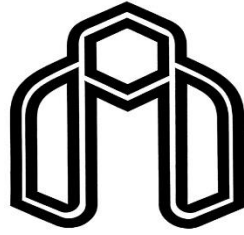


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گرایش ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان

تعیین منحنی‌های مشخصه واشر سرسیلندر به روش عددی و تجربی؛

مطالعه موردی واشر سرسیلندر یک موتور دیزل

نگارش

حامد آتش‌زر

اساتید راهنما:

سید هادی قادری

سید وحید حسینی

دی ۱۳۹۴

ت

شماره ۱۷۹، ۲۹۶، ۱۳
 تاریخ ۳
 مهلت ۹۲، ۱۲

بسمه تعالی



فرم شماره ۶ صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات هیات داوران و با استناد از صورتجلسه هیات داوران جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد
 دانشجو: حامد آتش زو به شماره دانشجویی ۹۲۰۱۵۲۲ رشته مکتوبات گرایش معادلات و توابع تحت عنوان
 همین مشخصه دانشجو سرمدی پور به روش شفاهی و تشریحی مطالعه موردی دانشجو سرمدی پور به
 عنوان پایان نامه در تاریخ ۹۲/۱۲/۱۲ با حضور هیات داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح
 زیر اظهار می گردد.

تعداد نمره قبولی دانشجو: ۱۱/۱۲/۹۳
 دفعه نهمه مرتبه

تاریخ: ۱۳۹۲/۰۲/۰۱
 تاریخ: ۱۳۹۲/۰۲/۰۱
 شماره ثبت: ۹۲۰۱۵۲۲

ردیف	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر سید علی		تاریخی
۲	دکتر سید علی		تاریخی
۳	دکتر سید علی		تاریخی
۴	دکتر سید علی		تاریخی
۵	دکتر سید علی		تاریخی
۶	دکتر سید علی		تاریخی
۷	دکتر سید علی		تاریخی
۸	دکتر سید علی		تاریخی
۹	دکتر سید علی		تاریخی
۱۰	دکتر سید علی		تاریخی

رئیس دانشکده
 ش. مردان
 تاریخ: تاریخی

تقدیم‌نامه

تقدیم به پدر و مادرم که با گذشت و فداکاری خویش سختی‌های مسیر کسب دانش را برایم آسان کردند.

سپاس‌گزاری

به مصداق آیه شریفه‌ی "مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ" شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقایان دکتر سیدهادی قادری و دکتر سید وحید حسینی که با راهنمایی‌های کارساز و سازنده‌ی خود مرا در انجام این پایان‌نامه یاری رساندند، تشکر کنم.

همچنین کمال تشکر را از شرکت توسعه قوای محرکه دینا و تحقیقات موتور ایران خودرو بدلیل در اختیار گذاشتن مستندات و تجهیزات آزمون‌های تجربی دارم.

تعهد نامه

اینجانب حامد آتش زور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک - دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه

تعیین متغیرهای مشخصه و اثر سرسیلندر بر روش عددی و تجربی!

مطالعه موردی و اثر سرسیلندر یک موتور دیزل

تحت راهنمایی سید هادی قناری و سید وحید حسینی متعهد می شوم

- به‌صرفه در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب استخراج از پایان نامه با کسب توسط خود یا فرد دیگری برای ارتباط هیچ نوع حقوق یا امتیازی در هیچ جایگاهی نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات استخراج از نام دانشگاه صنعتی شاهرود - Shahrood University of Technology به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج علمی پایان نامه مشارکت کرده اند در مقالات استخراج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجودی زنده یا جانمایی آنها استفاده شده است شرایط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه در مواردی که به حریم اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رضایت و شرایط و اصول اخلاقی علمی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات استخراج کتاب، برنانه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مفصلی در تالیفات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

ممن از این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

واشر سرسیلندر قطعه‌ای کلیدی در موتور است، که وظیفه آب‌بندی موتور را بر عهده دارد. هدف اصلی این پایان‌نامه، بدست آوردن منحنی مشخصه واشر سرسیلندر در مراحل بارگذاری و باربرداری برای تعیین صحت عملکرد آن با روش‌های تجربی و عددی است که بصورت موردی بر روی یک موتور دیزل دریایی انجام شده است. در این پایان‌نامه نمونه‌ای اولیه از یک دستگاه اندازه‌گیری منحنی مشخصه واشر طراحی و ساخته شده است. برای شناخت دقیق‌تر عملکرد واشر سرسیلندر و تأیید نتایج، دو حالت بارگذاری کلی و موضعی با کمک نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و منحنی مشخصه به دست آمد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که رفتار کلی واشر را می‌توان با دقت خوبی با استفاده از بارگذاری موضعی بدست آورد. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد نمودارهای نیرو-جمع‌شدگی تکرارپذیری خوبی دارند. مقایسه نتایج آزمون تجربی با عددی نشان می‌داد که در یک نیروی یکسان تغییر مکان در نتایج تجربی بیشتر از نتایج عددی است که این می‌تواند بدلیل عدم تختی سطح واشر باشد. با توجه به اینکه شکل بید تأثیر مهمی بر روی برگشت فنری و فشار تماس دارد، چند حالت مختلف از شکل بید با روش المان محدود بررسی و مقادیر بهینه ضخامت ورق و ارتفاع بید با استفاده از روش‌های طراحی آزمون مشخص شد. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش ضخامت ورق و افزایش ارتفاع بید برگشت فنری بیشتر می‌شود. همچنین نتایج تجربی نشان می‌داد که وجود روکش بدلیل افزایش اصطکاک باعث افزایش شیب منحنی نیرو - جمع‌شدگی واشر می‌شود. نتایج آزمایش کاغذ فوجی بر روی موتور، نشان می‌دهد که یک بید کمکی در جهت بهبود کیفیت آب‌بندی و تولید یک نوار آب‌بند اولیه جهت کاهش موج فشار احتراق در زمان همبندی ایجاد می‌شود. پهنای این لبه آزاد از اهمیت زیادی در تولید یک نوار آب‌بندی بهینه برخوردار است.

واژگان کلیدی: واشر سرسیلندر، منحنی مشخصه واشر، موتور دیزل، روش المان محدود.

فهرست

ت	تقدیم‌نامه	.....
ث	سپاس‌گزاری	.....
خ	فهرست	.....
ر	فهرست شکل‌ها	.....
ض	فهرست جدول‌ها	.....
۱	فصل ۱ مقدمه	.....
۲	۱-۱- انواع واشرهای کامپوزیت	.....
۳	۲-۱- انواع واشرهای فلزی	.....
۹	۳-۱- عملکرد واشر در شرایط مختلف موتور	.....
۱۰	۴-۱- منحنی مشخصه واشر	.....
۱۲	۵-۱- کاربردهای بارگذاری کلی و موضعی	.....
۱۲	۱-۵-۱- بارگذاری کلی	.....
۱۲	۱-۱-۵-۱- مزایا	.....
۱۳	۲-۱-۵-۱- معایب	.....
۱۳	۲-۵-۱- بارگذاری موضعی	.....
۱۳	۱-۲-۵-۱- مزایا	.....
۱۳	۲-۲-۵-۱- معایب	.....
۱۴	۶-۱- مروری بر تحقیق‌های پیشین	.....

۲۱	۷-۱- اهداف و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه
۲۱	۸-۱- فرض‌ها
۲۲	۹-۱- اهداف این پایان‌نامه
۲۲	۱۰-۱- نوآوری‌ها
۲۳	فصل ۲ آزمایش‌های تجربی
۲۴	۱-۲- دستگاه آزمایش بارگذاری موضعی
۲۶	۱-۱-۲- نیروسنج
۲۷	۲-۱-۲- کالیبراسیون و خوانش نیروسنج
۲۸	۳-۱-۲- پراب نیرو
۲۸	۴-۱-۲- واشر سرسیلندر
۲۹	۵-۱-۲- اجرای آزمایش با دستگاه بارگذاری موضعی
۳۰	۲-۲- منحنی بارگذاری
۳۱	۳-۲- منحنی بارگذاری-باربرداری
۳۱	۴-۲- منحنی بارگذاری-باربرداری ترتیبی
۳۲	۵-۲- بررسی عملی پنج واشر مختلف در بارگذاری-باربرداری
۳۵	۱-۵-۲- اجرای بارگذاری-باربرداری پنج واشر مختلف
۳۷	۶-۲- آزمایش کاغذ فوجی
۳۹	۷-۲- قالب بارگذاری کلی
۴۰	۸-۲- نیروی بستن پیچ‌های سرسیلندر
۴۳	فصل ۳ تحلیل المان محدود
۴۴	۱-۳- مدل المان محدود بارگذاری-باربرداری کلی
۵۵	۲-۳- شبیه‌سازی المان محدود بارگذاری موضعی
۵۷	۳-۳- بررسی تأثیر متغیرهای بید

۶۱	فصل ۴ نتایج
۶۲	۱-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری نمونه الف از مدل المان محدود
۶۳	۲-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری ۱۰° سه بعدی
۶۳	۳-۴- مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری ۱۰° سه بعدی با متقارن محوری (یکنواخت)
۶۴	۴-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری المان محدود حالت موضعی ۱۰°
۶۴	۵-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری برای حالت موضعی ۳۰°
۶۵	۶-۴- مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری المان محدود موضعی با یکنواخت
۶۶	۷-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل بدون روکش با آزمایش تجربی (نمونه الف)
۶۶	۸-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل روکش دار با آزمایش تجربی (نمونه ب)
۶۷	۹-۴- مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری دو مدل مختلف واشر سرسیلندر
۶۸	۱۰-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری واشر دایره‌ای چندراهه دود با آزمایش تجربی (نمونه ث)
۶۸	۱۱-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری واشر مربعی چندراهه دود با آزمایش تجربی (نمونه ت)
۷۰	۱۳-۴- بررسی متغیرهای مؤثر در بید واشر سرسیلندر
۷۰	۱-۱۳-۴- بررسی تغییرات ارتفاع بید و ضخامت واشر بر روی برگشت فنری
۷۱	۲-۱۳-۴- بررسی تغییرات ارتفاع بید و ضخامت واشر بر روی فشار تماس
۷۲	۳-۱۳-۴- بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع بید و ضخامت ورق بر روی منحنی نیرو-جمع‌شدگی
۷۳	۱۴-۴- مقایسه واشر سرسیلندر
۷۵	۱۵-۴- بررسی نتایج آزمایش سفت کردن پیچ
۷۶	۱۶-۴- بررسی عرض تماس بید
۷۸	۱۷-۴- بررسی تغییرات فشار تماس بر حسب نیرو در مدل المان محدود
۷۹	۱۸-۴- بررسی تغییرات برگشت فنری نسبت به جمع‌شدگی در مدل المان محدود
۸۰	۱۹-۴- بررسی تأثیر اصطکاک سطح واشر بر منحنی نیرو-جابجایی
۸۰	۲۰-۴- بررسی تأثیر نیروی همبندی واشر بر برگشت فنری در مدل المان محدود

فصل ۵ - نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۸۱
۵-۱- نتیجه‌گیری	۸۲
۵-۲- پیشنهاد	۸۵
منابع	۸۶
پیوست الف: نمای برش خورده از دستگاه اندازه‌گیری منحنی مشخصه واشر	۹۰
پیوست ب: نقشه واشر سرسیلندر	۹۲
پیوست ج: مشخصات فنی حسگر نیرو	۹۴
پیوست د: نقشه پیچ سرسیلندر	۹۶

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: موقعیت قرارگیری واشر سرسیلندر	۴
شکل ۲-۱: افزایش نیروی پیچ سرسیلندر متناسب با فشار سیلندر [۴]	۴
شکل ۳-۱: کرنش محوری بلوک سیلندر در زاویه‌های مختلف میل‌لنگ [۴]	۵
شکل ۴-۱: موقعیت بید واشر سرسیلندر	۶
شکل ۵-۱: بید کامل	۶
شکل ۶-۱: نیم‌بید	۶

- شکل ۷-۱: فنریت معادل در واشرهای چندلایه..... ۷
- شکل ۸-۱: بید واشر چندلایه از نوع سری..... ۷
- شکل ۹-۱: بید واشر چندلایه از نوع موازی..... ۷
- شکل ۱۰-۱: واشر استپر دار..... ۸
- شکل ۱۱-۱: واشر با استپر موج دار..... ۸
- شکل ۱۲-۱: واشر با استپر موج دار و بید کامل..... ۸
- شکل ۱۳-۱: تعداد مختلف موج‌های استپر موج دار..... ۹
- شکل ۱۴-۱: نواحی واشر که امکان نشستی وجود دارد..... ۱۰
- شکل ۱۶-۱: شماتیک بارگذاری کلی..... ۱۲
- شکل ۱-۲: جانمایی قطر پراب بر روی محیط بید واشر سرسیلندر..... ۲۵
- شکل ۲-۲: دستگاه آزمایش بارگذاری موضعی..... ۲۵
- شکل ۳-۲: نیروسنج ۲۵۰ kg..... ۲۶
- شکل ۴-۲: پراب..... ۲۸
- شکل ۵-۲: واشر سرسیلندر موتور دیزل..... ۲۹
- شکل ۸-۲: منحنی بارگذاری..... ۳۰
- شکل ۹-۲: بارگذاری-باربرداری..... ۳۱
- شکل ۱۰-۲: بارگذاری-باربرداری ترتیبی..... ۳۱
- شکل ۱۱-۲: واشر دیزل بدون روکش (نمونه الف)..... ۳۲
- شکل ۱۲-۲: واشر دیزل روکش دار (نمونه ب)..... ۳۳
- شکل ۱۳-۲: واشر دیزل روکش دار (نمونه پ)..... ۳۳
- شکل ۱۴-۲: واشر مربعی استیل چندراهه دود موتور دیزل (نمونه ت)..... ۳۴
- شکل ۱۵-۲: واشر دایره‌ای استیل چندراهه دود موتور دیزل (نمونه ث)..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲: بارگذاری موضعی واشر مربعی چندراهه دود..... ۳۷

- شکل ۲-۱۷: نمودار مشخص کننده فشار ایجاد شده بر روی کاغذ فوجی [۴۰]..... ۳۸
- شکل ۲-۱۸: انجام آزمایش کاغذ فوجی بر روی موتور دیزل..... ۳۸
- شکل ۲-۱۹: کفشک‌های ساخته شده جهت بارگذاری-باربرداری کلی..... ۳۹
- شکل ۲-۲۰: دستگاه آزمون کشش سرو هیدرولیک Instron 8802..... ۴۰
- شکل ۲-۲۱: روش کارکرد حس گر اولتراسونیک..... ۴۱
- شکل ۲-۲۲: شماره پیچ‌های سرسیلندر و نمونه‌ای از نقشه پیچ سرسیلندر..... ۴۲
- شکل ۳-۱: نمونه‌های دمبلی شکل آزمون کشش آلیاژ St12 بر اساس استاندارد ASTM-E8..... ۴۶
- شکل ۳-۲: دستگاه آزمون مدل Testometric..... ۴۷
- شکل ۳-۳: منحنی تنش-کرنش حقیقی به دست آمده از آزمایش کشش..... ۴۷
- شکل ۳-۴: ناحیه بریده شده از واشر..... ۴۸
- شکل ۳-۵: مقطع بریده شده از نمونه الف با دستگاه برش وایرکات..... ۴۸
- شکل ۳-۶: دستگاه سایه‌نگار نوری..... ۴۹
- شکل ۳-۷: عکس میکروسکوپی از بید..... ۵۰
- شکل ۳-۸: مدل شکلهی متقارن محوری بید واشر سرسیلندر..... ۵۲
- شکل ۳-۹: مقایسه انرژی جنبشی نسبت به انرژی کل در شکلهی بید..... ۵۲
- شکل ۳-۱۰: مقایسه شکل نهایی شکلهی المان محدود بید واشر سرسیلندر با نمونه واقعی..... ۵۲
- شکل ۳-۱۱: مدل المان محدود بارگذاری با پانچ و سندان تغییر شکل پذیر..... ۵۳
- شکل ۳-۱۲: مدل المان محدود بارگذاری-باربرداری..... ۵۳
- شکل ۳-۱۳: شکلهی سه بعدی واشر سرسیلندر..... ۵۴
- شکل ۳-۱۴: بارگذاری-باربرداری مدل سه بعدی..... ۵۵
- شکل ۳-۱۵: شکلهی 30° بید واشر سرسیلندر..... ۵۶
- شکل ۳-۱۶: بارگذاری موضعی 30° ۵۶
- شکل ۳-۱۷: بارگذاری موضعی 10° ۵۶

- شکل ۳-۱۸: متغیرهای مشخص شده در مقاله برای بهینه‌سازی [۱۱]..... ۵۸
- شکل ۳-۱۹: مدل‌های بارگذاری-باربرداری برای بهینه‌سازی..... ۶۱
- شکل ۴-۱: منحنی بارگذاری-باربرداری نمونه (الف) از مدل المان محدود به ازای چند جمع‌شدگی مختلف..... ۶۲
- شکل ۴-۲: منحنی بارگذاری-باربرداری برای حالت 10° سه‌بعدی..... ۶۳
- شکل ۴-۳: مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری 10° سه‌بعدی با متقارن محوری..... ۶۴
- شکل ۴-۵: منحنی بارگذاری-باربرداری برای حالت موضعی 30° ۶۵
- شکل ۴-۶: مقایسه منحنی بارگذاری یکنواخت و موضعی..... ۶۵
- شکل ۴-۷: منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل بدون روکش (نمونه الف)..... ۶۶
- شکل ۴-۸: منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل روکش‌دار (نمونه ب)..... ۶۷
- شکل ۴-۹: مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری دو نمونه مختلف واشر سرسیلندر..... ۶۷
- شکل ۴-۱۰: منحنی بارگذاری-باربرداری واشر دایره‌ای چندراهه دود..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱: منحنی بارگذاری-باربرداری واشر مربعی چندراهه دود..... ۶۹
- شکل ۴-۱۳: نتیجه بررسی تأثیر ضخامت ورق و ارتفاع بید بر برگشت فنری..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴: نتیجه بررسی تأثیر ضخامت ورق و ارتفاع بید بر فشار تماس..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵: بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع بید و ضخامت ورق بر روی منحنی نیرو-جمع‌شدگی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۶: مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری مدل المان محدود و دستگاه به ازای نیروی برابر..... ۷۴
- شکل ۴-۱۷: شکل بید پس از اعمال نیرو..... ۷۵
- شکل ۴-۱۸: تغییرات لبه داخلی واشر سرسیلندر قبل و بعد از اعمال نیرو..... ۷۷
- شکل ۴-۱۹: آزمایش کاغذ فوجی واشر سرسیلندر..... ۷۷
- شکل ۴-۲۰: عرض تماس بید در مدل المان محدود..... ۷۷
- شکل ۴-۲۱: تغییرات عرض تماس در سه ناحیه بید..... ۷۸
- شکل ۴-۲۲: تغییرات فشار تماس برحسب نیرو..... ۷۹
- شکل ۴-۲۳: تغییرات برگشت فنری نسبت به جمع‌شدگی..... ۷۹

شکل ۴-۲۴: تأثیر ضریب اصطکاک سطح و اثر بر میزان جابجایی و اثر ۸۰

شکل ۴-۲۵: تأثیر نیروی همبندی و اثر بر برگشت فنری ۸۱

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: تغییرات ولتاژ برحسب وزن ۲۷
- جدول ۲-۲ (الف) ترکیب شیمیایی واشر سرسیلندر دیزل نمونه پ برحسب درصد وزنی عناصر ۳۵
- جدول ۲-۲ (ب) نمونه پ از نظر ترکیب شیمیایی با استاندارد آمریکایی (UNS G10050) AISI 1005 با این ترکیب شیمیایی مطابقت دارد ۳۶
- جدول ۳-۲ (الف) ضخامت پوشش در برخی از قسمت‌های نمونه پ ۳۶
- جدول ۳-۲ (ب) ترکیب شیمیایی روکش واشر سرسیلندر دیزل نمونه پ برحسب درصد وزنی عناصر ۳۶
- جدول ۴-۲: نتایج آزمایش تغییر طول پیچ‌های سرسیلندر [۴۰] ۴۱
- جدول ۱-۳: نتیجه آزمایش کشش نمونه‌ها ۴۷
- جدول ۲-۳ حالات ایجادشده در واشر جهت بررسی شکل بید ۵۹
- جدول ۱-۴: مقایسه واشرهای مختلف ۷۴
- جدول ۲-۴: مقادیر نیروی به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی بر اساس رابطه ۳-۲ با فرض پیچ الاستیک ۷۵

فصل ۱

مقدمه

در موتورهای احتراق داخلی قطعه‌ای بین سیلندر و سرسیلندر به نام واشر سرسیلندر قرار می‌گیرد. بلوک سیلندر و سرسیلندر با استفاده از پیچ به هم متصل می‌شوند و واشر را فشرده می‌کنند (شکل ۱-۱). واشر سرسیلندر مهم‌ترین واشر استفاده‌شده در موتور است. هدف واشر سرسیلندر، آب‌بندی سیلندر برای تضمین بیشترین فشار و جلوگیری از نشت مواد خنک‌کننده یا روغن به درون سیلندر است. همچنین می‌توان آن را مهم‌ترین کاربرد آب‌بندی در موتور و محفظه احتراق دانست. واشر سرسیلندر خوب باید توانایی آب‌بندی محفظه احتراق، راهگاه محفظه خنک‌کاری و روغن را در محدوده وسیعی از عملکرد موتور داشته باشد. برای تحقق این امر، باید مطمئن شد که توزیع فشار درستی در تمام سطوح آب‌بندی به‌ویژه بر روی واشر و محدودی بین استوانه‌ها برقرار است [۱]. واشر سرسیلندر به‌طور کلی به دو نوع فلزی و کامپوزیت تقسیم‌بندی می‌شود.

۱-۱- انواع واشرهای کامپوزیت

۱- واشر نازک غیرفلزی چسبیده به هسته فلزی، با یک رینگ احتراق در راستای سوراخ سیلندر و متفاوت بودن روکش برای آب‌بندی سیال.

۲- ورق فلزی میخ‌کوب شده با یک هسته قابل تراکم مانند گرافیت انعطاف‌پذیر که شامل روکش برای آب‌بندی و رینگ احتراق اطراف سوراخ سیلندر است.

۳- هسته واشر ورق فلزی میخ‌کوب شده با یک رویه از گرافیت انعطاف‌پذیر و رینگ احتراق در اطراف سوراخ سیلندر.

قسمت انعطاف‌پذیر واشر می‌تواند از جنس آزیست باشد که در دهه‌های گذشته واشر را به‌طور کامل از آن می‌ساختند. ولی به دلایل زیست‌محیطی استفاده از آن به‌شدت محدود شده است. به‌طور کلی واشرهای کامپوزیت، برگشت فنی کمتری نسبت به فلزی دارند و پس از مدتی کارکرد آن کمتر هم می‌شود.

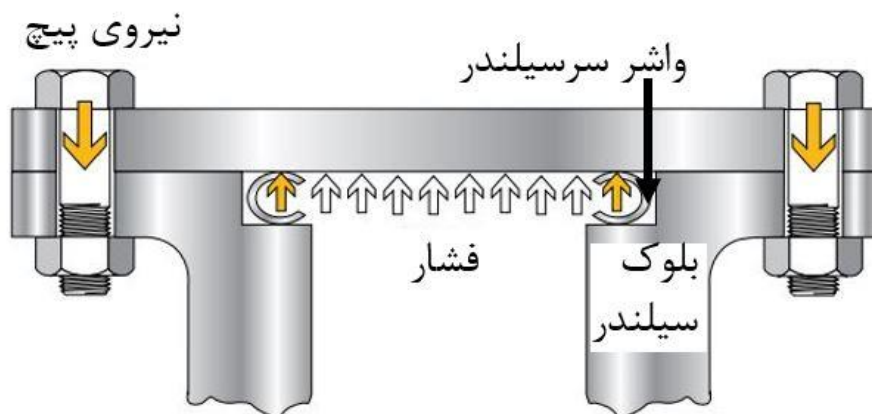
۱-۲- انواع واشرهای فلزی

۱- واشر تک لایه فلزی: قدیمی‌ترین واشر خالص فلزی که شامل یک لایه نازک فلزی که قسمتی از آن برجسته شده و دارای ضخامتی حدود 0.381 mm تا 0.508 است. این نوع واشرها با نقره روکش شده و رگه‌های آلومینیوم به آب‌بندی سیال کمک می‌کند [۲].

۲- واشرهای چندلایه فلزی: این واشر شامل دو یا چندلایه فلزی با قسمت برجسته که به یک هسته ورق فلزی صاف پرچ شده است، می‌باشد و نسبت به نوع تک لایه مزیت‌هایی دارد. آن‌ها در ضخامت‌های مختلفی موجود هستند و سازنده می‌تواند ارتفاع تراکم را تنظیم کند. در این نوع آب‌بندها، نیاز به وجود لاستیک بر روی سطح آن نیست و به دلیل سختی لایه‌های واشر برای جلوگیری از نشت، باید سطح سیلندر به اندازه کافی صاف باشد.

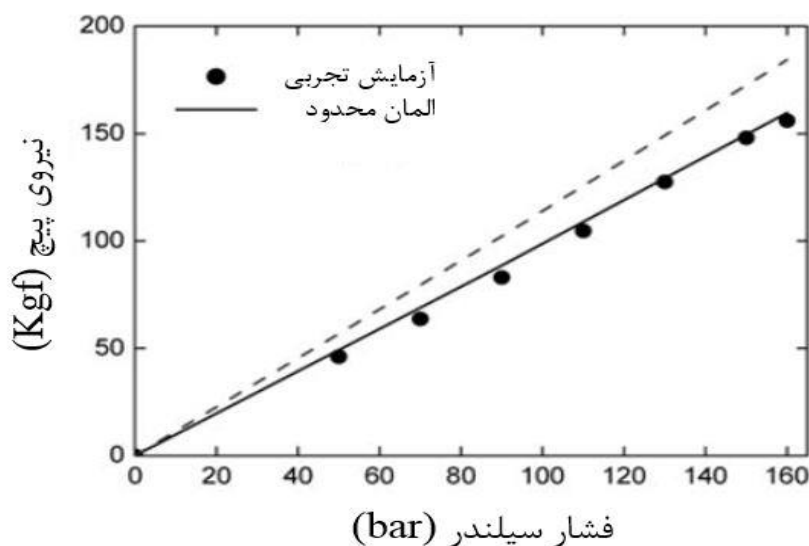
۳- واشر با لایه مسی: توانایی آب‌بندی این نوع واشر نسبت به دو نوع دیگر بیشتر است [۲].

محدوده فشار احتراق در موتورهای بنزینی 68 bar و در موتورهای دیزل 110 bar می‌باشد [۳]. به منظور جلوگیری از نشت گازهای حاصل از احتراق، سیال خنک‌کننده و روغن، فشار آب‌بندی واشر باید بالاتر از بیشترین فشار سیلندر ناشی از احتراق گاز باشد. به دلیل اینکه فشار آب‌بندی با فشردن واشر در طول سفت کردن پیچ‌ها افزایش می‌یابد، نیروی اعمالی پیچ‌ها باید به اندازه کافی زیاد باشد تا عملکرد آب‌بندی را تضمین کند. همچنین اگر نیرو بیش از حد نیاز باشد باعث می‌شود که اعضای اتصال، تحت تنش بیش از حد قرار گرفته و با توجه به اینکه موتورهای نوین بر اساس قدرت بالا و وزن کم طراحی شده‌اند و استحکام لازم جهت اعمال تنش زیاد را ندارند، خراب شوند.

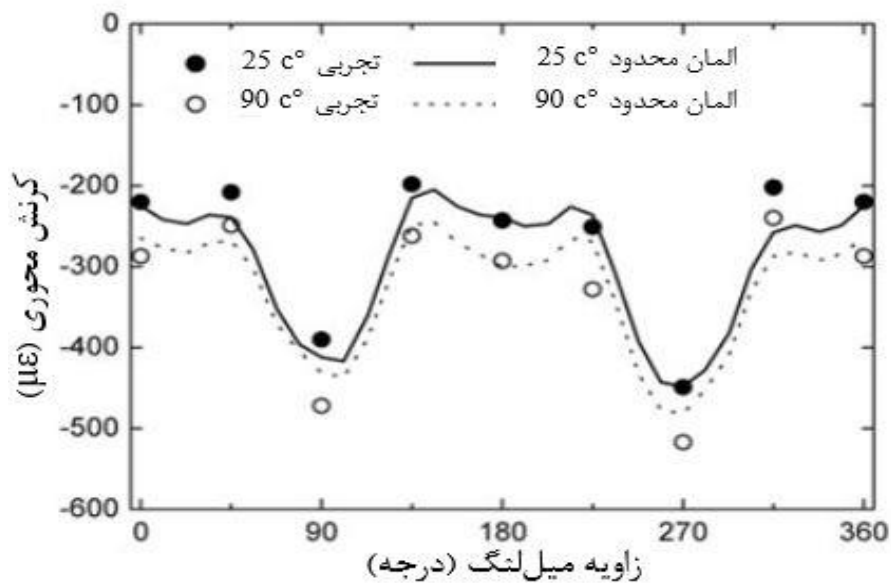


شکل ۱-۱: موقعیت قرارگیری واشر سرسیلندر

واشرهای سرسیلندر فلزی بر اساس نوع استفاده و فشار آب‌بندی، متفاوت هستند. در زمان کارکرد موتور با افزایش فشار سیلندر، نیروی اعمالی به پیچ افزایش یافته و در نتیجه باعث ایجاد تنش به صورت متغیر در واشر می‌شود (شکل ۱-۲). همچنین در بلوک سیلندر بر اساس زاویه‌ی میل‌لنگ، در دماهای مختلف در راستای محوری سیلندر، کرنش ایجاد می‌شود (شکل ۱-۳)، که باعث ایجاد تنش متغیر در مراحل چهارگانه احتراق موتور شده و می‌توان نتیجه گرفت که واشر سرسیلندر، تحت تنش ثابت نیست [۴].



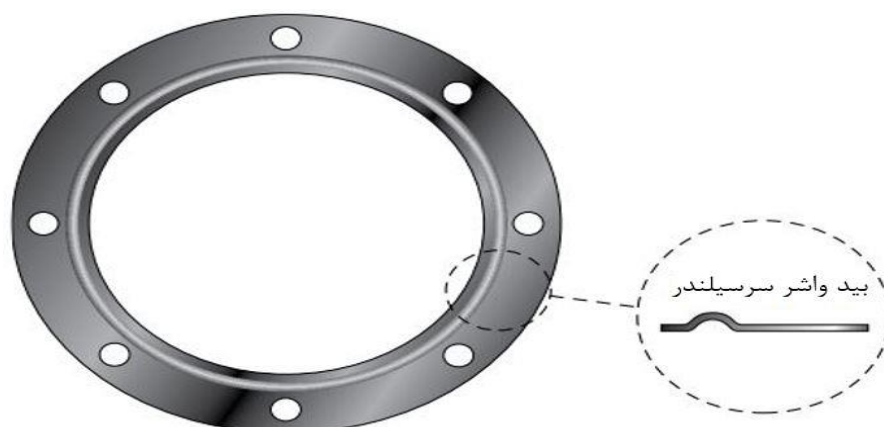
شکل ۱-۲: افزایش نیروی پیچ سرسیلندر متناسب با فشار سیلندر [۴]



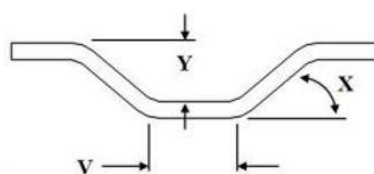
شکل ۱-۳: کرنش محوری بلوک سیلندر در زاویه‌های مختلف میل لنگ [۴]

در هنگام بستن پیچ‌های سرسیلندر، واشر ابتدا تحت یک پیش‌بار قرار می‌گیرد و تغییر شکل مومسان زیادی در آن ایجاد می‌شود. زمانی که موتور کار می‌کند نیروی اعمالی به واشر متغیر خواهد بود و مقدار انرژی کشسان ذخیره‌شده در واشر و به دنبال آن برگشت فنری، فشار تماسی لازم برای آب‌بندی را تأمین می‌کند. طراحی بید^۱ (شکل ۱-۴)، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد واشر دارد و عمل آب‌بندی را انجام می‌دهد. اگر بید به صورت شکل ۱-۵ باشد به آن بید کامل و اگر به صورت شکل ۱-۶ باشد به آن نیم‌بید می‌گویند.

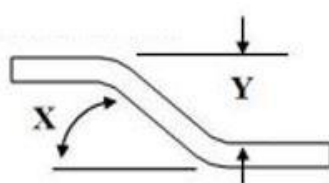
^۱ Bead



شکل ۱-۴: موقعیت بید واشر سرسیلندر



شکل ۱-۵: بید کامل



شکل ۱-۶: نیم‌بید

منحنی مشخصه واشر، رفتار نیرو-جمع‌شدگی واشر، تحت اثر بارگذاری- باربرداری را نشان می‌دهد و از مؤلفه‌های مهم طراحی واشر است. نوع واشر مورد استفاده در موتورهای مختلف بسته به نوع موتور متفاوت است. در موتورهای دیزل، واشر معمولاً یک‌لایه و نسبتاً ضخیم هستند در صورتی که در موتورهای بنزینی، واشرهای یک‌لایه، کامپوزیت و چندلایه استفاده می‌شود. فشار تماسی (فشار اعمالی از سوی سیلندر و سرسیلندر به واشر که موجب آب‌بندی می‌شود) که در واشرهای یک‌لایه و کامپوزیت ایجاد می‌شود، تقریباً برابر است. با توجه به اینکه واشر یک‌لایه تحمل دمای بالا و دوام بالا دارد، استفاده از آن بیشتر است. استفاده از واشر سرسیلندر چندلایه در صنایع خودروسازی به سبب فشار تماسی بالا، زیاد

است. همچنین این نوع واشر پرکاربردترین واشر حال حاضر است [۱]. هر چه فشار تماس بیشتری لازم باشد، باید تعداد لایه‌های واشر افزایش یابد. میزان برگشت فنری واشرهای چندلایه متناسب با تعداد لایه‌ها است، زیرا هر لایه خاصیت فنریت دارد و اگر برگشت فنری کل لایه‌ها باهم جمع شوند، برگشت فنری معادل به دست می‌آید (شکل ۷-۱). بیدهای این‌گونه واشرها را برحسب نحوه قرارگیری لایه‌ها در کنار هم به انواع سری (شکل ۸-۱)، و یا موازی (شکل ۹-۱)، تقسیم می‌شوند [۵].



شکل ۷-۱: فنریت معادل در واشرهای چندلایه



شکل ۸-۱: بید واشر چندلایه از نوع سری



شکل ۹-۱: بید واشر چندلایه از نوع موازی

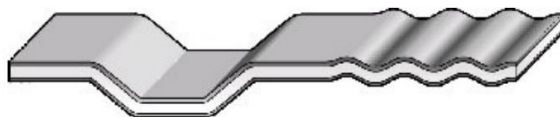
بین لایه‌های مختلف واشر، واسطه‌ای به نام استپر^۱ قرار دارد (شکل ۱۰-۱). استپر از یک نوار از جنس فولاد فنری ساخته شده است که با فرآیند شکل‌دهی در ورق واشر شکل می‌گیرد و یا به صورت جدا ساخته شده و به ورق جوش داده می‌شود. استپر به‌عنوان اولین قسمت آب‌بندی کننده، جابجایی بید را محدود می‌کند. همچنین با انتقال نیروهای نزدیک پیچ‌های سرسیلندر به نواحی دیگر و توزیع آن، به

^۱stopper

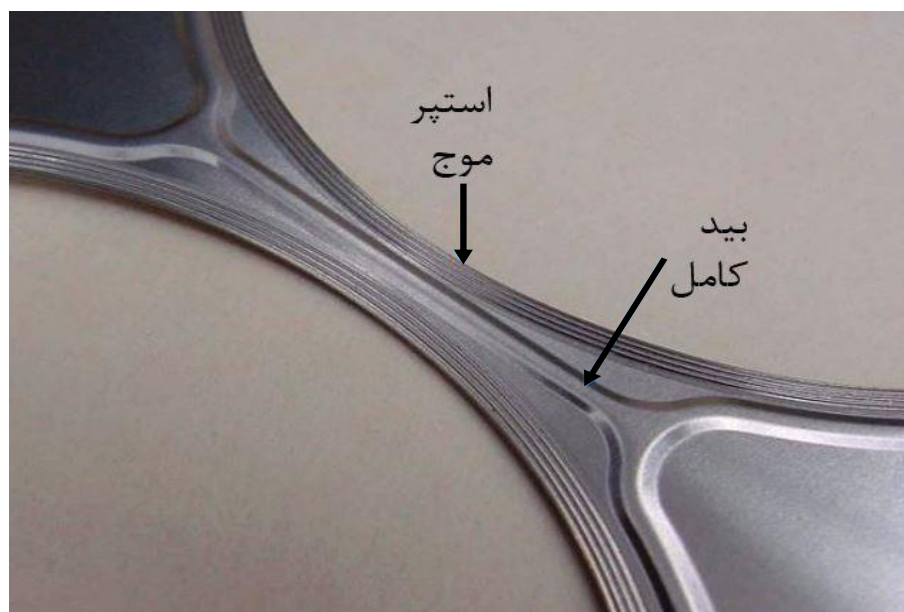
کاهش تغییرشکل موضعی واشر سرسیلندر، کمک می‌کند. بعلاوه تغییرات گپ آب‌بندی ناشی از احتراق موتور با اعمال نیرو بر روی استپر کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۰ نوع دیگری از استپر که شامل قسمتی موج‌دار می‌باشد اختراع شد (شکل ۱-۱۱) و (شکل ۱-۱۲)، که باعث بهبود عملکرد واشر می‌شود. تعداد موج‌ها و شکل موج‌ها که می‌تواند مربعی یا دوزنقه‌ای یا مانند شکل نیم‌دایره باشد به طراحی انجام‌شده بستگی دارد (شکل ۱-۱۳).



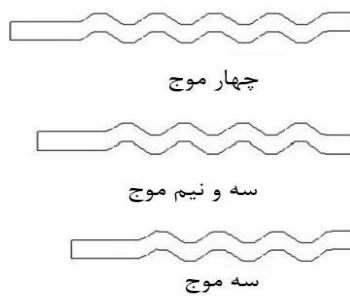
شکل ۱-۱۰: واشر استپر دار



شکل ۱-۱۱: واشر با استپر موج‌دار



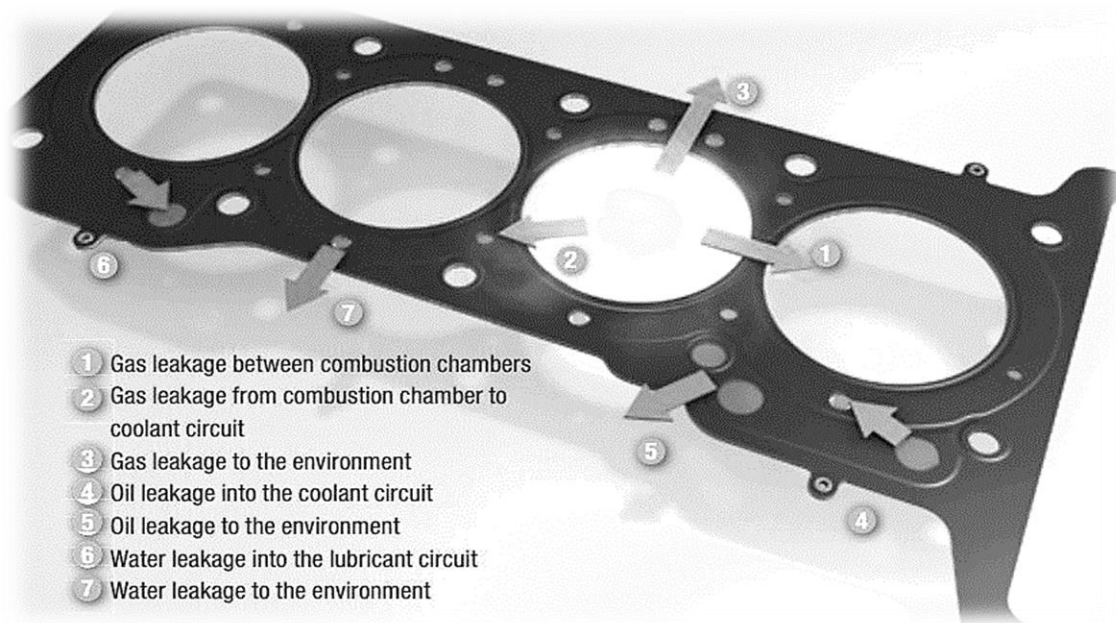
شکل ۱-۱۲: واشر با استپر موج‌دار و بید کامل



شکل ۱-۱۳: تعداد مختلف موج‌های استپر موج‌دار

۱-۳- عملکرد و اثر در شرایط مختلف موتور

- ۱- توزیع فشار آب‌بندی بر روی و اثر به مقدار زیادی به نیروی پیش‌بار پیچ‌ها بستگی دارد که در حقیقت به‌عنوان منبع بیشینه بارگذاری خارجی بر روی سیلندر به حساب می‌آیند.
- ۲- مکان ضعیف‌ترین فشار تماسی در قسمت‌های برجسته و اثر می‌تواند در نتیجه تأثیر تنش و کرنش حرارتی انتقال پیدا کند. نتایج نشان می‌دهد که بار حرارتی و در نتیجه آن تنش‌های حرارتی به وجود آمده تأثیر بسیار مثبتی در بهبود بازده آب‌بندی دارند.
- ۳- از آنجایی که نیروی پیش‌بار بکار رفته در پیچ‌ها، تحت شرایط عملکرد، با نیروی گاز ناشی از احتراق متضاد است، با افزایش فشار گاز امکان فرار گازها وجود دارد. بنابراین یک روش مؤثر برای افزایش ظرفیت آب‌بندی و اثر، افزایش بزرگی نیروی پیش‌بار پیچ‌ها بدون تجاوز از حد تسلیم مواد در هر جزء از ساختار موتور است. در بعضی از نواحی و اثر امکان نشتی وجود دارد (شکل ۱-۱۴).



شکل ۱-۱۴: نواحی واشر که امکان نشتی وجود دارد

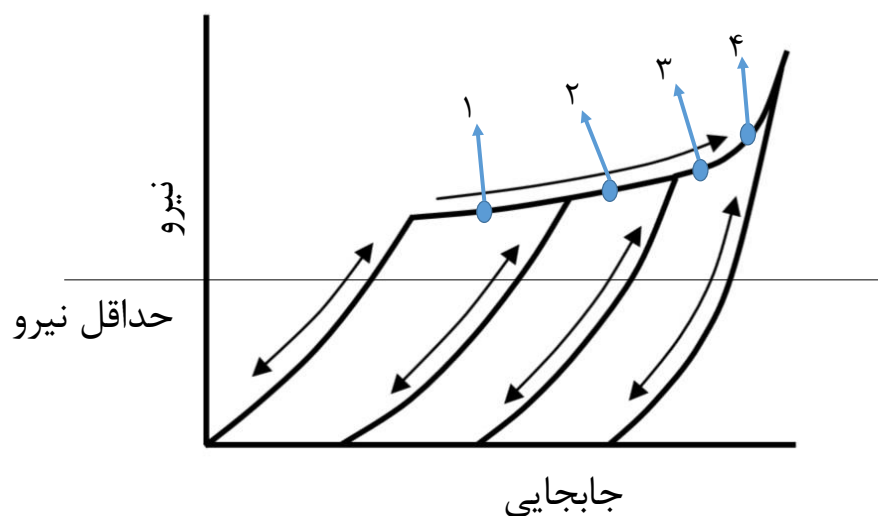
۴- فشار آب‌بندی بر روی واشر در حالت روشن کردن سرد و سرد شدن موتور بعد از شرایط بار حرارتی به کمترین مقدار خود می‌رسد.

۵- در شرایط بارگذاری حرارتی تنش‌های فشاری در ساختار سرسیلندر، واشر و بدنه موتور به دلیل متفاوت بودن ضرایب انبساط حرارتی و بزرگ بودن نرخ انبساط حرارتی سرسیلندر نسبت به قطعات دیگر، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به‌ویژه در کف سرسیلندر، در محل تماس آن با واشر، باید دقت شود مقدار این تنش‌ها فراتر از حد تسلیم آلومینیم بکار رفته در سرسیلندر نباشد، زیرا افزایش مقدار تنش‌ها از حد تسلیم آلومینیم باعث خراب شدن آب‌بندی می‌شود [۶].

۴-۱-۱- منحنی مشخصه واشر

به خاطر هزینه بالای طراحی و ساخت یک واشر سرسیلندر، از ابتدا باید در راستای هدف نهایی که استخراج منحنی مشخصه مطلوب است، طراحی صورت گیرد. اگر بدون شبیه‌سازی و تخمین عملکرد، واشر ساخته شود، ممکن است به نتیجه قابل قبول منجر نشود. با توجه به اینکه رفتار کامل یک واشر یعنی همان منحنی مشخصه (شکل ۱-۱۵)، با رابطه نیرو-جمع‌شدگی نشان داده می‌شود، مسیر

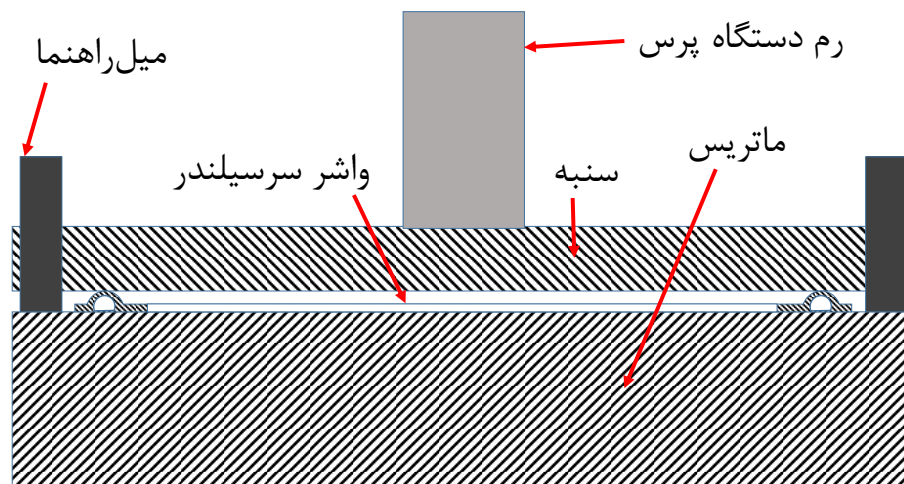
باربرداری بر اساس نقطه‌ای که باربرداری انجام می‌شود متفاوت است. برحسب میزان سفت کردن پیچ-های سر سیلندر، واشر می‌تواند در هر یک از موقعیت‌های مشخص شده قرار بگیرد. در ابتدا واشر در نقطه ۱ یا ۲ و بعد از مدتی کارکرد موتور در نقطه ۳ قرار می‌گیرد. پس از کارکرد زیاد در نقطه ۴ قرار می‌گیرد و برگشت فنری کاهش می‌یابد. در هر صورت جهت کارکرد صحیح باید در یک محدوده که برحسب حداقل نیرو مشخص شده قرار بگیرد تا بتواند وظیفه خود را انجام دهد. به‌طور کلی رفتار واشر در بارگذاری-باربرداری خطی نبوده و از یک واشر به واشر دیگر متفاوت است. جهت کسب اطلاعات از شرایط کاری موتور و تأثیر بر روی قطعات موتور از روش المان محدود استفاده می‌شود که به دلیل حجم بالای محاسبات سعی در ساده‌سازی مدل المان محدود است. بنابراین به‌جای استفاده از مدل واشر در شبیه‌سازی موتور می‌توان از المان واشر استفاده کرد. برای استفاده از المان واشر نیاز به داشتن منحنی مشخصه واشر است.



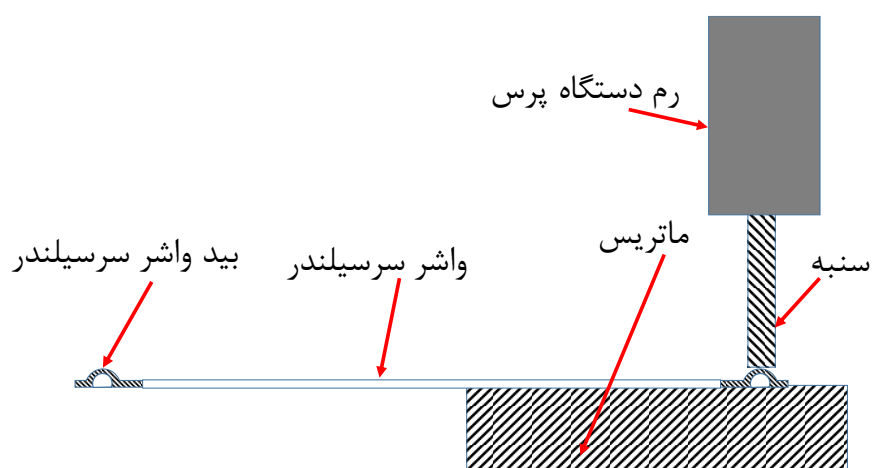
شکل ۱-۱۵- منحنی مشخصه بارگذاری-باربرداری

به روش‌های مختلفی می‌توان منحنی بارگذاری-باربرداری را استخراج کرد که با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از مقالات، روش بارگذاری بر روی کل سطح واشر (شکل ۱-۱۶)، روش اصلی است. روش ابتکاری که بررسی آن در این پایان‌نامه انجام شده است، بارگذاری موضعی (شکل ۱-۱۷)، است. به دلیل

اینکه میزان برگشت فنری در واشر کم است و در حد چند μm است، بارگذاری-باربرداری جهت استخراج منحنی باید به دقت انجام شود تا مقدار انحراف در منحنی کم باشد.



شکل ۱-۱۶: شماتیک بارگذاری کلی



شکل ۱-۱۷: شماتیک بارگذاری موضعی

۵-۱-۵-۱ کاربردهای بارگذاری کلی و موضعی

۱-۵-۱-۱ بارگذاری کلی

جهت اعمال نیرو به کل واشر استفاده می‌شود.

۱-۱-۵-۱-۱ مزایا

امکان محاسبه نیرو و جمع‌شدگی به صورت دقیق وجود دارد.

۱-۵-۱-۲- معایب

- ۱- جهت استخراج منحنی واشرهایی با چند بید باید قسمت بیددار را از بقیه قسمت‌های واشر جدا کرد و به صورت مجزا آزمایش کرد که هزینه‌بر است.
- ۲- معمولاً استفاده از آن به دلیل اینکه تجهیزات موردنیاز برای هر نوع واشر متفاوت است، زیاد نیست.
- ۳- نیاز به پرس‌هایی که بتواند نیروی زیادی اعمال کند.

۱-۵-۲- بارگذاری موضعی

۱-۵-۲-۱- مزایا

- ۱- با توجه به عدم تختی کامل واشر در اطراف بید، تأثیر آن در بررسی بید از بین می‌رود.
- ۲- به دلیل اینکه در بعضی از واشرها مانند واشر سرسیلندر خودرو چند شکل بید وجود دارد، از بارگذاری کلی نمی‌توان استفاده کرد و یا اینکه باید قالب مخصوص شکل آن واشر طراحی گردد.
- ۳- با توجه به اینکه جهت بارگذاری کلی نیاز به اعمال نیروی زیادی است، هزینه زیاد می‌شود.
- ۴- می‌توان نقاط مختلف از بید یک واشر یا چند واشر با بید مشابه را باهم مقایسه کرد.

۱-۵-۲-۲- معایب

- ۱- به دلیل اینکه ممکن است واشر کج قرار بگیرد و مقدار نیرو و جمع‌شدگی اشتباه محاسبه شود، دقت آن کم است.
- ۲- نداشتن خروجی به ازای کل واشر

۱-۶- مروری بر تحقیق‌های پیشین

در راستای بررسی واشر سرسیلندر تحقیق‌های زیادی از سوی برخی اشخاص انجام شده است که به‌طور خلاصه به آن‌ها پرداخته می‌شود. جف اسکات و همکاران [۵] با نرم‌افزار المان محدود آباکوس موفق به دستیابی منحنی مشخصه با المان‌های مختلف به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی شدند و برای شرایط کارکردی مختلف توزیع فشار وارده به بید را بررسی کردند، ولی به دلیل عدم وجود راه‌های عملی برای تأیید نتایج، و عدم در نظر گرفتن تنش پسماند حاصل از شکل‌دهی واشر، دقت موردنظر نداشته و قابلیت اطمینان آن به‌جز برای شرایط کارکردی سرد که تأیید نتایج با استفاده از کاغذ فوجی است امکان ندارد. پاون جورویکر و همکاران [۷] موفق به دستیابی به فشار تماس در سطح واشر سرسیلندر ناشی از پیش‌تنش پیچ‌های سرسیلندر کمپرسور با نرم‌افزار المان محدود انسیس شدند و شبیه‌سازی را با استفاده از المان‌های سه‌بعدی با ۱۶ گره انجام و نتایج با روش کاغذ فوجی تأیید شد. کاغذ فوجی به یک‌لایه پلی‌استر گویند که شامل میکروکپسول است و با ترکیدن آن‌ها میزان فشار وارده تعیین می‌شود.

فرانک پوپیللاس و همکاران [۸] موفق به بهینه‌سازی استپر موج (قسمتی از واشر سرسیلندر چندلایه) واشر سرسیلندر چندلایه با استفاده از تحلیل در نرم‌افزار آباکوس شدند. پس از اختراع استپر موج، روش‌های المان محدود استفاده و باعث انعکاس ویژگی‌های جدیدی از آن شد. استپر موج نقش مهمی را در آب‌بندی موتورهای احتراق داخلی مدرن بازی می‌کند. آن‌ها پس از شبیه‌سازی امکان بهینه‌سازی متغیرهای آن را به دست آوردند و گپ بین سیلندر و سرسیلندر را تحت سیکل‌های مختلف موتور به دست آوردند. روش آن‌ها دارای دقت کمی بدون تأیید عملی است ولی برای کاهش زمان طراحی مفید است.

فرانک پوپیللاس و همکاران [۹] موفق به طراحی واشر سرسیلندر با استفاده از آباکوس جهت آنالیز مشخصات و طول عمر و کارایی محصولات آب‌بندی شدند. آن‌ها متغیرهای تأثیرگذار اصلی را بر مبنای تحلیل خود به دست آوردند. کازویا اوشیجیما و همکاران [۱۰] منحنی بارگذاری یک واشر با بید دوتایی

را از روش تجربی راست آزمایی کردند. آن‌ها یک واشر را پس‌ازاینکه با آزمون کشش، مشخصات مواد واشر مشخص شد، شبیه‌سازی را با نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام دادند و برای تأیید نتایج از بارگذاری عملی استفاده کردند که نتایج به دلیل شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن تنش‌های پسماند شباهت کمی به یکدیگر داشتند. آن‌ها همچنین تنها موفق به استخراج منحنی بارگذاری شدند.

موج آگوس چوپرون و همکاران [۱۱] با فرض اینکه فشار تماس باعث افزایش عرض تماس بید می‌شود، بهینه‌سازی فشار تماس را بر مبنای آن انجام دادند. آن‌ها یک مدل خاص از واشر که دارای شکل هندسی با جزئیات لازم است را انتخاب کرده و ۹ متغیر هندسی از آن را به ۳ حالت مختلف تغییر دادند و بر اساس آن هندسه‌های مختلفی که واشر می‌تواند داشته باشد ایجاد شد و با نرم‌افزار المان محدود MSC Marc تحلیل المان محدود انجام و با در نظر گرفتن فشار بالای 400 MPa که تماس برقرار شده است، عرض تماس برای هر یک استخراج و با روش طراحی آزمایش تاگوچی مقدار بهینه متغیرها مشخص شد.

موج آگوس چوپرون و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و آزمایشگاهی یک نوع خاص از واشر فلزی پرداختند. آن‌ها در ابتدا واشر را بین دو فلانچ که یکی از آن‌ها در مرکز دارای سوراخ است و لوله حسگر گاز به آن متصل است، قرار داده و پیچ‌های فلانچ را محکم کردند. سپس با قرار دادن مجموعه در اتاقک گاز هلیوم تحت فشار، میزان گاز وارد شده به ناحیه مرکزی واشر را بررسی و بر اساس آن نشتی گاز را تعیین کردند. همچنین به دلیل اینکه اصطکاک در طول سفت کردن پیچ‌های فلانچ تغییر می‌کند به دست آوردن نیروی اعمالی به واشر از طریق استفاده از تورک‌متر دقت لازم را ندارد، بنابراین با استفاده از کرنش‌سنج بر روی پیچ‌های فلانچ میزان نیروی معادل با هر فشار تعیین و بر اساس آن نیرویی که در آن نشتی وجود ندارد، مشخص شده است. با استفاده از کاغذ فوجی در بالا و پایین واشر قرار گرفته در فلانچ، میزان عرض تماس در هر نیرو مشخص شده است و تطبیق نتیجه آن با روش المان محدود با نرم‌افزار MSC Marc انجام شده است.

قاسمی و همکاران [۶] به بررسی اثر متقابل سیلندر و واشر سرسیلندر و سرسیلندر پرداختند. او بررسی آببندی و تنش‌های موجود بین سیلندر و سرسیلندر و واشر در شرایط همبندی سرد و گرم و روشن کردن سرد و احتراق و غیره را انجام داد. همچنین نتایج عددی را با آزمون حرارتی و کاغذ فوجی تأیید کرد. بر اساس آن توزیع فشار آببندی بر روی واشر سرسیلندر به‌طور گسترده‌ای وابسته به نیروی پیش‌بار پیچ‌ها است. بعلاوه مکان ضعیف‌ترین فشار تماسی بر روی واشر در نتیجه بار حرارتی تغییر می‌کند.

چانگ چانگ لی و همکاران [۱۳] فشار تماس بر روی واشر و تنش بر روی سرسیلندر را در شرایط مختلف از قبیل مونتاژ گرم و سرد و شروع سرد و احتراق را به روش المان محدود بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده تأثیر زیاد نیروی پیش‌تنش پیچ‌ها بدون در نظر گرفتن تنش حرارتی، بر روی آببندی است. همچنین موقعیت بیشینه فشار تماس بر روی واشر به دلیل تنش حرارتی تغییر می‌کند. شایان‌ذکر است که به کارکرد موتور در حالت ایستا و تنها تحت تأثیر نیروی پیش‌تنش، مونتاژ سرد و در صورتی که تحت فشار سیلندر و نیروی پیش‌تنش باشد، شروع سرد و در صورتی که تحت نیروی پیش‌تنش پیچ و تنش حرارتی باشد، مونتاژ گرم و اگر تحت شرایط نیروی پیش‌تنش پیچ و فشار سیلندر و تنش حرارتی باشد، به آن شرایط احتراقی گویند.

آیرون اسوازا و همکاران [۱۴] با استفاده از یک تسمه و دو کرنش‌سنج، چسبیده به دو طرف آن و اتصال تسمه به کنار لاینر سیلندر، میزان کرنش عرضی واشر سرسیلندر ناشی از کارکرد موتور را اندازه گرفتند. آن‌ها همچنین با ایجاد مدل المان محدود از دو واشر مختلف کامیون و بررسی میزان نیروی اعمالی به آن‌ها هنگام کارکرد موتور، دوام آن‌ها را بررسی کردند.

سریکانس و همکاران [۱۵] به بررسی یک واشر از چهار نوع جنس متفاوت با نرم‌افزار المان محدود انسیس پرداختند. چهار نوع جنس، استیل، فیبر کربنی، سرامیک و کولار بودند. آن‌ها به بررسی تنش

برشی و میزان جابجایی و شار حرارتی پرداختی و بر اساس نتایج آن‌ها، فیبر کربنی دارای کمترین مقدار در هر سه مورد بررسی شده، در بین چهار نوع جنس واشر است. شگیوکی هارویاما و همکاران [۱۶] به بررسی تفاوت در عرض تماس بید و فشار تماسی در دو زبری سطح Ra ۳/۵ و Ra ۲/۵ در سطوح سیلندر و سرسیلندر پرداختند. بر مبنای نتایج آن‌ها فشار تماسی در دو زبری سطح یکسان ولی عرض تماس در زبری سطح ۲/۵ از ۳/۵ بیشتر است. همچنین نیرو بر واحد طول بید در بالا و پایین واشر برابر است.

هاسگاوا و همکاران [۱۷] از یک ورق مسی برای تشخیص نیرو استفاده کردند. ورق مسی در حمام آبکاری در یک شرایط خاص روکش و به دلیل روکش بر روی سطح آن ناصافی‌های سطحی ایجاد شده است. نیروی اعمال شده به سطح ورق متناظر با شفافیت ورق است. بر این اساس ورق نمونه را در یک دستگاه که مساحت اعمال نیرو و نیروی اعمال شده قابل تشخیص است قرار داده و فشار وارده در هر شفافیت مشخص شد. با توجه به اینکه پس از اعمال نیرو ذرات برجسته فشرده می‌شوند و رنگ سفید پیدا می‌کنند و زمینه دارای رنگ سیاه است، پس با استفاده از پردازش تصویر، و مقایسه میزان شفافیت ورق، تعیین فشار وارده به ورق میسر می‌شود.

مسزاک و همکاران [۱۸] با استفاده از قرص‌های ساخته شده از سرب و قرار دادن آن‌ها در نقاطی از واشر که از قبل سوراخ شده بودند، میزان تغییر ضخامت را مشخص کردند. بر اساس اینکه تعداد زیادی قرص برای یک آزمایش کامل نیاز است، به ازای هر بار که نیروی اعمالی بیشتر می‌شود، ضخامت قرص کاهش و بر اساس آن منحنی نیرو بر حسب ضخامت قرص، که می‌توان آن را منحنی نیرو-جمع‌شوندگی واشر دانست، به دست می‌آید. همچنین آن‌ها به بررسی فشار تماس وارده با استفاده از نوع دیگری از کاغذ فوجی موسوم به کربنی پرداخته‌اند.

جان اوکانو و همکاران [۱۹] به بررسی تأثیر نوع دیگر استپر نسبت به مدل قدیمی پرداختند. بر این اساس آن‌ها محفظه‌ای که واشر در آن قرار می‌گیرد و تحت فشار گاز نیتروژن است را بررسی کردند و

میزان آب‌بندی را بر اساس آن مشاهده کردند. همچنین دو واشر متفاوت که یکی تنها دارای روکش لاستیک و یکی دیگر دارای روکش الاستیک بر روی لاستیک هست را با قرار دادن در یک مکانیسم مشابه سیلندر و سرسیلندر و قرار دادن آن در سیال با دمای 150°C و به مدت ۷۰ ساعت آزمایش نفوذ کردند. یعنی پس از قرار گرفتن در این شرایط واشر را با استفاده از دستگاه سختی سنج از لحاظ سخت شدن روکش بررسی کردند. دلیل این آزمایش بررسی تأثیر لایه‌ای شدن روکش بر آب‌بندی است. آن‌ها همچنین با توجه به اینکه در زمان کارکرد موتور، سرسیلندر نسبت به سیلندر تا حدودی دارای حرکت است و باعث لایه‌ای شدن سطح واشر می‌شود، حرکت نسبی آن‌ها را در یک آزمایش شوک حرارتی بررسی کردند. آن‌ها همچنین جهت بررسی فشار ایجادشده بر روی واشر با استپر جدید و قدیمی، از کاغذ فوجی بهره بردند و با روش المان محدود تفاوت تنش آن‌ها را بررسی کردند.

هیروتاکا و همکاران [۲۰] به بررسی انواع مختلف واشر سرسیلندر و همچنین به بررسی اینکه چطور نیازهای آینده و تولیدکنندگان را رفع می‌کنند پرداخته‌اند. یوکیو کاوایی و همکاران [۲۱] به بررسی یک واشر که شامل دولایه ورق بیدار و یک ورق واسطه بین آن‌ها است نسبت به مدل قدیمی واشر سرسیلندر پرداخته‌اند. به منظور ارزیابی مقاومت شکست خستگی، کرنش کششی را به روش المان محدود بررسی و دو شرایط بسته‌شده سیلندر و شرایط احتراق بررسی، که در زمان بسته شدن، تفاوتی بین واشرها وجود ندارد ولی در زمان احتراق کرنش در واشر جدید حدود یک سوم است. برای تأیید نتایج از یک اتاقک آزمون فشار که واشر را با ۱۰۷ سیکل به صورت دینامیکی می‌فشارد، استفاده شد. بر اساس آن واشر جدید تا فشار $9/5\text{ MPa}$ به خستگی نمی‌رسد ولی واشر قدیمی در فشار 7 MPa دچار شکست خستگی می‌شود. جوزف سانتنر و همکاران [۲۲] به بررسی یک قانون جریان برای واشر سرسیلندر پرداختند.

شنجی فوکاسه و همکاران [۲۳] با قرار دادن چهار کرنش‌سنج در چهارسوی دیواره لاینر سیلندر، میزان کرنش را برحسب فشار به دست آوردند. آن‌ها جهت تأیید نتایج از روش المان محدود استفاده کردند.

مارک موزر و همکاران [۲۴] یک دستگاه آزمایش نشتی هوا ساخته و موفق به استخراج منحنی فشار برحسب نرخ نشتی شدند.

انجلیکینگ و همکاران [۲۵] یک فیکسچر که مکانیسم اعمال نیرو با پیچ و خوانش جابجایی با ساعت اندازه‌گیری است، ساخته و با آن منحنی نیرو-جابجایی استخراج کردند. به دلیل مکانیسم استفاده‌شده منحنی قسمت باربرداری ندارد. ایشیگاکي و همکاران [۲۶] به بررسی نیروهای اعمالی به واشر پرداختند.

بالدسرا و همکاران [۲۷] با استفاده از یک دستگاه پرس و یک مکانیسم که امکان خوانش جابجایی با ساعت اندازه‌گیری دارد، موفق به استخراج منحنی بارگذاری-باربرداری واشر چندراهه دود شدند. آیزاوا و همکاران [۲۸] با ارائه چند ساختار از واشر سرسیلندر، ساختار بهینه را بر مبنای کمترین حرکت واشر بین سرسیلندر و سیلندر و کمترین نوسان فشار تماس بر روی واشر سرسیلندر پایه‌ریزی کردند. هتاگر و همکاران [۲۹] نشتی واشر را با قرار دادن مکانیسمی بر روی دستگاه پرس که امکان بررسی نشتی گاز از واشر سرسیلندر وجود دارد، نشتی گاز را در حین اعمال نیرو بررسی کردند.

یاتیس و همکاران [۳۰] بر مبنای اینکه بر روی سطح سیلندر و سرسیلندر غیریکنواختی وجود دارد، میزان فشار در نواحی مختلف را بین سیلندر و سرسیلندر با استفاده از یک نوع کاغذ مخصوص آغشته به مواد مخصوص مشخص کردند. کانیدا و همکاران [۳۱] موفق به دستیابی به منحنی بیشینه کرنش نسبت به فاصله از لبه داخلی واشر سرسیلندر از روش المان محدود و تائید نتایج با استفاده از یک کرنش‌سنج بر روی لایه داخلی از واشر سرسیلندر چندلایه شدند.

موکنه‌پت و شرکت ویکتور رنیز [۳۲] یک برنامه یک‌بعدی برای طراحی واشر سرسیلندر ارائه کردند. برنامه آن‌ها از یک مدل ساده‌شده المان محدود از اتصال واشر سرسیلندر استفاده می‌کند. مدل از یک فنریت معادل و متغیرهای موتور و اجزا واشر استفاده می‌کند. با تغییر متغیرهای واشر، منحنی بارگذاری-باربرداری می‌تواند تغییر کند و به صورتی سریع واشر با طراحی بهینه ساخته شود. ورودی برنامه نیروی

سفت کردن پیچ‌های سرسیلندر، تعداد سیلندرها، سفتی موتور است. مورک و همکاران [۳۳] یک مدل ویسکوالاستیک برای واشر سرسیلندر ارائه کردند.

کسلر و همکاران [۳۴] به بررسی تنش‌های حرارتی در واشر سرسیلندر غیرفلزی پرداختند و با استفاده از گرم‌کننده و حس‌گر ترموکوپل و اعمال نیرو به واشر به وسیله دستگاه پرس، حین گرم شدن، منحنی تنش حرارتی را برحسب دما به دست آوردند. سانترا و همکاران [۳۵] به بررسی المان محدود واشر سرسیلندر در دو مرحله پرداختند. در مرحله اول نیروی پیش‌تنش اعمال می‌شود و در مرحله دوم تحت بارگذاری حرارتی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده با استفاده از کاغذ فوجی تأیید شده است. از مدل المان محدود بررسی شده می‌توان برای پیش‌بینی عملکرد واشر تحت شرایط کاری موتور که کاغذ فوجی امکان استفاده در آن شرایط را ندارد استفاده کرد. میچل کستلی و همکاران [۳۶] به بررسی فشار سیلندر با استفاده از کرنش‌سنج بر روی لایه میانی واشر سرسیلندر پرداختند. آن‌ها سه واشر که دارای ضخامت زیاد است را انتخاب کردند و کرنش‌سنج را به صورت شعاعی بر روی لایه داخلی قسمت سوراخ دار واشر که متناظر با سوراخ سیلندر است قرار دادند. به دلیل اعمال فشار ناشی از احتراق به واشر، شکل کرنش‌سنج تغییر پیدا می‌کند و با روابط محاسباتی میزان فشار و تغییرات آن در شرایط کاری موتور مشخص می‌شود.

هبرت و همکاران [۳۷] برای آنالیز المان محدود واشر سرسیلندر از یک روش جدید استفاده کردند. برای تعریف متحد مواد به صورت غیرخطی و ناهمسانگرد آن‌ها از کدنویسی در آباکوس استفاده کردند که امکان تعریف مشخصه‌های بارگذاری و باربرداری به صورت مستقل وجود دارد. روش جدید همچنین سرعت همگرایی بیشتری دارد. راثوب و همکاران [۳۸] برای بررسی واشر سرسیلندر موتور دیزل، سیلندر و سرسیلندر و لاینر سیلندر و واشر را به صورت جدا مدل کرده و با بررسی مدل المان محدود مونتاژ شده از آن‌ها، علاوه بر امکان بررسی منحنی نیرو-جابجایی واشر، امکان پیش‌بینی تغییرات رفتاری متغیرهای واشر برای اصلاح عملکرد آن وجود دارد.

با توجه به فناوری پایین سازندگان خودرو در داخل کشور و نیاز به تحقیق و توسعه در این زمینه ضرورت بررسی و ارائه روش‌هایی برای آزمون واشر سرسیلندر و صحه‌گذاری آن وجود دارد.

۷-۱- اهداف و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

با توجه به اینکه متغیرهای زیادی در طراحی واشر سرسیلندر دخالت دارند و بررسی کامل نیازمند صرف هزینه و زمان زیاد است با ارائه فرضیاتی از بررسی آن‌ها صرف‌نظر شده است.

۸-۱- فرض‌ها

۱- نیروی اعمالی از طرف سرسیلندر به‌صورت یکنواخت روی واشر توزیع می‌شود.

۲- تفاوت نیروی اعمالی از پیچ‌های سرسیلندر حین کارکرد نادیده گرفته می‌شود.

۳- ماده واشر سرسیلندر همسانگرد است.

۴- گرادیان دما وجود ندارد و اثر افزایش دما بر عملکرد واشر قابل چشم‌پوشی است.

در این پایان‌نامه در ابتدا با شبیه‌سازی به‌صورت ساده‌شده از فرآیند شکل‌دهی و بارگذاری-باربرداری با حل‌گر صریح نرم‌افزار المان محدود آباکوس اطلاعات لازم جهت آزمایش تجربی بارگذاری کلی به‌دست‌آمده است و سپس با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از آن آزمایش عملی بارگذاری کلی انجام شده است. پس از آن جهت مطالعه موضعی واشر سرسیلندر دستگاه بارگذاری-باربرداری موضعی طراحی و ساخته شده است و نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود بارگذاری-باربرداری به‌صورت موضعی مقایسه شده است. جهت بررسی تأثیر روکش و جنس واشر بر روی منحنی مشخصه، پنج واشر مختلف با بید مشابه بررسی شدند. جهت حصول متغیرهای بهینه واشر سرسیلندر، با تغییر در شکل بید و ضخامت ورق، منحنی مشخصه استخراج و باهم مقایسه شده است. درنهایت با استفاده از کاغذ فوجی تائید نسبی نتایج انجام‌شده است.

۹-۱- اهداف این پایان نامه

- ۱- مقایسه واشرها
- ۲- مدل سازی واشرها
- ۳- به دست آوردن رفتار واقعی آنها
- ۴- استخراج منحنی مشخصه
- ۵- کالیبراسیون نتایج عددی با تجربی
- ۶- ساخت دستگاه عمومی آزمون بید واشر سر سیلندر
- ۷- بررسی تأثیر روکش در عملکرد واشر
- ۸- استخراج منحنی فشار تماس واشر
- ۹- بهینه سازی واشر
- ۱۰- بررسی تفاوت در منحنی مشخصه استخراج شده

۱۰-۱- نوآوری ها

- ۱- با استخراج منحنی مشخصه از روش تجربی و استفاده از آن در المان واشر از محاسبات سنگین جهت بررسی مدل المان محدود واشر جلوگیری می شود.
- ۲- با روش عددی و بدون سعی و خطا به نتیجه بهینه رسیدن
- ۳- کمک به تولید صنعتی داخل کشور
- ۴- ساخت دستگاه بارگذاری-باربرداری موضعی و آزمایش با آن
- ۵- امکان مقایسه چند واشر با یکدیگر

۶- بررسی تغییرات ضخامتی بید و اشتر در چند نقطه متفاوت از آن

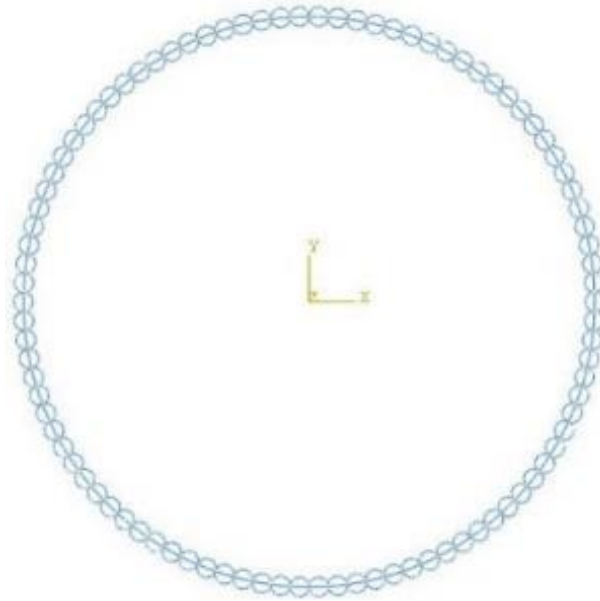
پایان نامه حاضر شامل ۵ فصل است. در فصل اول، مقدمه و تعاریف و کاربردها و تاریخچه و اهداف و فصل های پایان نامه است. فصل دوم مربوط به مشخصات دستگاه بارگذاری موضعی و چگونگی طراحی و ساخت دستگاه و اجرای آزمایش است. همچنین با بررسی چند اشتر مختلف در بارگذاری نقطه ای و بارگذاری-باربرداری در نقاط مختلف اشرها تأثیر ویژگی های اشرها بر روی منحنی مشخصه به صورت آزمایش عملی نشان داده شده است. در ادامه آزمایش کاغذ فوجی بررسی شده است. همچنین محاسبه نیروی اعمالی به پیچ با استفاده از حسگر اولتراسونیک و گشتاورسنج انجام شده است. فصل سوم مربوط به شبیه سازی المان محدود بارگذاری-باربرداری کلی و جهت امکان مقایسه شبیه سازی بارگذاری-باربرداری سه بعدی است. همچنین شبیه سازی المان محدود بارگذاری موضعی انجام شده است. در ادامه با تغییر در شکل بید به سه شکل مختلف و همچنین به سه ضخامت مختلف با بررسی المان محدود تأثیر آنها بر منحنی مشخصه نشان داده شده است. فصل چهارم نتایج پایان نامه و در نهایت در فصل پنجم، نتیجه گیری و پیشنهادهایی برای ادامه ی کار ارائه شده است.

فصل ۲ آزمایش‌های

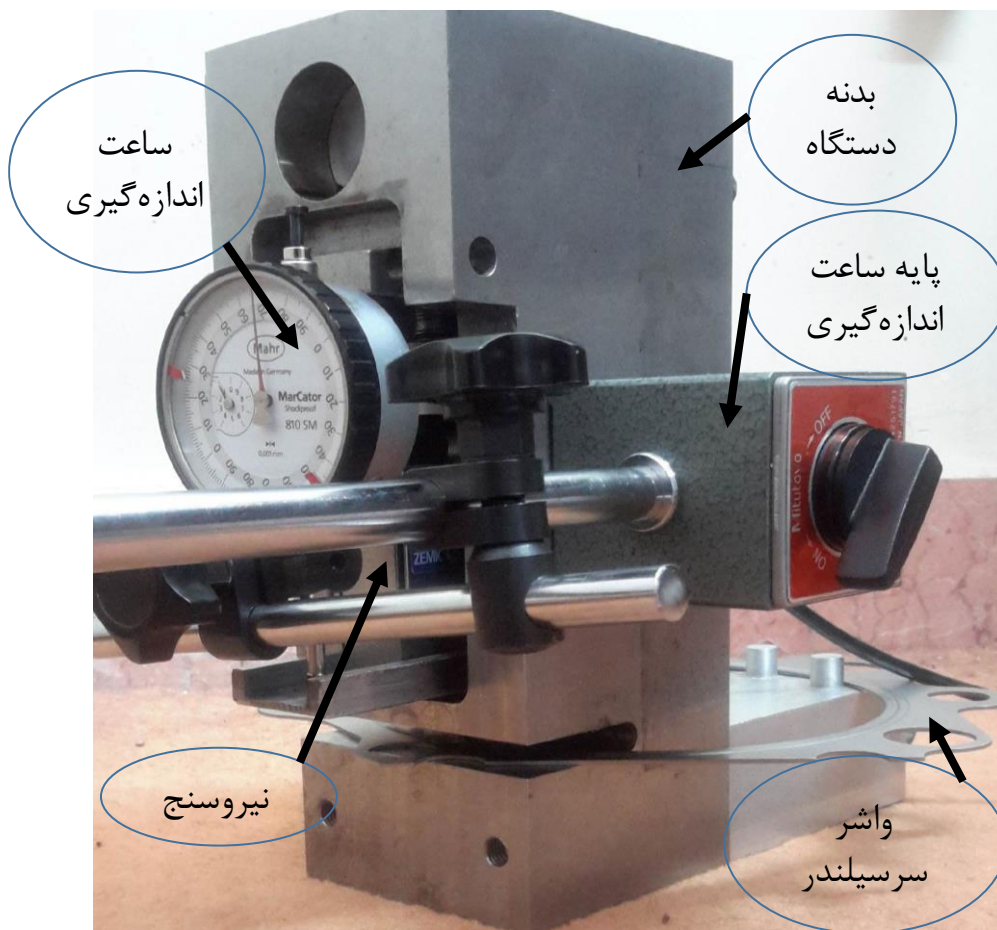
تجربی

۱-۲- دستگاه آزمایش بارگذاری موضعی

برای بارگذاری موضعی واشر سرسیلندر نیاز به ساخت دستگاهی جهت آزمایش است. از آنجایی که میزان تغییر ارتفاع بید پس از بارگذاری حداکثر ۱ mm است، اگر جهت بارگذاری از یک مکانیسم اعمال نیروی مستقیم، مثلاً یک پیچ استفاده شود باید از یک پیچ با گام کوچک استفاده شود تا بارگذاری به صورت یکنواخت انجام شود و نیروی ناگهانی اعمال نشود، ولی به دلیل اینکه نیروی اعمالی حدود ۲۵۰kg است، پیچ با گام کوچک ظرفیت تحمل چنین باری نداشته و بنابراین طراحی بر اساس اعمال نیروی غیرمستقیم انجام شده است. دستگاه باید قادر به اندازه‌گیری جابجایی با دقت 0.001 mm باشد، نیاز است تا خیز دستگاه از آن کمتر باشد که علاوه بر محاسبه با روابط تحلیل خیز، از روش المان محدود استفاده شده است. در ابتدای طراحی با استفاده از داده‌های استعلامی از شرکت سازنده در مورد نیروی نیروی اعمالی به واشر سرسیلندر که حدود ۲۵ ton محاسبه شده است و بر اساس اینکه می‌توان در محیط بید واشر سرسیلندر تعداد ۹۴ عدد از قطر پراب جاسازی کرد (شکل ۱-۲)، نیروسنج موردنیاز حدود ۲۵۰kg تخمین زده شد. البته بعد از آزمایش مشخص شد که نیرو بیشتر بوده است، زیرا میزان فشردگی بید واشر بر اساس این نیرو، خیلی نیست، ولی ساخت دستگاه (شکل ۲-۲)، بزرگ‌تر نیازمند صرف هزینه زیاد است. به دلیل اینکه تعداد گام‌های بارگذاری باید به حدی باشد که غیرخطی بودن نمودار حفظ شود، نمی‌توان از روشی که بارگذاری را با سرعت و گام زیاد انجام می‌دهد استفاده کرد.



شکل ۱-۲: جانمایی قطر پراب بر روی محیط بید واشر سرسیلندر



شکل ۲-۲: دستگاه آزمایش بارگذاری موضعی

۲-۱-۱- نیروسنج

نیروسنج بکار رفته در این دستگاه از مارک ZEMIC (شکل ۲-۳) است که بیشترین نیرویی که می‌توان به آن اعمال کرد ۲۵۰ kg است و برای استفاده باید کالیبره شود. رزوه بالا و پایین آن M12*1.75 است که باید قطعات دیگر متناسب با آن طراحی شود. از آنجایی که ماکزیمم وزن قابل‌اعمال ۲۵۰ kg است، برای اینکه نیروسنج از کالیبره خارج نشود و آسیب نبیند، حدود ۲۳۰ kg بیشتر به آن نیرو وارد نشد. روش کار این مدل نیروسنج مشابه کرنش‌سنج است که برای خوانش مقدار نیرو از رابطه‌های مشابه استفاده می‌شود.



شکل ۲-۳: نیروسنج ۲۵۰ kg

۲-۱-۲- کالیبراسیون و خوانش نیروسنج

نیروسنج در صورت سالم بودن، به ازای هر ورودی، خروجی را به صورت خطی تغییر می‌دهد، که بر اساس آن می‌توان با استفاده از یک وزنه مبنا که مقدار مشخصی دارد، ولتاژ خروجی را اندازه گرفت و بر اساس اینکه تغییرات خطی است وزن‌های دیگر را به دست آورد. در راستای کالیبره کردن نیروسنج از یک وزنه به وزن 50 kg که تمامی متعلقات وابسته به پایین نیروسنج را محسوب می‌شود استفاده شد و مقدار ولتاژ خروجی حدود $2/6\text{ mV}$ شد. با توجه به این که نیروسنج در حالت کششی و فشاری عکس‌العمل یکسانی دارد، تفاوتی در راستای اعمال نیرو ندارد. با توجه به اینکه در حالت بی‌باری ولتاژی حدود $0/1\text{ mV}$ را نشان می‌دهد، می‌توان رابطه خطی موردنیاز را محاسبه کرد (جدول ۱-۲). با توجه به رابطه ۱-۲ تغییرات ولتاژ و با استفاده از رابطه ۲-۲ نیروی نیروسنج محاسبه می‌شود.

$$\Delta V = 2.6 - 0.1 = 2.5 \quad \text{mV} \quad 1-2$$

$$F = ((50 * 9.81) (\Delta V - 0.1)) \div 2.5 \quad \text{N} \quad 2-2$$

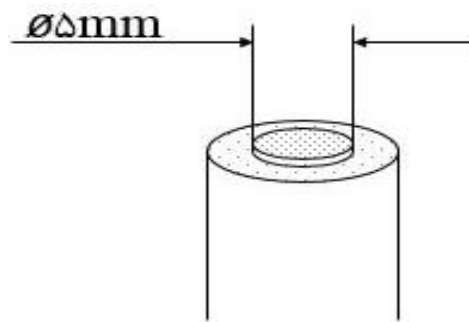
جدول ۱-۲: تغییرات ولتاژ بر حسب وزن

حالت اعمال بار	حالت بی‌بار	واحد	
۵۰	۰	kg	وزن اعمالی
۲/۶	۰/۱	mV	ولتاژ پل

در هنگام بارگذاری، مقدار تغییرات ولتاژ با استفاده از ولت‌متر خوانده می‌شود و با این رابطه نیرو بر حسب نیوتن محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه احتمال خطای کالیبراسیون وجود دارد آزمایش کالیبراسیون چند بار انجام و پس از اطمینان از صحت نتایج از آن استفاده می‌شود. همچنین دقت ولت‌متر استفاده شده $0/1\text{ mV}$ است که بر اساس آن دقت خوانش نیرو حدود 20 N خواهد بود.

۲-۱-۳- پراب نیرو

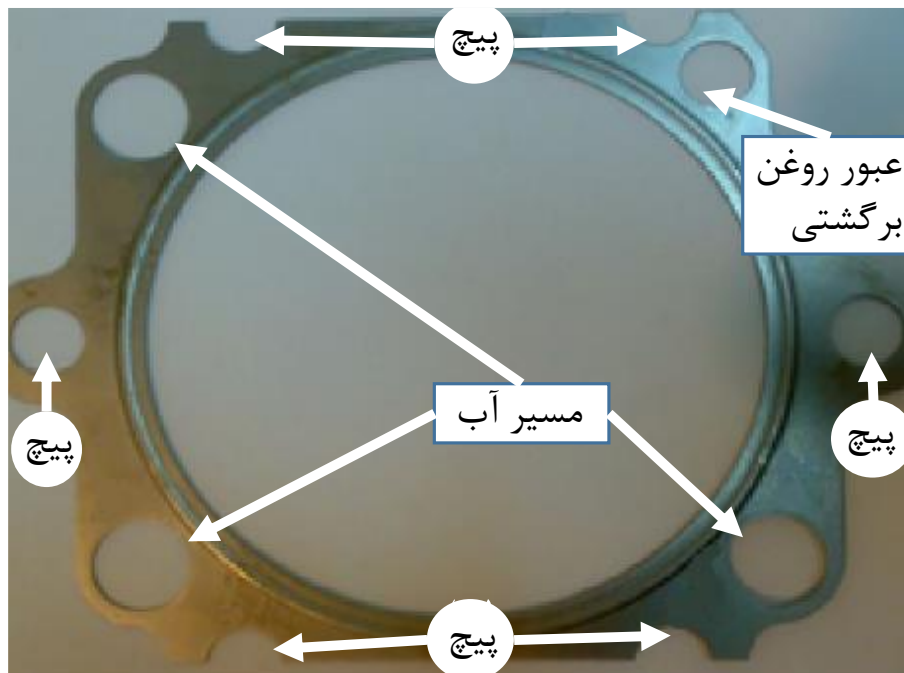
این قطعه (شکل ۲-۴) برای اعمال نیروی عمودی به بید و اشتر سرسیلندر ساخته شده است. از آنجایی که تحت بار زیادی قرار می‌گیرد، باید از جنسی باشد که استحکام زیادی، علی‌رغم سختی زیاد برای جلوگیری از سایش هنگام بارگذاری داشته باشد. مناسب‌ترین راه استفاده از یک نیم‌پیچ $M12 \times 1.75$ با درجه استحکام ۱۲/۹ است که با تراشکاری به شکل نهایی می‌رسد. جهت اعمال نیروی کاملاً عمودی سطح کف آن که در تماس با بید است، سنگ زده می‌شود. به‌طور کلی این قطعه دارای سختی بالا (حدود ۳۰ راکول) و تختی سطح بالایی در قسمت تماس آن با بید است.



شکل ۲-۴: پراب

۲-۱-۴- واشر سرسیلندر

این دستگاه به نحوی طراحی شده است که امکان موقعیت‌دهی دقیق بید و اشتر یک نوع خاص از واشر سرسیلندر (شکل ۲-۵)، که برای موتور دیزل است را در زیر پراب نیرو دارد، ولی در صورتی که امکان قرارگیری واشر زیر پراب وجود داشته باشد، می‌توان موقعیت‌دهی دقیق بید هر گونه واشری را به صورت چشمی انجام داد. برای درک بهتر شکل واشرها در بخش ۲-۲ آمده است.



شکل ۲-۵: واشر سرسیلندر موتور دیزل

۲-۱-۵- اجرای آزمایش با دستگاه بارگذاری موضعی

از آنجایی که موقعیت‌دهنده ساخته شده برای موقعیت‌دهی واشر سرسیلندر یک نوع از موتور دیزل ساخته شده است، برای آزمایش این نوع واشر، فقط لازم است که واشر زیر پراب قرار داده شود (شکل ۲-۶)، و با استفاده از آچار تخت ۲۸ کمی پیچ محرک (شکل ۲-۷)، بسته شود تا ولتاژ خروجی نیروسنج به حدود 0.1 mV که ولتاژ مبنا هنگام کالیبراسیون است، برسد. این ولتاژ متناسب با نیروی صفر در نظر گرفته می‌شود، و چون که در جابجایی صفر، نیرو صفر است باید وسیله اندازه‌گیری نیرو، که در اینجا ساعت اندازه‌گیری است، صفر شود و سپس با کمی چرخش پیچ محرک مقدار ولتاژ و جابجایی متناسب با آن ثبت شود. دقت اندازه‌گیری جابجایی ممکن است به دلایلی نظیر اصطکاک در قطعات متحرک دستگاه و عدم دقت در خوانش جابجایی به اندازه دقت ساعت اندازه‌گیری نباشد و می‌توان گفت که حدود $3 \mu\text{m}$ میکرومتر قطعی است.



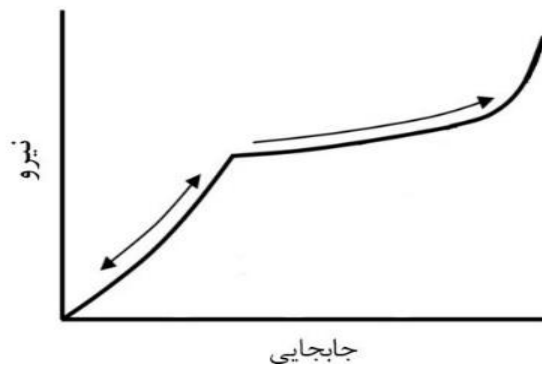
شکل ۲-۶: قرارگیری واشر زیر پراب



شکل ۲-۷: پیچ محرک بالای دستگاه

۲-۲- منحنی بارگذاری

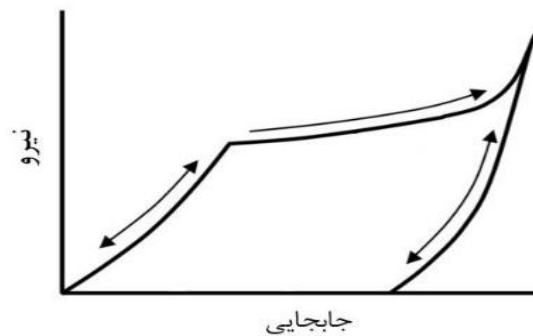
برای به دست آوردن منحنی بارگذاری (شکل ۲-۸)، باید کل بارگذاری را به چند قسمت تقسیم کرد و سپس از صفر شروع کرده و با افزایش نیرو، جابجایی متناسب با آن ثبت شود و تا اتمام تقسیمات، بارگذاری انجام شود. با رسیدن به ماکزیمم نیروی قابل اعمال، دیگر بارگذاری انجام نمی‌شود و با اتصال نقاط استخراج شده از بارگذاری، منحنی ایجاد می‌شود.



شکل ۲-۸: منحنی بارگذاری

۳-۲- منحنی بارگذاری-باربرداری

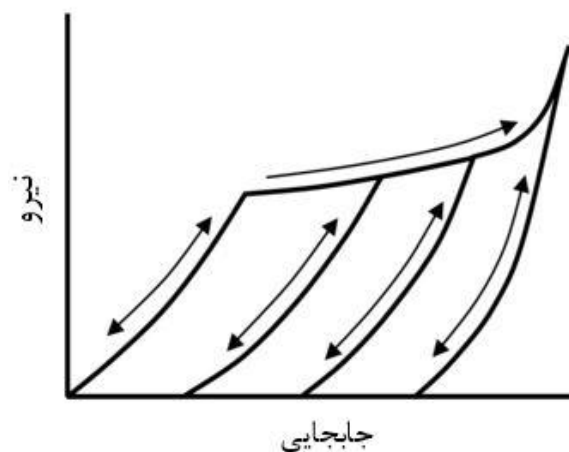
در صورتی که پس از بارگذاری، باربرداری به نحوی انجام شود که از آن چند نقطه استخراج شود تا بتوان از آن منحنی باربرداری ایجاد کرد، به آن منحنی بارگذاری-باربرداری (شکل ۲-۹) گویند.



شکل ۲-۹: بارگذاری-باربرداری

۴-۲- منحنی بارگذاری-باربرداری ترتیبی

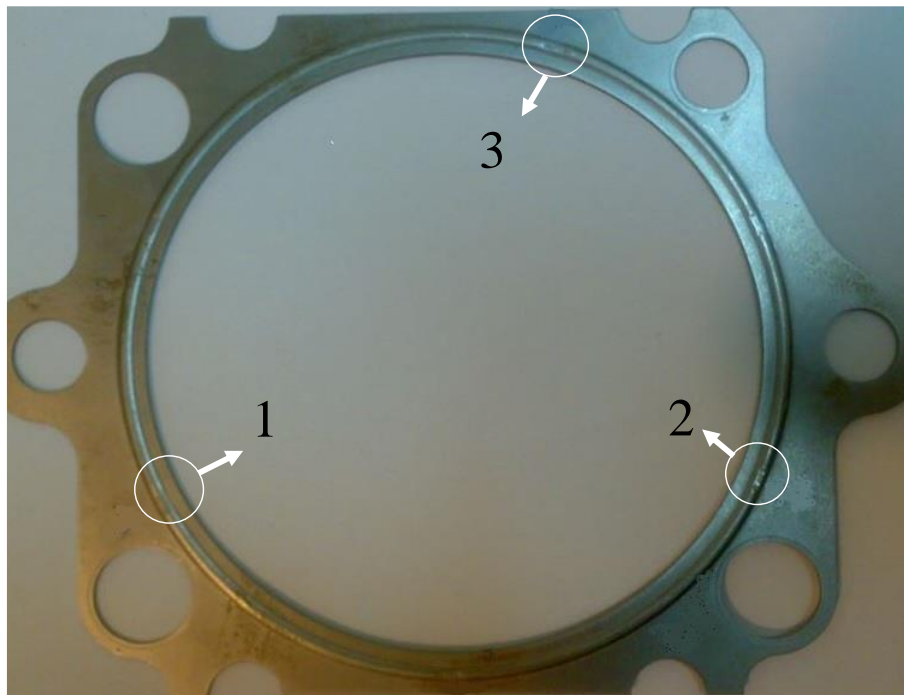
اگر به ازای چند نیروی ماکزیمم مختلف بارگذاری و باربرداری انجام شود، و سپس منحنی‌ها کنار هم قرار بگیرند، این منحنی (شکل ۲-۱۰) که همان منحنی مشخصه کامل است ایجاد می‌شود.



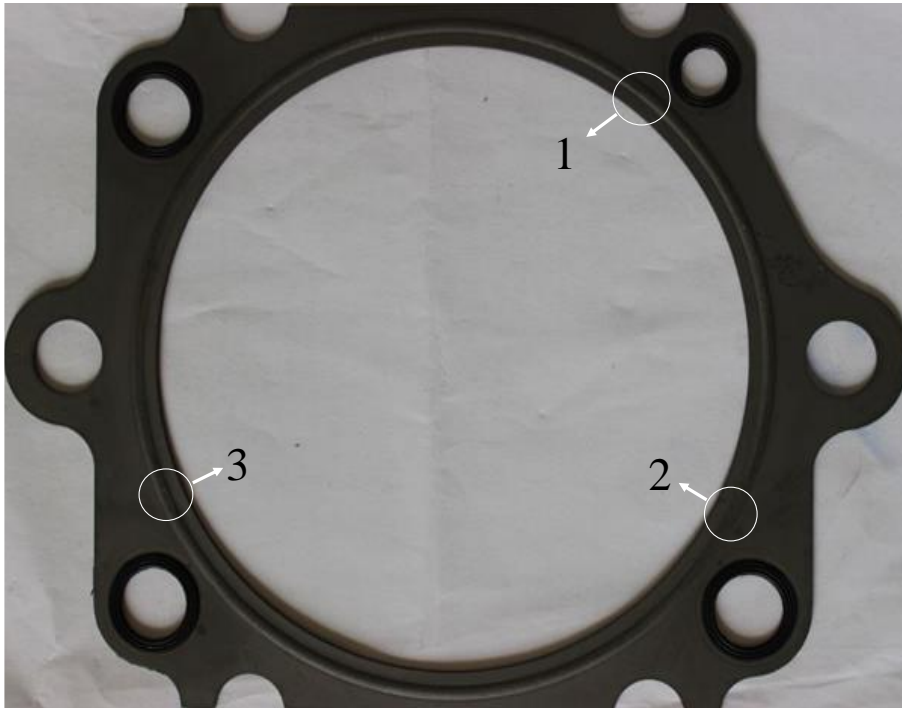
شکل ۲-۱۰: بارگذاری-باربرداری ترتیبی

۲-۵- بررسی عملی پنج واشر مختلف در بارگذاری-باربرداری

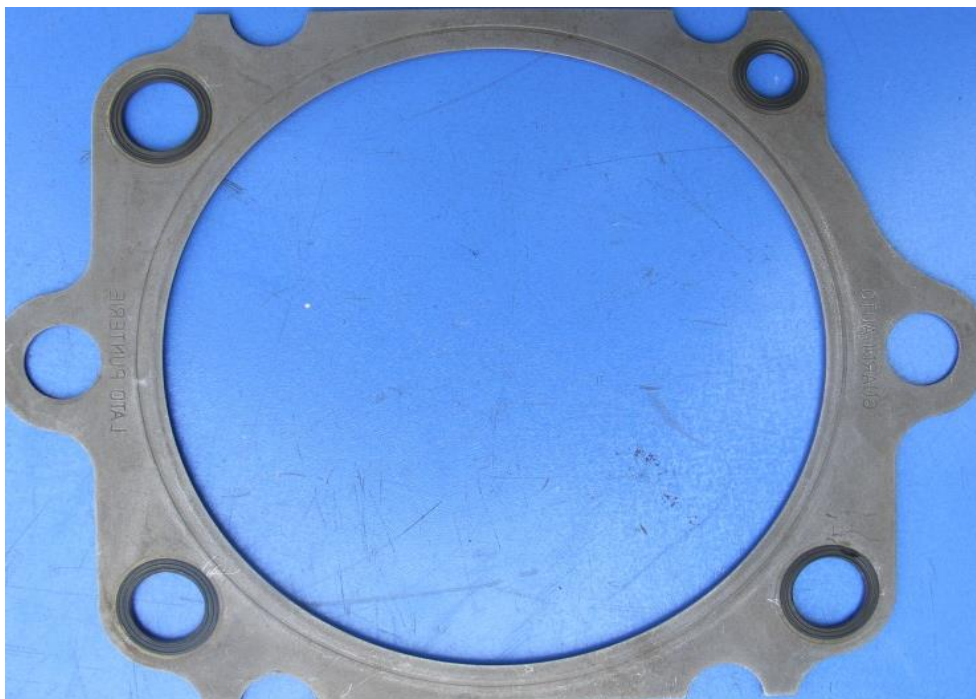
به‌منظور بررسی تفاوت در نوع بید و جنس واشر سرسیلندر، پنج نمونه واشر متفاوت (شکل ۲-۱۱)، (شکل ۲-۱۲)، (شکل ۲-۱۳)، (شکل ۲-۱۴)، (شکل ۲-۱۵)، را در ابتدا کمی با پوساب تمیز کرده و سپس برای هر واشر چند نقطه انتخاب کرده و ضخامت آن نقاط با میکرومتر اندازه گرفته می‌شود. پس از بارگذاری و باربرداری با دستگاه (شکل ۲-۱۶)، دوباره با کولیس ضخامت اندازه‌گیری می‌شود.



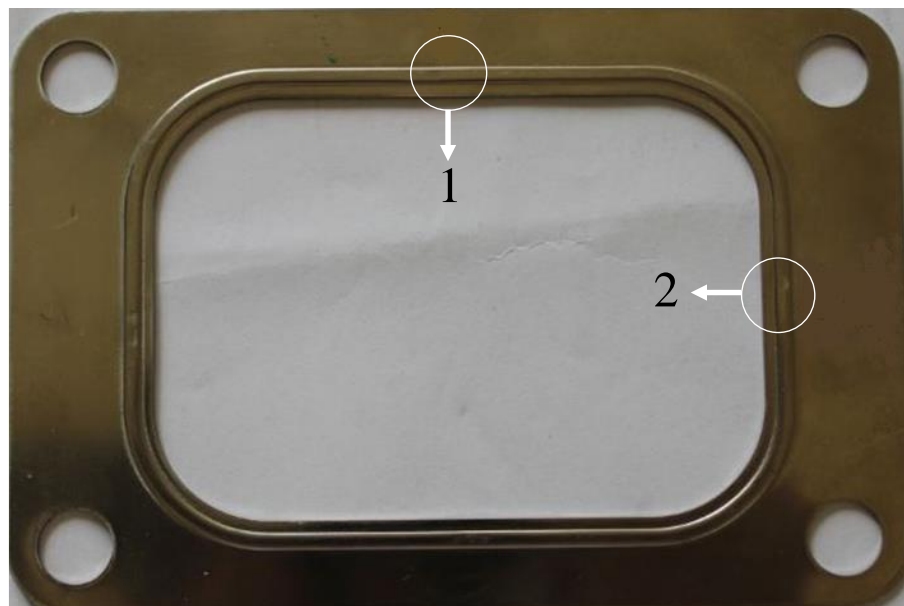
شکل ۲-۱۱: واشر دیزل بدون روکش (نمونه الف)



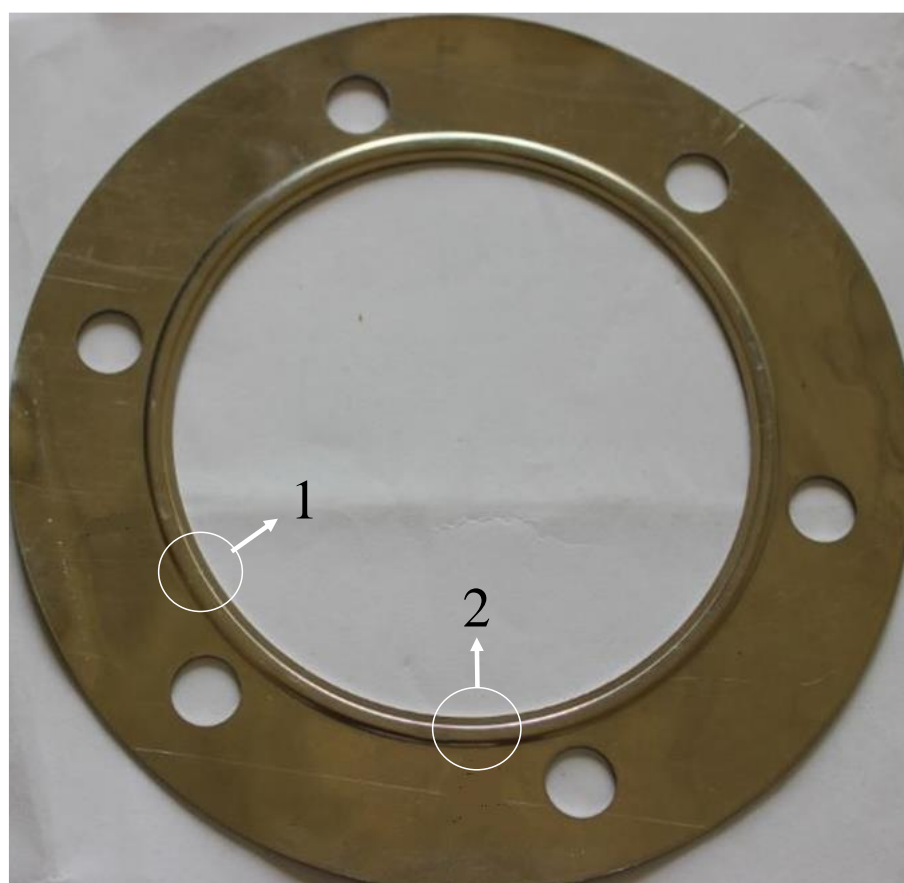
شکل ۲-۱۲: واشر دیزل روکش‌دار (نمونه ب)



شکل ۲-۱۳: واشر دیزل روکش‌دار (نمونه پ)



شکل ۲-۱۴: واشر مربعی استیل چندراهه دود موتور دیزل (نمونه ت)



شکل ۲-۱۵: واشر دایره‌ای استیل چندراهه دود موتور دیزل (نمونه ث)

۲-۵-۱- اجرای بارگذاری-باربرداری پنج واشر مختلف

با توجه به شکل‌ها از بین پنج واشر، ۲ واشر چندراهه دود یکی مربعی شکل (شکل ۲-۱۴) و دیگری دایره‌ای شکل (شکل ۲-۱۵) و هر دو از جنس استیل و با یک نوع بید و ضخامت ۱ mm می‌باشند. به خاطر اینکه قالب‌های آن‌ها باهم فرق داشته و هر کدام جداگانه ساخته شده‌اند، احتمال تفاوت در منحنی آن‌ها وجود دارد و بنابراین بررسی آن‌ها ضروری است. به‌طور کلی بررسی آن‌ها برای اینکه عمومیت دستگاه مورد آزمایش قرار بگیرد و اثر جنس در رفتار منحنی مشخصه معلوم شود انجام شده است و تنها به استخراج منحنی با دستگاه ساخته شده، اکتفا شده است. ۳ واشر دیگر مربوط به سر سیلندر و با ضخامت ۱/۲۵ mm هستند و تفاوت آن‌ها در این است که یکی روکش نشده (نمونه الف) (شکل ۲-۱۱) و دیگری روکش شده (نمونه ب) (شکل ۲-۱۲) و دیگری روکش شده از یک سازنده دیگر (نمونه پ) است (شکل ۲-۱۳). نقاط اندازه‌گیری شده در واشرها برای امکان مقایسه متقارن با واشر دیگر است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی المان محدود نیاز به شکل بید است شکل بید آن استخراج و از بید آن هم عکس برداری شده است. همچنین به دلیل اینکه جنس آن و نوع آلیاژ کاملاً مشخص نبوده است از روش اسپکترومتری نشری جهت آنالیز خواص آن استفاده شده است (جدول ۲-۲ الف و ب) و همچنین بر روی ضخامت و ترکیب شیمیایی روکش آنالیز صورت گرفته است (جدول ۲-۳ الف و ب).

جدول ۲-۲- الف) ترکیب شیمیایی واشر سرسیلندر دیزل نمونه پ بر حسب درصد وزنی عناصر

P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	W
۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۳	None	Trace
Sn	Pb	As	Sb	Zr	Nb	Fe	
۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	None	Trace	None	۰/۰۰۲	Base	

جدول ۲-۲ - ب) نمونه پ از نظر ترکیب شیمیایی با استاندارد آمریکایی (UNS) AISI 1005 (G10050) با این ترکیب شیمیایی مطابقت دارد

S	C	Si	Mn	P	
۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱	۰/۰۳۵	۰/۳	Max

جدول ۲-۳ - الف) ضخامت پوشش در برخی از قسمت‌های نمونه پ

ردیف ضخامت پوشش		ردیف ضخامت پوشش		ردیف ضخامت پوشش	
(μm)		(μm)		(μm)	
۱	۰/۰۳	۲	۰/۱	۳	۱/۲۵
۴	۰/۰۳	۵	۱/۰۳	۶	۱/۶۹
۷	۱/۵۵	۸	۱/۶۲	۹	۲/۳۵

جدول ۲-۳ - ب) ترکیب شیمیایی روکش واشر سرسیلندر دیزل نمونه پ برحسب درصد وزنی عناصر

عنصر	Zn	Fe	Ca	p	O
درصد وزنی	۳۵/۴۶	۷/۷	۷/۳۲	۱۷/۴۹	۳۲/۱۲

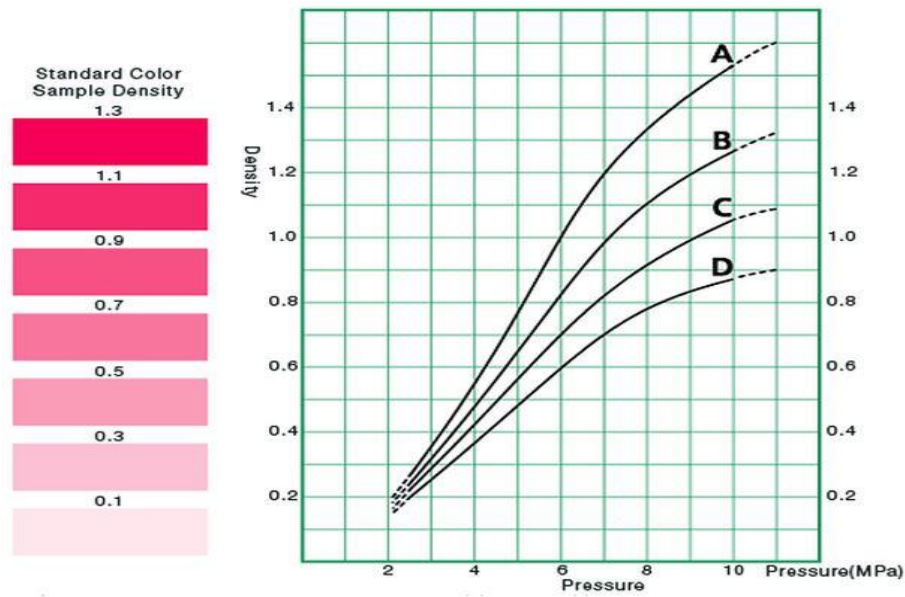


شکل ۲-۱۶: بارگذاری موضعی واشر مربعی چندراهه دود

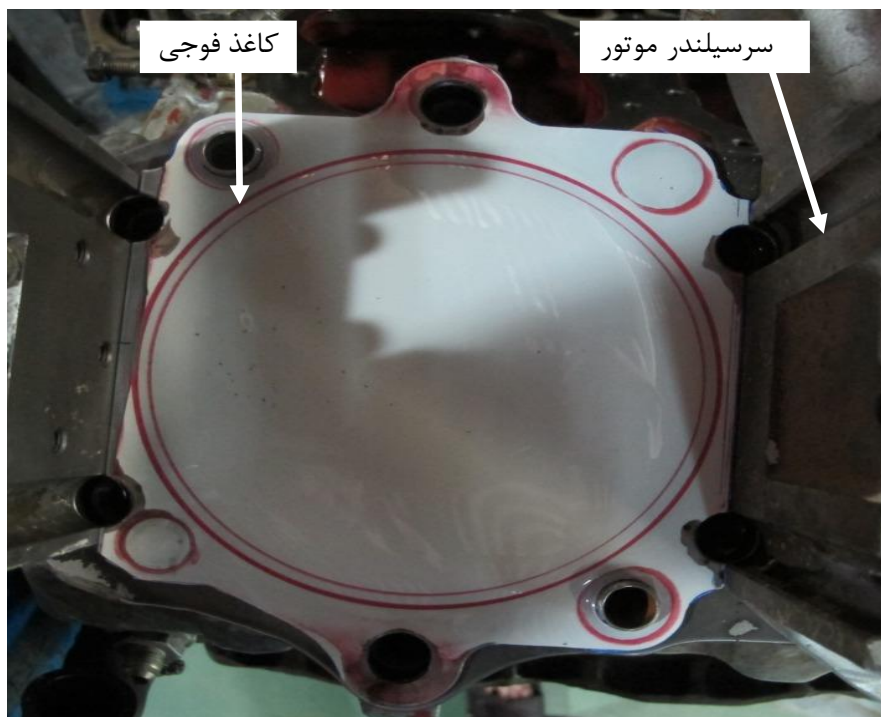
۲-۶-آزمایش کاغذ فوجی

جهت تأیید نتایج بارگذاری کلی انجام شده در نرم افزار المان محدود آباکوس از کاغذ فوجی استفاده شد. کاغذ فوجی شامل انواع یک لایه و دولایه است. نوع دولایه با ضخامت $200\ \mu\text{m}$ برای فشار خیلی کم و کم و متوسط مناسب است. نوع یک لایه با ضخامت $100\ \mu\text{m}$ برای فشارهای متوسط و زیاد و خیلی زیاد است. در کاغذ فوجی میکروکپسول‌هایی وجود دارد که در آن‌ها رنگ‌دانه است و بر اثر فشار ترکیده می‌شوند و میزان فشار اعمالی از رنگ کاغذ مشخص می‌شود. از طرف شرکت سازنده کاغذ نمودارهایی (شکل ۲-۱۷) جهت تعیین میزان فشار وارده بر اساس مقایسه رنگ با فشار وجود دارد [۳۹].

برای آزمایش بر روی موتور، کاغذ فوجی در دو طرف واشر سرسیلندر قرار گرفت و با بستن پیچ‌های سرسیلندر و اعمال نیرو به کاغذ آزمایش انجام شد. (شکل ۲-۱۸)



شکل ۲-۱۷: نمودار مشخص کننده فشار ایجاد شده بر روی کاغذ فوجی [۴۰]



شکل ۲-۱۸: انجام آزمایش کاغذ فوجی بر روی موتور دیزل

۷-۲- قالب بارگذاری کلی

به دلیل اینکه شبیه‌سازی باید راستی‌آزمایی شود، اجرای بارگذاری کلی ضرورت دارد. برای انجام دادن این آزمایش نیاز به سنبه و ماتریس که به‌عنوان کفشک، برای اعمال نیروی عمودی به واشر است. برای اینکه خیز کفشک‌ها باید از 0.001 mm کمتر باشد باید ضخامت آن‌ها محاسبه شود و همچنین نیروی اعمالی باید به‌صورت کاملاً عمودی وارد شود که علاوه بر راهنماهای قالب، نیاز است سطح کفشک‌ها سنگ زده شود. بر اساس محاسبات صورت گرفته ضخامت کفشکی که 44 mm ضخامت دارد می‌تواند در بارگذاری روی سطح واشر سرسیلندر خیزی کمتر از 0.0007 mm داشته باشد که در نهایت طراحی بر اساس ضخامت 40 mm انجام شد. دو کفشک از جنس ck45 (شکل ۲-۱۹) ساخته شدند سپس به‌وسیله‌ی دستگاه آزمون کشش سروهیدرولیک Instron 8802 (شکل ۲-۲۰)، واشر فشرده شد. به دلیل اینکه دستگاه قابلیت وارد کردن حداکثر نیروی 200 kN دارد امکان فشردن کامل و یا حتی نیمه‌کامل فراهم نشد و بنابراین جهت تأیید نتایج باید روش دیگر را انتخاب کرد.



شکل ۲-۱۹: کفشک‌های ساخته‌شده جهت بارگذاری-باربرداری کلی

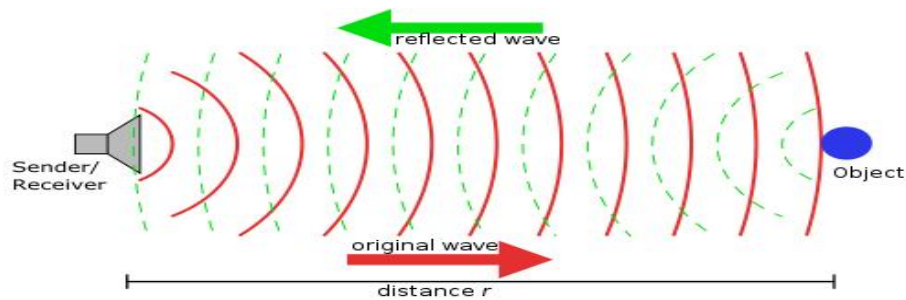


شکل ۲-۲۰: دستگاه آزمون کشش سرو هیدرولیک Instron 8802

۲-۸- نیروی بستن پیچ‌های سرسیلندر

به دلیل وجود اصطکاک بین پیچ‌های سرسیلندر و سوراخ سرسیلندر و رزوه سیلندر استخراج نیروی لازم برای سفت کردن پیچ‌های آن با استفاده از گشتاورسنج و تبدیل گشتاور اعمالی به نیرو، دقت لازم را نداشته و تضمینی برای اینکه نیروی اعمالی کم یا زیاد است وجود ندارد زیرا مقدار خوانده‌شده ممکن است اشتباه باشد. بنابراین روشی بر مبنای اندازه‌گیری تغییر طول پیچ استفاده شد. در ابتدا سر پیچ‌های آن سنگ زده شد. سپس با استفاده از کولیس ارتفاع کلی پیچ‌ها اندازه‌گیری و پس از سفت کردن آن‌ها، طول آن‌ها با استفاده از حس‌گر اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. حس‌گر اولتراسونیک نوعی حس‌گر غیرتماسی است که با ارسال یک پالس صوتی کوتاه در فرکانس فراصوت به سمت هدفی که این پالس را منعکس می‌کند و بر اساس فاصله زمانی مابین ارسال امواج تا دریافت آن‌ها و با توجه به سرعت صوت در آن محیط، فاصله تا مانع مشخص می‌شود. فرکانس مورد استفاده در حس‌گر اولتراسونیک معمولاً ۴۰-۶۰ kHz است که خارج از بازه شنوایی انسان است (شکل ۲-۲۱). با استفاده از رابطه ۲-۳ با داشتن تغییر طول کلی پیچ‌ها (δ) و سطح مقطع (A)، به‌دست‌آمده از قطر متوسط

پیچ و با مدول یانگ (E) ۲۰۰ GPa، همچنین طول قسمت بدون رزوه (l_1) و قسمت رزوه‌دار (l_2)، مقدار نیروی اعمالی به پیچ (F)، مشخص می‌شود. جدول ۴-۲ نتایج آزمایش تغییر طول پیچ‌های سرسیلندر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۱: روش کارکرد حس‌گر اولتراسونیک

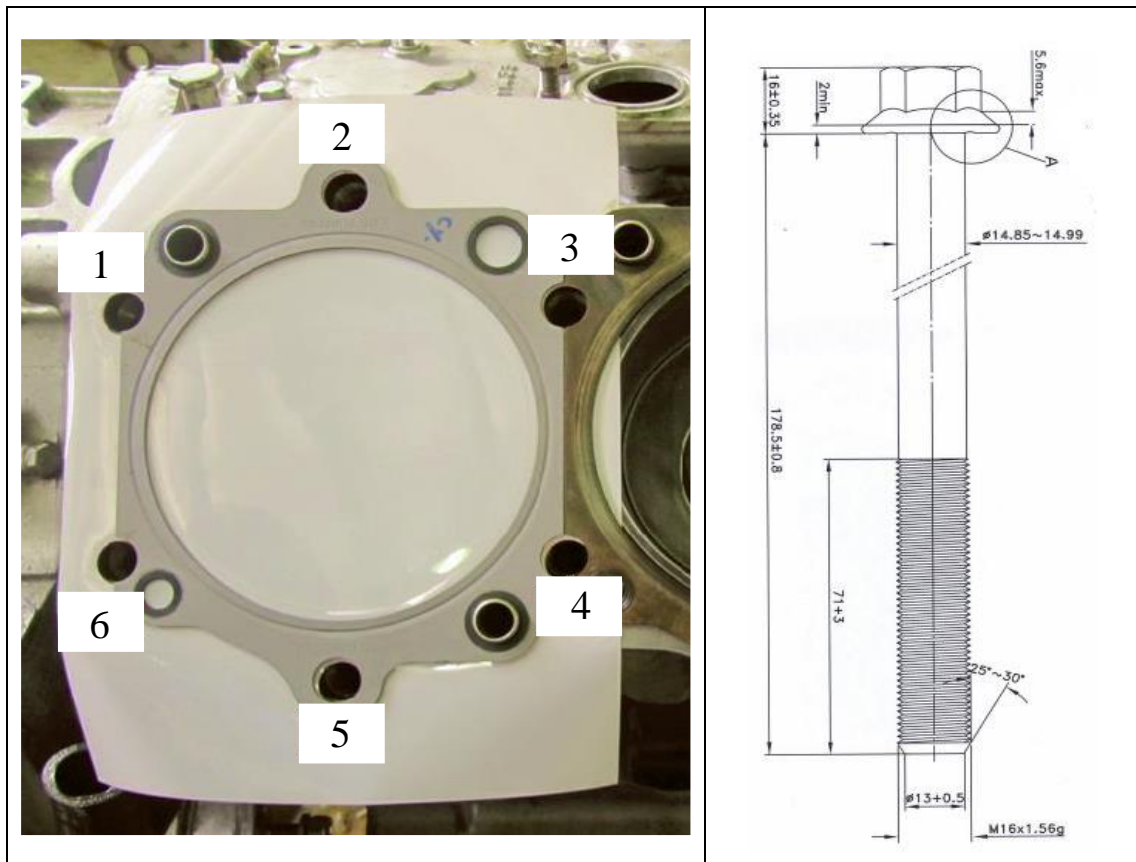
رابطه ۲-۳ از کتاب استانداردهای طراحی و ماشین‌سازی [۴۳].

$$F = \frac{\delta AE}{l_1 + 0.5 l_2}$$

جدول ۴-۲: نتایج آزمایش تغییر طول پیچ‌های سرسیلندر [۴۰]

طول پیچ‌ها (mm)						اندازه‌گیری
۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره پیچ
۱۹۲/۸۴	۱۳۹/۴	۱۹۲/۶۴	۱۹۲/۶۴	۱۹۲/۴	۱۹۲/۴۲	طول اولیه L0
۱۹۵/۳۲	۱۴۱/۰۸	۱۹۵/۱۱	۱۹۵/۱	۱۹۴/۱۵	۱۹۴/۶۷	طول بعد از مونتاژ L1
۲/۴۸	۱/۶۸	۲/۴۷	۲/۴۶	۱/۷۵	۲/۲۵	تغییر طول L1-L0
۱۹۲/۹	۱۳۹/۴۴	۱۹۲/۷	۱۹۲/۷۱	۱۹۲/۳۳	۱۹۲/۴۸	طول بعد از دمونتاژ L2
۳۷۰	۳۶۲	۳۸۶	۳۶۷	۴۰۲	۳۶۷	گشتاور بستن پیچ (N m)
۳۴۹	۳۲۰	۳۶۰	۳۴۴	۳۲۹	۳۴۶	گشتاور باز کردن (N m)

شکل ۲-۲ شماره پیچ‌های سرسیلندر را هنگام آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲: شماره پیچ‌های سرسیلندر و نمونه‌ای از نقشه پیچ سرسیلندر

فصل ٣ تحليل

المان محدود

۳-۱- مدل المان محدود بارگذاری-باربرداری کلی

امروزه شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی اهمیت ویژه‌ای دارد، چون می‌توان اطلاعات زیادی در مورد اجرای فرایند و تغییر تدریجی بعضی متغیرهای آن را به‌وسیله برنامه‌های المان محدود گوناگون تخمین زد که می‌تواند به بهبود فرایند شکل‌دهی کمک کند.

شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی شامل مراحل زیر است

- ساخت مدل‌های CAD (ورق، ابزار، ورق گیر و ...)
- تولید مسیرهای ابزار برای کنترل جابجایی ابزار
- ساخت مدل المان محدود، اعمال شرایط مرزی، تعریف مشخصات ماده، پارامترهای تماسی و ...
- حل مدل

به دلیل آنکه شکل‌دهی ورق‌های فلزی باعث ایجاد کرنش‌های بزرگی در ماده می‌شود باید الگوریتم مناسبی در نرم‌افزار المان محدود برای آن تعریف شود [۴۱]. برای شبیه‌سازی‌های فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۳ انتخاب مناسبی است. این نرم‌افزار محیط کاملی است که فضایی ساده و کاربرپسند برای ساختن مدل‌ها، انجام تحلیل، مشاهده و بررسی مراحل تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارد. مزیتی که نرم‌افزار نسبت به برنامه‌های مشابه دارد، امکان مدل‌سازی آسان و امکان مدل‌سازی اکثر قطعات در آن وجود دارد. از جمله امکانات قابل توجه که در این پایان‌نامه از آن استفاده شده است، امکان برنامه‌ریزی پارامتریک جهت انجام یک تحلیل با تغییر خود به خودی متغیر پارامتری شده، است که در این پایان‌نامه با توجه به اینکه نیاز است مقدار جابجایی از یک مقدار حداقلی به یک مقدار حداکثری برسد و به ازای هر یک از این جابجایی‌ها یک تحلیل انجام شود و خروجی که همان نیرو برحسب جابجایی است باهم مقایسه شوند، باعث تسریع در فرایند انجام تحلیل و کاهش نیاز به مداخله انسانی می‌شود.

یک تحلیل کامل در برنامه آباکوس معمولاً از سه مرحله تشکیل شده است:

^۳Abaqus

- مرحله‌ی پیش از حل^۴
- مرحله‌ی حل^۵
- مرحله‌ی پس از حل^۶

مرحله‌ی پیش از حل، به چندین ماژول^۷ تقسیم شده است و هر ماژول بخشی از پروسه مدل‌سازی را بر عهده دارد. برای مثال ماژول‌هایی برای تعریف هندسه مدل، خصوصیات مصالح و انجام مش بندی اختصاص داده شده است. با انتقال از یک ماژول به ماژول دیگر و انجام عملیات مدل‌سازی مرتبط با آن ماژول و تکرار این کار تا آخرین ماژول، مدل اجزای محدود ساخته خواهد شد. وقتی که ساختن مدل به اتمام رسید، نرم‌افزار آباکوس یک فایل ورودی می‌سازد و مدل ساخته شده را به بخش حل‌گر نرم‌افزار تحویل می‌دهد. حل‌گرهای استاندارد آباکوس و صریح آباکوس فایل ورودی را خوانده و تحلیل را انجام می‌دهند و در حین تحلیل کاربر را در جریان روند تحلیل قرار می‌دهند. سپس در مرحله‌ی پس از حل، پایگاه داده‌ی اطلاعات خروجی ساخته می‌شود و از ماژول نمایش^۸ برای خواندن از پایگاه داده اطلاعات خروجی و نمایش آن‌ها استفاده می‌شود [۴۲].

در این پایان‌نامه، شبیه‌سازی فرایند با استفاده از حل‌گر صریح آباکوس که قادر به حل سریع و آسان مسائل بسیار غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ است، انجام شده است.

⁴ Abaqus/CAE

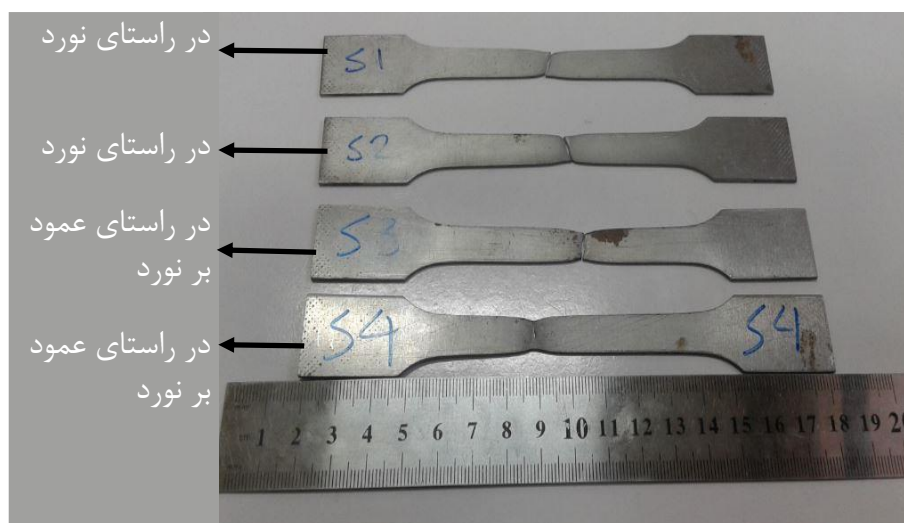
⁵ Abaqus/Standard or Abaqus/Explicit

⁶ Abaqus/Viewer

⁷ Module

⁸ Visualization

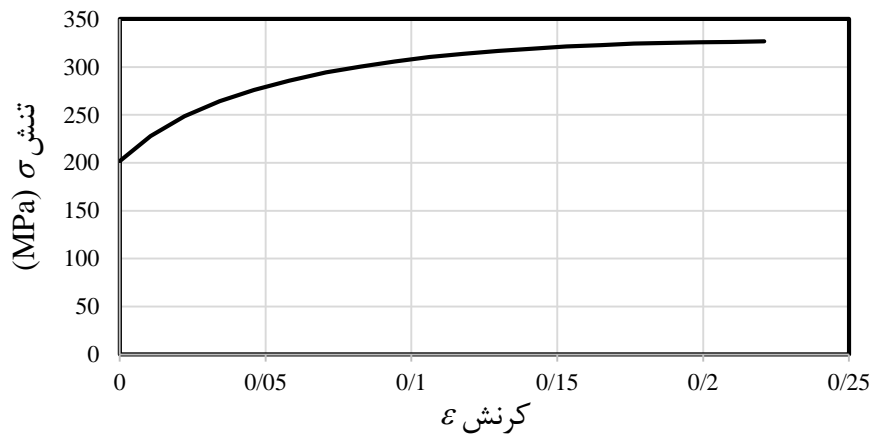
در راستای تحلیل المان محدود واکش سرد سربند باید مشخصات مواد و شکل بید واکش مشخص باشند. جهت استخراج خواص مواد واکش، چهار نمونه آزمون کشش از ورق که واکش از آن ساخته می‌شود بر اساس استاندارد ASTM ساخته شد. جهت ساخت دقیق‌تر آن‌ها از ماشین وایرکات استفاده شد. از بین این چهار نمونه آزمون کشش (شکل ۳-۱)، دو نمونه در راستای نورد ورق و دو نمونه در راستای عمود بر راستای نورد ورق ساخته شد. جهت انجام آزمایش آزمون کشش از دستگاه آزمون مدل Testometric (شکل ۳-۲)، استفاده شد. پس از بررسی نتایج، منحنی تنش و کرنش برای نمونه‌های مختلف ترسیم و مشخص شد که تفاوت اندکی بین نتایج به‌دست‌آمده از نمونه‌های آزمون کشش وجود دارد و بنابراین جهت استفاده از نتایج در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، تنش و کرنش مهندسی تبدیل به تنش و کرنش حقیقی شدند (شکل ۳-۳)، و سپس از آن در شبیه‌سازی استفاده شد. جدول ۳-۱ نتایج آزمون کشش نمونه‌ها است.



شکل ۳-۱: نمونه‌های دمبلی شکل آزمون کشش آلیاژ St12 بر اساس استاندارد ASTM-E8



شکل ۳-۲: دستگاه آزمون مدل Testometric

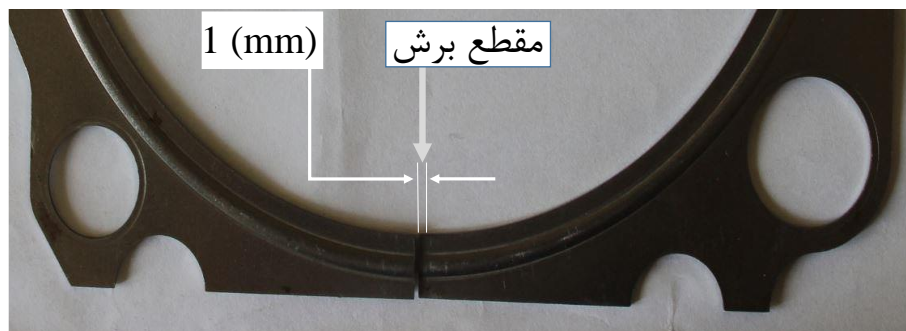


شکل ۳-۳: منحنی تنش-کرنش حقیقی به دست آمده از آزمایش کشش

جدول ۳-۱: نتیجه آزمایش کشش نمونه‌ها

نمونه‌ها	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
تنش تسلیم	۲۰۳	۲۳۵	۲۲۴	۲۲۳
تنش نهایی	۳۲۶	۳۲۹	۳۲۹	۳۲۴

استخراج شکل بید واشر سرسیلندر قسمت دیگری از کار است که باید با دقت بالا انجام شود. قسمتی از واشر نمونه الف (شکل ۳-۴)، که امکان برش متقارن در آن وجود دارد جهت برش انتخاب شد. پس از آن با دقت بالا با استفاده از ماشین وایرکات برش صورت گرفت و مقطع موردنظر (شکل ۳-۵)، از واشر سرسیلندر جدا شد. جهت طراحی شکل بید در نرم افزار المان محدود آباکوس از دستگاه سایه‌نگار نوری (شکل ۳-۶)، برای استخراج نقاط منحنی‌های بید استفاده شد.



شکل ۳-۴: ناحیه بریده‌شده از واشر

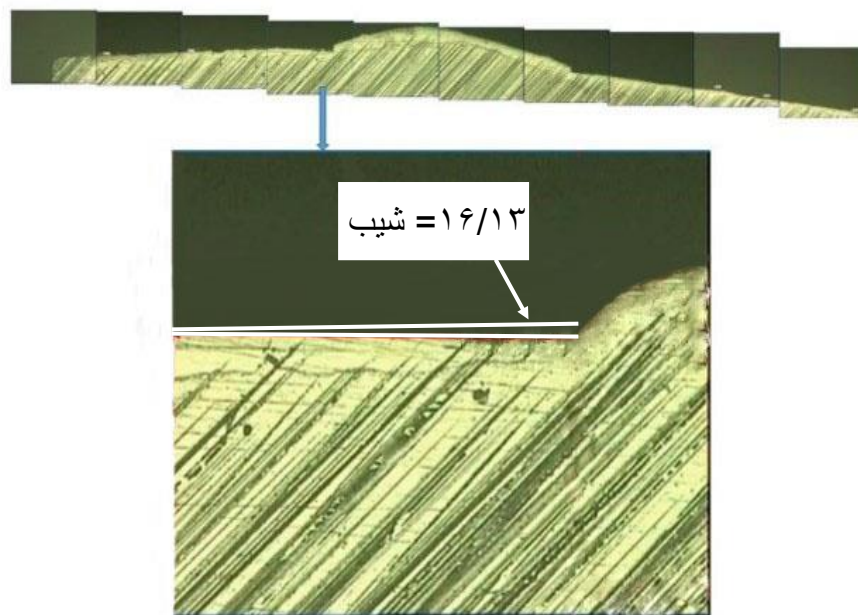


شکل ۳-۵: مقطع بریده‌شده از نمونه الف با دستگاه برش وایرکات



شکل ۳-۶: دستگاه سایه‌نگار نوری

با توجه به اینکه خصوصیات ماده و پروفایل بید و اشتر استخراج شده است از آن در مدل‌سازی استفاده می‌شود. جهت مشاهده شکل بید از ناحیه خط پرس با میکروسکوپ نوری از نمونه پ عکس‌برداری انجام شده است (شکل ۳-۷). پس از عکس‌برداری با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ شیب اطراف بید بررسی شد. بر این اساس در سمت چپ سطح مقطع در فاصله $749/3 \mu\text{m}$ حدود $52/53 \mu\text{m}$ اختلاف ارتفاع وجود دارد که بنابراین شیب آن حدود $16/13^\circ$ است.



شکل ۳-۷: عکس میکروسکوپی از بید

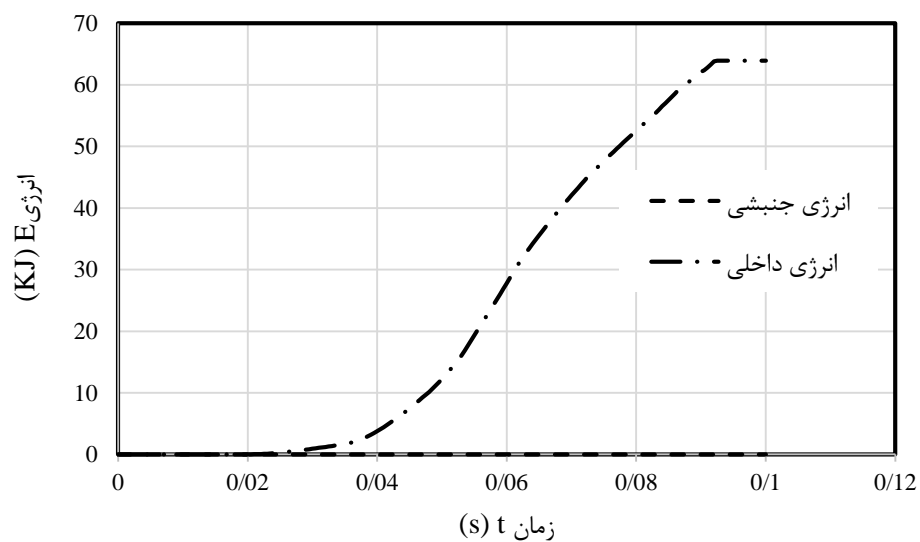
با استفاده از نرم‌افزار solid work از نقاط به‌دست‌آمده از شکل بید، پانچ و ماتریس ترسیم شدند و به نرم‌افزار آباکوس وارد شدند. مدل متقارن محوری از واشر در نرم‌افزار آباکوس تهیه شد و با اختصاص مواد استخراج‌شده به آن در حل گر صریح، قطعه شکل‌دهی شد. از آنجایی که هر قطعه تا شکل‌گیری کامل متحمل تنش‌های زیادی می‌شود، در ابتدا حتماً باید قطعه شکل‌دهی شود (شکل ۳-۸)، و پس از آن بارگذاری انجام شود تا از اثرات تنش پسماند در حین شکل‌دهی واشر صرف‌نظر نشود. در قطعه از المان CAX4R استفاده شد و مینیمم سایز مش 0.005 mm گذاشته شد. اندازه مش در صورتی که زیاد کوچک باشد نیاز به محاسبات زیادی دارد و اگر بزرگ باشد باعث مشکل در همگرایی حل می‌شود و بنابراین در نقاط حساس از مش‌های کوچک‌تر و در نقاط دیگر مش‌ها بزرگ‌تر هستند. از آنجایی که سرعت حل پایین بود از فن mass scaling استفاده شد و جهت اطمینان در عدم‌تغییر نتایج به دلیل mass scaling، انرژی جنبشی نسبت به انرژی کلی مقایسه شد (شکل ۳-۹)، که باید حدود ۵ تا ۱۰ درصد آن باشد [۱۶]. به دلیل وجود برگشت فنی هنگام شکل‌دهی بید واشر، ممکن است شکل بید پس از شبیه‌سازی با شکل واقعی یکسان نباشد. بنابراین با استخراج مختصات اطراف بید شکل‌دهی شده در نرم‌افزار آباکوس، و مقایسه با شکل واقعی بید، از لحاظ ظاهری، مدل شکل‌دهی تأیید شد (شکل ۳-۸).

۱۰). به دلیل اینکه در حالت واقعی سیلندر و سرسیلندر از جنس چدن می‌باشند و ممکن است تغییر شکل مومسان یا کشسان در آن روی بدهد، باید از لحاظ تغییر شکل بررسی شود. بدین منظور سیلندر و سرسیلندر به صورت ساده‌شده‌ای از مدل اصلی، با دو بلوک که ضخامت آن‌ها حدوداً برابر با مدل اصلی یعنی ۴۰ mm است متناسب با مدل شکل‌دهی شده و اشر که 10° است به صورت 10° با المان C3D8R مدل شده است. شرایط مرزی به صورت متقارن و عمود بر قطاع بلوک است. جهت حل سریع اندازه المان‌ها چند برابر بزرگ‌تر از المان‌های و اشر است. اگر سرسیلندر کاملاً تغییر شکل پذیر باشد امکان فهمیدن جابجایی کلی وجود ندارد تا بتوان بر اسان آن نتیجه‌گیری کرد بنابراین قسمت بالای آن به حالت rigid تغییر پیدا می‌کند (شکل ۳-۱۱). پس از انجام تحلیل مشخص شد که جابجایی و تنش المان‌ها از حد تعیین شده کمتر بوده و می‌توان سرسیلندر و سیلندر را به صورت rigid مدل‌سازی کرد. پس از شکل‌دهی، باید بارگذاری و باربرداری انجام شود (شکل ۳-۱۲)، که قطعه شکل‌دهی شده را در یک مدل دیگر که جهت بارگذاری و باربرداری است وارد کرده، و بر روی آن بارگذاری انجام می‌شود. شرایط مرزی به نحوی است که در یک گام^۱ بارگذاری و در استپ دیگر باربرداری انجام می‌شود. پس از انجام تحلیل نتایج استخراج شدند. جهت استخراج منحنی مشخصه کامل، بارگذاری-باربرداری برای چند بارگذاری از کم تا زیاد انجام شد و منحنی مشخصه از قرار گرفتن همه آن‌ها کنار هم ایجاد شد.

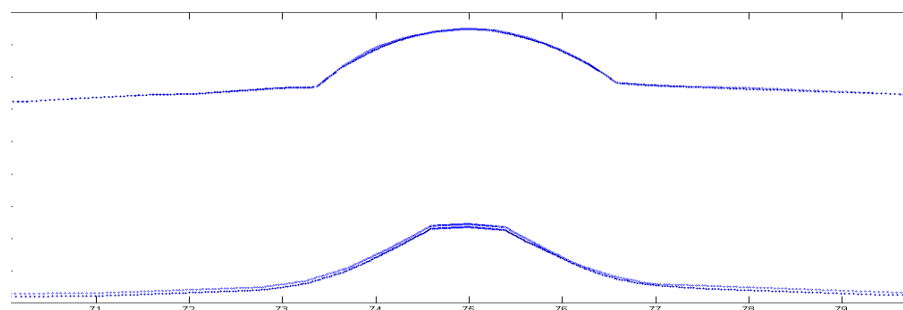
step^۱



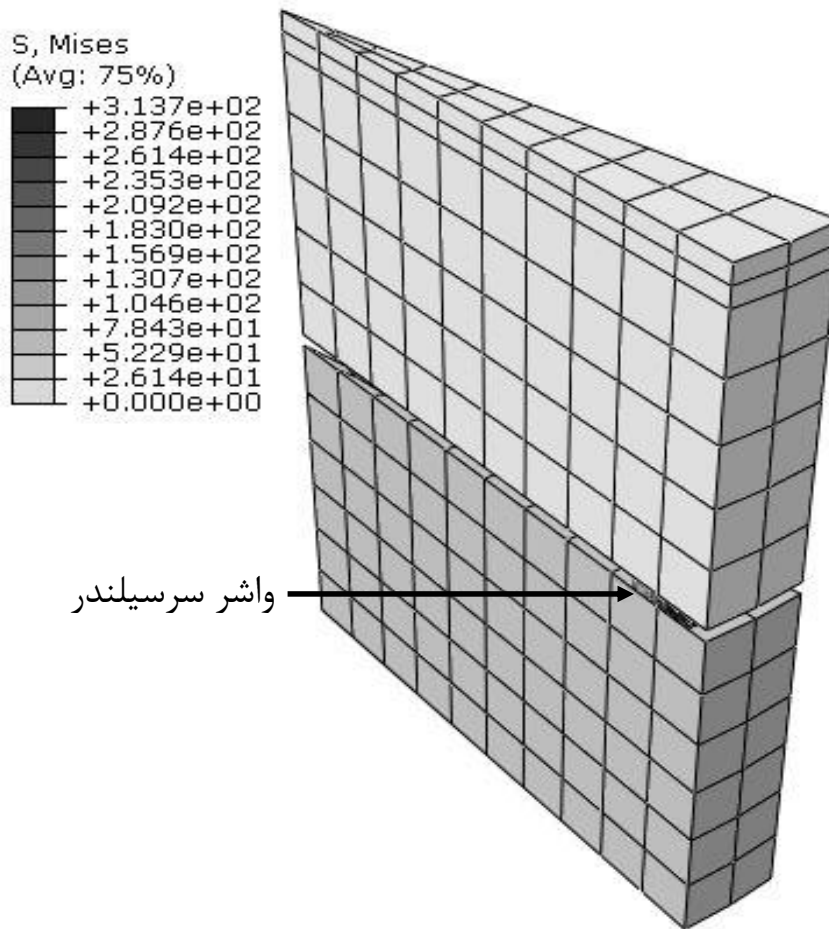
شکل ۳-۸: مدل شکل‌دهی متقارن محوری بید واشر سرسیلندر



شکل ۳-۹: مقایسه انرژی جنبشی نسبت به انرژی کل در شکل‌دهی بید



شکل ۳-۱۰: مقایسه شکل نهایی شکل‌دهی المان محدود بید واشر سرسیلندر با نمونه واقعی



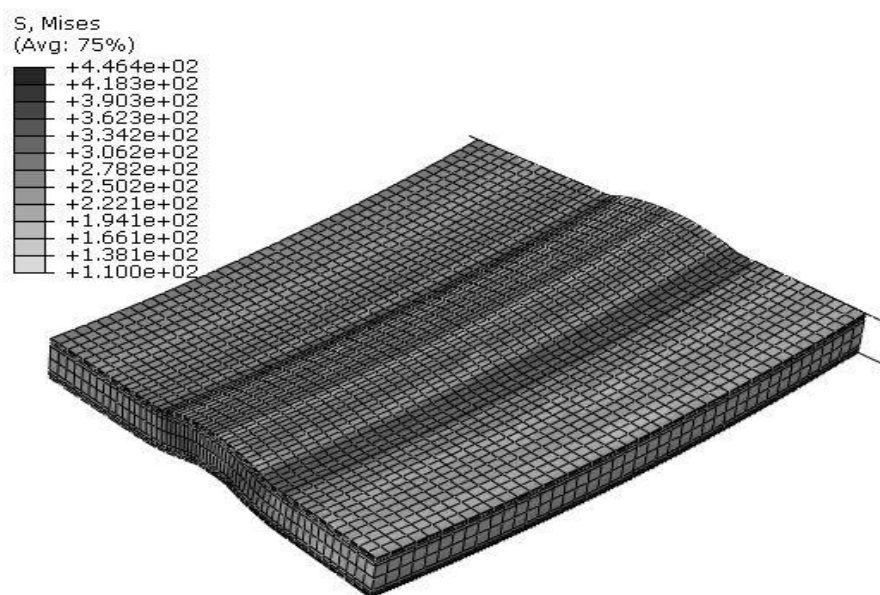
شکل ۳-۱۱: مدل المان محدود بارگذاری با پانچ و سندان تغییر شکل پذیر



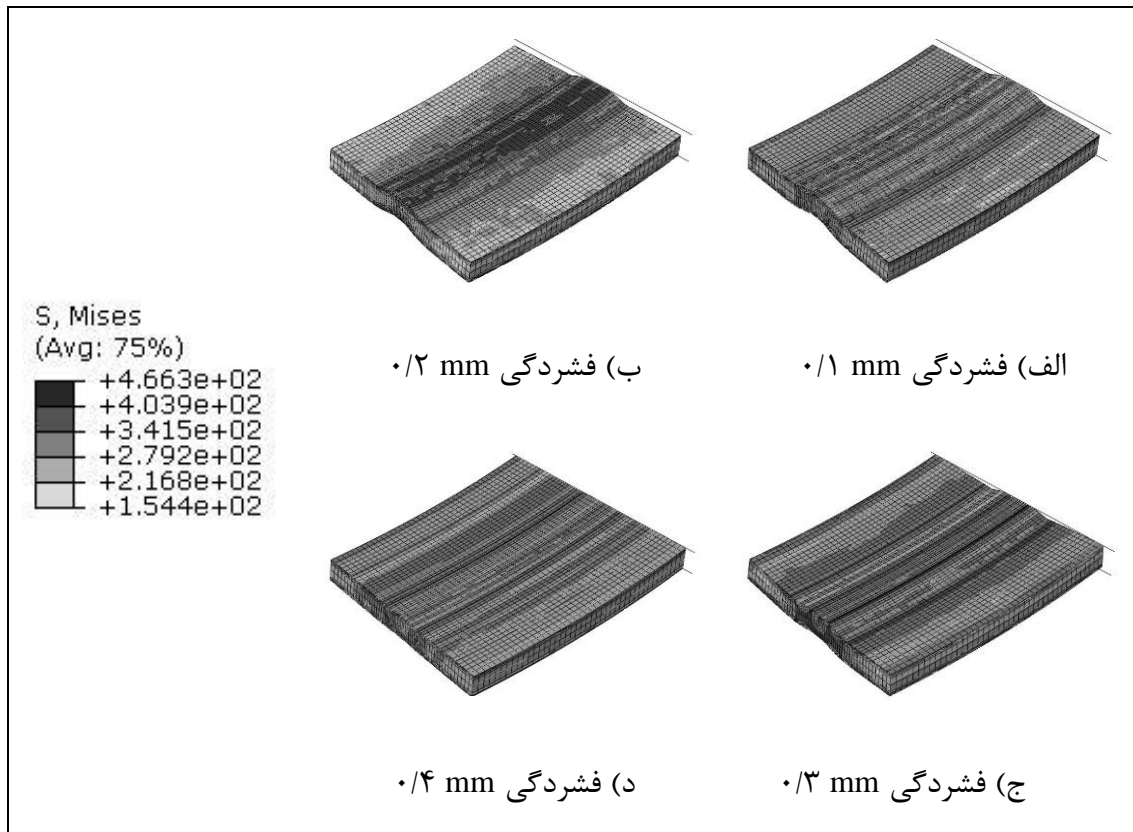
شکل ۳-۱۲: مدل المان محدود بارگذاری-باربرداری

پس از بارگذاری متقارن محوری، جهت تأیید نتایج از بارگذاری سه‌بعدی استفاده شد. برای اینکه نیاز به زمان خیلی زیاد برای پردازش اطلاعات در زمان حل نباشد، قطاعی 10° از کل واشر به صورت سه‌بعدی

با المان C3D8I یعنی المان سه‌بعدی با ۸ گره از نوع Incompatible ایجاد شد. از المان نوع Reduce Integration به دلیل انرژی هیستریزیس که از نوع آن المان نشئت می‌گیرد نمی‌توان استفاده کرد، زیرا باعث تغییر زیاد در نتایج می‌شود. شکل‌دهی با المان نوع Incompatible کمی مشکل‌تر است زیرا به انحراف المان حساس‌تر است و باید با حوصله بیشتر مشکلات را حل کرد و زوایای بید و گوشه‌های آن را طوری تغییر داد که نه باعث تغییر نتایج و نه باعث ایجاد مشکل در حل شود. پس از شکل‌دهی سه‌بعدی واشر سرسیلندر (شکل ۳-۱۳)، واشر شکل‌گرفته در یک مدل بارگذاری وارد، و بر روی آن بارگذاری انجام شد (شکل ۳-۱۴). به دلیل اینکه تحلیل انجام‌شده یک قسمت از ۳۶ قسمت از کل بارگذاری است نتایج را در عدد ۳۶ ضرب کرده و سپس با مدل متقارن محوری مقایسه می‌شود. پس از استخراج نتایج اولیه جهت استخراج منحنی مشخصه کامل، به صورت ترتیبی و مشابه بارگذاری متقارن محوری، شبیه‌سازی برای چند بارگذاری مختلف انجام و نتایج استخراج شدند.



شکل ۳-۱۳: شکل‌دهی سه‌بعدی واشر سرسیلندر



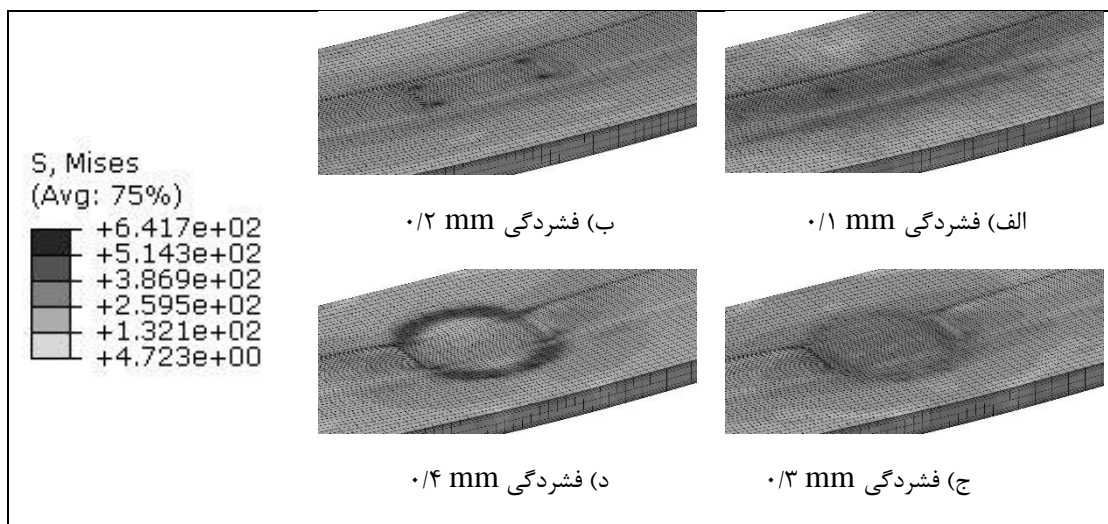
شکل ۳-۱۴: بارگذاری-باربرداری مدل سه‌بعدی

۳-۲- شبیه‌سازی المان محدود بارگذاری موضعی

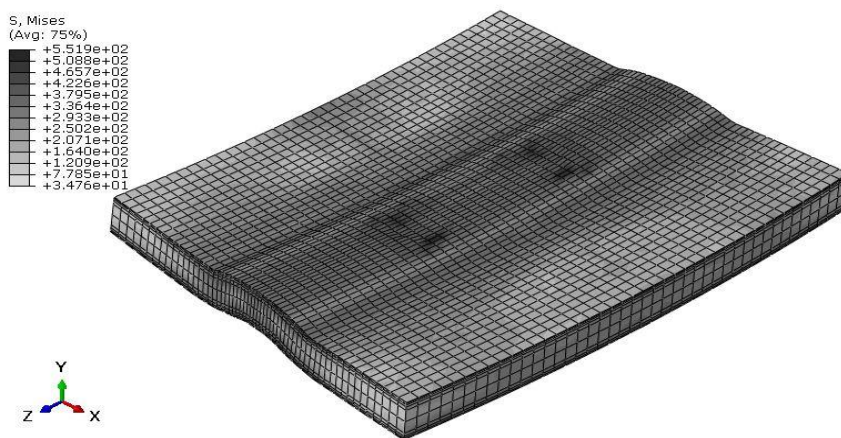
برای شبیه‌سازی بارگذاری موضعی در ابتدا باید شکل‌دهی سه‌بعدی انجام شود. به دلیل اینکه شرایط مرزی در حین بارگذاری کاملاً مشخص نیست، شکل‌دهی به دو صورت سه‌بعدی با قطاع‌های 10° و 30° (شکل ۳-۱۵)، انجام و سپس بارگذاری انجام می‌شود. شکل‌دهی 10° برای مقایسه با بارگذاری متقارن محوری انجام شده است و نیازی به انجام دوباره آن نیست. شکل‌دهی 30° با گسترش مدل قطعه 10° ایجاد می‌شود. جهت بارگذاری قطعه، مدل شکل‌دهی به مدل بارگذاری وارد می‌شود و سپس به جای پانچ از یک قطعه جهت اعمال نیرو با عنوان پراب استفاده می‌شود، و به جای ماتریس از یک قطعه دیگر با عنوان سندان استفاده می‌شود. پراب با استفاده از Discrete rigid از نوع Solid ایجاد می‌شود و سپس تبدیل به shell می‌شود. پس از مونتاژ مدل بارگذاری انجام می‌شود، و هر دو بارگذاری 30° (شکل ۳-۱۶)، و 10° (شکل ۳-۱۷)، با ایجاد جابجایی سنبه با حل گر صریح انجام می‌شود.



شکل ۳-۱۵: شکل دهی ۳۰° بید واشر سرسیلندر



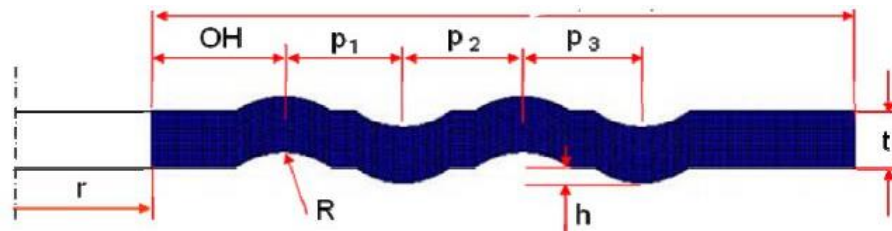
شکل ۳-۱۶: بارگذاری موضعی ۳۰°



شکل ۳-۱۷: بارگذاری موضعی ۱۰°

۳-۳- بررسی تأثیر متغیرهای بید

با توجه به اینکه مفهوم بهینه‌سازی به دستیابی به مقدار بهینه یک یا چند متغیر اطلاق می‌شود که در نظر گرفته شده‌اند و ممکن است باعث پدیدار شدن عکس شرایط بهینه برای دیگر متغیرها شود، در این مسئله به خاطر در نظر نگرفتن تأثیر انتقال حرارت ممکن است مقدار بهینه از لحاظ مقدار فشار تماس و برگشت فنی و اشر سرسیلندر، باعث کاهش انتقال حرارت و سوختن و اشر گردد که بدون در نظر گرفتن آن، مسئله به یک مسئله دستیابی به بیشترین فشار تماس در سطح و اشر و بیشترین میزان برگشت فنی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه دو هدف مسئله مشخص است، با ترکیب سه شکل قالب مختلف با سه ضخامت متفاوت ورق، مطابق با جدول ۳-۲ برای شکل‌دهی و بارگذاری-باربرداری، ۹ حالت ایجاد می‌شود که در هر حالت دو متغیر ضخامت ورق و ارتفاع بید وجود دارند. بر این اساس با تغییر در شکل اولیه قالب شکل‌دهی و با افزایش ۰/۱ به ضخامت بید و کاهش ۰/۱ از ضخامت بید و همچنین شکل اولیه قالب، جمعاً ۳ حالت برای قالب ایجاد می‌گردد. همچنین با تغییر ضخامت ورق اولیه و افزودن ۰/۱ به ضخامت اولیه و کاهش ۰/۱ از ضخامت اولیه جمعاً ۳ حالت برای ضخامت ایجاد می‌شود. با توجه به این که برای بهینه‌سازی نیاز به مقدار بیشینه فشار تماس و برگشت فنی به عنوان هدف است، برای هر کدام از ۹ حالت موجود پس از بارگذاری-باربرداری یک منحنی استخراج شد و مقادیر بیشینه دو متغیر مورد نظر استخراج شد. بنابراین متناسب با جدول زیر که با مبنا قرار دادن و اشر اصلی، با کاهش یا افزایش ضخامت ورق و شکل قالب ایجاد شده است ۹ حالت ایجاد می‌شود. در یکی از مقالات بررسی شده، با استفاده از روش تاگوچی مدل شکل ۳-۱۸ بهینه‌سازی شده است. با توجه به شکل آن مشخص است که از لحاظ هندسی، این یک بید منطقی نبوده و تنها با هدف بهینه‌سازی طراحی شده است و بنابراین با هدف کاربردی بررسی انجام نشده است.



شکل ۳-۱۸: متغیرهای مشخص شده در مقاله برای بهینه‌سازی [۱۱]

به‌عنوان مثال یک قطاع از دایره را به‌عنوان یک متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته است، در صورتی که در حالت واقعی این چنین نیست. همچنین مدل‌های ایجاد شده، با طراحی مدل در نرم‌افزار solidwork انجام شده است، که به دلیل عدم در نظر گرفتن تنش‌های پسماند ناشی از شکل‌دهی، با حالت واقعی متفاوت و دقت کافی را ندارد، ولی به لحاظ محاسباتی، سرعت بالایی دارد. در واشر حاضر به دلیل اینکه بررسی با در نظر گرفتن تنش پسماند، نیازمند شکل‌دهی اولیه و وجود سنبه و ماتریس مناسب که امکان تطبیق با یکدیگر برای ایجاد هر یک از شکل‌ها است، باید سنبه و ماتریسی که امکان ایجاد شکل واشر منطقی موردنظر را دارد، برای هر یک از آن‌ها دوباره طراحی شود. ولی وابستگی هندسی به نحوی است که اگر یک متغیر تغییر کند کل شکل بید تغییر می‌کند و بنابراین طراحی سنبه و ماتریس مشکل می‌شود و متغیرهای قابل بررسی کاهش می‌یابد. همچنین، به دلیل اینکه شکل هندسی مطابق با پروفیل شکل ۳-۱۰ است و از بید واقعی استخراج شده است، متغیرهای آن کاملاً مشخص نبوده و برای بهینه‌سازی، شکل قالب به‌طور کلی به نحوی بازطراحی شده است که حالت واقعی داشته باشد. بنابراین تعداد متغیرهای قابل بهینه‌سازی کاهش می‌یابد. شعاع گوشه بید و عرض بید دو قسمت دیگر از واشر است که در ابتدا قصد بهینه‌سازی آن وجود داشت. ولی به دلیل اینکه شکل بید به نحوی است که شعاع گوشه آن بزرگ است، با تغییر در شعاع گوشه بید، شکل بید به صورتی نامتوازن می‌شود. به دلیل این که بید تقریباً به شکل بیضی است، با تغییر ارتفاع بید، عرض آن تغییر می‌کند و می‌توان از کاهش ضخامت به‌عنوان کاهش عرض نام برد. شکل‌های دیگری را هم می‌توان جهت بهینه‌سازی انجام داد ولی جهت امکان مقایسه باید از یک‌شکل بید و تغییر در قسمت‌های مختلف آن استفاده کرد. البته شکل بید هم

باید منطقی باشد مثلاً از مربع می‌توان استفاده کرد یا از یک لوزی نمی‌توان استفاده کرد. همچنین واشر با دو بید هم شبیه‌سازی شد که به دلیل تفاوت زیاد در مقادیر به دست آمده نسبت به تک بید امکان مقایسه آن‌ها جهت بهینه‌سازی نیست.

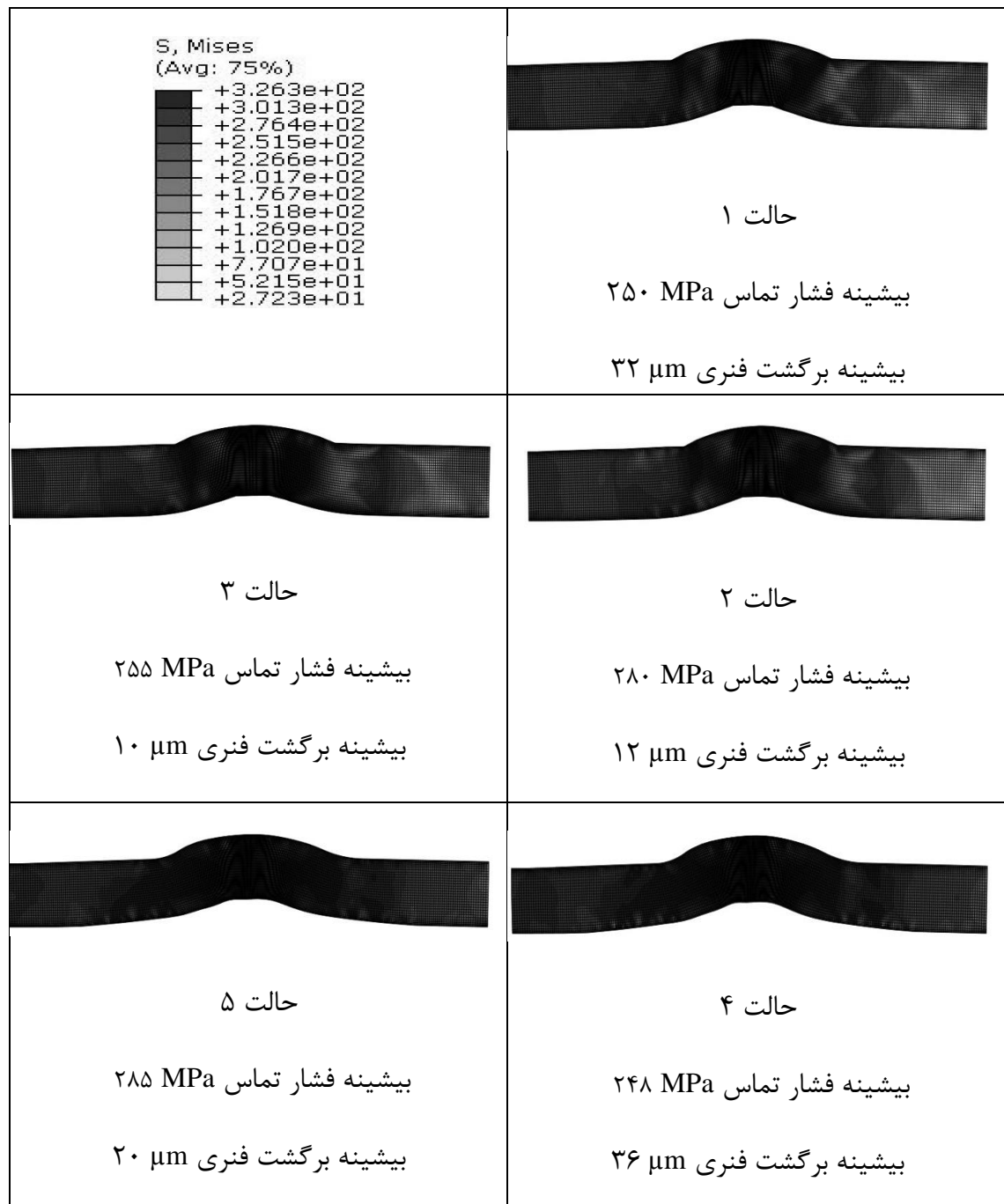
جدول ۲-۳ حالات ایجادشده در واشر جهت بررسی شکل بید

حالات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
تغییرات در ارتفاع قالب (mm)	-	-	-	+۰/۱	+۰/۱	+۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱
ضخامت ورق (mm)	۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۳۵	۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۳۵	۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۳۵

با توجه به حالات مختلف، ۹ مدل بارگذاری-باربرداری (شکل ۳-۱۹)، ایجاد شد و مش‌بندی و نحوه بارگذاری و باربرداری و استپ و غیره مشابه مدل اولیه است. برای دو حالتی که شکل ماتریس و سنبه تغییر کرده است، در ابتدا با مش بزرگ شکل‌دهی انجام شد و پس از رفع ایرادات، با مش کوچک، شکل‌دهی نهایی انجام شد. از هر مدل ماکزیمم مقدار منحنی نیرو-جابجایی و فشار تماس در سطح واشر استخراج شد. طراحی آزمایش^۱ یک روش بررسی‌کننده‌ی اثرات متغیرهای چندگانه روی یک متغیر خارجی (پاسخ) است. این آزمون‌ها شامل یک سری رشته‌ها یا آزمایش‌ها است که به صورت هدفمند و معنی‌داری در متغیرهای ورودی یا پاسخ ساخته می‌شوند و داده‌ها در هر رشته جمع‌آوری می‌شوند. متخصصین از DOE برای شناسایی شرایط فرایند مؤلفه‌های تولیدشده‌ای که بر کیفیت تأثیرگذار هستند، استفاده می‌کنند و سپس تنظیمات متغیر ورودی (فاکتور) را طوری تعیین می‌کنند که نتایج بهینه‌ای داشته باشد. در مینی‌تب، چهار روش فاکتوریال، سطح پاسخ، مخلوط و تاگوچی برای طراحی آزمایش وجود دارد. مراحلی که در مینی‌تب برای طراحی یک آزمایش، از جمله تحلیل و رسم نمودار و گراف برای تمام روش‌ها انجام می‌شود مشابه است و مینی‌تب یک سری ابزارهای تحلیلی و نموداری آماده می‌کند تا نتایج آزمایش‌ها را به‌طور کامل متوجه شوید. برای بررسی مقادیر بهینه

^۱ DOE

متغیرهای بید از روش روش فاکتوریل استفاده شد. پس از انجام شبیه‌سازی حالت‌های مختلف با نرم‌افزار آباکوس، منحنی‌های فشار تماس و برگشت فنری برای هر حالت ترسیم شد. با بررسی منحنی‌ها مقادیر ماکزیمم آن‌ها مشخص و به نرم‌افزار مینی‌تب وارد و پس از انجام تنظیمات لازم منحنی‌های بهینه ترسیم شدند.



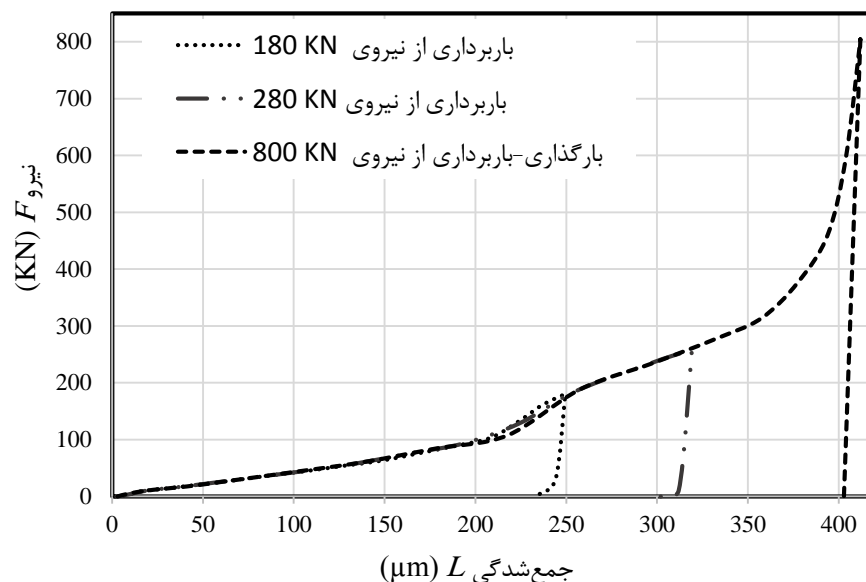
 <p>حالت ۷</p> <p>بیشینه فشار تماس ۲۶۰ MPa</p> <p>بیشینه برگشت فنری ۲۷ μm</p>	 <p>حالت ۶</p> <p>بیشینه فشار تماس ۲۴۰ MPa</p> <p>بیشینه برگشت فنری ۱۱ μm</p>
 <p>حالت ۹</p> <p>بیشینه فشار تماس ۲۴۹ MPa</p> <p>بیشینه برگشت فنری ۷ μm</p>	 <p>حالت ۸</p> <p>بیشینه فشار تماس ۲۶۰ MPa</p> <p>بیشینه برگشت فنری ۱۷ μm</p>

شکل ۳-۱۹: مدل‌های بارگذاری-باربرداری برای بهینه‌سازی

فصل ۴ نتایج

۱-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری نمونه الف از مدل المان محدود

با توجه به شکل ۱-۴ مشخص می‌شود که نیروی اعمالی به صورت یکنواخت است. با توجه به شکل با افزایش نیرو، میزان تغییرات جمع‌شدگی کاهش می‌یابد و برگشت فنری کم می‌شود. در پیک منحنی که نیروی ۸۰ ton است، تغییرات نیرو بر حسب جمع‌شدگی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. از لحاظ مقایسه نسبت به منحنی استخراجی چانگ چان لی و همکاران [۱۳] و دیگر محققان تطابق ظاهری زیادی وجود دارد. به دلیل اینکه تکرار پذیری و دقت نمودار مشخص شود و همچنین برگشت فنری و مقدار جمع‌شدگی در هر نیرو مشخص شود، به ازای چند نیروی متفاوت رسم شده است.

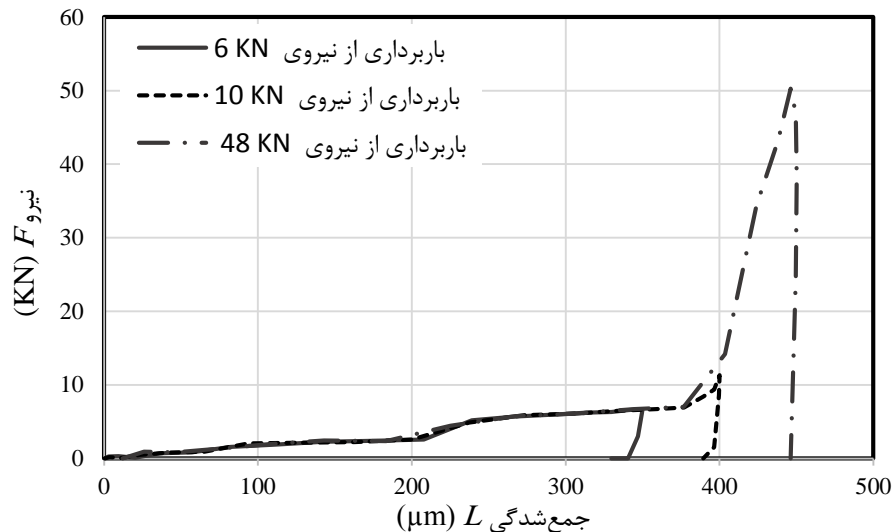


شکل ۱-۴: منحنی بارگذاری-باربرداری نمونه (الف) از مدل المان محدود به ازای چند جمع‌شدگی

مختلف

۲-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری 10° سه‌بعدی

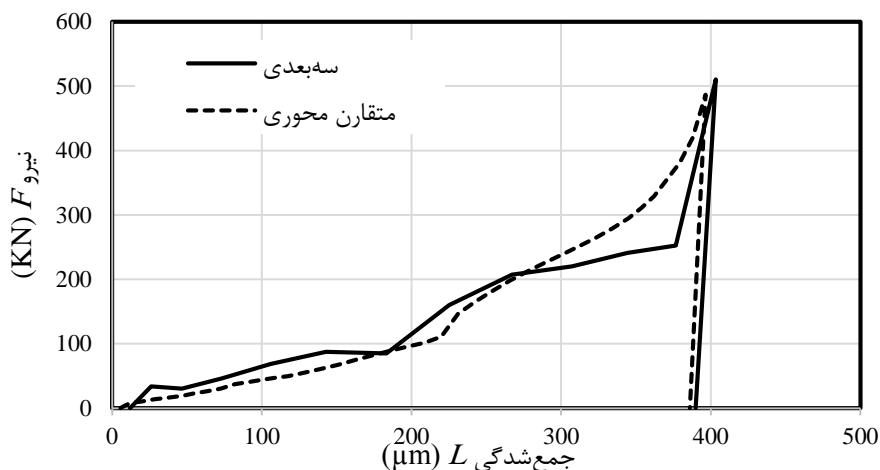
برای تائید نتایج مدل المان محدود کلی از یک مدل المان محدود 10° (شکل ۲-۴)، استفاده شده است. کلیه مشخصات مواد برای آن مشابه بارگذاری کلی است.



شکل ۲-۴: منحنی بارگذاری-باربرداری برای حالت 10° سه‌بعدی

۳-۴- مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری 10° سه‌بعدی با متقارن محوری (یکنواخت)

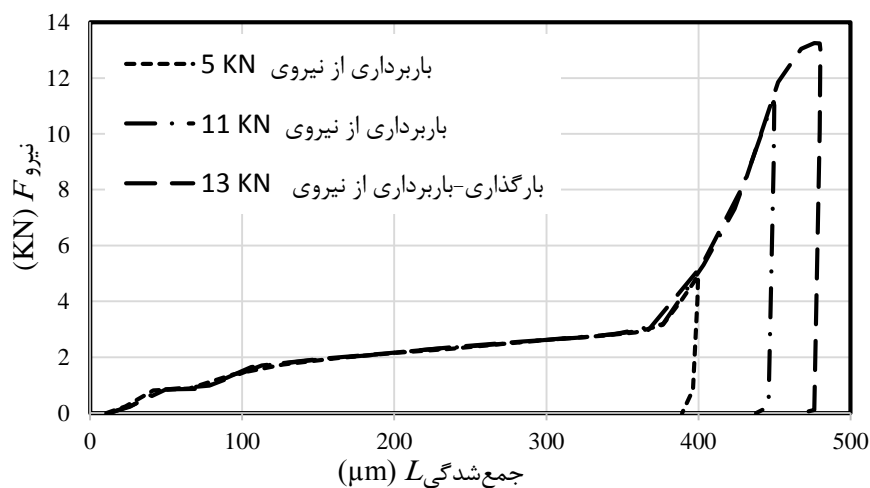
شکل ۲-۴ حالت 10° سه‌بعدی از منحنی متقارن محوری (شکل ۱-۴) است. با در نظر گرفتن جابجایی برابر مشخص می‌شود که در صورت ضرب عدد ۳۶ در مقادیر نیروی این منحنی، مقادیری مشابه به دست می‌آید (شکل ۳-۴). شکستگی‌های موجود بر روی منحنی سه‌بعدی به دلیل اعمال نیروی غیر یکسان نسبت به بارگذاری کلی (متقارن محوری) است. برای بارگذاری موضعی باید از یک مدل سه‌بعدی استفاده کرد، بنابراین تائید مدل سه‌بعدی با متقارن محوری ضروری است.



شکل ۴-۳: مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری 10° سه بعدی با مقارن محوری

۴-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری المان محدود حالت موضعی 10°

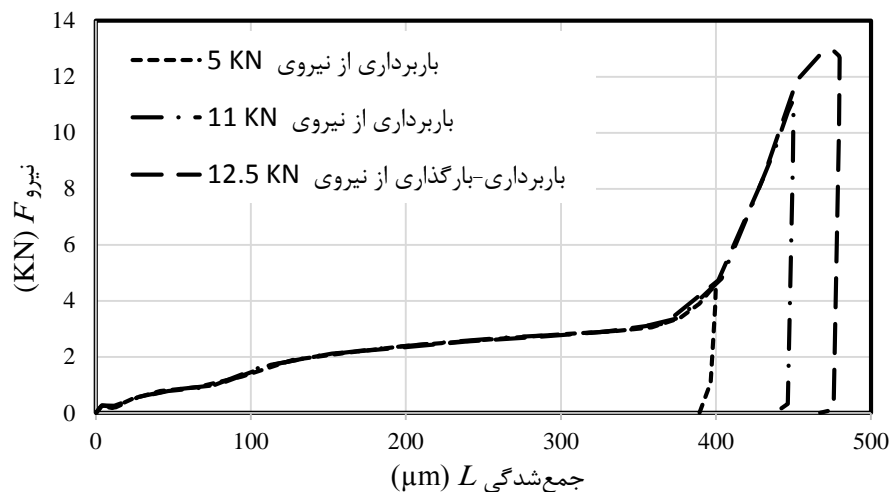
به دلیل حجم محاسباتی پایین در ابتدا حالت 10° از بارگذاری موضعی انجام شد. (شکل ۴-۴)



شکل ۴-۴: منحنی بارگذاری-باربرداری برای حالت موضعی 10°

۴-۵- منحنی بارگذاری-باربرداری برای حالت موضعی 30°

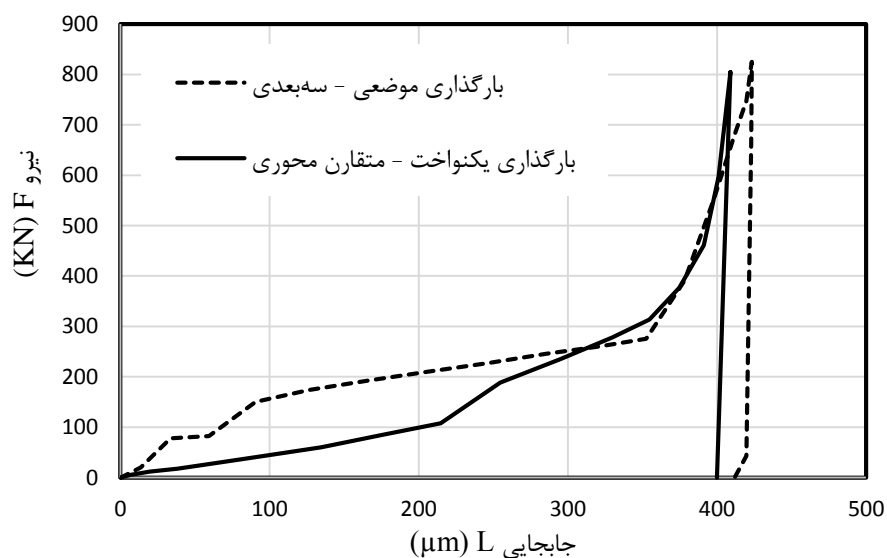
به دلیل اینکه شرایط مرزی مشخص نیست، شبیه سازی بارگذاری موضعی هم برای 10° و هم برای 30° (شکل ۴-۵)، انجام شده است. با توجه به شکل، مشخص می شود که مانند بارگذاری کلی، می توان از بارگذاری موضعی منحنی کاملاً یکنواخت و منطقی به دست آورد، که مبنایی بر امکان انجام بارگذاری موضعی به صورت تجربی است.



شکل ۴-۵: منحنی بارگذاری-باربرداری برای حالت موضعی 30°

۴-۶- مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری المان محدود موضعی با یکنواخت

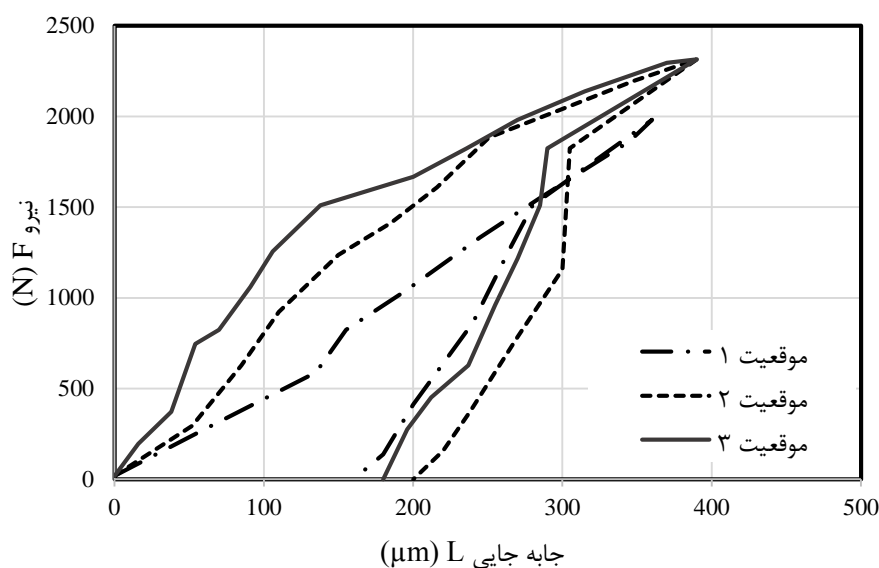
با توجه به اینکه قطر پراب برابر ۵ mm است، در صورتی که مقادیر عددی منحنی شکل ۴-۵، در عدد ۹۴ که حاصل تقسیم محیط بید بر ۵ است، ضرب شود، مقادیری نزدیک به منحنی شکل ۴-۱ که کل بید است به دست می‌آید (شکل ۴-۶). با توجه به شکل منحنی‌ها و تطابق آن‌ها با یکدیگر، اختلاف اندک آن‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۶: مقایسه منحنی بارگذاری یکنواخت و موضعی

۷-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل بدون روکش با آزمایش تجربی (نمونه الف)

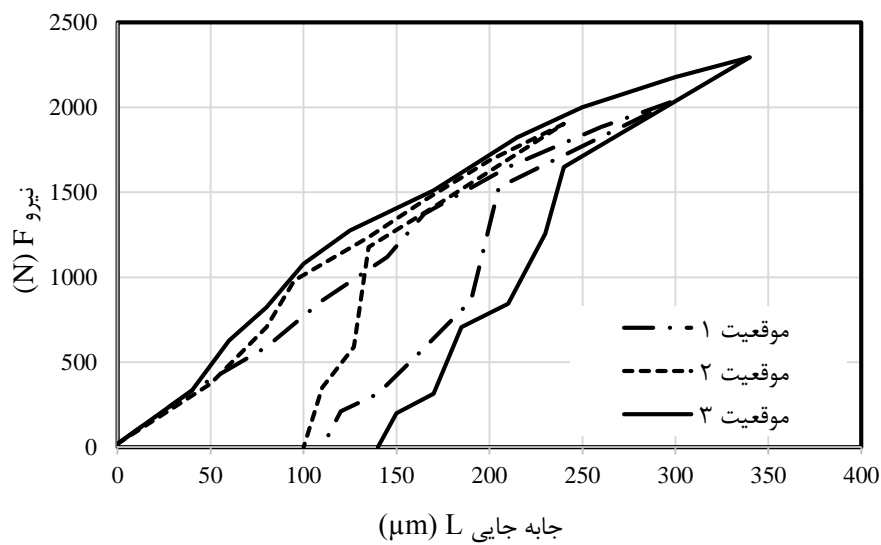
در شکل ۷-۴ به دلیل اینکه واشر در چند نقطه تحت بارگذاری قرار گرفته است، در یک نیروی برابر، تا حدی منحنی‌ها متفاوت هستند. پس از رسیدن به نیروی نهایی 2300 N ، منحنی به صورت کاملاً تیز است، که نشان دهنده تأثیر عاملی مانند یک فنریت اضافه بر فنریت بید واشر است، که باعث می‌شود که تغییرات ناگهانی ایجاد شود.



شکل ۷-۴: منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل بدون روکش (نمونه الف)

۸-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل روکش‌دار با آزمایش تجربی (نمونه ب)

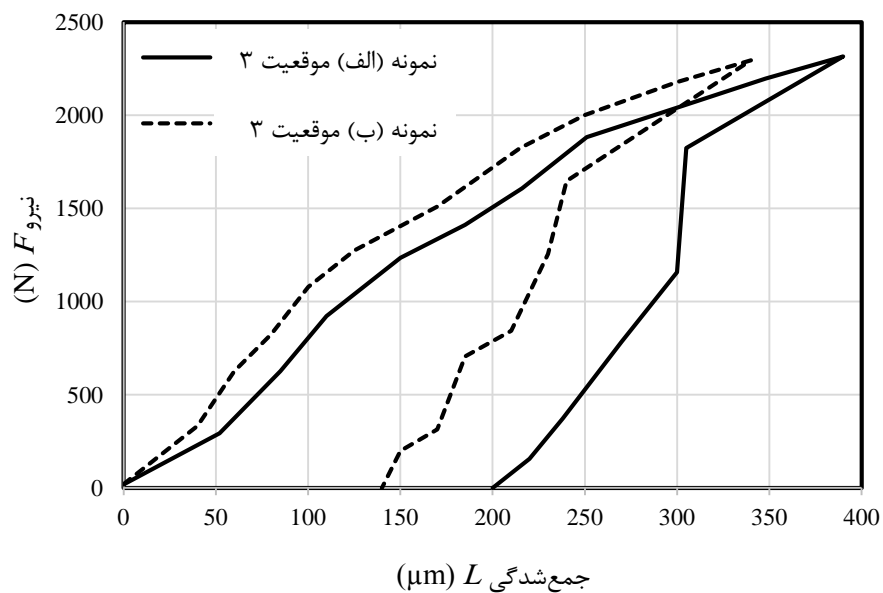
در واشر بدون روکش (نمونه الف) بیشینه جابجایی در نیروی 230 Kg حدود $390\text{ }\mu\text{m}$ ولی در حالت روکش‌دار آن (نمونه ب) بیشینه جابجایی حدود $340\text{ }\mu\text{m}$ است که نشان‌دهنده تأثیر روکش بر جابجایی است. همچنین بیشترین کرنش پلاستیک در واشر روکش‌دار (شکل ۸-۴)، حدود $140\text{ }\mu\text{m}$ ولی در واشر بدون روکش حدود $200\text{ }\mu\text{m}$ است. با توجه به اینکه برگشت فنری در واشر نمونه (الف) حدود $190\text{ }\mu\text{m}$ و در حالت روکش‌دار آن (نمونه ب) حدود $200\text{ }\mu\text{m}$ است، تفاوت عمده‌ای در کارایی آن‌ها از لحاظ برگشت فنری وجود ندارد.



شکل ۴-۸: منحنی بارگذاری-باربرداری واشر موتور دیزل روکش دار (نمونه ب)

۴-۹- مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری دو مدل مختلف واشر سرسیلندر

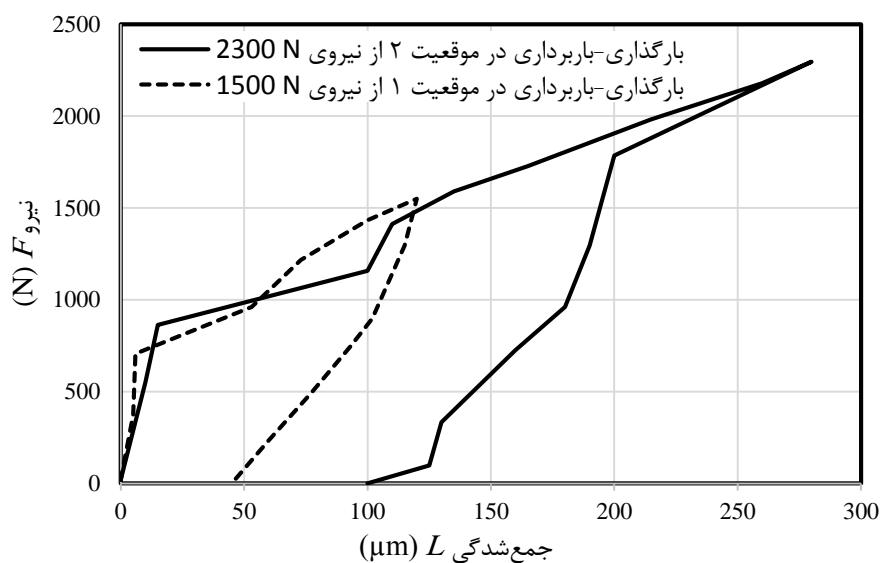
با توجه به شکل ۴-۹، بیشینه جابجایی نمونه (الف) $1/609 \text{ mm}$ و نمونه (ب) $1/56 \text{ mm}$ و برگشت فنی آنها تقریباً برابر است.



شکل ۴-۹: مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری دو نمونه مختلف واشر سرسیلندر

۱۰-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری و اثر دایره‌ای چندراهه دود با آزمایش تجربی (نمونه ت)

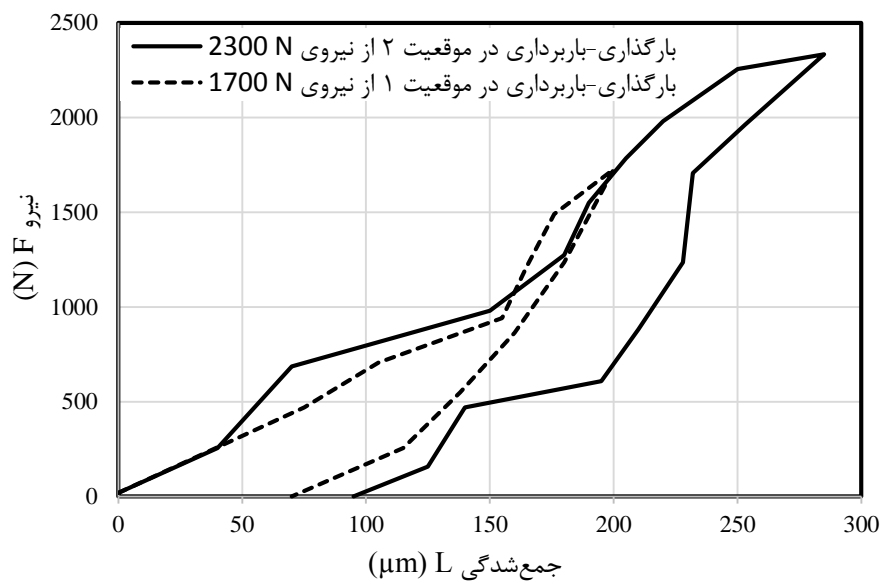
در شکل ۱۰-۴ در بارگذاری 2300 N ، برگشت سریع منحنی نشان‌دهنده تأثیر عامل خارجی بر روی آن است. از لحاظ مقایسه نسبت به منحنی و اثر دیزل، به دلیل اینکه جنس آن از استیل است، جمع-شدگی کمتری دارد. به طور مشابه مانند شکل ۱۱-۴ منحنی نیروی کمتر، دارای خطای کمی نسبت به نیروی بیشتر است و می‌تواند با افزایش نیرو کمتر شود.



شکل ۱۰-۴: منحنی بارگذاری-باربرداری و اثر دایره‌ای چندراهه دود

۱۱-۴- منحنی بارگذاری-باربرداری و اثر مربعی چندراهه دود با آزمایش تجربی (نمونه ت)

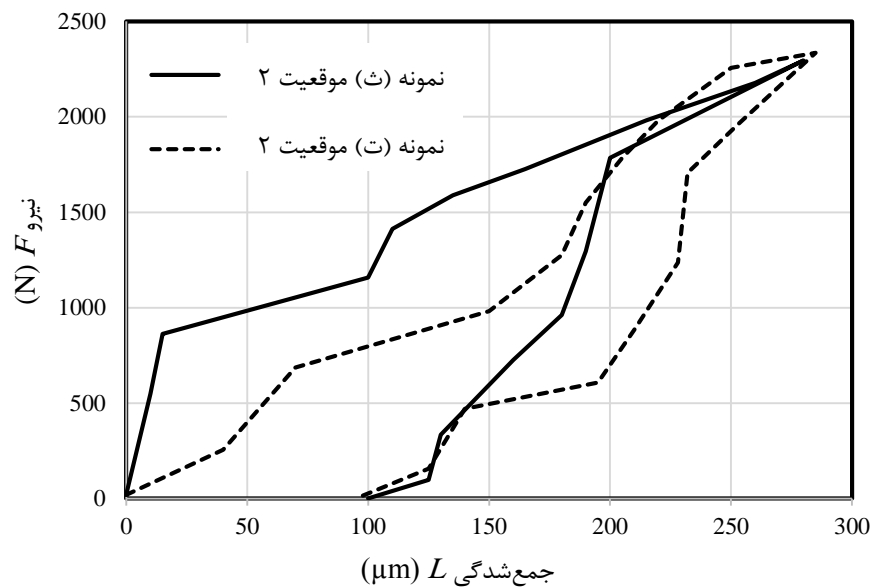
در شکل ۱۱-۴ در بارگذاری 2300 N ، برگشت سریع منحنی که نشان‌دهنده تأثیر عامل خارجی بر روی آن است، مشابه شکل ۱۰-۴ وجود دارد. از لحاظ مقایسه نسبت به منحنی و اثر دایره‌ای، تفاوت چندانی وجود ندارد، ولی شیب آن‌ها در ابتدا با هم متفاوت است.



شکل ۴-۱۱: منحنی بارگذاری-باربرداری واشر مربعی چندراهه دود

۴-۱۲- مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری دو مدل مختلف واشر چندراهه

هر دو واشر چندراهه دود مربعی و دایره‌ای دارای بید یکسان هستند و همچنین جنس هر دو آن‌ها استیل است. تنها اختلاف ممکن، می‌تواند ناشی از تفاوت قالب زمان ساخت باشد. بنابراین انتظار شکل منحنی یکسان برای هر دو واشر (شکل ۴-۱۲)، وجود دارد. در دونیرو، برای هر یک منحنی استخراج شده است. در نیروی نهایی که حدود ۲۳۰ Kg است، در هر دو حدوداً یک کرنش پلاستیک، و منحنی هر دو به هم شبیه هستند. به‌طور کلی نسبت به واشر دیزل به دلیل اینکه جنس آن از استحکام بالایی برخوردار هستند در نیروی ۲۳۰ Kg بیشینه جابجایی حدود ۲۸۵ μm است که از آن خیلی کمتر است.



شکل ۴-۱۲: مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری دو مدل مختلف واشر چندراهه

۴-۱۳- بررسی متغیرهای مؤثر در بید واشر سرسیلندر

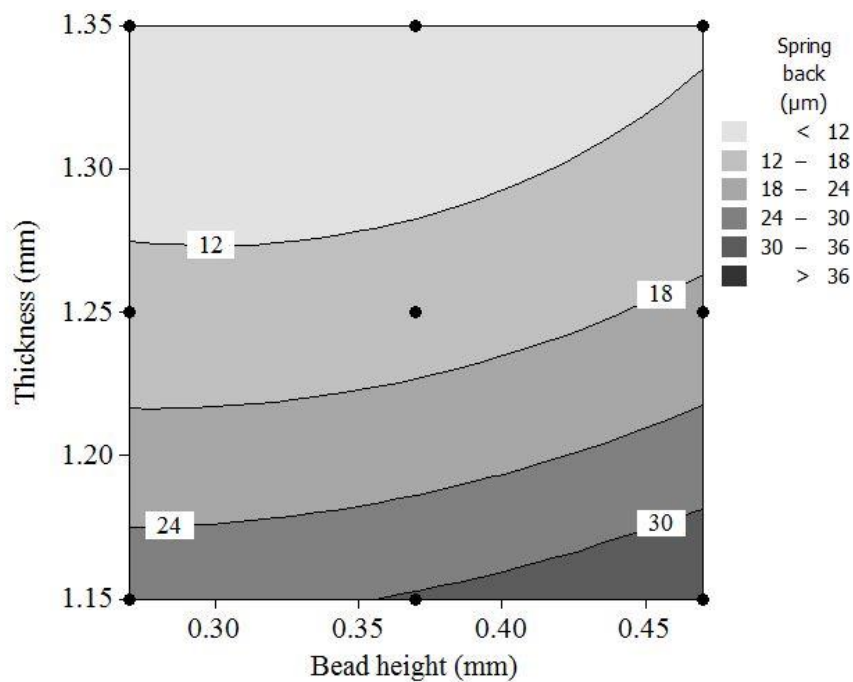
۴-۱۳-۱- بررسی تغییرات ارتفاع بید و ضخامت واشر بر روی برگشت فنری

با توجه به شکل ۴-۱۳ در ارتفاع بید 0.5 mm و ضخامت ورق 1.15 mm بیشترین برگشت فنری وجود دارد. با توجه به طیف شکل، در تمامی سطوح ارتفاع بید، هر چه ضخامت ورق کمتر باشد، برگشت فنری بیشتر می‌شود، در حالی که تأثیر تغییرات ارتفاع بید بر روی برگشت فنری، نسبت به ضخامت ورق حدود ۲۵ درصد است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، برگشت فنری بیشتر واشر با ضخامت کمتر دو دلیل دارد.

۱- به دلیل اینکه ضخامت واشر کم است، ضریب سختی فنر (K) کم می‌شود و در عوض جابجایی زیاد می‌شود.

۲- مطابق با شکل ۴-۱۵ به دلیل اینکه واشر نازک‌تر است، با اعمال نیرو حالت اعوجاجی بیشتری داشته و میزان پلاستیک شدن در واشر نازک‌تر کمتر است و بنابراین برگشت فنری بیشتری در آن وجود دارد.

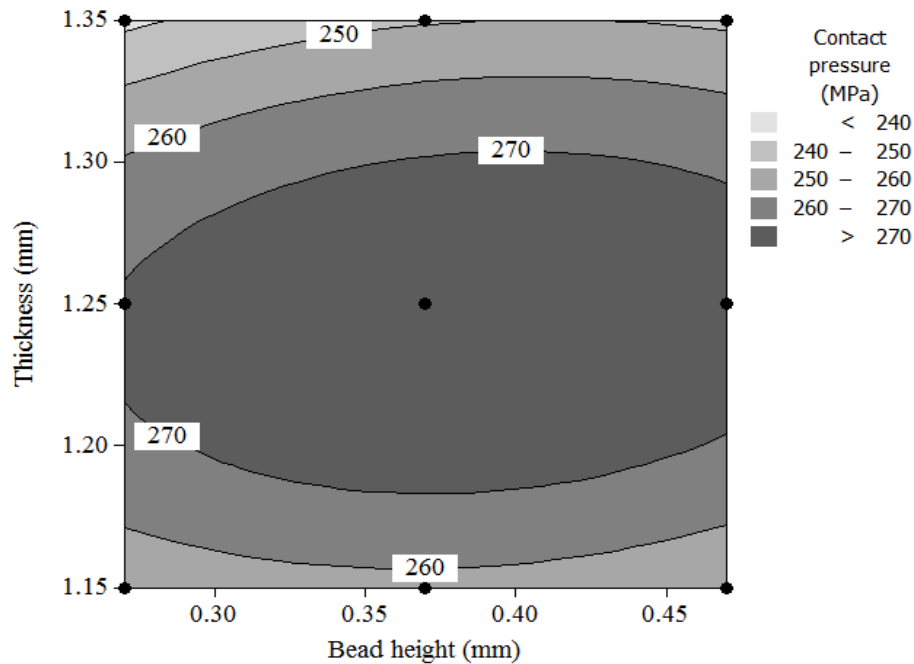
با توجه به اینکه تأثیر برگشت فنری در جبران تغییرات گپ ایجاد شده، هنگام کارکرد موتور است باید، متناسب با فشار تماس، ضخامت واشر و ارتفاع بید را استفاده کرد.



شکل ۴-۱۳: نتیجه بررسی تأثیر ضخامت ورق و ارتفاع بید بر برگشت فنری

۴-۱۳-۲- بررسی تغییرات ارتفاع بید و ضخامت واشر بر روی فشار تماس

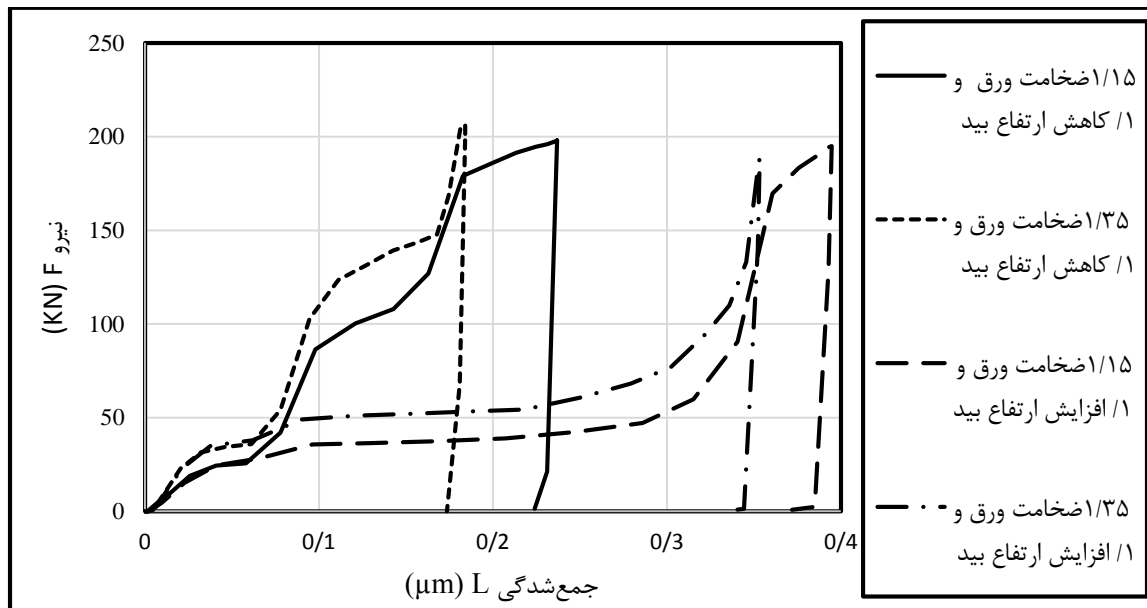
فشار تماسی (شکل ۴-۱۴)، موجب آببندی محصولات احتراق می‌شود. با توجه به اینکه نیرو در تمامی تحلیل‌های مورد نیاز برای این بررسی ثابت بوده است، برای زیاد شدن فشار تماس باید سطح مؤثر واشر کاهش یابد. سطح مؤثر واشر غالباً سطح بید می‌باشد که متناظر با عرض تماس بید است. در حالتی که واشر $1/15$ mm باشد، به علت وجود ضریب سختی فنر کم، سطح مؤثر کمتری ایجاد می‌کند، واشر با ضخامت $1/35$ mm به علت پلاستیک شدن، قادر به ایجاد فشار در حد ضخامت $1/25$ mm نیست. با توجه به اینکه ضخامت واشر اصلی حدود $1/25$ mm است، مشخص می‌شود که از لحاظ فشار آببندی در نقطه بیشینه است.



شکل ۴-۱۴: نتیجه بررسی تأثیر ضخامت ورق و ارتفاع بید بر فشار تماس

۴-۱۳-۳- بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع بید و ضخامت ورق بر روی منحنی نیرو-جمع‌شدگی

مطابق با شکل ۴-۱۵ با افزایش ارتفاع بید، نیروی یکنواختی به واشر اعمال می‌شود و همچنین میزان جمع‌شدگی زیاد است که بر اساس آن اختلاف اندک در تغییرات ضخامتی واشر قابل صرف‌نظر است و واشر کارایی خود را دارد. همچنین در واشر با ضخامت $1/35$ mm به وضوح تغییر ناگهانی منحنی و ایجاد حالت پلاستیک در فلز قابل مشاهده است. در کارکرد واقعی اهمیت یکنواختی نیروی اعمالی به اندازه فشار تماس و برگشت فنری نیست و بنابراین نمی‌توان از آن به عنوان نقطه‌ای روشن در طراحی نام برد.



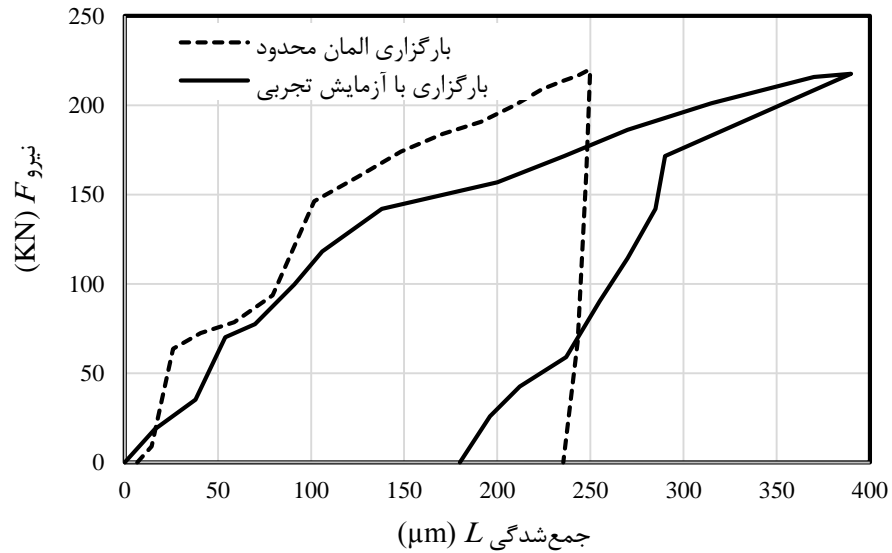
شکل ۴-۱۵: بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع بید و ضخامت ورق بر روی منحنی نیرو-جمع‌شدگی

۴-۱۴- مقایسه واشر سرسیلندر

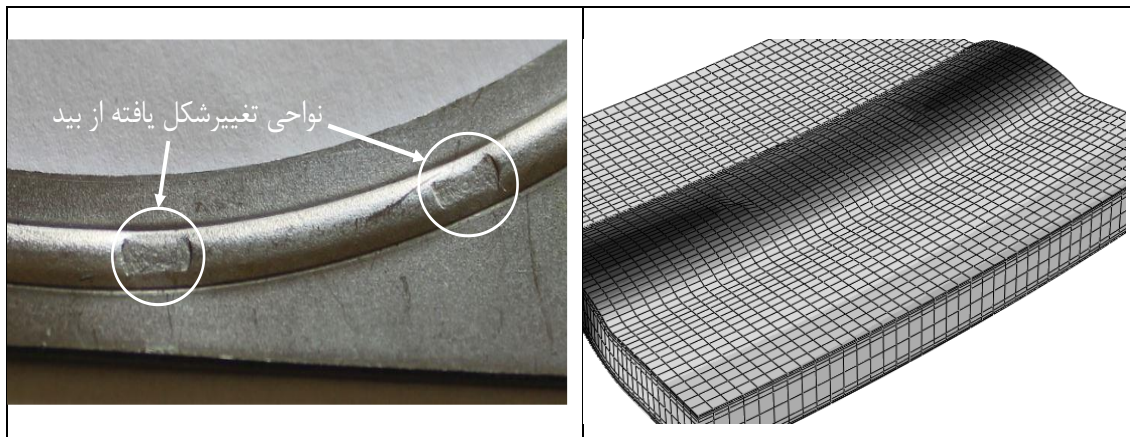
با توجه به جدول ۴-۱ در آزمون تجربی به ازای جابجایی برابر، مقدار نیروی کمتری نسبت به شبیه‌سازی المان محدود بارگذاری موضعی می‌شود (شکل ۴-۱۶) و درحالی‌که واشر تحت اعمال نیرو قرار گرفته و به سمت پایین جابه‌جا شده است میزان زیادی از جابجایی صرف تغییر شکل الاستیک شده است که به دلایل ناشناخته بودن جزئیات، شبیه‌سازی آن میسر نیست. در نیروی ۲۳۰ kg مطابق شکل ۴-۱۷ شکل بید پس از اعمال نیرو با دستگاه و مدل المان محدود یکسان است. بر این اساس می‌توان اختلاف به‌دست‌آمده در محاسبه نیروی اعمالی به واشر سرسیلندر از طریق نیروی سفت کردن سرسیلندر با مدل المان محدود را توجیه کرد. با توجه به شکل ۴-۱۶ بیشینه جمع‌شدگی به حدود $390 \mu\text{m}$ می‌رسد که به دلیل اینکه در حالت فشاری تأثیر اصطکاک و مشکلات کارکردی را نمی‌توان دلیلی برای جمع‌شدگی دانست، این حد از جمع‌شدگی به‌طور قطع یقین انجام شده است. با توجه به جدول ۴-۱ برگشت فنی از طریق استفاده از دستگاه و کولیس برای دو واشر سرسیلندر دارای خطای کمی بوده و دلیل آن موقعیت‌دهی دقیق واشر با قطعه ساخته‌شده برای موقعیت‌دهی آن است. درحالی‌که دو واشر چندراهه دود به دلیل عدم موقعیت‌دهی دقت کمتر دارند.

جدول ۴-۱: مقایسه واشرهای مختلف

واشر دایره‌ای	واشر مربعی	واشر دیزل روکش دار نمونه (ب)	واشر دیزل بدون روکش نمونه (الف)	نوع واشر
۱/۴۰۷	۱/۴۵۳	۱/۵۶	۱/۶۰۹	ضخامت بید قبل از اعمال نیرو (mm)
۱/۲۶	۱/۳۶	۱/۴۲	۱/۴۶	ضخامت بید بعد از اعمال نیرو (mm)
۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۴	تفاوت (پلاستیک) (mm)
۰/۲۸۰	۰/۲۸۵	۰/۳۴	۰/۳۹۰	ماکزیمم جابجایی دستگاه (mm)
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲	۰/۲۵	برگشت فنری با کولیس (mm)
۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲	۰/۲۱	بازگشت فنری استخراج شده از منحنی (mm)



شکل ۴-۱۶: مقایسه منحنی بارگذاری-باربرداری مدل المان محدود و دستگاه به ازای نیروی برابر



شکل ۴-۱۷: شکل بید پس از اعمال نیرو

۴-۱۵- بررسی نتایج آزمایش سفت کردن پیچ

نیروی اعمالی به واشر سرسیلندر از طریق پیچ‌های سرسیلندر در حالت‌های مختلف بررسی شد. ابتدا با استفاده از نتایج اندازه‌گیری کشش بوجود آمده در پیچ در آزمون تجربی با استفاده از حس‌گر اولتراسونیک و فرض پیچ الاستیک، بر اساس رابطه ۲-۳ نیروی اعمالی به هر پیچ در جدول ۴-۲ بدست آمد.

جدول ۴-۲: مقادیر نیروی به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی بر اساس رابطه ۲-۳ با فرض پیچ الاستیک

شماره پیچ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	نیروی کلی
نیرو (ton)	۶۵	۵۰	۷۱	۷۱	۶۵	۷۲	۲۶۲

نتایج حاکی از این است که حداقل نیروی اعمالی به هر پیچ بیش از ۵۰ ton برای پیچ‌های M16*1.5 با گرید ۱۲/۹ می‌باشد. این در حالی است که بر اساس استانداردهای پیچ زمانی که نیروی بیش از ۱۹/۰۸ به پیچ اعمال شود، پیچ پلاستیک شده و بیش از این مقدار نمی‌تواند نیروی کششی تحمل کند و پیچ تغییر طول می‌دهد [۴۳]. این بدین معنی است که پیچ‌های سرسیلندر همگی در ناحیه کارکرد پلاستیک قرار دارند. لذا محاسبات جدول ۴-۲ برای استفاده دقیق نمی‌باشد، و می‌بایست نیروی بسیار کمتری را برای بارگذاری در نظر گرفت. با استفاده از محاسبات استاتیکی و گشتاور به‌دست‌آمده هنگام

بستن پیچ‌های سرسیلندر، و جداول موجود در کتاب (جداول و استانداردهای طراحی و ماشین سازی) [۴۳]، نیروی لازم برای بستن هر پیچ به‌طور میانگین حدود ۱۳ ton است که تفاوت این مقدار هم در مقایسه با پیچ الاستیک زیاد می‌باشد. لذا با توجه به پلاستیک شدن پیچ‌های سرسیلندر، نیروی اعمالی هر پیچ برابر ۱۹/۰۸ ton تخمین زده می‌شود که برای کل واشر حدود ۷۶ ton می‌شود. این نیرو، حداکثر نیروی ممکن است. زیرا با آزمایش واشر، بر روی موتور واقعی و تحت فشار قرار گرفتن بید واشر سرسیلندر، مشخص شد که، واشر سرسیلندر با ضخامت اولیه ۱/۶۰۹ mm، پس از اعمال بار، ضخامتی حدود ۱/۲۳ mm نزدیک به ضخامت ورق (۱/۲۱ mm)، دارد. با کم کردن ضخامت اولیه از ثانویه، مشخص می‌شود که حدود ۰/۳۷۹ mm تغییرات ضخامتی وجود دارد. با توجه به نمودار المان محدود بارگذاری کلی به نظر می‌رسد که در چنین جابجایی، نیرو حدود ۴۰ ton است.

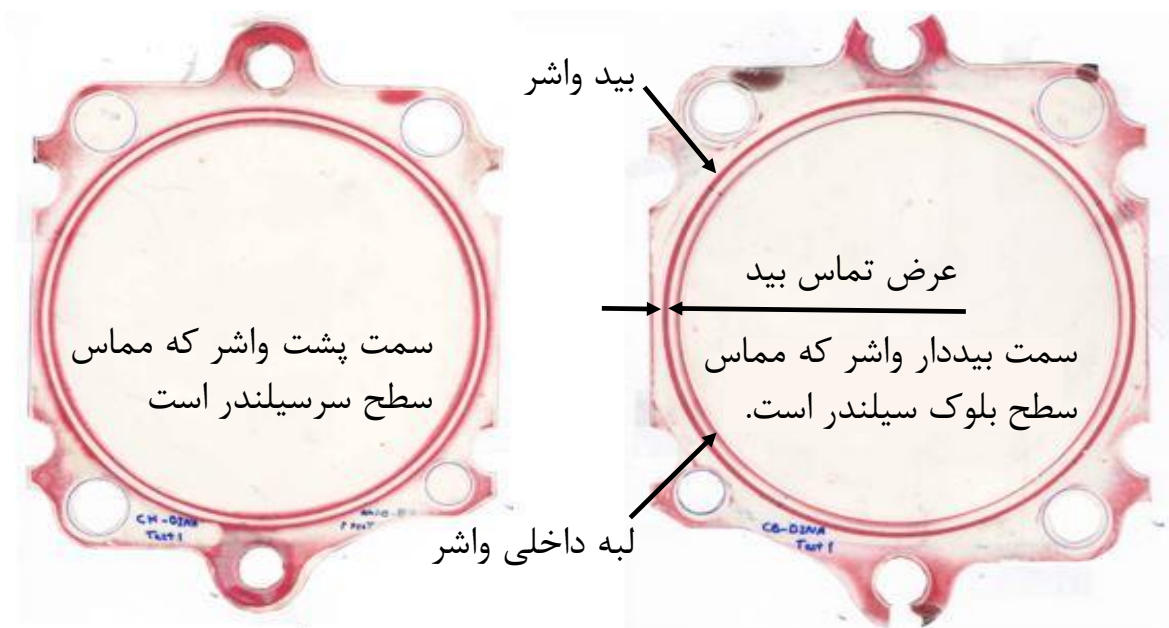
۴-۱۶- بررسی عرض تماس بید

پس از انجام آزمایش کاغذ فوجی بر روی موتور، مشخص شد که فشار اعمالی از ناحیه بید به کاغذ به صورت یکنواخت است و دارای عرض بید یکنواختی است. همچنین از نظر توزیع نیرو عملکرد مناسبی دارد. با توجه به شکل مشخص است که در ناحیه قرار گرفته در زیر پیچ‌های کناری سرسیلندر نیروی بیشتری اعمال شده است. در هنگام انجام آزمایش، لبه داخلی واشر به کاغذ فوجی برخورد می‌کند که با بررسی صورت گرفته مشخص شد که پس از اعمال نیرو به واشر، بید جمع شده و لبه داخلی واشر به سمت بیددار واشر خم می‌شود (شکل ۴-۱۸). قسمت داخلی واشر با خم شدن، به عنوان یک نیم‌بید عمل می‌کند که بید نقش عمده ایجاد فشار آب‌بندی ناشی از احتراق و لبه داخلی نقش حفظ فشار سیلندر، در حالی که موج انفجار ایجاد می‌شود را دارد.

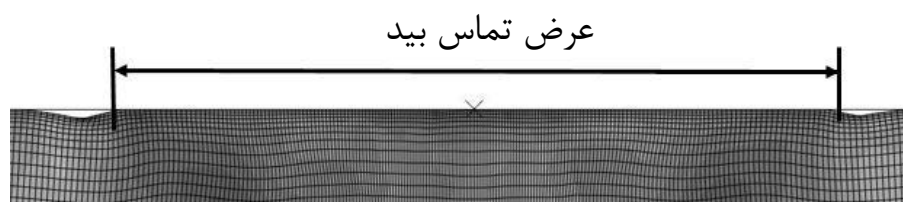


شکل ۴-۱۸: تغییرات لبه داخلی واشر سرسیلندر قبل و بعد از اعمال نیرو

با توجه به نیروی اعمالی به واشر سرسیلندر هنگام انجام این آزمایش که با استفاده از حس‌گر اولتراسونیک حداکثر ۸۰ ton است، به مقایسه عرض تماس بید در بالای واشر (شکل ۴-۱۹) در کاغذ فوجی و عرض تماس در نیروی مشابه با روش المان محدود (شکل ۴-۲۰)، پرداخته شده است.

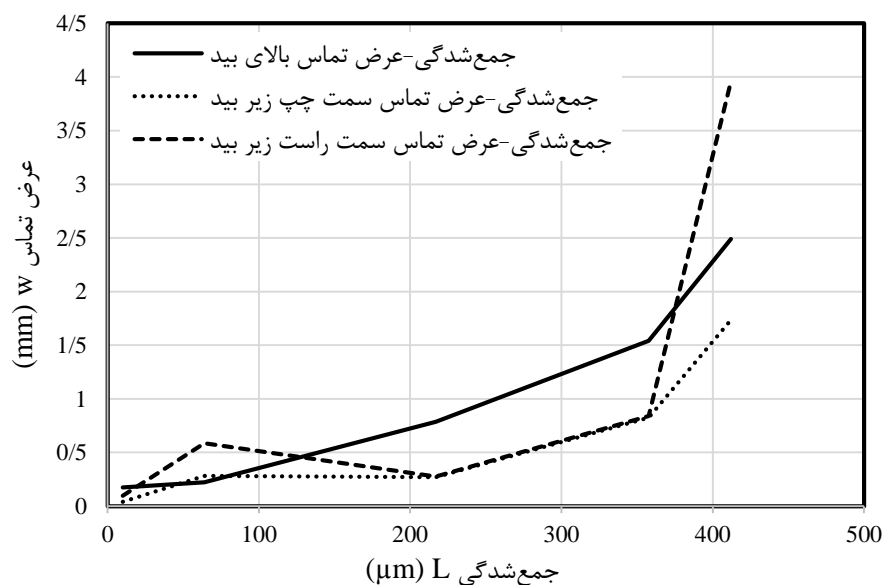


شکل ۴-۱۹: آزمایش کاغذ فوجی واشر سرسیلندر



شکل ۴-۲۰: عرض تماس بید در مدل المان محدود

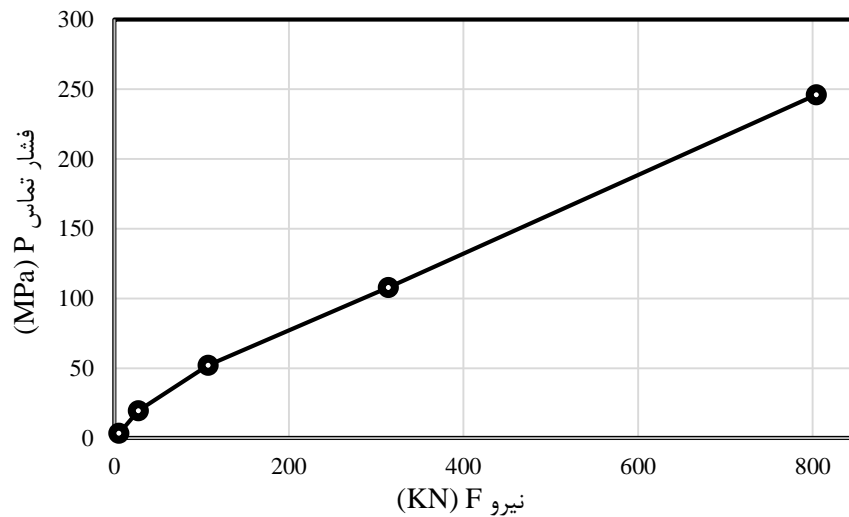
بر اساس کاغذ فوجی عرض بید بین $2/22$ mm تا $2/96$ تغییر می‌کند که تقریباً برابر با مقدار عرض بید در نیروی مشابه در مدل المان محدود با حدود $2/94$ mm است و می‌توان آن را تأییدی برای مدل المان محدود دانست. به دلیل عدم یکنواختی سطح فشار ایجاد شده بر روی کاغذ زیرین واشر، مقایسه نیروی اعمالی با استفاده از آن صحیح نیست. در شکل ۴-۲۱ مقایسه‌ای بین عرض تماس و نیروی اعمالی انجام شده است. بر اساس آن با افزایش نیرو، عرض تماس زیاد می‌شود. با دید مقایسه نسبت به بررسی صورت گرفته به وسیله موج آگوس چوپرون و همکاران [۱۲]، دقت بیشتری دارد، زیرا در بررسی آن‌ها، تغییرات عرض تماس در یک نیروی مشابه، مقدار عرض تماس به دست آمده از کاغذ فوجی، بیش از دو برابر مدل المان محدود است.



شکل ۴-۲۱: تغییرات عرض تماس در سه ناحیه بید

۴-۱۷- بررسی تغییرات فشار تماس برحسب نیرو در مدل المان محدود

مطابق با شکل ۴-۲۲ با افزایش نیرو، شیب فشار تماس کاهش و تغییرات آن به صورت خطی می‌شود که نشان می‌دهد عرض بید در ابتدای اعمال نیرو، به ناگهان تغییر کرده و سپس تغییر چندانی نداشته است.



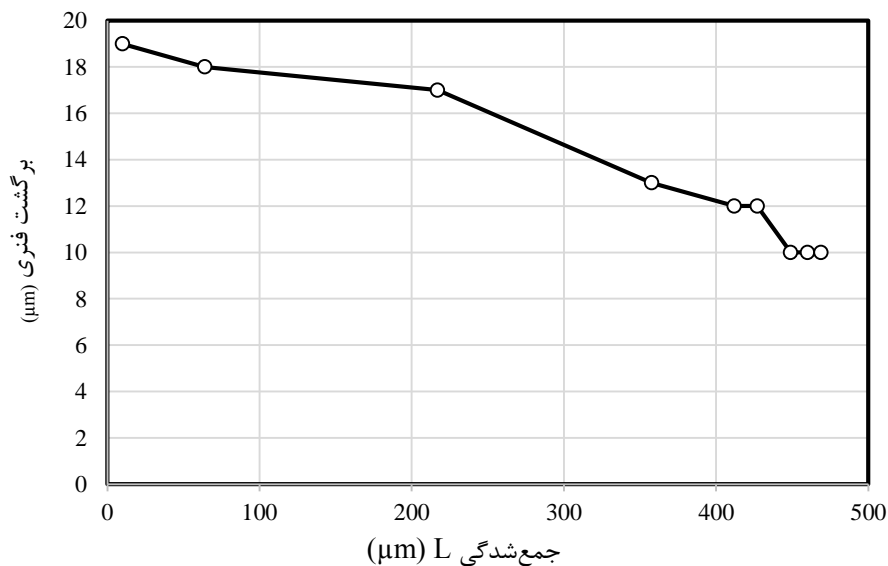
شکل ۴-۲۲: تغییرات فشار تماس بر حسب نیرو

۴-۱۸- بررسی تغییرات برگشت فنری نسبت به جمع‌شدگی در مدل المان محدود

با توجه به شکل ۴-۲۳ مشخص می‌شود که با افزایش جمع‌شدگی مقدار برگشت فنری کاهش می‌یابد.

در حالی که در محدوده جمع‌شدگی 100 تا 400 μm ، جمع‌شدگی 400 درصد شده است، برگشت

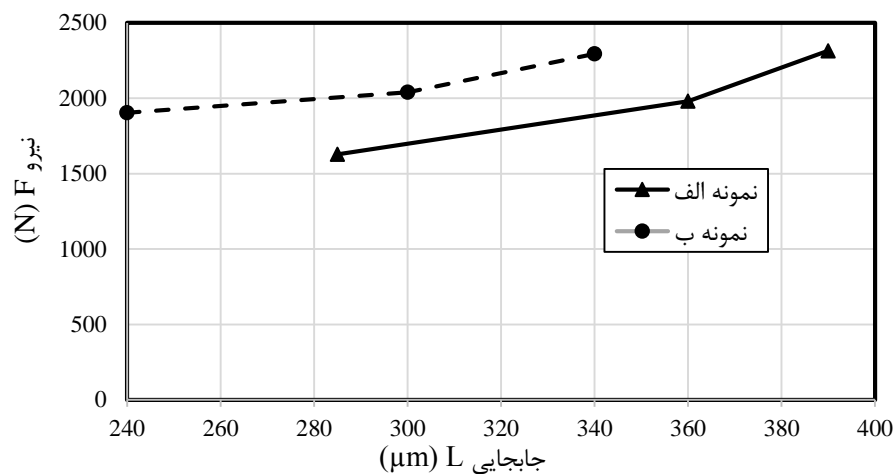
فنری 30 درصد کاهش یافته است.



شکل ۴-۲۳: تغییرات برگشت فنری نسبت به جمع‌شدگی

۴-۱۹- بررسی تأثیر اصطکاک سطح و اثر بر منحنی نیرو-جابجایی

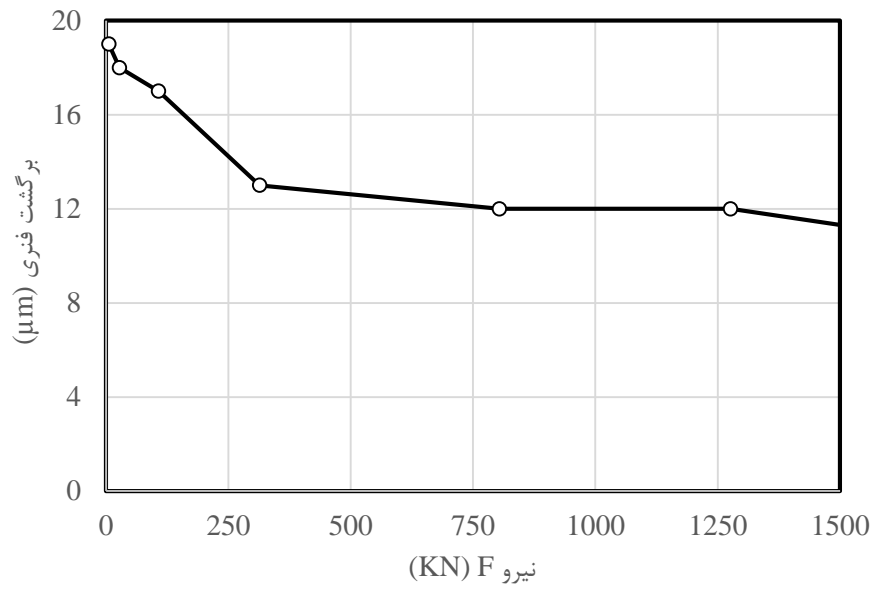
با توجه به شکل ۴-۲۴ مشخص می‌شود که در یک نیروی برابر، نمونه الف جابجایی بیشتری داشته است. سطح و اثر نمونه (الف) به صورت بدون روکش و کاملاً صیقلی است و بنابراین به دلیل عدم وجود اصطکاک زیاد، با اعمال نیرو، عرض بید باز شده و جابجایی زیادی انجام می‌شود. بر روی سطح و اثر نمونه (ب) نوع خاصی از روکش وجود دارد که نسبتاً زبر است و بنابراین تا حدی باعث ایجاد اصطکاک و در نتیجه مقاومت نسبت به باز شدن عرض بید حین اعمال نیرو به وجود می‌آید و بنابراین جابجایی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲۴: تأثیر ضریب اصطکاک سطح و اثر بر میزان جابجایی و اثر

۴-۲۰- بررسی تأثیر نیروی همبندی و اثر بر برگشت فنری در مدل المان محدود

با توجه به شکل ۴-۲۵ مشخص می‌شود که تغییرات برگشت فنری نسبت به نیرو تا نیروی کاری و اثر که حدود ۸۰ ton است به صورت نزولی است. پس از آن میزان برگشت فنری ثابت است و عملاً افزایش نیروی اعمالی تأثیری بر روی برگشت فنری ندارد.



شکل ۴-۲۵: تأثیر نیروی همبندی و اثر بر برگشت فنی

فصل ۵ - نتیجه -

گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری قسمت‌های مختلف این پایان‌نامه در این قسمت بیان شده است:

✓ با استفاده از روش المان محدود مدل متقارن محوری از واشر ایجاد و بارگذاری بر روی آن انجام شد. منحنی بارگذاری بگونه‌ای بود که در ابتدا با افزایش بار میزان جابجایی زیاد بود و بتدریج میزان جابجایی (جمع‌شدگی واشر) کاهش می‌یابد. این رفتار ضریب فنریت واشر کاملاً رفتاری غیرخطی می‌باشد. از طرفی در نیروهای بالا (حدود ۸۰ ton) که واشر به ماکزیمم مقدار جمع‌شدگی رسیده است، شیب نیرو بر حسب جمع‌شدگی به سمت بینهایت میل می‌کند. نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی با 10° (از 360°) تطابق بسیار خوبی با مدل متقارن محوری داشت که نشان می‌دهد که مدل‌سازی متقارن محوری دقت کافی برای بررسی بارگذاری کلی روی واشر را دارد و نیازی به تحلیل سه‌بعدی در این قسمت نمی‌باشد.

✓ برای بررسی بارگذاری موضعی روی واشر، دو برش 10° و 30° (از 360°) بصورت سه‌بعدی با بارگذاری موضعی تحلیل شده است. از آنجا که نتایج نیرو-جمع‌شدگی در هر دو حالت یکسان است، برش 10° که حجم محاسبات کمتری دارد، انتخاب شد. نتایج حاکی از آن است که اگر محیط بید را بر قطر پراب تقسیم نماییم و در نیروی بدست آمده از تحلیل بارگذاری موضعی ضرب کنیم، نیروی بدست آمده شباهت زیادی با بارگذاری کلی واشر خواهد داشت و عبارتی می‌تواند نمودار نیرو-جمع‌شدگی واشر را تا حد قابل قبولی پیش‌بینی کند.

- ✓ اندازه‌گیری نمودار نیرو-جمع‌شدگی بصورت موضعی مزایای قابل توجهی در صنعت می‌تواند داشته باشد که از جمله آن می‌توان به اندازه‌گیری بید در قسمت‌های مختلف واشر، بررسی واشرها با اشکال متفاوت، کنترل کیفی آسان، امکان عیب‌یابی قالب سمبه ماتریس، هزینه کم و اندازه‌گیری با قطعه مرجع نام برد. در این راستا دستگاه اندازه‌گیری منحنی مشخصه واشر با بارگذاری موضعی ساخته شده است که تا نیروی موضعی 2500 N قابل استفاده است.
- ✓ نتایج بدست آمده در دستگاه اندازه‌گیری منحنی مشخصه واشر، دارای جواب‌های نسبتاً تکرارپذیری می‌باشد ولی جابجایی اندازه‌گیری شده در یک نیروی واحد بیشتر از نتایج عددی می‌باشد. یکی از دلایل زیاد بودن جابجایی، می‌تواند وجود تاب اولیه در واشرهای تجربی موجود باشد. علاوه بر این فرم تغییر شکل پلاستیک در قطعه در نتایج تجربی و نتایج عددی شباهت قابل قبولی نسبت به هم دارند. این بدین معنا می‌تواند باشد که نوع بارگذاری عددی و رفتار پلاستیک قطعه در مقایسه با نتایج تجربی دقت قابل قبولی دارد.
- ✓ در این تحقیق تأثیر ضخامت ورق و ارتفاع بید بر روی برگشت فنری و فشار تماس مطالعه شده است. با توجه به اینکه برگشت فنری در جبران تغییرات گپ ایجاد شده هنگام کارکرد موتور بر روی فرایند آب‌بندی تأثیر زیادی دارد، می‌بایست سعی شود تا واشرها بیشترین برگشت فنری را داشته باشند. نتایج حاکی از آنست که با کاهش ضخامت ورق و افزایش ارتفاع بید برگشت فنری واشر به بیشترین مقدار خود خواهد رسید. از طرفی فشار تماس وظیفه اصلی آب‌بندی محصولات احتراق پرفشار را دارد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌داد که با افزایش ضخامت ورق فشار آب‌بندی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یافت. عبارتی بهینه ضخامت ورق برای تولید ماکزیمم فشار آب‌بندی ضخامت میانی $1/25\text{ mm}$ می‌باشد. این در حالی است که ارتفاع بید تأثیر قابل توجهی بر این فشار تماسی ندارد. علت عدم تولید فشار آب‌بندی در ضخامت‌های

کمتر ورق عدم کافی بودن ضریب فنریت است و علت عدم دستیابی به فشار آببندی بالاتر در ضخامت بالاتر واشرها پلاستیک شدن واشر طی مرحله فشردگی شناخته شد.

✓ نتایج آزمایش فشار تماسی با استفاده از کاغذ فوجی بر روی موتور، نشان می‌دهد که فشار اعمالی از ناحیه بید به کاغذ به صورت یکنواخت است و دارای عرض بید نسبتاً یکنواختی است. همچنین از نظر توزیع نیرو بیشترین مقدار فشردگی در ناحیه بید اصلی (full bead) اتفاق می‌افتد که نشان از عملکرد صحیح بید دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه نزدیک به پیچ‌ها ورق واشر دچار فشردگی زیادی شده است. نکته جالب در آزمون تجربی، اینست که لبه داخلی واشر در حین فرایند همبندی به سرسیلندر (کاغذ فوجی) برخورد می‌کند. این بدین معنی است که این لبه آزاد به مانند یک بید کمکی (half bead) در بهبود کیفیت آببندی و تولید یک نوار آببند اولیه جهت کاهش موج فشار احتراق عمل می‌کند. لذا پهنای این لبه آزاد از اهمیت زیادی در تولید یک نوار آببندی بهینه برخوردار است.

✓ نیروی اعمالی به واشر سرسیلندر از طریق پیچ‌های سرسیلندر در حالت‌های مختلف بررسی شد. ابتدا با استفاده از نتایج اندازه‌گیری کشش بوجود آمده در پیچ در آزمون تجربی با استفاده از حس‌گر اولتراسونیک و فرض پیچ الاستیک، نیروی اعمالی به هر پیچ بدست آمد. نتایج حاکی از آن است که تمامی پیچ‌ها در ناحیه پلاستیک قرار دارند. سپس با استفاده از استانداردهای موجود نیروی اعمالی هر پیچ در ناحیه پلاستیک حدود ۱۹ ton برای هر پیچ بدست آمد که در کل حدود ۷۶ ton به سرسیلندر اعمال می‌کند. این نیرو بخشی صرف فشردگی بید واشر و بخشی صرف فشردگی ورق واشر (در نواحی نزدیک پیچ‌ها) می‌شود. برای اینکه بتوان تخمینی از نیروی فشردگی بید واشر بدست آورد، تغییر شکل پلاستیک بید واشر در شرایط کارکرد واقعی موتور اندازه‌گیری شد. این تغییر شکل پلاستیک بید واشر حدود ۰/۳۷۹ mm بود که

نقطه معادل آن در نتایج المان محدود با بارگذاری کلی، نیروی فشردگی واشر برابر با ۴۰ ton را نشان می‌دهد.

✓ در این تحقیق با استفاده از دو واشر یکسان با روکش (ضریب اصطکاک زیاد) و بدون روکش (ضریب اصطکاک کم)، تأثیر اصطکاک بر منحنی مشخصه واشر بصورت تجربی پرداخته شده است. نتایج حاکی از این است که وجود اصطکاک باعث افزایش شیب نمودار نیرو-جمع‌شدگی می‌شود. دلیل این موضوع می‌توان چنین بیان کرد که با وجود اصطکاک زیاد، دهانه‌های بید تمایل کمتری به باز شدن خواهند داشت که این موضوع باعث افزایش ضریب فنریب واشر خواهد شد.

۵-۲-پیشنهاد

از آنجا که انجام این پایان‌نامه نیاز به ارتباط تنگاتنگ با صنعت از چرخه تولید تا مصرف در موتور دارد، زوایای زیادی در این تحقیق ناگفته مانده است که می‌تواند در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد. این پیشنهادات در ادامه لیست شده است:

✓ بهینه‌سازی مکانیزم اعمال بار دستگاه اندازه‌گیری نیرو-جمع‌شدگی موضعی
 ✓ اتوماسیون دستگاه اندازه‌گیری منحنی مشخصه جهت رسم لحظه‌ای نمودار نیرو-جمع‌شدگی
 برای جلوگیری relaxation

✓ انجام بارگذاری کلی جهت مقایسه دقیق‌تر با بارگذاری موضعی
 ✓ بررسی اثر دما بر عملکرد منحنی مشخصه واشر
 ✓ بررسی واشر چندلایه بدون استپر و با استپر ساده یا موج‌دار با ضخامت ورق کمتر از 0.5 mm
 ✓ شبیه‌سازی واشر سرسیلندر بصورت کامل در شرایط همبندی واقعی با وجود سرسیلندر و بلوک

منابع

- [1] R. Pohle, "Analysis of the Sealing Behavior of Cylinder Head Gaskets (CHG)," SAE Technical Paper1989.
- [2] D. M. Toth, F. Hatch, and G. Upper, "Advanced analytical techniques for the optimization of PTFE seals," SAE Technical Paper1993.
- [3] <http://www.d-series.org/forums/engine-building/141308-advanced-tech-what-makes-torque-why-do-i-care.html>. Advanced Tech [Online].
- [4] S.-S. Cho, C. Shin, C. Lee, H. Chang, and K. Lee, "Assessment of an engine cylinder head-block joint using finite element analysis," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 11, pp. 75-80, 2010.
- [5] J. S. Eagleson, "Head Gasket Finite Element Model Correlation," 2013.
- [6] ق. محسن and ن. علیرضا, "تحلیل تنش های تماسی و رفتار غیرخطی لایه بستار چندلایه فولادی به کمک روش اجزای محدود".
- [7] P. P. Jorwekar, Y. V. Birari, and M. M. Nadgouda, "Cylinder head gasket contact pressure simulation for a hermetic compressor," 2006.
- [8] F. Popielas, C. Chen, and S. Obermaier, "CAE approach for multi-layer-steel cylinder head gaskets," SAE Technical Paper 0148-7191, 2000.
- [9] F. Popielas, C. Chen, R. Ramkumar, H. Rebien, and H. Waldvogel, "CAE Approach for Multi-Layer-Steel Cylinder Head Gaskets-Part 2," SAE Technical Paper 0148-7191, 2003.
- [10] K. Ushijima, S. Haruyama, K. Kaminishi, and D.-H. Chen, "Study on Deformed Mode of Thin Metal Gasket Based on Experiment and FEM," presented at the INNOVATION AND MANAGEMENT Kitakyushu, Japan , 2000.
- [11] M. A. Choiron, S. Haruyama, and K. Kaminishi, "Optimum Design of New 25A-size Metal Gasket Considering Plastic Contact Stress," *International Journal of Modeling and Optimization*, vol. 1, pp. 146-150, 2011.
- [12] M. A. Choiron¹, Y. Kurata, S. Haruyama, Kaminishi, and K. sup, "Simulation and experimentation on the contact width of new metal gasket for asbestos substitution," 2011.
- [13] C.-C. Lee, K.-N. Chiang, W.-K. Chen, and R.-S. Chen, "Design and analysis of gasket sealing of cylinder head under engine operation conditions," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 41, pp. 1160-1174, 2005.
- [14] I. Száva, F. Dogaru, B. Varga, V. Enache, and R. Tutunea, "NUMERICAL MODELING OF THE CYLINDER-HEAD GASKET'S DISPLACEMENT FIELD, BASED ON EXPERIMENTAL DATA," 2010.
- [15] M. Srikanth and B. Balakrishnan, "Cylinder Head Gasket Analysis to Improve its Thermal Characteristics Using Advanced Fem Tool."
- [16] S. Haruyama, D. Nurhadiyanto, M. A. Choiron, and K. Kaminishi, "Surface Roughness of Flange Contact to the 25A-size Metal Gasket by using FEM Simulation," *International Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 74, pp. 665-669, 2013.
- [17] H. Ko, T. Hasegawa, S. Kitaoka, and T. Udagawa, "A Method of Measuring Contact Pressure of Cylinder Head Gasket," SAE Technical Paper 0148-7191, 2004.
- [18] D. E. Czernik and F. L. Mischczak, "A new technique to measure real time static and dynamic gasket stresses," SAE Technical Paper1991.
- [19] J. Okano, N. Kobayashi, I. Nagano, and T. Tabata, "An Example of Optimal Cylinder Head Gasket Design for Light Weight High Performance Engine," SAE Technical Paper2013.

- [20] R. Capretta and H. Ohigashi, "Design Methodology for Automotive Multi-Layer Steel Cylinder Head Gaskets," SAE Technical Paper1995.
- [21] K. Yamaguchi, A. Sato, E. Goto, R. Fujiki, Y. Kawai, and K. Nakata, "Development of a new metal cylinder head gasket," SAE Technical Paper 0148-7191, 1998.
- [22] J. S. Santner and A. Wesley, "Development of Compressive Flow Strength Testing for Gasket Materials," SAE Technical Paper 0148-7191, 1995.
- [23] S. Fukase, T. Takahashi, and J. Kimura, "Experimental study of static and dynamic behavior of the cylinder head gasket in a turbocharged diesel engine with intercooler," SAE Technical Paper 0148-7191, 1999.
- [24] M. A. Moser, "Functional Testing Devices for Gasket Materials," 0148-7191, 1983.
- [25] F. Engelking, E. Presser, and C. Ellis, "Improved Laboratory Gasket Test Methods," SAE Technical Paper1968.
- [26] T. Ishigaki, J. Kitagawa, and A. Tanaka, "New evaluation method of metal head gasket," SAE Technical Paper 0148-7191, 1993.
- [27] P. Baldissera, C. Delprete, and C. Rosso, "Numerical and experimental analysis of exhaust manifold gasket," SAE Technical Paper2006.
- [28] O. Aizawa, M. Yakushiji, and T. Uno, "Optimum sealing design of cylinder head gasket for high peak pressure diesel engines," SAE Technical Paper 0148-7191, 1994.
- [29] R. L. Whittaker, "Sealability-Its Role in Gasket Evaluation," SAE Technical Paper1985.
- [30] A. Yates and P. Dudley, "Static Testing Methods for Evaluating Head Gasket Performance," SAE Technical Paper1983.
- [31] K. Sato, T. Nishiyama, O. Murakami, K. Kunieda, and Y. Chiba, "Strength analysis of a cylinder head gasket using computer simulation," SAE Technical Paper2009.
- [32] M. Mockenhaupt, "The 1D CAE Program for Cylinder Head Gasket Design," SAE Technical Paper 0148-7191, 2003.
- [33] D. E. Czernik, J. Moerk, and F. Robbins, "The Relationship of a Gasket's Physical Properties to the Sealing Phenomenon," SAE Technical Paper1965.
- [34] E. Smoley, R. Kottmeyer, and F. Kessler, "Thermal Loads in Gasketed Joints," SAE Technical Paper1968.
- [35] T. Santra and V. K. Agarwal, "Sealing Prediction and Improvement at Cylinder Head & Block Interface under Thermo-Mechanical Loading involving Multi-Layer Steel Gasket," SAE Technical Paper 0148-7191, 2015.
- [36] M. J. Kestly, "Multiple-layer cylinder head gasket with integral pressure sensor apparatus for measuring pressures within engine cylinders," ed: Google Patents, 2004.
- [37] C. Hebert and W. Webster, "Cylinder head gasket simulation in finite element analysis," SAE Technical Paper 0148-7191, 1998.
- [38] J. H. Raub, "Structural analysis of diesel engine cylinder head gasket joints," SAE Technical Paper 0148-7191, 1992.
- [39] <http://www.fujifilm.com/products/prescale/prescalefilm/>. fujifilm [Online].
- [40] hosseini. v, azadi. m, nasiri. A, "ارزیابی لایه‌ی بستار (واشر سرسیلندر)", ed, 2010.
- [41] H. Arfa, R. Bahloul, and H. BelHadjSalah, "Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of

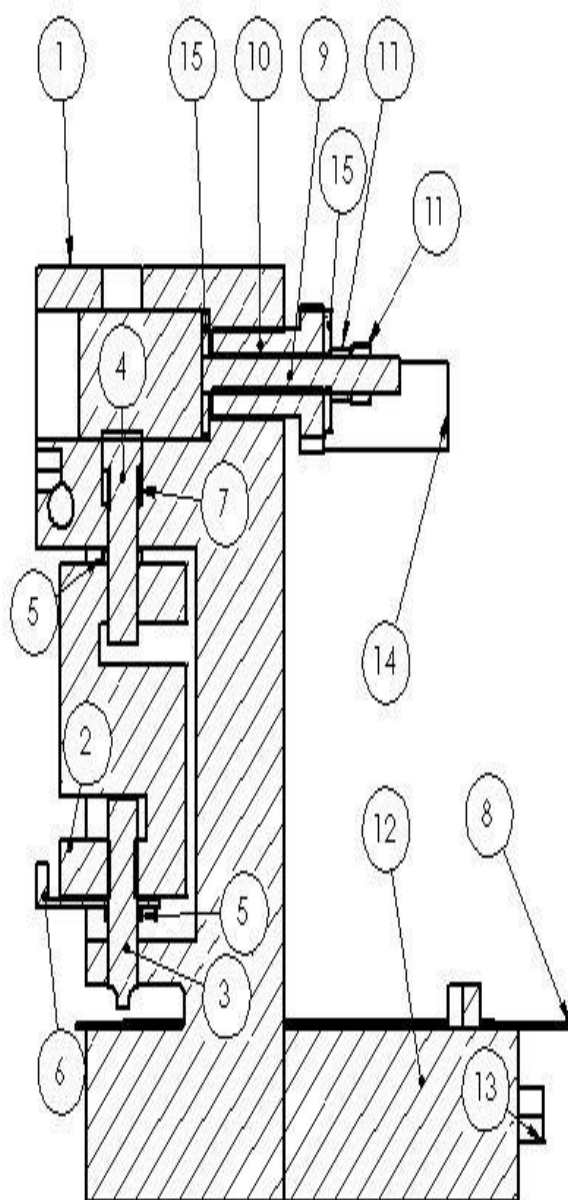
aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts," *International journal of material forming*, vol. 6, pp. 483-510, 2013.

<http://www.fatan.ir/software/abaqus/process-analysis-elements-abaqus-software> [42]

[Online]. روند تحلیل و المان‌های موجود در نرم افزار آباکوس.

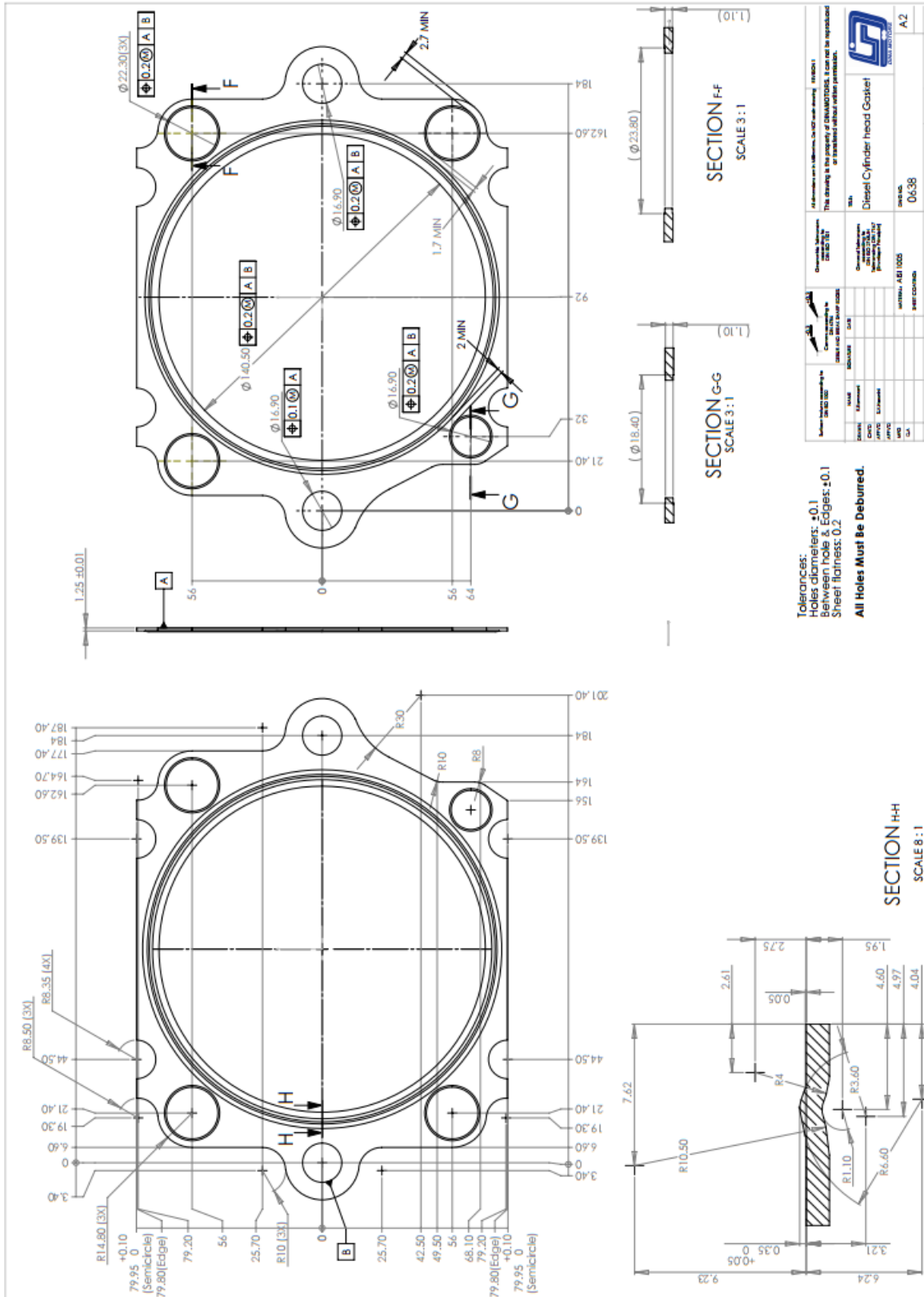
[43] U. Fischer, R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, F. Näher, S. Oesterle, *et al.*, *Mechanical and metal trades handbook*: Verlag Europa-Lehrmittel, 2010.

پیوست الف: نمای برش خورده از دستگاه اندازه گیری منحنی مشخصه واشر



شماره قطعه	تعداد	جنس	توضیحات
۱	۱	MO40	بدنه اصلی
۲	۱		نیروسنج ۲۵۰ کیلویی
۳	۱	فولاد	پراب از پیچ M12 با درجه استحکام 12.9
۴	۱	فولاد	پیچ M12 با درجه استحکام 12.9
۵	۲	فولاد	نیم مهره M12
۶	۱	فولاد	خوانش جابجایی
۷	۱	فولاد	فنر
۸	۱	فولاد	واشر
۹	۱	VCN200	
۱۰	۱	فولاد	پیچ M20
۱۱	۲	فولاد	نیم مهره M8
۱۲	۱	آلومینیم	برای موقعیت دهی واشر
۱۳	۲	فولاد	پیچ M8
۱۴	۱	فولاد	دستگیره
۱۵	۲	فولاد	واشر

پیوست ب: نقشه واشر سرسیلندر



پیوست ج: مشخصات فنی حسگر نیرو



OIML test certificate no. D09-03.18 Revision 2
 OIML C of C no. B092006-CN-00.01
 NTEP certificate no. 08-099A.1

Datasheet: H3 load cell

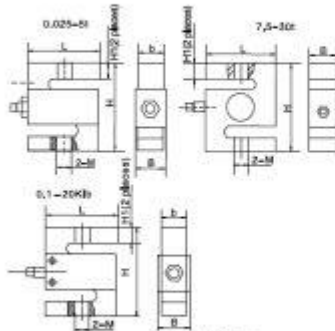
- Alloy steel IP67 "S" type load cell
- Suitable for crane and hanging hopper scales
- Tension and compression loading possible
- Also available in Imperial capacities and dimensions

Capacity	Accuracy	Part-Number
xx kg	C3	H3-C3-xxkg-xB
xx t	C3	H3-C3-xxt-xB

Specification:

Accuracy class		OIML R60 C3			OIML R60 C4			C3		
		2.0 ± 0.004 (3.0 ± 0.006 for imperial capacities)								
Output sensitivity (= FS)	mV/V	2.0 ± 0.004 (3.0 ± 0.006 for imperial capacities)								
Maximum capacity (E _{max})	t	0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5			3000, 4000			0.025, 0.05, 3.0, 5.0, 7.5, 10, 15, 20, 30		
Maximum number of load cell intervals (n _{LC})		10000			20000			10000		
Ratio of minimum LC verification interval Y = E _{min} / V _{min}		≤ ± 0.020			≤ ± 0.018			≤ ± 0.020		
Combined Error	%FS	≤ ± 1.5 % (≤ ± 1.0 % for imperial capacities)								
Minimum dead load	kg	150 % of E _{min}								
Safe overload	of E _{max}	300 % of E _{max}								
Ultimate overload	of E _{max}	300 % of E _{max}								
Zero balance	of FS	≤ ± 1.5 % (≤ ± 1.0 % for imperial capacities)								
Excitation, recommended voltage	V	5 - 12			5 - 12			5 - 12		
Excitation maximum	V	18			18			18		
Terminal resistance, input	Ω	350 ± 3.5			350 ± 3.5			350 ± 3.5		
Terminal resistance, output	Ω	351 ± 2.0			351 ± 2.0			351 ± 2.0		
Insulation impedance	MΩ	≥ 5000 (at 50VDC)			≥ 5000 (at 50VDC)			≥ 5000 (at 50VDC)		
Temperature range, compensated	°C	-10 ~ +40			-10 ~ +40			-10 ~ +40		
Temperature range, operating	°C	-35 ~ +85			-35 ~ +85			-35 ~ +85		
Element material		Alloy steel								
Ingress Protection (according to EN 60529)		IP67								
ATEX classification (optional)		IIIG Ex ia IIC T4			IIID Ex iaD20 T3°C			IIIG nL II C T4		

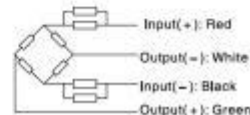
Outline Dimensions in mm



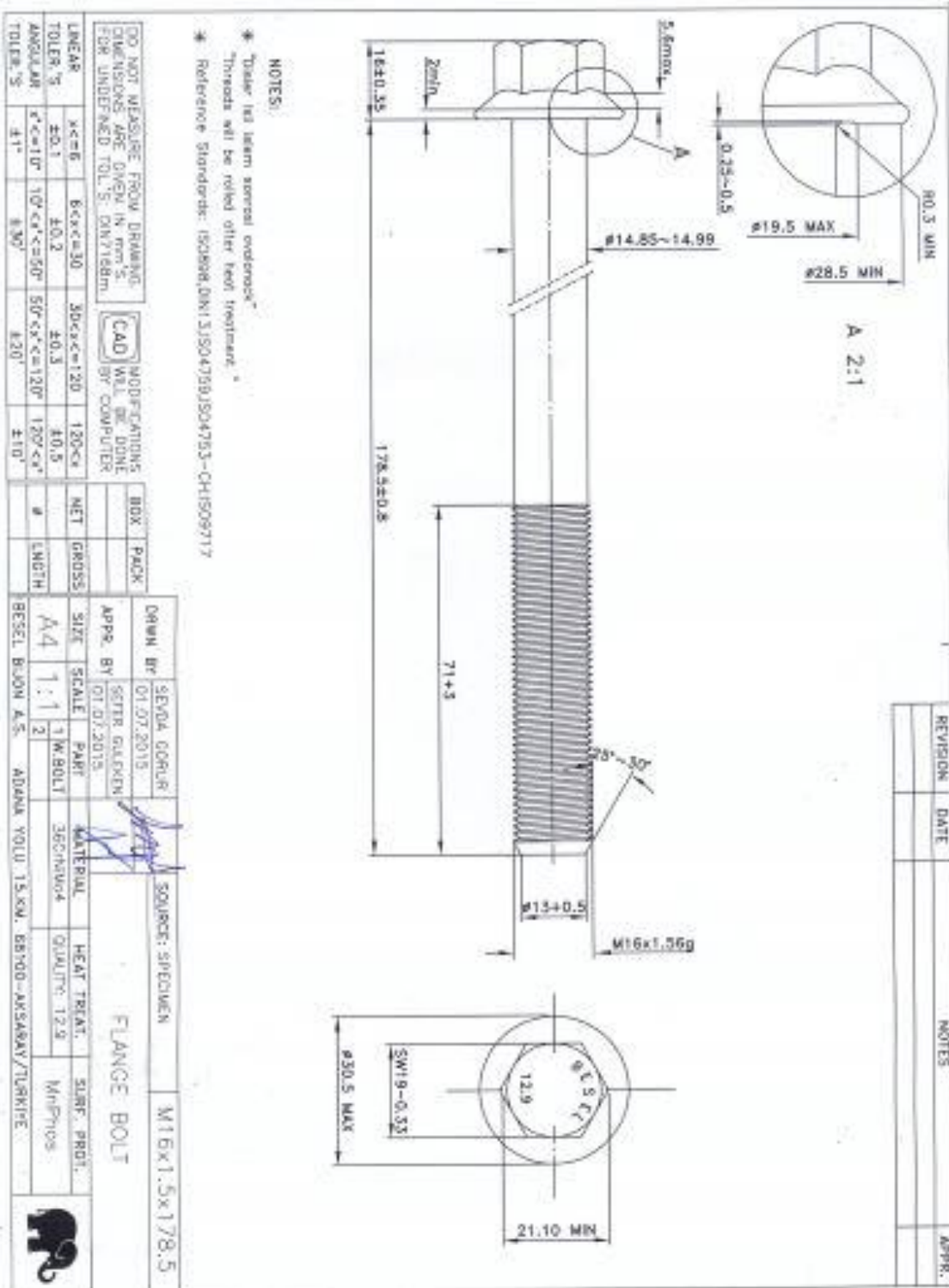
Capacity	L	H	b	B	M	H1
25 - 50kg	60,8(2,0)	76,2(3,0)	12,7(0,5)	14,6(0,57)	M8	15,7(0,62)
0,1 - 0,15t	50,8(2,0)	76,2(3,0)	18,0(0,75)	20,8(0,82)	M10 x 1,5	15,3(0,60)
0,2 - 0,75t	50,8(2,0)	76,2(3,0)	19,6(0,75)	20,8(0,82)	M12 x 1,75	13,6(0,54)
1 - 1,5t	60,8(2,0)	76,2(3,0)	25,4(1,0)	27,2(1,07)	M12 x 1,75	12,1(0,48)
2 - 5t	76,2(3,0)	101,6(4,0)	25,4(1,0)	27,2(1,07)	M20 x 1,5	20(0,78)
7,5 - 10t	129(4,0)	179(6,4)	50(1,97)	/	M30 x 3	40,2(1,58)
15 - 20t	160(6,0)	200(7,8)	50(2,36)	/	M42 x 3	51(2,01)
30t	190(7,4)	230(9,0)	80(3,15)	/	M42 x 3	57,5(2,26)
100 - 300b	60,8(2,0)	63,5(2,5)	12,7(0,5)	15,0(0,63)	1/8-20,NF	8,0(0,31)
500b	50,8(2,0)	63,5(2,5)	18,0(0,75)	22,2(0,88)	1/2-20,NF	/
0,75 - 1,5kb	50,8(2,0)	63,5(2,5)	19,6(0,75)	22,2(0,88)	1/2-20,NF	8,9(0,35)
2 - 2,5kb	60,8(2,0)	63,5(2,5)	25,4(1,0)	28,6(1,13)	1/2-20,NF	/
3kb	76,2(3,0)	101,6(4,0)	25,4(1,0)	28,6(1,13)	1/2-20,NF	14(0,55)
5 - 10kb	76,2(3,0)	101,6(4,0)	25,4(1,0)	28,6(1,13)	3/4-16,NF	15,8(0,62)
15kb	101,6(4,0)	138,7(5,5)	31,75(1,25)	34,8(1,38)	1-14,NF	27,5(1,08)
20kb	127(5,0)	177,8(7,0)	50,8(2,0)	54(2,13)	1-12,NF	38,9(1,57)

Wiring:

- Shielded, 4 conductor cable: φ5mm.
- Standard cable length: 3m(0.025~1.5t), 6m(2~30t)(0,1~20kb).
- Cable type and cable length for customer's own application are available on request.
- Shield not connected to element.



پیوست د: نقشه پیچ سرسیلندر



NOTES:
 * Unless the term "as per drawing" is used, all dimensions are given in mm's.
 * Reference Standards: ISO898, DIN 1.1504759, ISO4753-CH, ISO9717

DO NOT MEASURE FROM DRAWING DIMENSIONS ARE GIVEN IN mm'S FOR UNDEFINED TOL'S. DIN/168m.		CAD MODIFICATIONS WILL BE DONE BY COMPUTER		BOX	PACK	DRWN BY	SEDA COBUR	DATE	01.07.2015	SOURCE: SPECIMEN	M16x1.5x178.5		
LINEAR TOLER'S	±0.1	6x<c<=30	30<c<=120	120<c<=40.3	40.3	NET GROSS	SIZE	SCALE	1:1	PART	MATERIAL	HEAT TREAT.	SURF. PROT.
ANGULAR TOLER'S	±10'	10'<c<=50'	50'<c<=120'	120'<c<=4'	4'	LENGTH	A4	1:1	2	M.BOLT	36CrNiMo4	QUALITY: 12.9	Mn-Phos
RESEL BUON A.S. ADANA YOLU 15.KM. B8700-AKSAKAY/TURKIE.													



REVISION	DATE	NOTES	APPR.

Abstract

Cylinder head gasket is a key part in engine that its task is engine sealing. The target of this thesis is to obtain the characteristic curve of the cylinder head gasket in loading-unloading cycle. The experimental tests and finite element studies have been carried out on a case study gasket for a marine diesel engine. The case study is a metal gasket with a single bead on it. A test device for loading and unloading of the gasket bead was designed and fabricated. In this device the load is concentrated on a limited area of the gasket bead. Further, cylinder head gasket performance was analyzed under localized loading similar to the experimental conditions. In addition, the simulations are performed for loading of 360° bead. The simulation results show that the gasket behavior can be captured with high accuracy using the localized loading results. The experimental test results demonstrate high repeatability of the force-closure curves. Comparison of the experimental and simulation results revealed that for the same load, experimentally obtained bead displacement is more than from simulation. This difference was related to the out of flatness observed in the real gasket. The bead shape has a great influence on contact pressure and spring back. Therefore, several models of bead with different thickness and bead height were simulated and the optimum design was obtained with DOE methods. The results show that with decrease in the thickness and increase in bead height, the spring back is increased. Coating of the gasket surface increases friction and increases the inclination of characteristic curve. The results of the Fuji paper test and simulations show that under loading, an auxiliary bead is formed, that acts as a preliminary seal for the combustion pressure wave. So the width of the free edge of the gasket is a very important parameter for sealing.

Keywords: Cylinder head gasket, Gasket characteristic curve, Diesel engine, Finite element method.



University of Shahrood

Faculty of Mechanic

**Numerical and experimental determination of the characteristic curves
of a cylinder head gasket; a case study on a diesel engine gasket**

Hamed Atashzar

Supervisor:

Dr. Seyed Hadi Ghaderi

Dr. Seyed Vahid hosseini

December 2015