

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

به نام خدا



دانشکده مهندسی خودرو

## تحلیل حرارتی و تنش‌ی سرسیلندر موتور XU7

نگارش:

سیامک علیزاده نیا

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته

مهندسی خودرو - سازه بدنه

استاد راهنما: پروفسور محمدحسن شجاعی فرد

مشاور: مهندس علیرضا نورپور

بهمن ۱۳۸۲

( )

## چکیده

آنالیز اجزاء محدود، در مقیاس وسیعی از مسائل پیچیده با دقت بالا بکار گرفته می‌شود. این پروژه انجام آنالیز ترمومکانیکی یک سرسیلندر را به صورت مشروح مورد بررسی قرار می‌دهد. همخوانی و همپوشانی مدل سرسیلندر المان‌بندی شده با هندسه آن و تعداد المانهای ایجاد شده بر روی آن، بر جوابهای حاصل از حل اجزاء محدود یک مسئله تأثیر جدی می‌گذارد. روش مقایسه مودال، برای اطمینان از همپوشانی کافی همراه با تعداد المانهای بهینه روش کاملی می‌باشد. مدل کامل سه بعدی بصورت کاملاً دقیق ساخته شده و شامل ۴۰۱۲۳۶ المان و ۴۸۰۲۲۰ گره می‌باشد. نتایج حل ترمومکانیکی این مسئله نشان می‌دهد که تنش بالایی در اطراف سویاپ دود و پل بین سویاپها وجود دارد. این تنش، نتیجه فشار ناشی از احتراق و مقید کردن انبساط حرارتی در محفظه احتراق می‌باشد.

در این تحلیل فرض بر این شده است که تغییرات دما بر منحنی تنش، کرنش اثری ندارد. به منظور تحلیل حرارتی مدل، فرض می‌شود که تغییرات دمایی در حال کارکرد موتور وجود ندارد و این تغییرات بر روی بدنه سرسیلندر به مقداری کم است که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

# فهرست مطالب

۱	مقدمه
۲	فصل اول
۲	مروری بر منابع
۲-۱	مقدمه
۲-۱	آنالیز ترمومکانیکی سرسیلندر
۲-۱-۱	تعریف مدل
۲-۱-۲	شرایط مرزی حرارتی
۲-۱-۳	شرایط مرزی تنش
۲-۱-۴	معتبر سازی
۲-۱-۵	نتایج
۲-۱-۶	خلاصه و نتیجه گیری
۲-۱-۳	اندازه گیری و محاسبه کرنش در حین فعالیت کاری
۲-۱-۳-۱	مدل آنالیز قطعه
۲-۱-۳-۲	رفتار خزشی و رهایی تنش
۲-۱-۳-۳	حلقه هیستریزس تنش حرارتی
۲-۱-۳-۴	مدل کردن پلاستیک و اثر سخت شوندگی
۲-۱-۳-۵	خستگی حرارتی در سرسیلندر
۲-۱-۳-۶	پیش بینی عمر خستگی
۲-۱-۳-۷	رویه آزمایشها
۲-۱-۳-۸	نتایج آزمایش موتور
۲-۱-۳-۹	مقایسه با محاسبات
۲-۱-۳-۱۰	خلاصه و نتیجه گیری
۲-۱-۳-۴	نتیجه گیری
۱۷	فصل دوم
۱۷	اجزاء و روشها

۱۷	۱-۲ مقدمه
۱۷	۲-۲ سرسیلندر
۲۲	۳-۲ روش اجزاء محدود
۲۷	۴-۲ نرم افزار
۳۱	فصل سوم
۳۱	تعریف و تأیید مدل
۳۱	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ تعریف هندسه مدل
۳۶	۳-۳ مش بندی
۳۹	۴-۳ المان بندی سرسیلندر
۴۱	۵-۳ تأیید مدل به روش مودال
۴۱	۱-۵-۳ روش اجزاء محدود در تحلیل مودال
۴۲	۲-۴-۳ آزمایش مودال
۴۶	۳-۴-۳ نتایج
۵۲	نتیجه گیری
۵۶	فصل چهارم
۵۶	تحلیل حرارتی
۵۶	۱-۴ مقدمه
۵۸	۲-۴ شرایط کارکردی موتور XU7
۵۸	۳-۴ حل جریان سیال خنک کننده
۵۸	۱-۳-۴ مدلسازی و المان بندی آن
۵۹	۲-۳-۴ شرایط مرزی و روش حل
۶۲	۲-۳-۴ استقلال جوابها از تعداد المانها
۶۲	۳-۳-۴ تحلیل نتایج
۶۵	۴-۴ حل انرژی
۶۵	۱-۴-۴ مدلسازی و المان بندی آن

۶۸	..... ۲-۴-۴- شرایط مرزی و روش حل
۷۲	..... فصل پنجم
۷۲	..... تحلیل تنش
۷۲	..... ۱-۵- مقدمه
۷۲	..... ۲-۵- فرضیات کلی
۷۳	..... ۳-۵- مدل اجزاء محدود
۷۳	..... ۴-۵- خواص و رفتار مواد
۷۴	..... ۱-۴-۵- تئوری مدل مواد الاستیک خطی
۷۵	..... ۲-۴-۵- خواص فیزیکی حرارتی و مکانیکی
۷۶	..... ۵-۵- شرایط مرزی
۷۷	..... ۱-۵-۵- شرایط مرزی حرارتی
۷۷	..... ۲-۵-۵- فشار احتراق
۷۹	..... ۳-۵-۵- شرایط مرزی کف سرسیلندر
۸۰	..... ۴-۵-۵- شرایط مرزی پیچ سرسیلندر
۸۲	..... ۶-۵- تحلیل و مشاهده نتایج
۸۵	..... فصل ششم
۸۵	..... نتایج
۱۲۳	..... فصل هفتم
۱۲۳	..... بحث و تحلیل نتایج
۱۲۶	..... مراجع و منابع

## مقدمه

طراحی موتور به عنوان مهمترین قسمت یک خودرو از اهمیت ویژه ای برخوردار است. پیشرفتهای صورت گرفته در سالهای اخیر موجب کاهش ابعاد و افزایش قدرت موتور شده است. به منظور صرفه جویی در مصرف سوخت های فسیلی از نوع بنزینی و کاهش آلودگی ناشی از آن یکی از عمده ترین تغییرات صورت گرفته، تغییر سوخت موتورها از نوع بنزین به سوخت گازی بوده است. نظر به تغییر سوخت موتور xu7/jpl3 از نوع بنزینی به نوع گازی، تغییراتی در میزان حرارت بوجود آمده، فشار ماکزیمم ایجاد شده در محفظه سیلندر و نیروهای وارده بر پیچها در محل اتصال سیلندر به سرسیلندر مشاهده می شود. به این دلایل، تحلیل و پیش بینی مقدار تنشها و عمر این قطعه ضروری به نظر می رسد. این امر نیاز به شناخت کاملی از وظایف قطعات تشکیل دهنده و محدودیتهای موجود در طراحی استاتیکی و دینامیکی این قطعه دارد. روش کار برای تحلیل روش اجزاء محدود انتخاب شده است تا حل مسئله با سرعت و دقت بالایی صورت پذیرد.

جهت اطمینان از صحت نتایج نیاز به استفاده از آزمایشگاههای اندازه گیری پیشرفته است. راه حل دیگر استفاده از ساده سازی قطعه و تطابق این نتایج با جوابهای حاصله از روش FEM خواهد بود.

هدف اصلی از انجام این پروژه، اطمینان از تحمل و دوام سرسیلندر موتور گازسوز xu7/jpl3 در شرایط جدید کاری خواهد بود. در صورت عدم تحمل این قطعه در شرایط کاری جدید، قطعه نیاز به تصحیح خواهد داشت. تحلیل و بررسی تنشها در قطعه سرسیلندر xu7/jpl3 موجب تعیین وضعیت صحت یا عدم صحت عملکرد آن خواهد شد و در صورت اطمینان از نحوه عملکرد مناسب آن، هزینه طراحی و ساخت قالبهای مجزا و جدید حذف خواهد شد و نیاز به نمونه سازی، تست های جدید و ... را از بین خواهد برد که هزینه و زمان پروژه گازسوز کردن را کاهش خواهد داد. در غیر اینصورت ضریب تراکم و شرایط مرزی به گونه ای تغییر خواهد کرد تا سرسیلندر با همین وضعیت عملکرد مناسبی را داشته باشد. این امر از آن جهت است که در تغییر بر روی موتور، محدودیتهایی وجود دارد. تعدادی از این محدودیتهای هندسه جسم را مشخص می کنند و تعدادی دیگر جنس و خواص فیزیکی مواد را محدود می کنند.



# فصل اول

## مروری بر منابع (در زمینه تحلیل تنش‌ی سرسیلندر)

### ۱-۱- مقدمه

به منظور آمادگی برای کار روی سرسیلندر در ابتدا مطالعه مقالات و کارهای انجام شده ضروری به نظر می‌رسد. این امر بدان منظور صورت می‌گیرد تا از نتایج کارهای گذشته به نحوی استفاده شود که از کارهای تکراری پرهیز شود و در ضمن با نقد نتایج و رفع اشکالات کارهای انجام شده، نتایج صحیح و مناسبتری بدست آید. مطالعات به صورت اساسی بر روی مقالات SAE، مطالعه تئوری عملکرد موتور، تبادل اطلاعات با شرکت اصلی سازنده و سازمانهای مرتبط صورت پذیرفته است. هشت مقاله به صورت کلی در بحث مورد نظر پروژه انتخاب شده و ضمن تحقیق بر روی مطالب آنها به نقد آنها پرداخته شده، سعی بر آن شده تا اشکالات آنها اصلاح شده و در این مطالعه مورد بحث قرار گیرد. عمده مطالعات بر روی نحوه مدلسازی، المان بندی، تنشهای مکانیکی و حرارتی و آنالیز خستگی است. دو مقاله به صورت جدا جدا بحث شده و در نهایت در قسمت نتیجه گیری ضمن بحث بر روی روشها، نقاط ضعف و قوت مقالات مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۱-۲- آنالیز ترمومکانیکی سرسیلندر

این پروژه در یک مرکز نظامی انجام گرفته است [۱]. یک آنالیز سه بعدی اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS انجام گرفته است. این آنالیز برای یک منطقه بحرانی در منطقه ای با گرادیان دمایی بالا و کمترین انتقال حرارت صورت پذیرفته است. اهداف این آنالیز اینگونه آمده است :

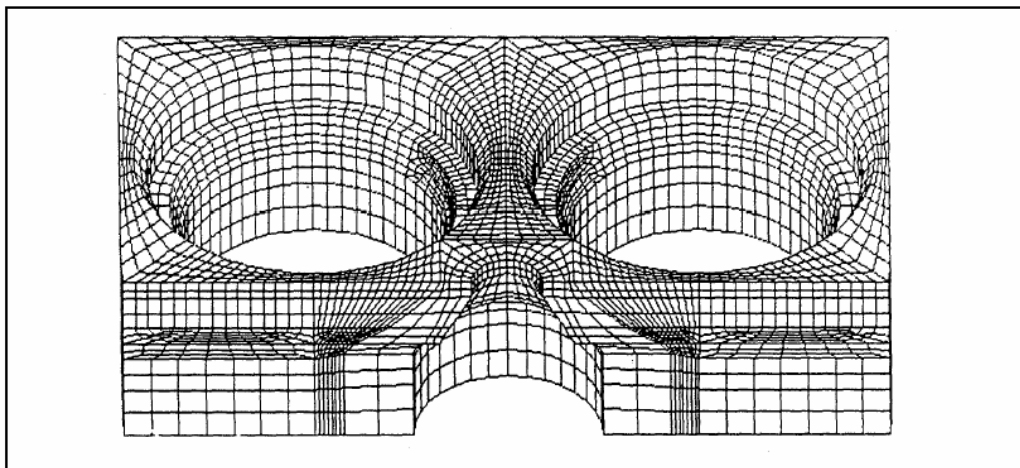
- تعیین میدان تنش حرارتی
- تعیین اندازه تنشهای بیش از حد الاستیک
- آزمایش اثر تغییر مواد بر اندازه تنشهای وارده بر سرسیلندر

جزئیات این آنالیز شامل تعریف مدل، شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی و معتبر سازی نتایج تا حد امکان بیان شده و نتایج آنالیزها و میدان تنش نیز نشان داده شده است. در پایان اثر تغییر مواد بر اندازه تنشهای اعمالی بر سرسیلندر آمده است.

قبل از انجام آنالیز اجزاء محدود، هندسه جسم و شرایط مرزی مدل تعریف می‌شود بدلیل پیچیدگی سرسیلندر، با ساده سازی فرض تقارن در نظر گرفته می‌شود. در این آنالیز فرض می‌شود وضعیت حرارت اثری بر رفتار منحنی تنش، کرنش ندارد و مسئله به صورت دکوپله<sup>۱</sup> حل می‌شود. یک وضعیت حرارتی پایدار در نظر گرفته و با تعیین میدان حرارتی، آن بر مدل استاتیکی اعمال می‌شود. هر دو مدل از یک نوع المان بندی بهره گرفته اند تا در حین انتقال دما بر مدل استاتیکی مشکلی پیش نیاید. تغییر شکل پلاستیک مدل نشده است و تنها تنشهای بیش از حد الاستیک مشخص می‌شوند.

### ۱-۲-۱- تعریف مدل

هندسه سرسیلندر و قیود مکانیکی و حرارتی مدل به صورت کاملاً سه بعدی مدل می‌شوند. شرایط حرارتی در سطح آتش شامل یک دمای بسیار بالا در محفظه احتراق و دمایی بسیار پایین در سطح تماس با بلوک سیلندر است. این مدل عمقی به اندازه ۲۵ میلیمتر دارد که با یک ساده سازی مناسب مدل ساده شده است. این ساده سازی با یک پیش بینی پاسخ حرارتی و تنشی صورت گرفته است. یک تقارن سیلندر به سیلندر وجود دارد، این تقارن اجازه می‌دهد که با توجه به کم شدن حجم مدل، از مش چگالتری برای آنالیز استفاده کنیم. کل محفظه احتراق بخصوص سطح آتش و اطراف سوپاپها از اهمیت بیشتری برخوردارند و یک مش مناسب در این مناطق گرادیان تنش را به خوبی مشخص می‌کند. تعداد المانها ۳۰ عدد در صفحه و ۸ المان در امتداد لبه است. شکل ۱-۱ چیدمان مناسب المانها را در لبه سوپاپ ها نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ چیدمان المانها در لبه نشیمنگاه سوپاپ

توجه کافی به نسبت ابعاد المانی لازم است که این نسبت را در این ناحیه کمتر از ۲,۵ قرار می‌دهد. مش ساخته شده به صورت پیوسته سه بعدی و ۸ گرهی با سه درجه آزادی است. مدل کامل شده شامل ۴۰۶۹۶ المان و ۴۸۵۳۶ گره می‌باشد که نسبت ابعادی و زاویه درونی به ترتیب ۲,۵ و ۹۰ درجه است. این نسبت در مناطق دیگر کمتر از ۵ و زاویه نیز کمتر از ۱۳۵ و بیشتر از ۴۵ درجه می‌باشد.

### ۱-۲-۲- شرایط مرزی حرارتی

اطلاعات شرایط مرزی حرارتی از منابع صنعتی و اطلاعات آزمایشگاهی در شرایط بار کامل بدست می‌آید. ضریب انتقال حرارت از اطلاعات آزمایشگاهی و آنالیز مدل یک بعدی بدست می‌آید. در این روش دما در حالت واقعی اندازه گیری شده و با دمای حاصل از آنالیز مقایسه می‌شود. این روش آنقدر تکرار می‌شود تا نتایج تحلیلی با دمای اندازه گیری شده آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد. این مدل دارای سوپاپ های دود و هوا نیست، بنابراین دمای اعمال شده در اطراف نشیمنگاه کمتر از مقدار واقعی خواهد بود.

### ۱-۲-۳- شرایط مرزی تنشی

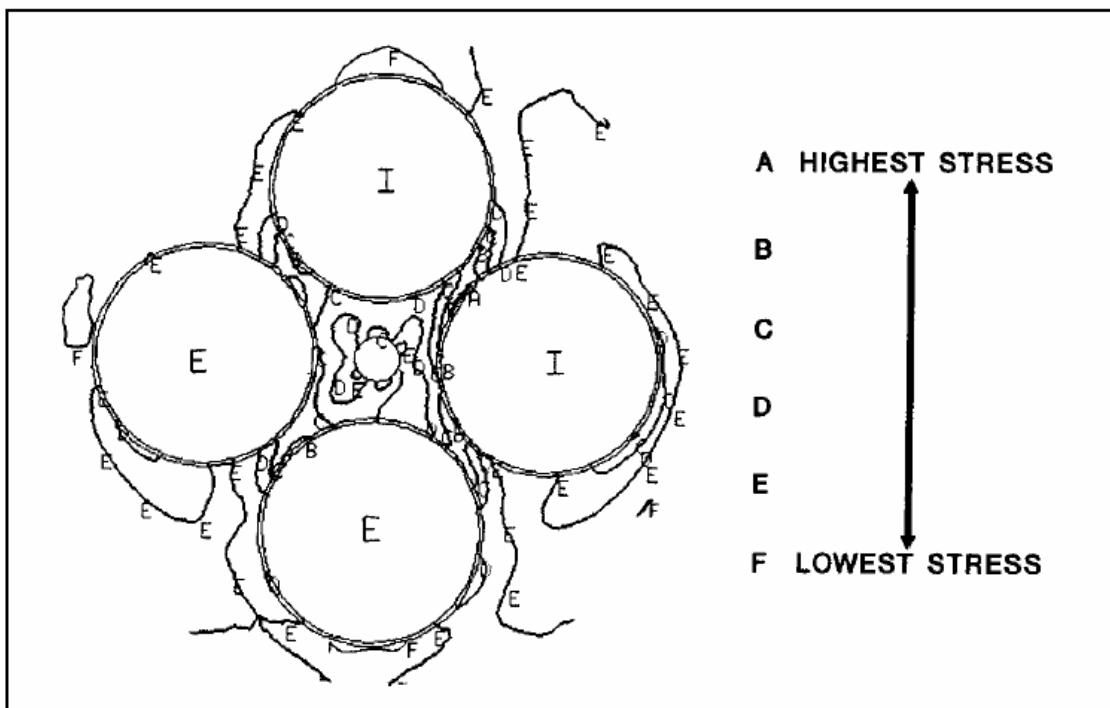
شرایط مرزی تنشی ترکیبی از نتایج آنالیز حرارتی و شرایط مرزی جابجایی برای تکه ای از سرسیلندر است. در این آنالیز فقط بارگذاری حرارتی و بار فشاری ناشی از احتراق مدل شده است که فشار در حدود ۱۴ مگا پاسکال است. این بار تأثیر چندانی بر مقادیر تنش ندارد و تنش ناشی از بارگذاری حرارتی بیش از ۸۰٪ مقدار تنش را به خود اختصاص می‌دهد. شرایط مرزی جابجایی در امتداد عمود بر صفحه تقارن صفر در نظر گرفته می‌شود. ساده سازی دیگر آن است که اثر متقابل بین سیلندر و سرسیلندر و واشر مدل نشده است. در ضمن فرض می‌شود که هر نقطه بر روی سیلندر با نقطه مشابه خود بر روی سرسیلندر با سرعت یکسان حرکت می‌کنند. این موجب می‌شود تا قیدی در صفحه پایین سرسیلندر بوجود نیاید البته در جهت عمود بر صفحه حرکتی وجود ندارد.

### ۱-۲-۴- معبر سازی

نتایج آنالیز اجزاء محدود به روش زیر اعتبار می‌یابند. دمای محاسبه شده از طریق آنالیز همخوانی مناسبی با نتایج بدست آمده از طریق منابع آزمایشگاهی دارد. سطح تنشهای واقعی را نمی‌توان مشخص کرد، بنابر این معبر سازی آنها ممکن نیست. اما نواحی تنش بالای مشخص شده در روش تحلیلی تطابق خوبی با محل‌های ایجاد ترک در سرسیلندرهاي کارکرده دارد.

## ۱-۲-۵- نتایج

در این بخش نتایج ارائه شده و تفسیری نسبت به اندازه و جهت های اصلی آن ارائه خواهد شد. مدل اجزاء محدود یک میدان تنش فشاری بالا را در لبه نشیمنگاه سوپاپ و سوراخ انژکتور را در سطح آتش سرسیلندر پیش بینی می‌کند. این تنشها در مرحله اول مربوط به تفاوت بالای دمای در سطح آتش است، که در یک طرف دمای بالای محفظه احتراق و در طرف دیگر دمای پایین راهگاه آب وجود دارد. در سطح آتش دما در حدود  $700^{\circ}\text{C}$  -  $400^{\circ}\text{C}$  و خارج از این منطقه در حدود  $300^{\circ}\text{C}$  -  $225^{\circ}\text{C}$  خواهد بود. انبساط حرارتی ناحیه داغ بوسیله ناحیه سفت سردتر مهار می‌شود که انبساط حرارتی کمتری دارد. به عنوان نتیجه بیان می‌شود که انبساط متفاوت، یک میدان تنش فشاری را در سطح ایجاد می‌کند. جهت تنش فشاری ماکزیمم در امتداد خطوط شعاعی است. خطوط دما ثابت معمولاً به صورت دوایری در سطح آتش هستند و بنابراین تنشهای ماکزیمم اصلی در جهت شعاع این دایره‌ها خواهد بود. این نتایج را زمانی می‌توان انتظار داشت که کرنشهای نرمال به یک ماده ایزوتروپیک و عاری از تنشهای اولیه و ماده ای در همه جهات یکنواخت موجود باشد. در صورتی که این مدل کاملاً عاری از تنش نیست، بنابراین شرایط کرنش نرمال حرارتی وجود نخواهد داشت که این نتیجه در شکل ۱-۲ دیده می‌شود.



شکل ۱-۲ تنش فون میزس در سطح محفظه احتراق

در مجموع ۸۵ تا ۹۰ درصد از تنش مجموع مربوط به بار حرارتی و مابقی مربوط به بار فشاری می‌باشد. نتیجه مهم عائد شده دیگر آن است که تنشها از حد الاستیک بالاتر می‌روند. نتیجه دیگر آن است که تنشها به صورت

تابعی معکوس از ضخامت رفتار می‌کنند، یعنی مکانهایی بیشترین تنش را تحمل می‌کنند که کمترین ضخامت را دارند. در نهایت به بررسی جایگزینی و تغییر مواد پرداخته می‌شود. ماده شماره ۱ همان جنس معمول آلومینیم است که در حال حاضر در ساخت سرسیلندر استفاده می‌گردد. ماده شماره ۲ یک ماده جدید صنعتی محتوی نیکل با مقاومت بالا در دمای بالا است. ماده شماره ۳ ماده پیشرفته‌ای با تکنولوژی بالاست. ممکن است به نظر برسد استفاده از ماده شماره ۲ با حد الاستیک بالا (۲,۵ برابر ماده شماره ۱) بتواند تحمل بیشتری از خود نشان دهد. اما آنالیز نشان می‌دهد که هنوز مناطق بزرگی از سطح آتش دارای تنشی بیش از حد الاستیک هستند. این حقیقت از آنجا ناشی می‌شود که کرنشها همچنان به اندازه قبل هستند چون ضریب انبساط حرارتی تقریباً به اندازه قبل است. اما چون تنش حرارتی تابعی از کرنش و مدول الاستیسیته است، مدول الاستیسیته بالاتر ماده ۲ نسبت به ماده ۱ موجب می‌شود که تنشی تقریباً دو برابر سرسیلندر ساخته شده از ماده شماره ۱ ایجاد شود. بنابر این دیده می‌شود با آنکه ماده دارای مدول الاستیسیته بالایی است، اما ضریب انبساط حرارتی مشابه ضریب انبساط حرارتی ماده قبل می‌باشد. ماده شماره ۳ دارای مدول و ضریب انبساط حرارتی متفاوتی با دو ماده دیگر است. در این حالت دیده می‌شود که تنش ماکزیمم از تنش حد الاستیک کمتر است. این حالت از آنجا ناشی می‌شود که ماده مزبور دارای ضریب انبساط حرارتی کمتری نسبت به حالت‌های قبل است. این امر موجب می‌شود تا حاشیه امنیت مناسبی برای طراحی و ساخت و اسمبل کردن قطعات وجود داشته باشد.

## ۱-۲-۶- خلاصه و نتیجه گیری

سراسر کارهای انجام شده بصورت همزمان با نتایج آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفت. گرا دیان حرارتی در سطح آتش بسیار بالا و در نتیجه تنش فشاری بالا، مخصوصاً در لبه نشیمنگاه‌ها ایجاد می‌شود. جهت تنشهای فشاری در جهت شعاعی بدست می‌آید که متناسب با عکس ضخامت‌ها نیز هست. این تنشهای فشاری می‌توانند موجب ایجاد ترک در قطعه شوند. علت ایجاد ترک، خروج از محدوده الاستیک و ورود به ناحیه پلاستیک در بعضی نواحی است، البته رشد ترک وابسته به تنشهای کششی است. بعضی از مواد جدید نوید بخش این قضیه هستند که می‌توان موادی ایجاد کرد که ترکیبی از مدول الاستیسیته بالا و ضریب انبساط حرارتی پایین ایجاد شود، به نحوی که سطح مناسبی از تنشهای حرارتی ایجاد شود.

### ۱-۳- اندازه گیری و محاسبه کرنش در حین فعالیت کاری

این پروژه در دانشگاه آخن انجام شده است و بیشتر به بحث در مورد مسائل خستگی حرارتی می‌پردازد [۲]. خستگی حرارتی در تعداد چرخه پایین اتفاق می‌افتد، بنابراین خستگی حرارتی نوعی از خستگی کم چرخه است. مسئله ترک در سرسیلندر مرتبط با خستگی کم چرخه (خستگی حرارتی) مسئله ای معمول در موتورهای احتراق داخلی است. اگرچه هنوز هم پیش بینی عمر قطعه با توجه به پیچیدگی قطعه و رفتار ماده کاری بسیار مشکل است، فهم مناسبی از خستگی در قطعه منجر به طراحی مناسبتر قطعه گردد. ابزار تحلیلی می‌تواند کرنش و تنش را به صورت تابعی از زمان و عمر کاری قطعه را استخراج کند، در ضمن به صورت موازی می‌توان کرنش را در سطح آتش اندازه گرفت که در حالت بار کامل باشد. برای آنالیز این مدل از روش اجزاء محدود توسط نرم افزار ABAQUS استفاده شده تا رفتار سختی ایزوتروپیک- سینماتیک ماده مدل شود. یک کرنش سنج پیشرفته نصب می‌شود تا کرنشهای دینامیکی و دما در طی کار اندازه گیری شود. نتایج برای مقایسه و کالیبراسیون محاسبات صورت می‌گیرد.

امروزه تولیدات صنعتی نیاز به آنالیز سریع، توسعه پیشرفته و دقت بالا در کارهای خود را دارند. آنالیز مدل به عنوان روشی استاندارد برای تأیید مدل برای تولید در صنعت مورد استفاده است. با این حال با تست های تجربی این نتایج مورد تأیید قرار می‌گیرد. برای توسعه ساختار های جدید، با استفاده از آنالیز اجزاء محدود، می‌توان شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی، بارگذاری مکانیکی، تغییر شکل، وزن و انتخاب مواد را در سطح مناسبتری بهینه کرد. در ضمن با افزایش قدرت در موتورهای جدید، بارگذاری حرارتی قویتری در محفظه احتراق بوجود می‌آید. در ضمن تخمین عمر قطعه و محدود کردن گسترش ترک از مهمترین فاکتورهای طراحی یک موتور مناسب هستند که با استفاده از نرم افزار های اجزاء محدود قابل دسترسی هستند.

#### ۱-۳-۱- مدل آنالیز قطعه

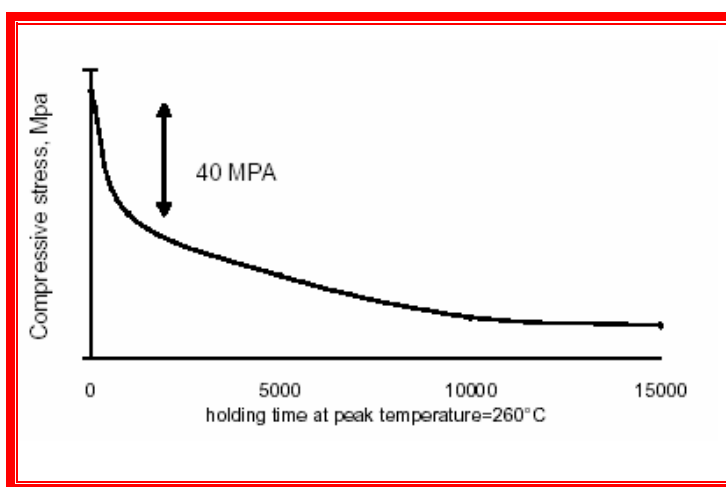
این بخش به مطالعه ای بر آنالیز بارگذاری تناوبی آلیاژ آلومینیم A356 می‌پردازد که نتایج آن توسط آزمایش مورد تأیید قرار گرفته است. موفقیت کاربرد آلیاژهای آلومینیم در کاربردهای تنش حرارتی مستقیماً مربوط به تحمل تنشهای حرارتی تناوبی در دمای بیش از  $300^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. از آنجا که سطوح آتش محدود بوده و از اطراف با یک منطقه سرد در تماس هستند، بنابراین محدودیت انبساط حرارتی منجر به تنش فشاری بالا در قطعه می‌گردد. تنشهای قابل توجه در دمایی کمتر از  $200^{\circ}\text{C}$  به وجود می‌آیند. بیشتر مواد در این حالت رفتاری پلاستیک از خود نشان داده رفتار خزشی جسم موجب ایجاد یک تنش کششی در سیستم می‌گردد.

### ۱-۳-۲- رفتار خزشی<sup>۲</sup> و رهایی تنش<sup>۳</sup>

شکل ۱-۳ منحنی رهایی تنش را برای نمونه ای در  $260^{\circ}C$  نشان می‌دهد. در طول این دوره بارگذاری، سطح تنش در نمونه با گذشت زمان رو به کاهش می‌گذارد و خزش اولیه رخ می‌دهد. مدلی برای رفتار کرنشی ارائه شده که به شکل زیر است:

$$\dot{\epsilon}^{cr} = A \cdot \sigma^n \cdot t^m \quad (1-1)$$

که مقادیر ثابت با استفاده از منحنی رهایی تنش از  $100-290^{\circ}C$  اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱-۳ منحنی رهایی تنش

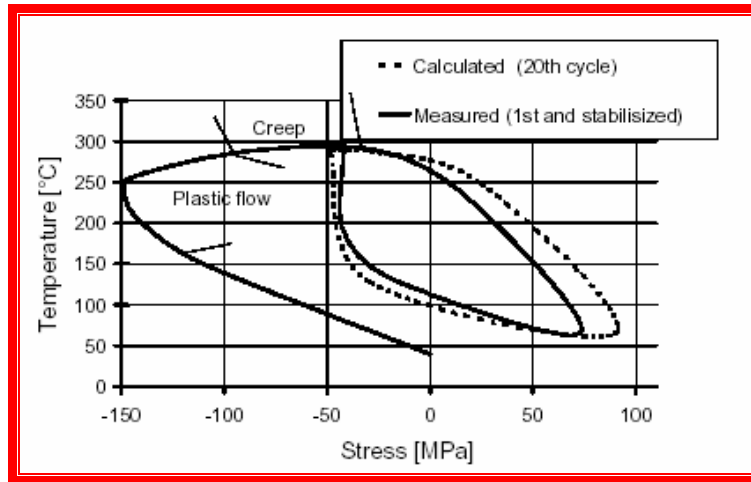
### ۱-۳-۳- حلقه هیستریزیس<sup>۴</sup> تنش حرارتی

شکل ۱-۴ رابطه بین تنش و دما را در یک نمونه تحت آزمایش دما نشان می‌دهد. نمونه ای تحت بارگذاری حرارتی القایی فرکانسی قرار می‌گیرد که از یک سمت با آب خنک می‌شود. تنش حرارتی در حالتی ایجاد می‌شود که یک سر نمونه گیردار و سر دیگر نمونه می‌تواند حرکتی آزادانه داشته باشد. این نمونه ابتدا به صورت پیش گرم تا  $66^{\circ}C$  گرم می‌شود و سپس درون گیره بسته شده است و یک سر آن تا  $288^{\circ}C$  در مدت ۳ دقیقه گرم می‌شود و ۱ دقیقه در همین حالت باقی می‌ماند. نهایتاً در مدت ۳ دقیقه به حالت اول باز می‌گردد، این چرخه تا زمانی تکرار می‌گردد که شکست در قطعه اتفاق بیفتد. قید انبساط حرارتی موجب ایجاد تنش فشاری بالا می‌شود. با افزایش درجه حرارت سطح تنش به نقطه تسلیم رسیده، قطعه دچار شکست می‌گردد.

2\_ Creep behavior

3\_ Stress relaxation

4\_ Hysteresis

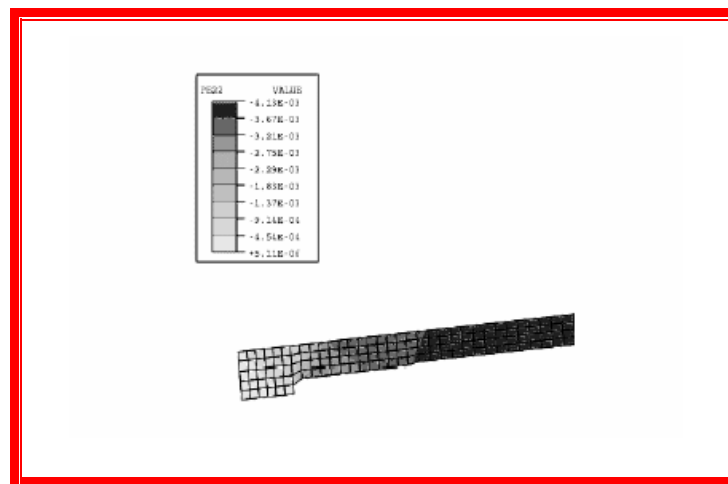


شکل ۴-۱\_ رابطه دما \_ درجه حرارت، اندازه گیری شده و محاسبه شده در نمونه

توجه به این نکته الزامی است که در حرارت پیوسته (زمان ۱ دقیقه حالت پایدار)، تنش شروع به کاهش می کند ( زیرا مقاومت جسم کاهش پیدا کرده است). در طی چرخه، حلقه تنش به سمت تنش کششی حرکت کرده، که مربوط به رفتار خزشی ماده در دماهای بالاتر خواهد بود. بعد از چند حلقه (۵۰-۳۰) پایداری حلقه آشکار می گردد. در این حالت می توان از این حلقه پایدار برای پیش بینی عمر استفاده کرد. حرکت به سمت تنشهای کششی هنوز هم وجود دارد، اما سرعت آن بسیار کاهش یافته است.

شکل ۵-۱ مدل المان بندی شده نمونه را نشان می دهد. این مدل برای تحلیل مدل اجزاء محدود استفاده

می شود. رابطه بین دما- تنش در هر دو صورت اندازه گیری شده و محاسبه شده در شکل ۴-۱ آمده است.



شکل ۵-۱ تغییر شکل پلاستیک در نمونه



### ۱-۳-۴- مدل کردن پلاستیک و اثر سخت شوندگی

قانون سخت شوندگی، تغییرات اندازه و حرکت سطح تسلیم را در فضای تنش توصیف می‌کند. یک مدل سخت شوندگی سینماتیک / ایزوتروپیک برای رفتار خزشی این ماده در نظر گرفته شده است. مشکلات عمده این مدلسازی عبارتند از :

- مدل‌های متنوع سخت شوندگی که برای رفتار خزشی معرفی شده اند فقط در حالت تک محوره مورد تأیید قرار گرفته اند.
  - شیب منحنی تنش \_ کرنش در سرسیلندر ناشناخته است.
  - مدل کرنشی برای مدل‌هایی که تحت بارگذاری چرخه ای هستند، توصیه نشده است. مدل خزش برای بارگذاری تکراری پیچیده است و باید یک جزء دیگر به آن اضافه شود.
  - اگر خزش و پلاستیسیته با هم اتفاق بیفتد، ممکن است هر دو بر رفتار هم اثر متقابل داشته باشد.
- ملزومات برای مدل عددی آلیاژهای آلومینیومی عبارتند از :

- برای پارامترهای مواد متفاوت و آلیاژهای متفاوت این رفتار باید تأیید گردد.
- ساخت نمونه ای برای تأیید مدل صورت گیرد.
- مکانیزم تنشهای فشاری در دمای بالا و تنش کششی در دمای پایین، مورد توجه قرار گیرد.
- رفتار خزشی در دماهای بالا مورد پیش بینی قرار گیرد.
- حرکت حلقه های هیستریزس به سمت تنشهای کششی در طول تخمین عمر قطعه در نظر گرفته شود.
- پیش بینی عمر خستگی به صورتی صحیح صورت پذیرد.

لازم است تا رابطه تنش \_ کرنش و تغییرات آن در شرایط بارگذاری تکراری مدل شود. هدف آن است تا شیب منحنی تنش \_ کرنش در حد امکان پایدار باشد. یک مدل سخت شوندگی سینماتیک / ایزوتروپیک در شرایط بارگذاری حرارتی استفاده می‌شود. ترم سخت شوندگی به صورت زیر ارائه می‌شود :

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}_{pt} - \gamma \alpha \dot{\epsilon}_{pt} \quad (2-1)$$

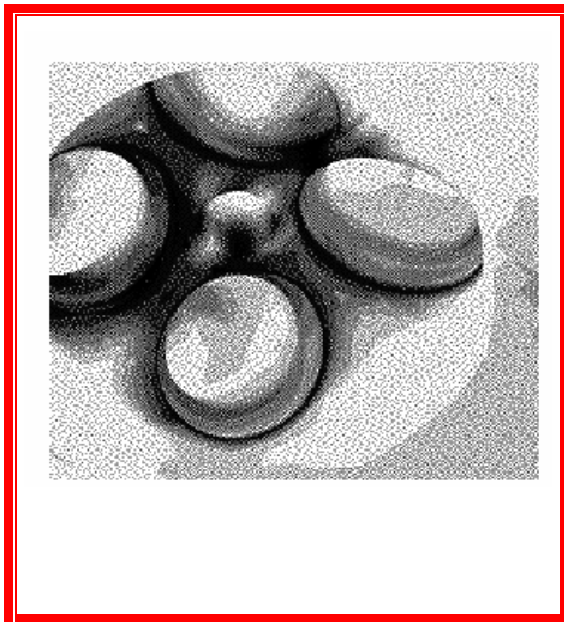
جزء اول (جزء سختی سینماتیک غیر خطی) حرکت سطح تسلیم را در فضای تنش بیان می‌کند. جزء دوم (جزء سختی ایزوتروپیک) تغییرات تنش معادل را به صورت تابعی از تغییر شکل پلاستیک ارائه می‌دهد. بقیه پارامترها از نتایج آزمایش استخراج می‌گردد.

### ۱-۳-۵ خستگی حرارتی در سرسیلندر

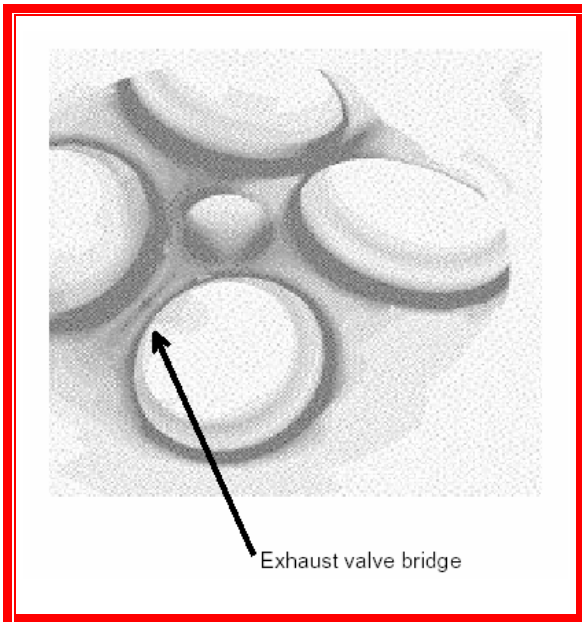
سرسیلندر در شرایط کاری بارهای زیر را تحمل می‌کند :

- بار حرارتی به عنوان تابعی از سرعت و قدرت موتور
- اعمال نیروی سوپاپ‌ها در نشیمنگاه سوپاپ
- نیروی پیچهای سرسیلندر
- رفتار واشر سرسیلندر
- بارهای تنشی ناشی از رفتار ماده
- فشار متناوب ناشی از احتراق در چرخه کاری

شکل ۱-۶ کرنش پلاستیک محاسبه شده در سطح آتش سرسیلندر را در دمای بالا نشان می‌دهد. مناطق تاریک‌تر سطح، مقدار بیشتر کرنش پلاستیک را نشان می‌دهد. نگاه اول مؤید این مطلب است که در اطراف نشیمنگاه سوپاپ، کرنش به بیشترین مقدار می‌رسد. البته این مقدار در حالت واقعی بیش از مقدار نشان داده است، چرا که جازدن فشاری سیت سوپاپ موجب می‌شود تا یک پیش بار فشاری در این منطقه ایجاد شود. این پیش بار اثری بر خستگی کم چرخه ندارد اما برای پیش بینی عمر به عنوان یک تنش اولیه مورد محاسبه قرار می‌گیرد. مقدار جریان پلاستیک قابل ملاحظه‌ای در سطح احتراق، خصوصاً در اطراف خروجی دود وجود دارد. شکل ۱-۷ تنش کششی محاسبه شده بعد از خنک شدن را نشان می‌دهد، که این عمل بعد از خاموش شدن موتور و رسیدن دمای موتور دمای محیط است. در این حالت تنش کششی در ناحیه وسیعی از سطح دیده می‌شود. بنابراین نواحی بحرانی برای تخمین عمر خستگی وجود دارد که می‌تواند تلفیقی از بار حرارتی و بار مکانیکی باشد.



شکل ۷-۱ تنش کششی محاسبه شده بعد از خاموش شدن موتور



شکل ۶-۱ کرنش پلاستیک محاسبه شده در سطح آتش

### ۱-۳-۶- پیش بینی عمر خستگی

یک حلقه هیستریزس از آنالیز تنشی بدست آمده که عرض حلقه بستگی به سطح کرنش و مقاومت ماده دارد. همبستگی کرنش یا تنش پلاستیک به عمر، غالباً در خستگی کم چرخه بیان می‌شود. اما هیچ یک از دامنه‌های تنش یا کرنش پلاستیک به اندازه‌ای نیست که بتوان از آن برای پیش بینی عمر استفاده کرد. زیرا همبستگی ضرایب در مدل کرنش نسبتاً پایین است (۰,۲-۰,۵). بهترین همبستگی برای عمر خستگی در سطوح تقسیم شده بوسیله زمان حلقه یافت می‌شود. بنابراین سطح زیر حلقه گزینه مناسبی برای تخمین عمر است.

### ۱-۳-۷- رویه آزمایشها

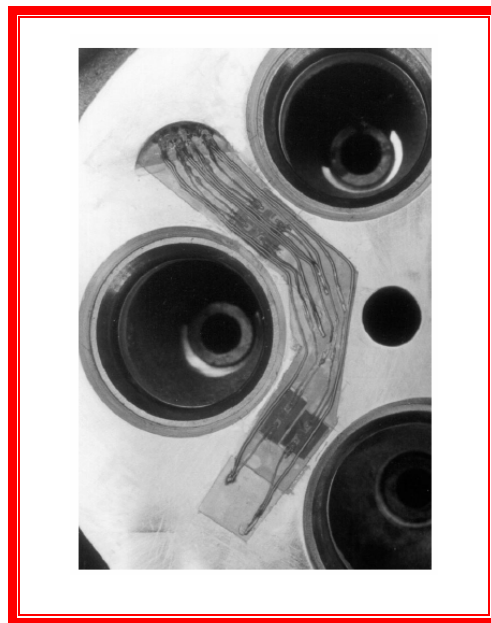
رفتار آلیاژ آلومینیم با استفاده از آنالیز نمونه بدست آمده است. برای یک سرسیلندر، آنالیز تنش-کرنش بسیار پیچیده خواهد بود، این پیچیدگی به علت شرایط مرزی متفاوت با نمونه است:

- ترکیبی از مواد متفاوت (سیت سوپاپ، انژکتور) در سرسیلندر موجود است.
- توزیع دمای پیچیده در لبه سوپاپ وجود دارد.
- شرایط مرزی حرارتی در سطح محفظه احتراق سرسیلندر تابعی از زمان و مکان است.
- انبساط حرارتی سرسیلندر کاملاً مهار شده نیست که تفاوت مهمی با نمونه است.
- بارگذاری واقعی پیچیده تر از حالت آزمایش نمونه است.

برای آنالیز رفتار ماده در سرسیلندر لازم است تا کرنش و درجه حرارت در سطح آتش به خوبی مشخص شود. آزمایشها توصیه می‌کنند با قرار دادن یک کپسول حاوی کرنش سنج در محفظه احتراق می‌توان این کار را انجام داد که ضخامت این کپسول ۰,۰۷ میلی‌متر و ضخامت چسب بین ۰,۰۰۵ تا ۰,۰۱ میلی‌متر می‌باشد. انتقال حرارت چسب و کرنش سنج بسیار کم است. در محل کرنش سنجها، تغییر شکل پلاستیک و خزش پیش بینی می‌شود. توجه کافی شود که خزش در چسب و کرنش نیز می‌تواند اتفاق بیفتند، بنابراین از موادی استفاده شده است که در دمای زیر  $300^{\circ}C$  و کرنش کمتر از  $2 \text{ m/m}$  خزشی وجود ندارد. شکل ۸-۱ تصویری از کاربرد این تکنولوژی را در یک سرسیلندر دیزل نشان می‌دهد. دو کرنش سنج بین راهگاههای هوا - دود و راهگاههای دود - دود قرار داده می‌شود که هر کدام بر دیگری عمود است تا کرنشها به صورت کامل به دست آیند.

توجهات زیر در حین آزمایش ضروری است :

- سیمهای اتصال به صورت جوش سخت به کرنش سنجها متصل شده اند.
- عایق کردن الکتریکی سیمها با بدنه بوسیله لایه ای از چسب برای جدا کردن صورت می‌گیرد.
- کابلها از سوراخ ریزی که در راهگاه آب به محفظه احتراق ایجاد شده، می‌گذرند.
- سوراخها بوسیله همان چسب کرنش سنج آب بندی می‌شوند.



شکل ۸-۱ نصب کرنش سنج در یک سرسیلندر موتور دیزل