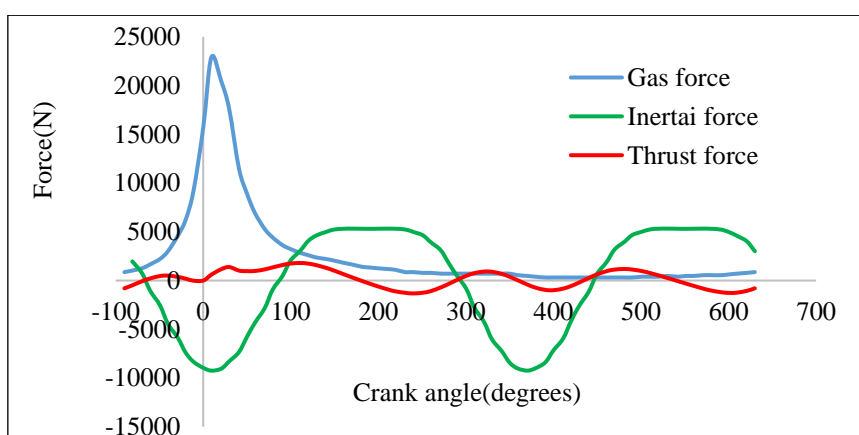


از شکل‌های (۳) و (۴) ملاحظه می‌گردد که حداکثر دما و فشار درون سیلندر کمی پس از شروع احتراق رخ می‌دهند همچنین شیب منحنی‌ها بلافاصله پس از احتراق کاهش می‌یابد.



شکل ۵: ضریب انتقال حرارت متوسط برحسب زاویه لنگ

نیروهای مکانیکی که بر پیستون اعمال می‌شود شامل فشار گاز، نیروی اینرسی و نیروی جانبی است. این نیروها در شکل (۶) که به وسیله نرم‌افزار متلب محاسبه شده است، نشان داده شده است.

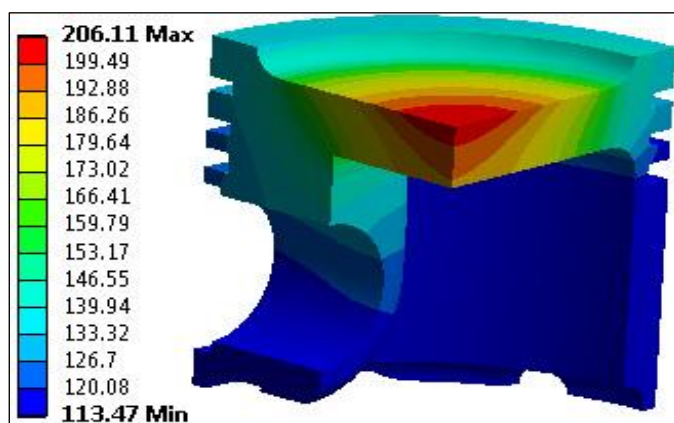


شکل ۶: نیروهای اعمالی بر پیستون برحسب زاویه لنگ

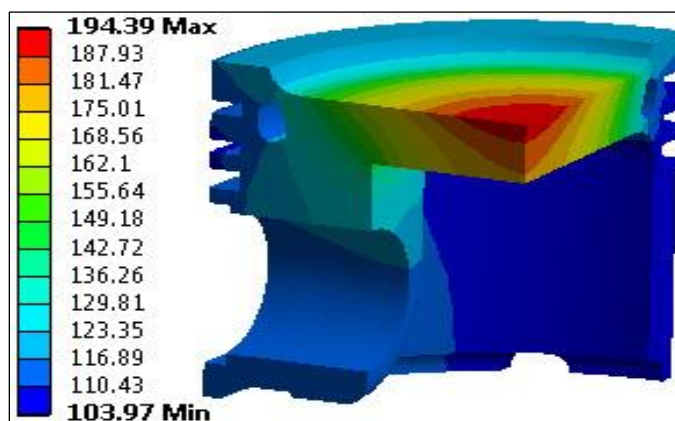
### تحلیل حرارتی

تنش‌های حرارتی در پیستون، تنش‌های غالب و حاکم هستند که منجر به ایجاد خستگی و گسیختگی در آن می‌شوند. بنابراین بارگذاری حرارتی مهم‌ترین بارگذاری در تحلیل ترمومکانیکی پیستون است. هرچه توزیع دما در نقاط مختلف پیستون دقیق‌تر باشد، تنش‌های حرارتی نیز در آن نقاط دقیق‌تر خواهد بود. افزایش دقت تحلیل حرارتی باعث افزایش دقت تحلیل مکانیکی خواهد شد. برای اعمال شرایط مرزی در تحلیل حرارتی پیستون، قسمت‌های مختلف آن به چند ناحیه تقسیم می‌شود. این نواحی شامل سطح تاج پیستون، نواحی بالای شیار رینگ‌ها، شیار رینگ‌ها، بین شیار رینگ‌ها، دامن پیستون، داخل پیستون و پین پیستون است. در این روش برای قسمت‌های مختلف پیستون از ضریب هدایت جابه‌جایی و دما استفاده می‌شود. محاسبه ضریب هدایت جابه‌جایی و دما برای قسمت‌های مختلف پیستون و اعمال آنها در ناحیه مورد نظر، تحلیل حرارتی انجام شده است. توزیع دما در پیستون اولیه و اصلاح شده که گالری روغن در آن طراحی شده است، به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.





شکل ۷: توزیع دما در پیستون اولیه



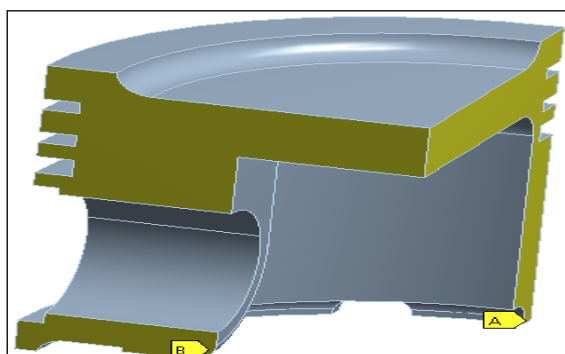
شکل ۸: توزیع دما در پیستون اصلاح شده

با بررسی شکل‌های (۷) و (۸) ملاحظه می‌شود که بیشینه دما در مرکز تاج پیستون رخ می‌دهد که ناشی از تبادل حرارت این ناحیه با گازهای داغ احتراق است. توزیع دما از سطح پیستون تا انتهای دامن آن کاهش می‌یابد و این ناحیه کمترین دما را تحمل می‌کند. این نتیجه با پژوهش‌های منابع [۱۲،۱۳،۲۵،۲۶] مطابقت دارد. بیشینه دما در پیستون اولیه و اصلاح شده به ترتیب ۲۰۶/۱۱ و ۱۹۴/۱۱ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین گالری روغن باعث کاهش دمای پیستون موتور در حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌شود. با کاهش دمای پیستون، تنش‌های ترمومکانیکی اعمالی بر آن کاهش یافته و در نتیجه عمر خستگی پیستون افزایش خواهد یافت.

#### تحلیل مکانیکی

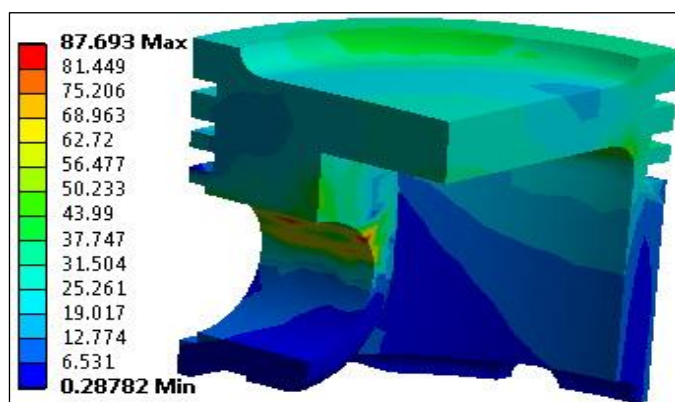
نیروهای مکانیکی که بر پیستون اعمال گردد شامل فشار گاز، نیروی اینرسی و نیروی جانبی می‌باشد. در تحلیل مکانیکی پیستون، توزیع دمای بدست آمده از تحلیل حرارتی به همراه بارهای مکانیکی اعمالی بر پیستون که شامل نیروهای اینرسی، فشار احتراق و نیروی جانبی است، به پیستون اعمال می‌شوند. صفحات نشان داده شده در شکل (۹) در تحلیل مکانیکی در جهت عمود بر آنها به منظور در نظر گرفتن شرایط مرزی در تحلیل مکانیکی مقید می‌شوند و تحلیل مکانیکی انجام می‌شود. توزیع تنش فون مایز در پیستون اولیه و اصلاح شده به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. با بررسی شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ملاحظه می‌شود که بیشینه تنش فون مایز در سطح بالای پین پیستون رخ می‌دهد. این نتیجه با پژوهش‌های منابع [۱۲،۱۳،۲۷] مطابقت دارد.



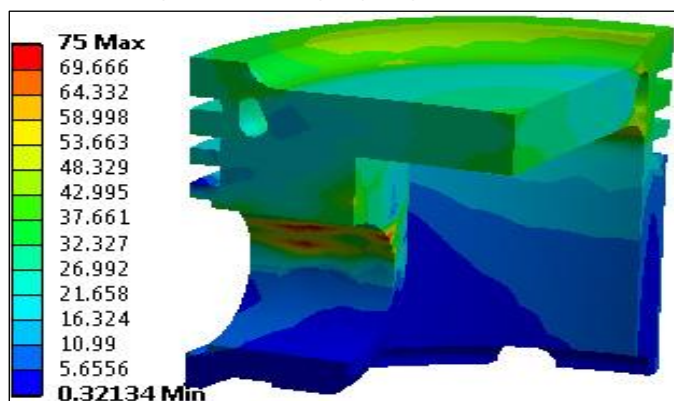


شکل ۹: شرایط مرزی در تحلیل مکانیکی

لازم به ذکر است هر چند بیشینه دما در تحلیل حرارتی در مرکز تاج پیستون مشاهده می‌شود اما این نقطه، بحرانی نیست. این قسمت نسبت به نواحی بحرانی پیستون که ناحیه بالایی گژن پین و شیار رینگ‌های پیستون است، تنش کمتری را تحمل می‌کند. بنابراین از اهمیت قابل توجهی برخوردار نیست. در قسمت شیار رینگ‌های پیستون، شیار رینگ اول که وظیفه اصلی آب‌بندی سیلندر و پیستون را برعهده دارد به علت تحمل فشار و دمای زیادی نسبت به سایر نواحی این قسمت، تنش بیشتری را تحمل می‌کند و دارای اهمیت زیادی است. دیواره پیستون نیز به علت سایش با جداره سیلندر تنش بالای را تحمل می‌کند اما نسبت به نواحی بحرانی فوق از اهمیت کمتری برخوردار است. بیشینه تنش فون مایز در پیستون اولیه و اصلاح شده که در ناحیه بالایی گژن پین رخ می‌دهد، به ترتیب ۸۷/۶۹۳ و ۷۵ مگاپاسکال است. بنابراین گالری روغن باعث کاهش تنش فون مایز در حدود ۱۳ مگاپاسکال می‌شود.



شکل ۱۰: توزیع تنش فون مایز در پیستون اولیه

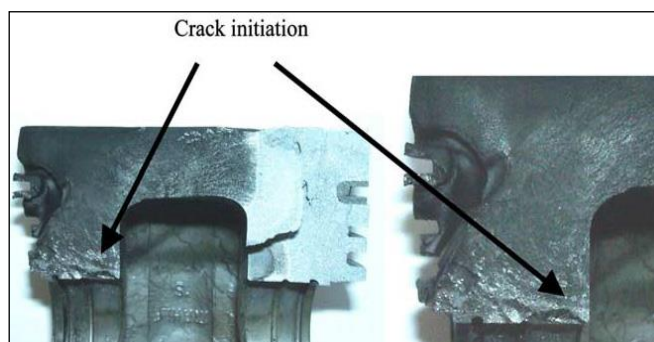


شکل ۱۱: توزیع تنش فون مایز در پیستون اصلاح شده

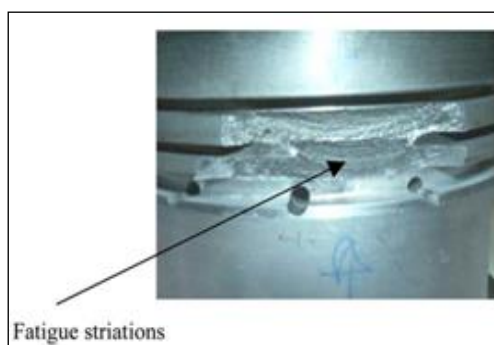


### اعتبارسنجی تحلیل ترمومکانیکی

با بررسی شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ملاحظه گردید که دو ناحیه بحرانی در پیستون وجود دارد. ناحیه بالایی گژن‌پین یکی از نواحی بحرانی پیستون است و حداکثر تنش فون مایرز در این قسمت رخ می‌دهد. نتایج توزیع تنش فون مایرز ناشی از بارهای ترمومکانیکی با آزمون‌های تجربی مطابقت دارد. پیستون ترک‌خورده در این ناحیه در تست‌های آزمایشگاهی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. یکی دیگر از قسمت‌های بحرانی پیستون موتور، رینگ‌نشین‌های آن است که تنش ترمومکانیکی زیادی را تحمل می‌کند. پیستون ترک‌خورده در این ناحیه در تست‌های آزمایشگاهی نیز در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۲: پیستون آسیب دیده [۲۸]



شکل ۱۳: پیستون آسیب دیده [۲۸]

### نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش ارزیابی اثر گالری روغن بر توزیع دما و تنش‌های ترمومکانیکی پیستون موتور XU7JP/L3 است. با استفاده از اجزای محدود امکان پیش‌بینی دقیق و قابل اطمینان توزیع دما و تنش‌های ترمومکانیکی پیستون وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی شده تحلیل حرارتی نشان داد که حداکثر دما در مرکز تاج پیستون موتور رخ می‌دهد اما این نقطه بحرانی نیست. نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که گالری روغن باعث کاهش دمای پیستون موتور در حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌شود. نتایج تحلیل مکانیکی نشان داد که تنش فون مایرز در پیستون اصلاح شده در حدود ۱۳ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. ناحیه بالایی گژن‌پین پیستون و شیار رینگ‌های آن، نواحی بحرانی هستند و تنش زیادی را تحمل می‌کنند. برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی شده تحلیل ترمومکانیکی، نتایج تحلیل اجزای محدود با نمونه واقعی پیستون آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی، مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونه واقعی دارد.



## مراجع

- [1] Peng, W., Jizu, L., Minli, B., Yuyan, W., Chengzhi, H., Liang, Z., (2014). Numerical simulation on the flow and heat transfer process of nanofluids inside a piston cooling gallery. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 65(4), pp 378-400.
- [2] Zhu, N., Dong, F., Zong, M., Ni, J., (2017). Simulation and Optimization on Oscillating Cooling Characteristics in High-Enhanced Piston Oil Cooling Gallery. *SAE International Journal of Engines*, 10(4), pp 1993-1998.
- [3] Deng, L., Liu, Y., Wang, Z., Liu, S., Zhang, J., (2016). Optimization of the location of the oil cooling gallery in the diesel engine piston. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 10(1).
- [4] Binder, C., Vasanth, E., Norling, D., Cronhjort, A., (2018). Experimental Determination of the Heat Transfer Coefficient in Piston Cooling Galleries (No. 2018-01-1776). *SAE Technical Paper*.
- [5] Deng, X., Lei, J., Wen, J., Wen, Z., Shen, L., (2017). Numerical investigation on the oscillating flow and uneven heat transfer processes of the cooling oil inside a piston gallery. *Applied Thermal Engineering*, 126, pp 139-150.
- [6] Wang, P., Lv, J., Bai, M., Hu, C., Zhang, L., Liu, H., (2013). Numerical Investigation into the Cooling Process of Conventional Engine Oil and Nano-Oil Inside the Piston Gallery. In *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress: Volume 2: Advanced Internal Combustion Engines (II)* (pp. 1151-1163). Springer Berlin Heidelberg.
- [7] Chen, Y., Moghe, S., (2018), November. Heavy Duty Engine Piston Cooling Gallery Oil Filling Ratio Measurement and Comparison of Results with Simulation. In *Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference* (Vol. 51982, p. V001T01A004). American Society of Mechanical Engineers.
- [8] Han, S., Kim, H., Im, G., Yoo, Y., .(), Effect of cooling gallery on the piston temperature in a gasoline direction injection engine, Spain,
- [9] Wang, P., Liang, R., Yu, Y., Zhang, J., Lv, J., Bai, M., (2017). The flow and heat transfer characteristics of engine oil inside the piston cooling gallery. *Applied Thermal Engineering*, 115, pp 620-629.
- [10] Luff, D.C., Law, T., Shayler, P.J., Pegg, I., (2012). The effect of piston cooling jets on diesel engine piston temperatures, emissions and fuel consumption. *SAE International Journal of Engines*, 5(3), pp 1300-1311.
- [11] Caldera, M., Massone, J.M., Martinez, R.A., (2017). Failure analysis of a damaged direct injection diesel engine piston. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17, pp 979-988.
- [12] Ashouri, H., (2021). Improving High Cycle Fatigue Life in A Gasoline Engine Piston using Oil Gallery with Considering Stress Gradient. *ADMT Journal*, 14(4), pp 73-82.
- [13] Ashouri, H., (2023). Evaluation of thermal barrier coating in fatigue life for an aluminum alloy piston with considering residual stress. *Journal of Solid Mechanics*, 15(3), pp 343-351.
- [14] Liu, Y., Jing, G., Liu, H., Zhang, W., Han, M., Xiao, S., Zhang, Z., (2022). Failure analysis and design improvements of steel piston for a high-power marine diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, 142, p 106825.
- [15] Prakash, S., Prabhakar, M., Niyas, O.P., Faris, S., Vyshnav, C., (2020). Thermal barrier coating on IC engine piston to improve efficiency using dual fuel. *Materials Today: Proceedings*, 33, pp 919-924.
- [16] Soni, A.K., Godara, S.S., Gade, R., Brenia, V., Shekhawat, R.S., Saxena, K.K., Prasad, R., (2022). Modelling and thermal analysis for automobile piston using ANSYS. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp 1-15.
- [17] Dagar, N., Sharma, R., Rinawa, M.L., Gupta, S., Chaudhary, V., Gupta, P., (2022). Design and analysis of piston using aluminum alloy and composites in Solidworks and Ansys. *Materials Today: Proceedings*, 67, pp 784-791.
- [18] Ashouri, H., (2015). Finite element analysis of thermo-mechanical stresses in diesel engines cylinder heads using a two-layer viscoelasticity model, pp 2054-2064.



- [19] Ashouri, H., (2022). Thermo-mechanical analysis of magnesium alloy cylinder heads using a two-layer viscoplasticity model. *Automotive Science and Engineering*, 12(3), pp 3892-3904.
- [20] Ashouri, H., (2022). Low cycle fatigue prediction for cylinder head considering notch stress-strain correction proposed by Neuber. *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, 14(3).
- [21] Kirkpatrick, A.T., (2020). *Internal combustion engines: applied thermosciences*. John Wiley & Sons.
- [22] Esfahanian, V., Javaheri, A., Ghaffarpour, M., (2006). Thermal analysis of an SI engine piston using different combustion boundary condition treatments. *Applied Thermal Engineering*, 26 (2-3), pp 277-287.
- [23] Liu, Y., Reitz, R.D., (1997). Multidimensional modeling of engine combustion chamber surface temperatures (No. 971593). SAE Technical Paper.
- [24] Heywood, J.B., (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education..
- [25] Ayatollahi, M.R., Mohammadi, F., Chamani, H.R., (2011). Thermo-mechanical fatigue life assessment of a diesel engine piston. *International Journal of Automotive Engineering*, 1(4), pp 256-266.
- [26] Ashouri, H., (2022). Fatigue life assessment for an aluminum alloy piston using stress gradient approach described in the FKM method. *Journal of Solid Mechanics*, 14(1), pp 57-66.
- [27] Giacomini, M., Sissa, S., Rosi, R., Fantoni, S., (2015). Influence of different temperature distributions on the fatigue life of a motorcycle piston. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229(9), pp 1276-1288.
- [28] Silva, F.S., (2006). Fatigue on engine pistons—A compendium of case studies. *Engineering failure analysis*, 13(3), pp 480-492.