

صلى الله عليه وسلم



عنوان پایان نامه

# بررسی فرایند اتوفریتاژ و شرینک فیت در بالا بردن ظرفیت مکانیکی سیلندرهای تحت فشار

تهیه و تنظیم

امیر تیمور کلالی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

استاد راهنما

دکتر علیرضا ستوده

شهریور ۱۳۸۸

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که در همه مراحل  
زندگی مهربانانه من را مورد حمایت خود  
قرار دادند

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: پیش گفتار	۱
۱	مقدمه	۱
۱	مروری بر کارهای گذشته	۱
۴	اهداف تحقیق در این پایانامه	۴
۴	مروری بر بخش های مختلف پایان نامه	۴
۶	فصل دوم: مقدمه ای بر فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت	۶
۷	۱-۲ مقدمه	۷
۷	۲-۲ توزیع تنش در جدار سیلندر با در نظر گرفتن خواص الاستیک ماده	۷
۱۰	۳-۲ بررسی اثر فرایند شرینگ فیت بر افزایش تحمل فشار سیلندر	۱۰
۱۲	۴-۲ بررسی فرایند اتوفریتاژ	۱۲
۱۲	۱-۴-۲ تحلیل فرایند اتوفریتاژ با لحاظ مدل الاستیک-پلاستیک کامل [۲۸]	۱۲
۱۷	۲-۴-۲ بهینه سازی عملیات اتوفریتاژ با لحاظ مدل الاستیک-پلاستیک کامل	۱۷
۱۹	۳-۴-۲ بهینه سازی عملیات اتوفریتاژ با لحاظ مدل سخت شوندگی رمبرگ [۲۰]	۱۹
۲۳	فصل سوم: روابط حاکم بر محیط پلاستیسیته	۲۳
۲۴	۱-۳ مقدمه	۲۴
۲۴	۲-۳ مقدمات پلاستیسیته	۲۴
۲۴	۱-۲-۳ مولفه های کرنش در ناحیه پلاستیک	۲۴
۲۵	۲-۲-۳ تنش و کرنش پلاستیک موثر	۲۵
۲۶	۳-۳ معیار تسلیم	۲۶
۲۶	۱-۳-۳ نظریه تعامد تغییر شکل پلاستیک	۲۶
۲۸	۴-۳ سخت شوندگی ایزوتروپیک	۲۸
۲۸	۱-۴-۳ سخت شوندگی خطی ایزوتروپیک	۲۸
۲۹	۲-۴-۳ محاسبه ضریب $n$ در کرنش سختی ایزوتروپیک [۲۹]	۲۹
۳۰	۵-۳ سخت شوندگی سینماتیک	۳۰
۳۱	۱-۵-۳ سخت شوندگی خطی سینماتیک	۳۱
۳۱	۲-۵-۳ سخت شوندگی غیر خطی سینماتیک [۲۹]	۳۱
۳۲	۳-۵-۳ محاسبه ضریب $n$ در کرنش سختی سینماتیک	۳۲
۳۳	فصل چهارم: کدنویسی اجزاء محدود در محیط پلاستیسیته	۳۳
۳۴	۱-۴ مقدمه	۳۴
۳۵	۲-۴ مشخصات کد اجزاء محدود برای تحلیل سیلندر	۳۵
۳۶	۳-۴ مشخصات المان مستطیلی	۳۶
۳۷	۴-۴ نحوه شبکه بندی سیلندر	۳۷
۳۸	۵-۴ محاسبه ماتریس سختی $K$ و ماتریس جابجایی $u$ با فرض ماده الاستیک	۳۸
۴۲	۶-۴ کدنویسی اجزاء محدود در نظریه پلاستیسیته	۴۲
۴۴	۱-۶-۴ بررسی روش ضمنی و روش صریح در تحلیل پلاستیسیته	۴۴
۴۵	۱-۱-۶-۴ روابط پلاستیسیته حاکم در روش انتگرال گیری صریح	۴۵
۴۸	۲-۱-۶-۴ روابط پلاستیسیته حاکم در روش انتگرال گیری ضمنی	۴۸

۵۳	۲-۶-۴ آشنایی با چارچوب کد اجزاء محدود محیط پلاستیسیته
۵۳	۱-۲-۶-۴ نمو بارگذاری
۵۴	۲-۲-۶-۴ روش های عددی تحلیل های غیر خطی
۵۵	۳-۲-۶-۴ محاسبه تنش در گره های المان
۵۹	۴-۲-۶-۴ محاسبه نیروهای بین گره ای و استخراج نیروی باقیمانده
۵۹	۵-۲-۶-۴ معیار همگرایی
۶۱	فصل پنجم: شبیه سازی در نرم افزار ANSYS
۶۲	۱-۵ مقدمه
۶۲	۲-۵ مدل سازی سیلندر با شرایط تنش صفحه ای
۶۲	۱-۲-۵ هندسه مساله و قیود جابجایی مرزی
۶۳	۲-۲-۵ انتخاب المان
۶۳	۳-۲-۵ تعیین رفتار ماده
۶۴	۳-۵ مدل سازی مخزن یا سیلندر سر بسته
۶۴	۱-۳-۵ هندسه مساله و قیود جابجایی مرزی
۶۵	۲-۳-۵ انتخاب المان
۶۶	۴-۵ بهینه سازی فرایند اتوفریتاژ به کمک نرم افزار ANSYS
۶۷	۱-۴-۵ شناخت متغیرهای طراحی و متغیرهای هدف در بهینه سازی اتوفریتاژ
۶۸	۲-۴-۵ نحوه مدل کردن ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت در نرم افزار ANSYS
۶۸	۱-۲-۴-۵ زبان طراحی پارامتری نرم افزار ANSYS
۷۰	۲-۲-۴-۵ برنامه ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت
۷۲	فصل ششم: نتایج
۷۳	۱-۶ مقدمه
۷۳	۲-۶-۲ بهینه سازی فرایند شرینگ فیت
۷۴	۱-۲-۶ شعاع بهینه شرینگ فیت در سیلندر دو لایه
۷۴	۲-۲-۶ شعاع های بهینه شرینگ فیت در سیلندرهای مرکب سه لایه، چهار لایه و پنج لایه
۸۱	۳-۶ تحلیل فرایند اتوفریتاژ با لحاظ مدل سخت شوندگی
۸۲	۱-۳-۶ بدست آوردن معادله دیفرانسیلی حاکم بر سیلندر های تحت فشار
۸۳	۲-۳-۶ توزیع تنش با در نظر گرفتن کرنش سختی خطی ایزوتروپیک-تنش صفحه ای
۸۸	۳-۳-۶ توزیع تنش با در نظر گرفتن کرنش سختی غیر خطی ایزوتروپیک-تنش صفحه ای
۹۱	۴-۳-۶ توزیع تنش با در نظر گرفتن کرنش سختی خطی ایزوتروپیک-سیلندر بسته
۹۳	۵-۳-۶ توزیع تنش با در نظر گرفتن کرنش سختی غیر خطی ایزوتروپیک-سیلندر بسته
۹۵	۶-۳-۶ توزیع تنش با در نظر گرفتن سخت شوندگی خطی سینماتیک-تنش صفحه ای
۹۷	۷-۳-۶ توزیع تنش با در نظر گرفتن سخت شوندگی خطی سینماتیک-سیلندر بسته
۹۸	۴-۶ بهینه سازی ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت
۱۰۳	۵-۶ مدل سازی فرایند اتوفریتاژ به کمک کد اجزاء محدود تدوین شده
۱۰۳	۱-۵-۶ تحلیل تنش صفحه ای با در نظر گرفتن سخت شوندگی خطی ایزوتروپیک
۱۰۶	۲-۵-۶ تحلیل تنش صفحه ای با در نظر گرفتن سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک
۱۰۷	۳-۵-۶ تحلیل تنش صفحه ای با در نظر گرفتن سخت شوندگی خطی سینماتیک
۱۰۹	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۱۳.....	مراجع
۱۱۷.....	پیوست ۱
۱۲۹.....	پیوست ۲

## فهرست شکلها

- شکل ۱-۲ توزیع تنش های شعاعی و مماسی و ون میزز در ناحیه الاستیک ..... ۸
- شکل ۲-۲ تغییرات فشار داخلی مجاز نسبت به افزایش ضخامت سیلندر ..... ۹
- شکل ۳-۲ جازدن دو سیلندر به صورت شرینگ فیت ..... ۱۰
- شکل ۴-۲ تنش ون میزز در سیلندر یکپارچه و سیلندر شرینگ فیت شده ..... ۱۱
- شکل ۵-۲ نمودار تنش- کرنش درمدل الاستیک پلاستیک کامل ..... ۱۲
- شکل ۶-۲ سیلندری که تا شعاع  $C$  وارد ناحیه پلاستیک شده ..... ۱۴
- شکل ۷-۲ توزیع تنش ناشی از اعمال فشار اتوفریتاژ ..... ۱۶
- شکل ۸-۲ توزیع تنش پسماند در جداره سیلندر ..... ۱۶
- شکل ۹-۲ توزیع تنش ون میزز بر اثر فشار کاری  $20 \text{ MPa}$  در سیلندر اتوفریتاژ شده و سیلندر ساده ..... ۱۷
- شکل ۱۰-۲ نمودار تنش-کرنش درمدل سخت شوندهگی رمبرگ ..... ۱۹
- شکل ۱۱-۲ تقسیم شدن سیلندر به دو ناحیه الاستیک و پلاستیک بر اثر فشار اتوفریتاژ ..... ۲۰
- شکل ۱۲-۲ مقایسه تنش ون میزز در سیلندر اتوفریتاژ شده با سیلندر ساده [۲۰] ..... ۲۲
- شکل ۱-۳ تجزیه کرنش الاستیک و پلاستیک [۲۹] ..... ۲۵
- شکل ۲-۳ نظریه تعامد و چگونگی تجزیه مولفه ای کرنش پلاستیک [۲۹] ..... ۲۷
- شکل ۳-۳ شکل سخت شوندهگی ایزوتروپیک [۲۹] ..... ۲۸
- شکل ۴-۳ شکل کرنش خطی ایزوتروپیک [۲۹] ..... ۲۸
- شکل ۵-۳ سخت شوندهگی ایزوتروپیک و بزرگ شدن سطح تسلیم [۲۹] ..... ۳۰
- شکل ۶-۳ سخت شوندهگی سینماتیک و جابجا شدن سطح تسلیم [۲۹] ..... ۳۰
- شکل ۷-۳ شکل شماتیک سخت شوندهگی غیرخطی سینماتیک [۲۹] ..... ۳۲
- شکل ۱-۴ نمایش المان مستطیلی چهار گره ای در مختصات محلی ..... ۳۶
- شکل ۲-۴ نحوه تحلیل سازه های با تقارن محوری [۳۲] ..... ۳۷
- شکل ۳-۴ نحوه شبکه بندی ضخامت سیلندر در حالت سیلندر سر باز ..... ۳۸
- شکل ۴-۴ نمایش استخراج کرنش پلاستیک (الف) روش ضمنی (ب) روش صریح [۳۲] ..... ۴۵
- شکل ۵-۴ کرنش سختی رابطه رمبرگ ..... ۴۶
- شکل ۶-۴ اصلاح تنش آزمایشی به کمک پارامتر  $R$  [۳۱] ..... ۵۶
- شکل ۷-۴ اصلاح تنش آزمایشی و کوچک کردن نمو تنش به کمک پارامتر  $m$  [۳۵] ..... ۵۷
- شکل ۱-۵ قطاعی از سیلندر برای تحلیل تنش صفحه ای ..... ۶۳
- شکل ۲-۵ نمایش قید شرط مرزی متقارن [۳۶] ..... ۶۳
- شکل ۳-۵ نمایش المان PLANE 183 [۳۶] ..... ۶۴
- شکل ۴-۵ مدل هندسی مخزن ..... ۶۵
- شکل ۵-۵ نمایش المان SOLID 186 [۳۶] ..... ۶۵
- شکل ۶-۵ شبکه بندی قطعه مورد تحلیل ..... ۶۶
- شکل ۷-۵ تحلیل جداگانه دو سیلندر برای مدلسازی ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت ..... ۷۱
- شکل ۱-۶ عملیات شرینگ فیت در سیلندر سه لایه ..... ۷۵
- شکل ۲-۶ توزیع تنش در سیلندر یکپارچه بر اثر فشار کاری  $64 \text{ MPa}$  ..... ۷۷
- شکل ۳-۶ توزیع تنش در دو لایه بر اثر فشار کاری  $80 \text{ MPa}$  ..... ۷۸
- شکل ۴-۶ توزیع تنش در سیلندر سه لایه بر اثر فشار کاری  $86/58 \text{ MPa}$  ..... ۷۸

- شکل ۵-۶ توزیع تنش در سیلندر چهار لایه بر اثر فشار کاری  $90/16 \text{ MPa}$  ..... ۷۹
- شکل ۶-۶ توزیع تنش در سیلندر پنج لایه بر اثر فشار کاری  $92/4 \text{ MPa}$  ..... ۷۹
- شکل ۷-۶ تغییرات بیشترین فشار کاری مجاز نسبت به تعداد لایه های سیلندر مرکب ..... ۸۰
- شکل ۸-۶ نمودار تنش- کرنش آلومینیوم [۲۰] ..... ۸۵
- شکل ۹-۶ نمودار حساسیت به مش برای تنش صفحه ای ..... ۸۶
- شکل ۱۰-۶ توزیع تنش در سیلندری با مشخصات جدول (۷-۶) و تحت فشار  $100 \text{ MPa}$  ..... ۸۶
- شکل ۱۱-۶ توزیع کرنش پلاستیک در جدار سیلندر با مشخصات جدول (۷-۶) بر اثر فشار داخلی  $100 \text{ MPa}$  ..... ۸۷
- شکل ۱۲-۶ توزیع تنش پسماند بعد از باربرداری در جدار سیلندر ..... ۸۷
- شکل ۱۳-۶ توزیع تنش در سیلندری با مشخصات جدول (۹-۶) و تحت فشار  $100 \text{ MPa}$  ..... ۸۹
- شکل ۱۴-۶ توزیع کرنش پلاستیک در جدار سیلندر با مشخصات جدول (۹-۶) بر اثر فشار داخلی  $100 \text{ MPa}$  ..... ۹۰
- شکل ۱۵-۶ توزیع تنش پسماند بعد از باربرداری در جدار سیلندر ..... ۹۰
- شکل ۱۶-۶ توزیع تنش در سیلندر بسته با مشخصات جدول (۱۰-۶) ..... ۹۲
- شکل ۱۷-۶ توزیع تنش پسماند در سیلندر بسته با مشخصات جدول (۱۰-۶) ..... ۹۳
- شکل ۱۸-۶ توزیع تنش در سیلندر بسته با مشخصات جدول (۹-۶) ..... ۹۴
- شکل ۱۹-۶ توزیع تنش پسماند در سیلندر بسته با مشخصات جدول (۹-۶) ..... ۹۴
- شکل ۲۰-۶ توزیع تنش با فرض سخت شوندگی سینماتیک ماده با مشخصات جدول (۱۱-۶) ..... ۹۶
- شکل ۲۱-۶ توزیع کرنش پلاستیک با فرض سخت شوندگی سینماتیک طبق مشخصات جدول (۱۱-۶) ..... ۹۶
- شکل ۲۲-۶ شماتیک ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت ..... ۹۹
- شکل ۲۳-۶ مقایسه تنش ون میزز در جداره سیلندر ساده، اتوفریتاژ شده و مرکب اتوفریتاژ شده ..... ۱۰۳
- شکل ۲۴-۶ نمودار حساسیت به مش مساله مورد تحلیل در کد تولیدی ..... ۱۰۴
- شکل ۲۵-۶ توزیع تنش با توجه به مشخصات جدول (۱۶-۶) و (۱۷-۶) ..... ۱۰۵
- شکل ۲۶-۶ توزیع تنش پسماند با توجه به مشخصات جدول (۱۶-۶) و (۱۷-۶) ..... ۱۰۵
- شکل ۲۷-۶ توزیع تنش با توجه به مشخصات جدول (۹-۶) و (۱۷-۶) با فرض کرنش سختی غیر خطی ..... ۱۰۶
- شکل ۲۸-۶ توزیع تنش پسماند با در نظر گرفتن کرنش سختی غیر خطی ..... ۱۰۷
- شکل ۲۹-۶ توزیع تنش با توجه به مشخصات جدول (۱۸-۶) و (۱۹-۶) ..... ۱۰۸
- شکل ۳۰-۶ توزیع تنش پسماند با در نظر گرفتن کرنش سختی سینماتیک ..... ۱۰۸



## فهرست جداول

جدول ۱-۲	مشخصات سیلندر یکپارچه.....	۱۱
جدول ۲-۲	مشخصات سیلندر دو لایه تحت عملیات شرینگ فیت.....	۱۱
جدول ۳-۲	مشخصات سیلندر تحت اتوفریتاژ.....	۱۶
جدول ۴-۲	مشخصات سیلندر با تبعیت از مدل سخت شوندگی رمبرگ طبق رابطه (۲-۲۵).....	۲۲
جدول ۱-۴	جدول رده بندی تحلیل های غیر خطی [۳۴].....	۵۳
جدول ۱-۵	عملگرهای زبان APDL.....	۶۹
جدول ۲-۵	توابع موجود در APDL.....	۷۰
جدول ۱-۶	مشخصات سیلندر دو لایه تحت عملیات شرینگ فیت.....	۷۴
جدول ۲-۶	مشخصات سیلندر سه لایه تحت عملیات شرینگ فیت.....	۷۵
جدول ۳-۶	شعاع های بهینه فرایند شرینگ فیت برای سیلندر های چند لایه.....	۷۶
جدول ۴-۶	مشخصات سیلندر.....	۷۷
جدول ۵-۶	شعاعهای بهینه شرینگ فیت.....	۷۷
جدول ۶-۶	بیشترین فشار مجاز در سیلندرهایی مرکب.....	۸۰
جدول ۷-۶	جدول مشخصات سیلندر مورد بررسی.....	۸۶
جدول ۸-۶	ترکیب آلیاژی سیلندر مورد تحلیل [۲۰].....	۸۹
جدول ۹-۶	جدول مشخصات سیلندر مورد بررسی [۲۰].....	۸۹
جدول ۱۰-۶	جدول مشخصات مخزن مورد بررسی.....	۹۲
جدول ۱۱-۶	جدول مشخصات سیلندر مورد بررسی.....	۹۶
جدول ۱۲-۶	پارامترهای طراحی ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت.....	۹۹
جدول ۱۳-۶	پارامترهای بهینه ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت طبق مشخصات جدول (۲-۴).....	۱۰۲
جدول ۱۴-۶	انواع تحلیل انجام شده توسط کد اجزاء محدود تولیدی.....	۱۰۳
جدول ۱۵-۶	جدول مشخصات مخزن مورد بررسی.....	۱۰۴
جدول ۱۶-۶	مشخصات سیلندر مورد تحلیل با کد تولیدی.....	۱۰۴
جدول ۱۷-۶	جدول مشخصات مخزن مورد بررسی.....	۱۰۸
جدول ۱۸-۶	مشخصات سیلندر مورد تحلیل با کد تولیدی.....	۱۰۸

## فهرست علائم

$\nu$	ضریب پواسون
$E$	مدول الاستیسیته
$\sigma_r$	تنش شعاعی
$\sigma_\theta$	تنش مماسی
$\sigma_z$	تنش محوری
$\sigma_e$	تنش معادل
$\sigma_{y0}$	تنش تسلیم اولیه
$\sigma_y$	تنش تسلیم
$\sigma_{von}$	تنش ون میزز
$S$	تنش انحرافی
$\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$	مولفه های کرنش کل در راستای شعاعی، مماسی، محوری
$\epsilon_e$	کرنش معادل کل
$\epsilon_r^p, \epsilon_\theta^p, \epsilon_z^p$	مولفه های کرنش پلاستیک در راستای شعاعی، مماسی، محوری
$\epsilon_e^p$	کرنش معادل پلاستیک (کرنش موثر)
$\epsilon_r^e, \epsilon_\theta^e, \epsilon_z^e$	مولفه های کرنش الاستیک در راستای شعاعی، مماسی، محوری
$r$	شعاع سیلندر
$P_w$	فشار کاری
$P_a$	فشار اتوفریتاژ
$P_{sh}$	فشار شرینگ فیت
$d\lambda$	ضریب پلاستیسیته
$x$	پارامتر سخت شوندگی در سخت شوندگی سینماتیک
$c$	ثابت سخت شوندگی
$C$	ماتریس سختی الاستیک
$C^{ep}$	ماتریس سختی الاستیک-پلاستیک
$N_i$	توابع شکل
$h_p$	شیب نمودار تنش-کرنش پلاستیک
$\delta$	تداخل قطری در فرایند شرینگ فیت

## فصل اول: پیش گفتار

## مقدمه

مخازن تحت فشار کاربردهای مختلفی در نیروگاههای هسته ای، صنایع غذایی، صنایع نظامی، نفت، حمل سوخت و گازهای فشرده<sup>۱</sup> دارند و این نیاز روزافزون صنایع باعث تمرکز مهندسين بر روی این بخش از طراحی مهندسی شده است. از طرفی لزوم کاهش قیمتها و استفاده بهینه از مواد محققان را بر آن داشت که خود را محدود به روشهای مرسوم الاستیک نکرده و رهیافت الاستیک-پلاستیک که استفاده موثرتر از مواد موجود را امکان پذیر می سازد مورد توجه قرار دهند. اتوفریتاژ<sup>۲</sup> یک فرایند الاستیک-پلاستیک شناخته شده است که موجب افزایش تحمل فشارمخازن جدار ضخیم می گردد. همچنین عملیات شرینگ فیت<sup>۳</sup> نیز یکی از روش های قدیمی برای تقویت سیلندر های تحت فشار بوده که بیشتر در توپ های جنگی و ادوات نظامی مورد استفاده قرار می گیرد.

## مروری بر کارهای گذشته

اولین مشاهده از اثر تنشهای پس ماند در بالا بردن عمر خستگی سیلندرهای تحت فشار، در سال ۱۸۴۷ توسط یک افسر توپخانه آمریکا به نام جکسون رامدن<sup>۴</sup> ثبت شد [۱]. او بدون اینکه از نظر علمی اثر تنش های پسماند را در تحکیم سیلندرهای تحت فشار بداند، پروسه ای برای ساخت لوله های توپ طراحی کرد. بدین صورت که بعد از قالب گیری، با خنک کردن سریع درون لوله توپ به کمک آب، ایجاد نوعی تنش پسماند در جدار داخلی سیلندر می نمود. ولیکن تحقیقات جدی در ارتباط با اثرات فرایند اتوفریتاژ تقریباً ۱۰۰ سال بعد در سال ۱۹۵۰ آغاز شد.

فرایند اتوفریتاژ یک فرایند الاستیک-پلاستیک است که موجب افزایش مقاومت مخازن جدار ضخیم و یا به عبارت دیگر افزایش تحمل فشار آن می شود. اساس فرایند اتوفریتاژ بر این است که ابتدا سیلندر تحت یک فشار داخلی بالا قرار می گیرد، این فشار که فشار اتوفریتاژ<sup>۵</sup> نامیده می شود باعث تولید جریان پلاستیک در سطح داخلی و قسمتی از جداره سیلندر می شود. حذف این فشار موجب تولید تنشهای پسماند فشاری در ناحیه پلاستیک و تنشهای کششی در ناحیه الاستیک می گردد. در نتیجه وقتی یک مخزن اتوفریتاژ شده تحت فشار کاری<sup>۶</sup> قرار بگیرد قبل از ایجاد تنش کششی در جدار سیلندر باید بر تنشهای پسماند فشاری موجود در مخزن غلبه کند و این موضوع باعث افزایش ظرفیت فشاری مخزن می گردد.

<sup>1</sup> CNG

<sup>2</sup> Autofrettage

<sup>3</sup> Shrinkfit

<sup>4</sup> Jackson Romdan

<sup>5</sup> Autofrettage pressure

<sup>6</sup> Working pressure

تکنیک اتوفریتاژ توسط افرادی همچون منینگ [۲]، چن [۳]، شاوینگ و گنگ لینگ [۴]، در طول سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفت.

قسمت حساس و تعیین کننده برای شبیه سازی فرایند اتوفریتاژ، مدل کردن ناحیه پلاستیک ماده می باشد. سیر پژوهشی مقالات کار شده در مورد فرایند اتوفریتاژ بدین صورت است که ابتدا محققان برای ساده سازی تحلیل، جنس ماده را به صورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر می گیرند. رولینگ زو و جینلای یانگ [۵] مدل مخزن را به صورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفتند و شعاع بهینه اتوفریتاژ را بر این مبنا استخراج کردند. ونگ [۶] در سال ۱۹۸۹ با ارائه روش تحلیلی روابطی برای توزیع تنش در سیلندرهای با شرایط کرنش صفحه ای استخراج نمود. ژائو اکسین لین [۷-۹] در سالهای ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ در سه مقاله متوالی به ارائه روابط پارامتری فرایند اتوفریتاژ با لحاظ کرنش سختی نمایی برای حالت تنش صفحه ای سیلندر با تغییر شکل های کوچک و بزرگ پرداخت. در این مقالات از مدل لوی میز برای تحلیل سیلندر کمک گرفته شد که خود باعث خطا در این روابط می گردید. همچنین ژائو وانلین [۱۰] نیز با ارائه روشی تحلیل و عددی با در نظر گرفتن سخت شونده گی رمبرگ تنش های پسماند را در استوانه ای تحت فشار بدست آورد. میلیگان و همکاران [۱۱] نشان دادند که در فولادهای مقاوم به وضوح اثر باشینگر وجود دارد و این اثر تابعی از میزان کرنش پلاستیک بوجود آمده در بارگذاری می باشد. کندال [۱۲] بعداً ارتباط بین اثر باشینگر و میزان کرنش پلاستیک را ارائه نمود. هیچیک از محققین بجز تعداد معدودی در تحقیقات انجام شده در مورد این موضوع به اندازه گیری منحنی واقعی باربرداری این مواد نپرداخته اند. استیسی و ویستر [۱۳] از معدود محققینی هستند که منحنی بارگذاری- باربرداری فولاد AISI 4333 را اندازه گیری و ارائه نمودند. از نتایج کاری ایشان بخوبی غیر خطی بودن باربرداری و استحکام تسلیم پایین فشاری و سخت شونده گی قابل توجه در باربرداری ملاحظه می گردد که هیچ یک از مدل های ایده آل سخت شونده گی امکان تخمین چنین رفتاری را ندارند.

شبان [۱۴] در روشی نسبتاً پیچیده امکان تولید منحنی باربرداری با لحاظ اثر باشینگر را در نرم افزار های تجاری اجزاء محدود پیشنهاد کرد. او با در نظر گرفتن یک بار حرارتی غیر واقعی توانست تغییرات در استحکام فشاری ماده را به نرم افزار القاء نموده و رفتار سخت شونده گی را به دنبال آن مدل نماید.

شبان و همکاران با استفاده از این متد تنشهای پسماند عملیات اتوفریتاژ را تخمین زدند.

در مساله ای مشابه، سردکاری سوراخهای اتصال، پوسارد و همکاران [۱۵] منحنی باربرداری آلومنیوم با مشخصات 2024-T351 را به ازای چندین کرنش پلاستیک بارگذاری بدست آورده و تابعیت اثر باشینگر از کرنش پلاستیک را بوضوح در این ماده نمایش دادند.

در جای دیگر جاهد و دبی [۱۶] اهمیت بسزای در نظر گرفتن اثر باشینگر را در تخمین تنشهای پسماند در مخازن اتوفریتاژ شده از طریق انجام مقایسات متعدد نمایش دادند.

پارکر [۱۷] با اندازه گیری منحنی باربرداری، نقش بسزای آنرا در محاسبات تنشهای پسماند نشان دادند. بعضی از محققان نیز به ارائه روش های تحلیلی اثر باشینگر در فرایند اتوفریتاژ پرداخته اند.

لیوری و لازارین [۱۸] با در نظر گرفتن اثر باشینگر و استفاده از روابط ونگ، روشی تحلیلی برای محاسبه تنش پسماند در جداره سیلندر ارائه داد. زائو و همکاران [۱۹] با ارائه روشی متفاوت و با تقسیم ناحیه پلاستیک به نواحی کوچکتر روش جدیدی برای تحلیل سیلندر ارائه دادند.

البته مطالعات متعددی نیز در خصوص تعیین فشار مناسب و ایده آل اتوفریتاژ بدون توجه به رفتار واقعی ماده در بار برداری نیز انجام گرفته است. حجتی و حسنی [۲۰] در سال ۲۰۰۷ با در نظر گرفتن مدل سخت شوندگی نمایی و بنا بر روابط پارامتری ژائو اکسین لین، در دو حالت تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای فشار بهینه اتوفریتاژ را استخراج نمودند.

بسیاری نیز با تهیه کد اجزاء محدود، فرایند اتوفریتاژ را مورد بررسی قرار داده اند. دسی کن و سوارمن [۲۱] با فرمولسازی متفاوت در اجزاء محدود و با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته موثر، توزیع تنش پلاستیک را در سیلندر بدست آوردند. گیبسون و همکاران [۲۲] نیز با تدوین کد اجزاء محدود و با در نظر گرفتن اثر باشینگر در سه حالت تنش صفحه ای، کرنش صفحه ای و سیلندر سربسته به محاسبه تنش پرداختند. همچنین پری و آبودی [۲۳] به کمک معادلات تعادل و روابط پلاستیسیته به کمک روش اختلاف محدود و با در نظر گرفتن کرنش سختی سینماتیک، سیلندر را مورد تحلیل قرار دادند.

ترکیب عملیات اتوفریتاژ و شرینگ فیت نیز با توجه به قابلیت هر کدام از این دو، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است به نحوی که سیر مطالعاتی تحقیقات نشانگر مقبولیت آن می باشد.

پارکر و کندل [۲۴] عمر خستگی سیلندر مرکبی که تحت دو عملیات اتوفریتاژ و شرینگ فیت قرار گرفته است مورد بررسی قرار داده و تنش های پسماند نرمالیزه شده را به صورت جداولی ارائه کرده اند.

در سال ۲۰۰۶ جاهد و همکاران [۲۵] دو فرایند شرینگ فیت و اتوفریتاژ را با هم ترکیب کرده و با در نظر گرفتن نمودار واقعی تنش کرنش به کمک بهینه سازی عددی پارامترهای بهینه را برای عمر خستگی بیشتر بدست آوردند.

استفاده از فرایند اتوفریتاژ در مخازن کامپوزیتی از جدیدترین کاربردهای این فرایند محسوب می شود به طوری که با اعمال این فرایند در مخازن کامپوزیتی سعی در سبک کردن مخزن می شود.

کولی و همکاران [۲۶] با اعمال فرایند اتوفریتاژ در سیلندری کامپوزیتی از جنس MMC با آستر فولاد و استخراج پارامترهای طراحی، سعی در سبک سازی مخزن نمودند.

در جدیدترین بررسی در زمینه کاربرد فرایند اتوفریتاژ در مخازن کامپوزیتی، ون چن و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۰۹ سیلندری با الیاف SMA در نظر گرفتند و تاثیر فرایند اتوفریتاژ را در این الیاف به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داده اند.

### اهداف تحقیق در این پایانامه

هدف از این تحقیق، بررسی تحلیلی فرایند اتوفریتاژ با در نظر گرفتن مدل سخت شوندهگی ایزوتروپیک و سینماتیک می باشد. همچنین نشان داده می شود که ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت تا چه حد به کاهش تنش ون میز در جداره سیلندر کمک می کند و پارامترهای بهینه این عملیات استخراج می گردد. در ادامه نیز روش کدنویسی اجزاء محدود در ناحیه پلاستیسیته توضیح داده می شود و به کمک کد نوشته شده در نرم افزار متلب<sup>۱</sup> فرایند اتوفریتاژ مورد بررسی قرار می گیرد.

### مروری بر بخش های مختلف پایان نامه

در فصل اول مروری بر کارهای انجام شده صورت می پذیرد.

در فصل دوم مطالبی همچون روابط اساسی توزیع تنش در جداره سیلندر در ناحیه الاستیسیته، معرفی فرایند شرینگ فیت و تاثیر آن بر کاهش تنش جداره سیلندر، معرفی فرایند اتوفریتاژ و تاثیر آن بر کاهش تنش ون میز و معرفی شعاع بهینه اتوفریتاژ با فرض رفتار الاستیک-پلاستیک کامل و معرفی شعاع بهینه اتوفریتاژ با فرض کرنش سختی ایزوتروپیک مورد بررسی قرار می گیرد.

معادلات اساسی حاکم بر محیط پلاستیسیته با دو دیدگاه سخت شوندهگی ایزوتروپیک و سینماتیک در فصل سوم توضیح داده می شود.

در فصل چهارم تئوری اجزاء محدود در محیط پلاستیسیته ارائه می شود و روش کدنویسی پلاستیسیته با در نظر گرفتن سخت شوندهگی ایزوتروپیک خطی و غیر خطی و همچنین سخت شوندهگی سینماتیک با در نظر گرفتن مدل پراگر<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین برای هر کدام از انواع سخت شوندهگی روابط انتگرال گیری صریح<sup>۳</sup> یا ضمنی<sup>۴</sup> ارائه می گردد.

در فصل پنجم نحوه مدلسازی عملیات اتوفریتاژ و طریقه بهینه کردن پارامترهای طراحی ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت به کمک زبان پارامتری نرم افزار ANSYS<sup>۵</sup> توضیح داده می شود.

<sup>۱</sup> Matlab

<sup>۲</sup> Prager

<sup>۳</sup> Explicit method

<sup>۴</sup> Implicit method

<sup>۵</sup> APDL(ANSYS Parametric Design Language)

نتایج در فصل ششم ارائه می شود، ابتدا شعاع های بهینه فرایند شرینگ فیت برای سیلندر های مرکب دولایه، سه لایه، چهار لایه و پنج لایه به صورت روابطی پارامتری استخراج می گردد. سپس به کمک روابط تعادل حاکم بر محیط استوانه ای و روابط پلاستیسیته، معادله دیفرانسیلی استخراج می شود که با در نظر گرفتن انواع شرایط مرزی اعم از تنش و کرنش صفحه ای، مخزن و همچنین انواع رفتارهای سخت شوندگی این معادله سازگار بوده و توزیع تنش و کرنش پلاستیک برای هر مورد استخراج می گردد. لازم به ذکر است که برای استخراج این روابط، بر خلاف روش ژائو اکسین لین [۷] که بر مبنای نظریه لوی میزز استوار بود، از مبنای نظریه پرنتل<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این فصل همچنین ترکیب دو فرایند اتوفریتاژ و شرینگ فیت به صورت تحلیلی-عددی مورد بررسی قرار می گیرد و پارامترهای بهینه استخراج می گردد و نشان داده می شود که ترکیب این دو فرایند به طور قابل ملاحظه ای بر کاهش تنش ون میزز در جدار سیلندر تاثیر می گذارد.

در قسمت آخر این فصل نیز به کمک کد اجزاء محدود تدوین شده فرایند اتوفریتاژ تحلیل، و نتایج حاصله با نرم افزار ANSYS مقایسه می گردد و مزایای این کد تولیدی بر شمرده می شود.

---

<sup>1</sup> Prandtl



**فصل دوم: مقدمه ای بر فرایند  
اتوفریتاژ و شرینگ فیت**

## ۱-۲ مقدمه

یکی از روشهای موثر برای بالا بردن ظرفیت تحمل فشار در استوانه های جدار ضخیم ایجاد تنش پسماند در جداره آنها می باشد. برای ایجاد تنش پسماند در سیلندر های جدار ضخیم دو روش متداول است. روش اول استفاده از سیلندرهای مرکب می باشد. سیلندرهای مرکب از تداخل دو یا چند سیلندر ساده که به صورت پرسی (شرینک فیت<sup>۱</sup>) در داخل هم جا زده می شوند تشکیل می گردند. انطباق پرسی باعث ایجاد نوعی تنش پسماند در جدار سیلندر می شود.

روش دوم که روشی پیچیده تر اما کارآمدتر است، عملیات اتوفریتاژ می باشد. اتوفریتاژ یک فرایند الاستیک-پلاستیک شناخته شده است که با ایجاد تنش پسماند در جدار سیلندر موجب افزایش تحمل فشارمخازن جدار ضخیم می گردد.

همچنین ترکیب این دو فرایند نیز روشی موثر برای استفاده از خواص الاستیک و پلاستیک ماده به طور همزمان می باشد.

## ۲-۲ توزیع تنش در جدار سیلندر با در نظر گرفتن خواص الاستیک ماده

توزیع تنش های الاستیک شعاعی ( $\sigma_r$ ) و مماسی ( $\sigma_\theta$ ) برای یک سیلندر جدار ضخیم، تحت فشارهای داخلی ( $P_i$ ) و فشار خارجی ( $P_o$ ) با توجه به روابط لامه [۲۸] به صورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{a^2 P_i - b^2 P_o}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (P_i - P_o)}{(b^2 - a^2) r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{a^2 P_i - b^2 P_o}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (P_i - P_o)}{(b^2 - a^2) r^2} \\ u = \frac{1 - \nu}{E} \frac{(a^2 P_i - b^2 P_o) r}{b^2 - a^2} + \frac{1 + \nu}{E} \frac{a^2 b^2 (P_i - P_o)}{(b^2 - a^2) r} \end{cases} \quad (1-2)$$

در رابطه بالا  $a$  و  $b$  به ترتیب شعاعهای داخلی و خارجی استوانه،  $P_i$  و  $P_o$  فشار داخلی و فشار خارجی،  $E$  مدول الاستیسیته و  $\nu$  ضریب پواسون می باشد. معمولاً مخازن یا سیلندرهای تحت فشار فقط از درون تحت فشار قرار می گیرند و فشار بیرونی صفر در نظر گرفته می شود. در این صورت توزیع تنش به صورت رابطه (۲-۲) در می آید:

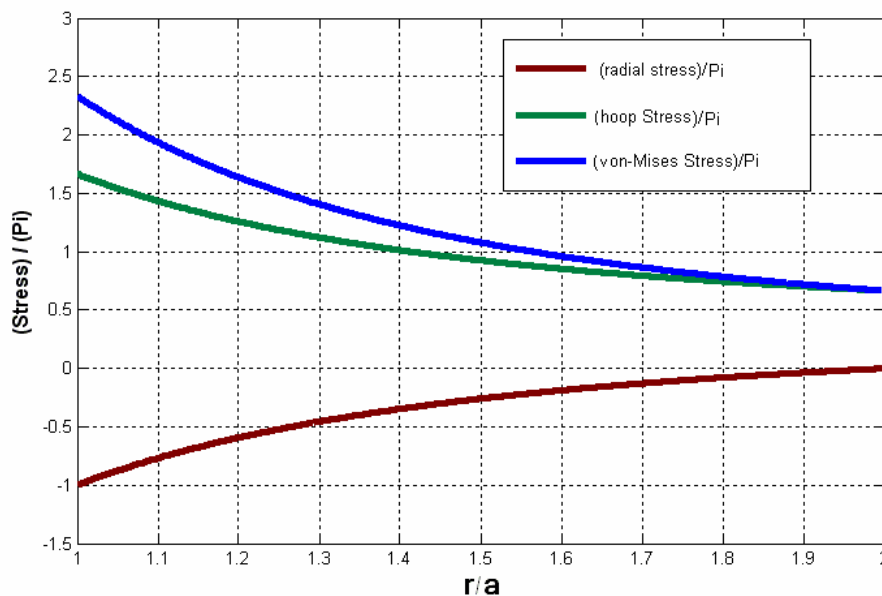
<sup>1</sup> Shrink-fit

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{a^2 P_i}{a^2 - b^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta = \frac{a^2 P_i}{a^2 - b^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \\ u = \frac{1 - \nu}{E} \frac{(a^2 P_i) r}{b^2 - a^2} + \frac{1 + \nu}{E} \frac{a^2 b^2 (P_i)}{(b^2 - a^2) r} \end{cases} \quad (2-2)$$

در این حالت همیشه تنش شعاعی منفی، تنش مماسی مثبت و بیشترین تنش مماسی و تنش وون میز در جدار داخلی رخ می‌دهد. این موضوع در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است. در این شکل تنشها نسبت به فشار داخلی  $P_i$  بی بعد شده اند.

برای تنش و کرنش در راستای طولی سیلندر، سه حالت در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{P_i a^2}{b^2 - a^2} \rightarrow E \varepsilon_z = \frac{P_i a^2 (1 - 2\nu)}{b^2 - a^2} & \text{close end} \\ \sigma_z = 0 \rightarrow E \varepsilon_z = -\frac{2\nu P_i a^2}{b^2 - a^2} & \text{open end} \\ \sigma_z = \frac{2\nu P_i a^2}{b^2 - a^2} \rightarrow E \varepsilon_z = 0 & \text{plane strain} \end{cases} \quad (3-2)$$



شکل ۱-۲ توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی و وون میز در ناحیه الاستیک

بیشترین تنش ون میزز در جدار داخلی رخ می دهد و برای حالت تنش صفحه ای به صورت رابطه (۴-۲) بدست می آید :

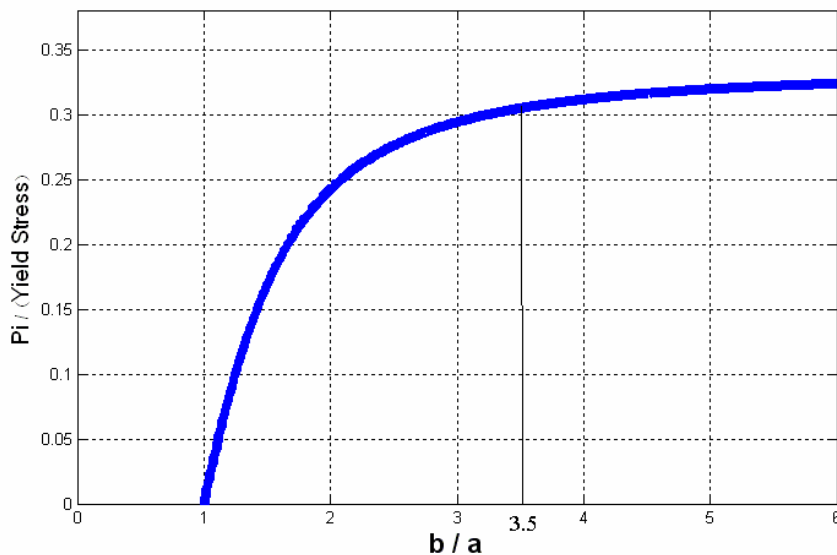
$$\sigma_{\text{vonMises-max}} = \sigma_{\text{vonMises}|_{r=a}} = \frac{P_i(3b^4 + a^4)^{0.5}}{b^2 - a^2} \quad (۴-۲)$$

همچنین از رابطه (۵-۲) می توان فشاری که شعاع داخلی را وارد ناحیه پلاستیک می کند بدست آورد :

$$\frac{P_{\text{yield}}}{\sigma_y} = \frac{(b^2 - a^2)}{\sqrt{3b^4 + a^4}} \quad (۵-۲)$$

که در این رابطه  $\sigma_y$  تنش تسلیم ماده و  $P_{\text{yield}}$  فشاری است که ناحیه داخلی را تسلیم می کند.

اگر رابطه بالا نسبت به  $\frac{b}{a}$  رسم شود، مشاهده می گردد که افزایش نسبت  $\frac{b}{a}$  به بیشتر از ۳/۵، تاثیر محسوسی در افزایش  $P_{\text{yield}}/\sigma_y$  نخواهد داشت. به عبارت دیگر نمی توان با افزایش ضخامت، فشار تسلیم را افزایش داد(شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ تغییرات فشار داخلی مجاز نسبت به افزایش ضخامت سیلندر