

الله

محمد بن عبد الله
الرسول



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تحلیل تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته های جدار نازک با سطح مقطع دایروی و چهارگوش
دارای گشودگی تحت گشتاور خمشی خالص

دانشجو

بهزاد جهانگیری

اساتید راهنما

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمیدرضا ایپکچی

تابستان ۱۳۹۳

تقدیم به:

**دو شمع فروزان، پدر و مادر فداکارم
آنان که هستی خویش را سرمایه وجودم کردند
و در راه علم و دانش حامی و همراهم بودند.**

تشکر و قدردانی

ضمن سپاس بیکران خداوند، لازم می‌دانم از تمامی اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم، به‌ویژه اساتید محترم آقای دکتر محمود شریعتی و آقای دکتر حمیدرضا ایپکچی که با راهنمایی‌های مدبرانه، نظارت و سرپرستی این پایان‌نامه را به عهده داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

تعهدنامه

اینجانب بهزاد جهانگیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان "تحلیل تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته های جدار نازک با سطح مقطع دایروی و چهارگوش دارای گشودگی تحت گشتاور خمشی خالص" تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا ایپکچی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این تحقیق، به مطالعه‌ی تجربی و عددی پدیده‌ی رچتینگ بر روی پوسته‌های جدار نازک با سطح مقطع دایروی و چهارگوش دارای گشودگی و بدون گشودگی تحت گشتاور خمشی خالص از جنس فولاد SS304 پرداخته شده است. در این تحلیل پوسته‌ها داخل فیکسچر طراحی شده، جهت اعمال گشتاور خمشی قرار گرفته‌اند و بار سیکلی با نیروی میانگین غیر صفر به انتهای آن‌ها اعمال می‌گردد که باعث انباشتگی کرنش پلاستیک و وقوع پدیده رچتینگ می‌شود. بارگذاری‌ها شامل دو نوع نیرو-کنترل و جابه‌جایی-کنترل می‌باشد. آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام گردیده‌اند. تحلیل‌های عددی توسط نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک انجام شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این تحقیق اثر دامنه بار، بار میانگین، دامنه جابه‌جایی، طول تحت خمش، قطر نمونه‌ها و هندسه پوسته‌ها بر رفتار رچتینگ مورد تحلیل قرار گرفته است. مشاهده گردید که با افزایش تنش میانگین و دامنه بار به دلیل افزایش گشتاور خمشی، میزان جابه‌جایی رچتینگ افزایش می‌یابد و نرخ جابه‌جایی رچتینگ به ازای افزایش سیکل، کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین تأثیر گشودگی دایروی بر پوسته‌های استوانه‌ای تحت این نوع بارگذاری مورد تحلیل قرار گرفته و مشاهده شد که ایجاد گشودگی، باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک و نرخ آن می‌شود.

کلیدواژه: پدیده رچتینگ، پوسته‌ی جدار نازک، بارگذاری سیکلی، خمش خالص

فهرست مطالب

ز	فهرست مطالب	.....
ط	فهرست اشکال	.....
ک	فهرست جداول	.....
ل	فهرست علائم و نشانه ها	.....
۱	فصل اول - مقدمه	.....
۲	۲-۱- تعریف پوسته ها	.....
۲	۲-۱- کاربرد پوسته ها	.....
۲	۳-۱- مکانیک شکست	.....
۳	۴-۱- تاریخچه مکانیک شکست	.....
۵	۵-۱- بارگذاری سیکلی	.....
۵	۱-۵-۱- انواع بارگذاری سیکلی	.....
۷	۲-۵-۱- تعریف خستگی	.....
۸	۳-۵-۱- تعریف رچتینگ	.....
۱۲	۶-۱- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه رچتینگ	.....
۱۹	۷-۱- جمع بندی	.....
۲۱	فصل دوم - آزمایش های تجربی	.....
۲۲	۱-۲- مقدمه ای بر آزمایش های انجام شده	.....
۲۲	۲-۲- دستگاه آزمایش	.....
۲۲	۱-۲-۲- هندسه و خواص مکانیکی	.....
۲۳	۳-۲-۲- آزمایش کشش استاندارد	.....
۲۵	۴-۲- انرژی و رابطه ی آن با نرخ تغییر شکل پلاستیک	.....
۲۷	۵-۲- بارگذاری خمشی	.....
۲۷	۱-۵-۲- شرایط مرزی	.....
۳۰	۶-۲- بارگذاری نیرو-کنترل	.....
۳۰	۱-۶-۲- تأثیر نیروی میانگین بر رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای	.....
۳۳	۲-۶-۲- تأثیر دامنه بار بر رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای	.....
۳۴	۳-۶-۲- اشباع جابه جایی رچتینگ	.....

۳۶	..... ۵-۶-۲- تأثیر وجود گشودگی در پوسته های استوانه ای بر رفتار رچتینگ آنها تحت گشتاور خمشی
۳۹	..... ۶-۶-۲- تأثیر محل گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته ی استوانه ای تحت خمش خالص
۴۱	..... ۷-۶-۲- تأثیر طول تحت خمش در پوسته های استوانه ای بر رفتار رچتینگ آن ها تحت بارگذاری نیرو خالص
۴۲	..... ۸-۶-۲- تأثیر قطر در پوسته های استوانه ای بر رفتار رچتینگ آنها تحت بارگذاری خمش خالص
۴۲	..... ۹-۶-۲- بارگذاری نیرو-کنترل روی پوسته های استوانه ای با مقاطع مربعی و مستطیلی
۴۴	..... ۱۰-۶-۲- اثر درز پوسته بر نحوه شکست
۴۵	..... ۷-۲- بارگذاری جابه جایی-کنترل
۴۵	..... ۱-۷-۲- بررسی رفتار سخت شوندگی/نرم شوندگی سیکلی ماده
۴۹	..... فصل سوم-تحلیل عددی
۵۰	..... ۱-۳- مقدمه ای در رابطه با تحلیل عددی
۵۰	..... ۱-۱-۳- روش اجزاء محدود
۵۲	..... ۲-۱-۳- معرفی نرم افزار Abaqus/CAE
۵۳	..... ۱-۲-۳- تحلیل عددی
۵۵	..... ۲-۲-۳- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای SS304
۵۷	..... ۳-۲-۳- تأثیر طول پوسته استوانه ای بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری خمش خالص در تحلیل عددی
۵۹	..... فصل چهارم- نتیجه گیری و پیشنهادها
۶۰	..... ۱-۴- نتیجه گیری
۶۳	..... ۲-۴- پیشنهادها
۶۸	..... پیوست الف
۷۱	..... واژه نامه فارسی به انگلیسی
۷۳	..... واژه نامه انگلیسی به فارسی

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱). خصوصیات بارگذاری سیکلی؛ الف) بارگذاری کاملاً کششی ب) بارگذاری کاملاً فشاری ج) بارگذاری کششی - فشاری..... ۶
- شکل (۲-۱). مسیر بارگذاری در آزمایش رچتینگ [۴]..... ۱۰
- شکل (۳-۱). چهار پدیده ی احتمالی از پلاستیسیته ی سیکلی [۵]..... ۱۰
- شکل (۴-۱). تعریف پارامترهای مختلف در آزمایش رچتینگ [۶]..... ۱۱
- شکل (۵-۱). پارامترهای هندسی پوسته استوانه ای مایل در بررسی رفتار خستگی توسط ویب و همکاران [۱۱]..... ۱۳
- شکل (۱-۲). دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و استفاده از طول سنج برای تست کشش استاندارد..... ۲۴
- شکل (۲-۲). فیکسچر طراحی شده جهت اعمال گشتاور خمش خالص سیکلی..... ۲۴
- شکل (۳-۲). نمودار تنش - کرنش حاصل از آزمایش کشش استاندارد برای فولاد SS304..... ۲۵
- شکل (۴-۲). انرژی آزاد شده الاستیک و پلاستیک در یک سیکل هیستریزس..... ۲۶
- شکل (۵-۲). دستگاه اینسترون و پوسته استوانه ای تحت گشتاور خمش خالص..... ۲۸
- شکل (۶-۲). اعمال نیروی کششی و فشاری توسط فک پایین دستگاه و اعمال گشتاور خالص به پوسته..... ۲۹
- شکل (۸-۲). الف - له شدگی در محل فک های میانی ب - تقویت لوله در محل له شدگی..... ۳۰
- شکل (۹-۲). رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای با طول مؤثر 280mm و نیروی میانگین 0.3kN و دامنه نیروی 1.4kN تحت بارگذاری خمش خالص..... ۳۱
- شکل (۱۰-۲). جابه جایی رچتینگ پوسته بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه های با نیروی میانگین F_m مختلف و دامنه نیروی 1.4kN تحت خمش خالص..... ۳۲
- شکل (۱۱-۲). محل شکست در میانه پوسته استوانه ای بدون گشودگی با طول مؤثر 280mm و نیروی میانگین 0.3kN و دامنه نیروی 1.4kN..... ۳۳
- شکل (۱۲-۲). جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل در نیروی میانگین 0.1kN و دامنه نیروهای F_d مختلف..... ۳۴
- شکل (۱۳-۲). نرخ جابهجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای تحت خمش خالص به ازای نیروهای میانگین F_m مختلف..... ۳۶
- شکل (۱۴-۲). انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با نیروی میانگین F_m مختلف و دامنه نیروی 1.4kN تحت خمش خالص..... ۳۷
- شکل (۱۵-۲). الف - گشودگی دایروی در میانه ی پوسته ی استوانه ای تحت گشتاور خمشی ب - تغییر شکل گشودگی به بیضی..... ۳۸
- شکل (۱۶-۲). الف - جمع شدن گشودگی ب - شکست از محل گشودگی..... ۳۹

- شکل (۲-۱۷). جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه‌های با بارمیانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN با و بدون گشودگی دایروی تحت خمش خالص..... ۴۰
- شکل (۲-۱۸). خمش در دونقطه ی میانی و محل گشودگی در پوسته ی استوانه ای..... ۴۰
- شکل (۲-۱۹). جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با بارمیانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN با گشودگی در محل یک چهارم طول تحت خمش و بدون گشودگی دایروی تحت خمش خالص..... ۴۱
- شکل (۲-۲۰). جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با بارمیانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN با طول های 650mm و 280mm تحت خمش خالص..... ۴۲
- شکل (۲-۲۱). جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه‌های با بارمیانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN با طول تحت خمش 280mm و قطرهای D مختلف..... ۴۳
- شکل (۲-۲۲). الف) تقویت محل له شدگی در محل تکیه گاه ب) شکست بعد از محل تقویت..... ۴۳
- شکل (۲-۲۳). اضافه نمودن تقویت در محل تکیه گاه..... ۴۴
- شکل (۲-۲۴). پوسته از نوع درزدار تحت بارگذاری خمش خالص..... ۴۴
- شکل (۲-۲۵). الف) محل درز در نیمه پایینی پوسته ب) محل درز روی تار خنثی..... ۴۵
- شکل (۲-۲۶). حلقه های هیستریزیس برای دامنه ی جابه جایی 20mm پوسته ی استوانه ای تحت خمش خالص..... ۴۶
- شکل (۲-۲۷). نیرو بر حسب تعداد سیکل پوسته ی استوانه ای با دامنه ی جابه جایی 20mm و 30mm تحت خمش خالص..... ۴۶
- شکل (۲-۲۸). تغییرات نیرو نسبت به تعداد سیکل برای بارگذاری جابه جایی کنترل..... ۴۷
- شکل (۳-۷). شماتیک بارگذاری نمونه..... ۵۴
- شکل (۳-۸). الف) نمونه مش بندی شده ب) نمونه تحت بارگذاری..... ۵۴
- شکل (۳-۸). مقایسه مقادیر جابه جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه ای با نیروی میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمش خالص..... ۵۵
- شکل (۳-۹). مقایسه مقادیر جابه جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه ای با نیروی میانگین 0.5kN و دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمش خالص..... ۵۶
- شکل (۳-۱۰). مقایسه مقادیر جابه جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه ای با نیروی میانگین 0.9kN و دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمش خالص..... ۵۶
- شکل (۳-۱۱). مقایسه مقادیر جابه جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه ای دارای گشودگی در مرکز با نیروی میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمش خالص..... ۵۷
- شکل (۳-۱۲). مقایسه مقادیر جابه جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه ای با نیروی میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN در طول ای L مختلف تحت بارگذاری خمش خالص..... ۵۸

فهرست جداول

جدول (۱-۲). مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS304 ۲۳

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تنش تسلیم	σ_y
مدول یانگ	E
نسبت پواسون	ν
نیروی میانگین	F_m
ضخامت پوسته استوانه‌ای	t
قطر خارجی پوسته استوانه‌ای	D
جابه‌جایی رچتینگ	δ_{max}
دامنه نیرو	F_a
کرنش رچتینگ	ϵ_r
بیشترین کرنش	ϵ_{max}
کمترین کرنش	ϵ_{min}
کرنش حقیقی	ϵ_{real}
تنش حقیقی	σ_{real}
کرنش مهندسی	ϵ_{Eng}
تنش مهندسی	σ_{Eng}
طول مؤثر پوسته استوانه‌ای	L_{eff}
تنش میانگین	σ_m
دامنه میانگین	σ_a
نسبت جابه‌جایی رچتینگ به طول مؤثر	X_r
تنش خمشی مومسان	S

M_e

گشتاور خمشی در محدوده کشسان

M_p

گشتاور مومسان کامل

فصل اول - مقدمه

۱-۱- تعریف پوسته‌ها

ورق‌ها و پوسته‌ها سازه‌هایی هستند که شکل اولیه آن‌ها به ترتیب تخت و خمیده می‌باشد و ضخامت آن‌ها نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچک‌تر است. معیاری که برای تعریف یک ورق یا پوسته نازک به کار برده می‌شود، این است که باید نسبت ضخامت به طول ضلع کوچک‌تر ورق کمتر از ۰.۰۵ باشد. این نسبت در مواردی به کمتر از ۰.۰۱ نیز می‌رسد [۱].

۱-۲- کاربرد پوسته‌ها

امروزه پوسته‌ها و ورق‌ها بخش اعظمی از سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده‌اند. پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد، کاربرد گسترده‌ای در صنایع دارند. سازه‌های پوسته‌ای از نظر تحمل بارهای فشاری و ضربه‌ای از بهترین سازه‌ها به شمار می‌روند و به همین دلیل در طبیعت نیز پوشش اندام گیاهان و جانوران ماهیت پوسته‌ای دارد. با درک ویژگی‌های سازه‌های پوسته‌ای از جمله قدرت تحمل بار، استحکام بالا و راحتی ساخت، مهندسان، همواره از سازه‌های پوسته‌ای در طراحی و ساخت سازه‌های مختلف استفاده می‌کنند.

در این پژوهش حالت خاصی از پوسته‌های متقارن محوری یعنی پوسته‌های استوانه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد. این نوع پوسته‌ها در سازه‌هایی مانند بدنه موشک‌ها، بالگردها، هواپیماها، پایه‌ی سکوه‌های دریایی و دودکش نیروگاه‌ها استفاده فراوان دارند.

۱-۳- مکانیک شکست

مکانیک شکست یکی از علوم مهندسی است که به بررسی شکست در مواد مختلف می‌پردازد و روش‌های طراحی برای عملکرد مطمئن سازه و یا قطعات ماشین را ارائه می‌نماید. این علم دارای

کاربردهای فراوان و گسترده‌ای در طراحی قطعات سازه‌ها و ماشین آلات مربوط به صنایع مختلف می‌باشد. از جمله این صنایع می‌توان به صنایع نیروگاهی، خودروسازی، کشتی‌سازی، هوافضا و غیره اشاره نمود. امروزه به منظور اطمینان از ایمنی و کارایی لازم، سازه‌های طراحی شده با روش‌های مکانیک شکست مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرند.

متلاشی شدن قطعات مهندسی در طی دهه‌های گذشته، لزوم درک دقیق تری از مکانیک شکست^۱ در اجسام را در علوم نوین ایجاب می‌کند. بسیاری از سازه‌های مکانیکی در اثر رشد ترک ناشی از نواقص جوشکاری و کیفیت نامطلوب فولاد به وجود می‌آید، که باعث شکستگی می‌گردند. کاربرد این علم در زمینه طراحی قطعات و سازه‌های مختلف در صنایع بسیار زیادی از جمله صنایع نیروگاهی، هوافضا، خودروسازی و کشتی‌سازی قرار گرفته است.

۱-۴- تاریخچه مکانیک شکست

اگرچه امروزه تعداد مواردی که سازه‌ها بر اثر شکست ترد به طور ناگهانی گسیخته می‌گردند، اندک است؛ ولیکن هنوز شکست ترد و ناگهانی سازه‌ها گاهی اتفاق می‌افتد. لذا این امر هنوز به عنوان یک تهدید جدی برای سازه‌ها خصوصاً سازه‌های حساس و مهم مانند سازه‌ی هواپیما، پل‌ها، سازه‌های نیروگاهی و... مطرح است. تاریخچه شکست سازه‌ها در حین کار به سال‌های گذشته و خیلی دور بر می‌گردد.

در سال ۱۸۸۶ میلادی یک لوله عمودی به طول ۲۵۰ فوت در حین آزمایش هیدرواستاتیک در کشور انگلستان گسیخته شد. در همان سال‌ها موارد دیگری از شکست ناگهانی در برخی از مخازن آب، روغن و گاز که در آن‌ها از پرچ استفاده شده بود، گزارش گردید. در بسیاری از موارد گزارش شده، ماده مورد استفاده دارای استحکام کششی کافی (بر اساس آزمایشات کشش نمونه) بوده است. یکی از موارد شکست ناگهانی، مربوط به تانکر عظیم شیره قند بود. این مخزن حاوی ۲۳۰۰۰۰۰ گالن شیره

¹ Fracture Mechanics

قند بوده است که به طور ناگهانی گسیخته شد. در این مورد تیم بررسی سانحه متشکل از مهندسان و طراحان مجرب پس از مدت‌ها بررسی دقیق و انجام آزمایشاتی، علت شکست را ایجاد تنش بیتر در مخزن نسبت به مقادیر محاسبه شده از فرمول‌های ساده مقاومت مصالح تشخیص دادند.

در گذشته بیشترین شکست‌های ترد و ترک‌خوردگی‌ها در کشتی‌های فلزی رخ داده است. از حدود ۵۰۰۰ کشتی تجاری که در زمان جنگ دوم جهانی ساخته شد، سازه‌ی بیش از هزار کشتی قبل از سال ۱۹۴۶ شکسته یا دارای ترک با اندازه‌ی قابل توجه بوده است. در اغلب موارد نیز مشاهده گردید که ترک از نقاط گوشه و محل‌هایی که تنش در آن‌ها متمرکز بوده، شروع شده است. در آن زمان با گرد نمودن گوشه‌های تیز و از میان برداشتن گوشه‌ای بریده‌ی چهارگوش و همچنین افزودن قطعاتی به عنوان متوقف کننده‌ی ترک توسط پرچ به مناطق نزدیک به محل‌های تمرکز تنش تا حدودی مشکل شکست ناگهانی سازه‌ی کشتی‌ها حل شد. در برخی از موارد نیز ترک از محل‌های جوشکاری شده شروع به رشد می‌نمود. از بررسی‌های صورت گرفته مشخص گردید که در جوشکاری‌های انجام شده، که اغلب توسط افراد غیر متخصص انجام می‌گرفت، شکاف‌ها و ترک‌های متعدد ایجاد می‌گردید. با افزایش کیفیت جوشکاری و طراحی صحیح جوش، تعداد ناپیوستگی‌ها در جوش به میزان قابل توجهی کاهش یافت و منجر به تقلیل قابل توجه شکست‌ها گردید. در تمامی این موارد، نقص طراحی به عنوان یک عامل مهم در شکست مطرح بود و مشاهده شد که با انجام صحیح طراحی، افزون متوقف کننده ترک در محل‌های بحرانی از نظر شکست، بالابردن کیفیت ساخت و تولید و انتخاب درست ماده از نظر ترکیب شیمیایی می‌توان تعداد شکست‌های ترد ناگهانی را کاهش داد.

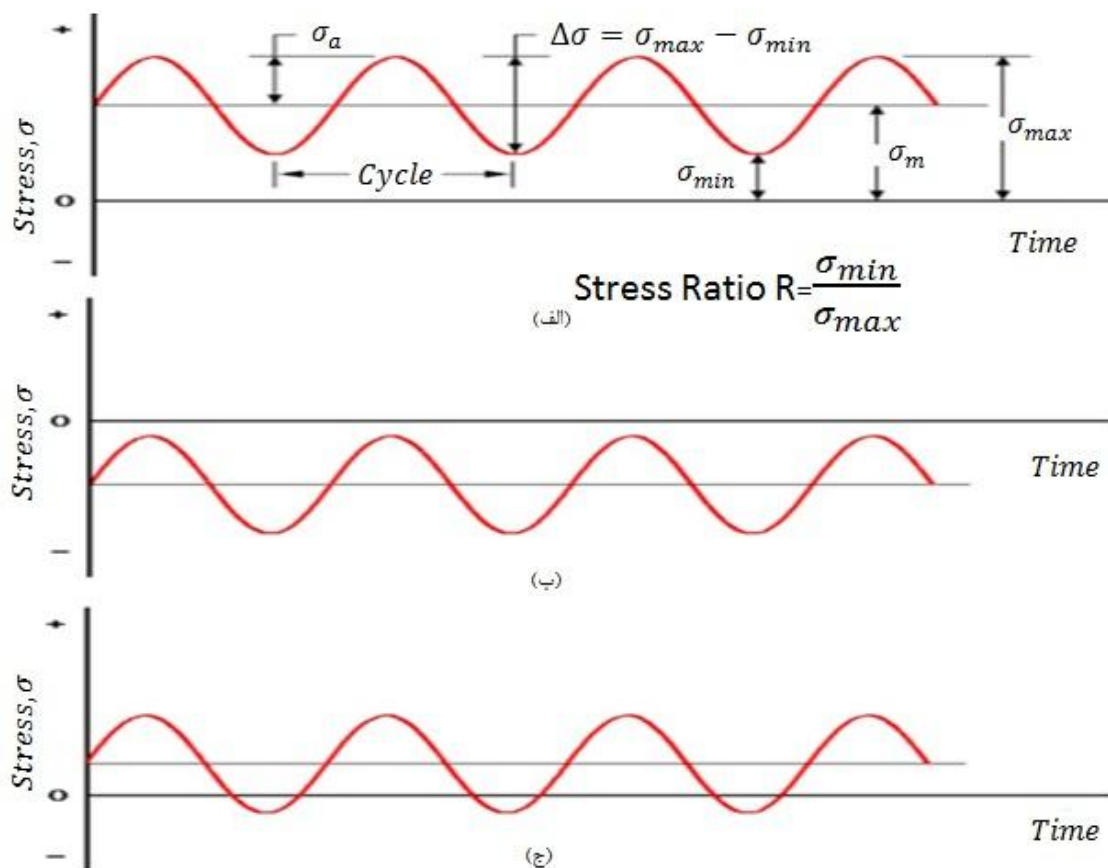
موارد بیان شده فقط درصد کوچکی از حوادث شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها و ماشین آلات بوده است؛ ولیکن از این موارد می‌توان مشاهده نمود که مواردی از جمله ترد بودن و عدم کیفیت تولید مواد، نقص طراحی، عدم توزیع مناسب تنش، نقص جوشکاری، رفتار ترد گونه برخی فولادها در درجه حرارت پایین، خوردگی و عدم کیفیت مناسب تولید عوامل اصلی و عمده در بروز شکست ناگهانی می‌باشند. امروز با استفاده از علم مکانیک شکست، اثبات گردیده است که عواملی همچون

خواص ماده، طراحی، تولید، درجه حرارت و شرایط محیطی و بارگذاری در سازه‌ها و قطعات مکانیکی به هم وابسته بوده و نمی‌توان فقط با انتخاب ماده‌ای با استحکام شکست مناسب از بروز شکست ترد جلوگیری کرد.

۱-۵- بارگذاری سیکلی

۱-۵-۱- انواع بارگذاری سیکلی

بارگذاری سیکلی، بارگذاری است که به صورت تناوبی و با شکل موج‌های مختلفی از قبیل سینوسی، مربعی و مثلثی و ... می‌تواند به یک قطعه و یا سازه مکانیکی وارد شود. همچنین این بارگذاری می‌تواند دارای مقدار میانگین (σ_m) نیز باشد. این مقدار میانگین می‌تواند بارگذاری را به صورت کاملاً کششی، کاملاً فشاری و یا فشاری-کششی تبدیل کند. مقدار میانگین برابر نصف مجموع حداکثر تنش (σ_{max}) و حداقل تنش (σ_{min}) در یک سیکل، دامنه تنش (σ_a) برابر تفاضل حداکثر تنش و حداقل تنش در یک سیکل و نسبت تنش (R) برابر نسبت تنش حداقل به تنش حداکثر می‌باشد. (شکل ۱-۱) بارگذاری سیکلی در آزمایش‌ها می‌تواند به دو صورت تنش-کنترل و کرنش-کنترل نیز انجام شود. مقدار حداکثر تنش در هر سیکل می‌تواند از مقدار تنش تسلیم ماده بیشتر و یا کمتر باشد که عامل تعیین کننده انواع خستگی و وجود پدیده رچتینگ می‌باشد. بارگذاری سیکلی در نهایت می‌تواند باعث زوال و ایجاد پدیده شکست در سازه‌ها شود.



شکل (۱-۱). خصوصیات بارگذاری سیکلی؛ الف) بارگذاری کاملاً کششی ب) بارگذاری کاملاً فشاری ج) بارگذاری

کششی-فشاری

سازه‌های مهندسی غالباً تحت بارگذاری‌های سیکلی و تناوبی قرار دارند که این بارگذاری می‌تواند تحت یک تنش میانگین و یا یک کرنش میانگین باشد. پدیده مهمی که در سال ۱۹۷۰ [۲] معرفی، و در دو دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است، رچتینگ می‌باشد، که به صورت انباشتگی سیکل به سیکل کرنش پلاستیک در سازه‌های تحت بارگذاری سیکلی با دامنه تنش ثابت و تنش میانگین غیر صفر تعریف می‌شود. این پدیده در خستگی‌های کم تکرار قابل مشاهده است. برای ایجاد این پدیده، تنش اعمالی باید به تنش تسلیم سازه برسد. رچتینگ می‌تواند عمر خستگی سازه را

کاهش دهد، و یا منجر به خرابی سیستم تحت ارتعاش یا بارگذاری سیکلی شود. بنابراین پدیده مذکور، پارامتر مهمی جهت پیش بینی عمر خستگی سازه‌های مهندسی می‌باشد [۳].

در گذشته طراحان، قطعات مهندسی را تنها با استفاده از خواص مواد در ناحیه الاستیک طراحی می‌کردند. با گذشت زمان و پیشرفت علم مهندسی نیاز به طراحی و ساخت قطعاتی با ظرفیت تحمل بار بسیار بالا و در عین حال سبک احساس شد. برای رفع این نیاز، مهندسان ایده استفاده از ظرفیت ماده در محدوده پلاستیک را مطرح کردند. البته پیش‌بینی رفتار ماده در این حالت به نوع و میزان بارگذاری و جنس ماده بستگی دارد و می‌تواند یا تعداد اندکی بارگذاری و باربرداری در محدوده پلاستیک دچار گسیختگی شود و یا برعکس، قابلیت تحمل تعداد بسیار زیادی بارگذاری و باربرداری در ناحیه پلاستیک را داشته باشد. بررسی این پدیده منجر به بوجود آمدن شاخه رچتینگ و خستگی کم چرخه در علم پلاستیسیته شد. با ورود بارگذاری به ناحیه پلاستیک ماده می‌تواند دو نوع رفتار سخت‌شوندگی از خود نشان دهد. در ادامه به بررسی مختصری بر روی انواع رفتارهای سخت‌شوندگی و پدیده رچتینگ و خستگی مواد خواهیم پرداخت.

۱-۵-۲- تعریف خستگی^۱

از سال ۱۸۵۰ معلوم شده است که فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش لازم برای شکست در اثر یک مرتبه اعمال بار، خواهد شکست. شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. که این نام‌گذاری احتمالاً مبتنی بر این دلیل است که به طور کلی مشاهده می‌شود شکست‌ها فقط پس از یک دوره زیاد رخ می‌دهند. هیچ‌گونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می‌شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی

¹ Fatigue

هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشت می‌شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی باشد.

۱-۵-۳- تعریف رچتینگ

رچتینگ^۱ انباشتگی کرنش پلاستیک در طی سیکل های بار گذاری به ازای مقدار مشخص دامنه تنش و تنش میانگین غیر صفر است. (شکل ۲-۲) وقتی بارگذاری تکرار می شود حلقه های منحنی هیسترزیس جابجا می‌شوند و در نهایت به یکدیگر نزدیک شده و به مقدار تقریبی ثابتی می‌رسند که به آن سیکل پایا می گویند.

شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می دهند، شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. این نامگذاری احتمالاً مبتنی بر این دلیل است که به طور کلی مشاهده می‌شود که شکست‌ها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می‌دهند. شکست ناشی از خستگی در سیکل‌های پایین با وجود یک پدیده‌ی ثانویه پلاستیسیته‌ی سیکلی به آسیب‌های ناشی از خستگی شدت می‌بخشد یا به تنهایی به عنوان یک مکانیزم شکست عمل می‌کند.

شکست خستگی در اثر شکل‌گیری و انتشار ترک است. یک ترک خستگی معمولاً از یک ناپیوستگی در جایی از ماده که تنش نوسانی به بیشترین مقدار رسیده، آغاز می‌شود. شرایط گوناگونی که بروز ترک را سرعت می‌بخشند، تنش‌های کششی پسماند، افزایش دما، نوسان دما، محیط خورنده و نوسان بار با بسامد زیاد است.

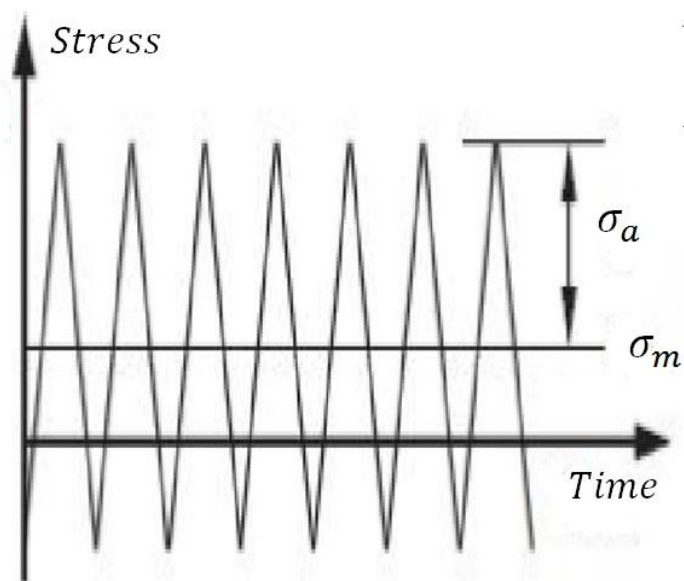
در تأسیسات شیمیایی و نیروگاه‌ها، لوله‌های تحت فشار بسیار زیادی وجود دارند که بار سیکلی به آنها اعمال می‌شود. اگر چه مقدار کرنش پلاستیک در یک سیکل بارگذاری کم می‌باشد، اما انباشتگی آنها در یک جهت در طول بارگذاری، قابل ملاحظه است. این پدیده به عنوان پلاستیسیته‌ی

¹ Ratcheting

سیکلی و یا رچتینگ شناخته شده است. کرنش‌های رچتینگ با حضور ترک تشدید یافته و شکست سریع تر رخ می‌دهد.

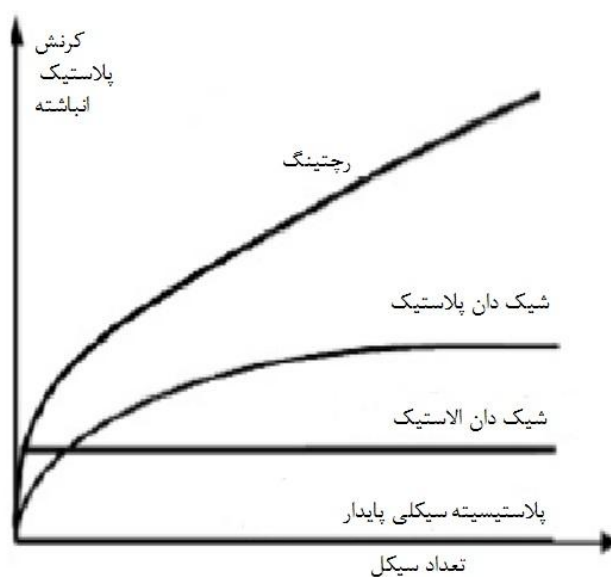
از طرفی دیگر، در چند دهه‌ی اخیر، طراحی در مهندسی تنها به استفاده از مواد در ناحیه‌ی الاستیک محدود می‌شد؛ اما به تدریج با توجه به نیازهای روز افزون برای طراحی قطعاتی با تحمل ظرفیت بار بسیار بالا و در عین حال سبک، ایده‌ی استفاده از ظرفیت ماده در محدوده‌ی پلاستیک در ذهن مهندسين طراح شکل گرفت. به این ترتیب بسیاری از قطعات به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در اثر بارگذاری در قطعه‌ی منتفی نیست. پس از گذشت مدت زمانی اندک از طراحی چنین قطعاتی، دیده شد که برخی این قطعات در اثر چند سیکل بارگذاری و باربرداری در محدوده‌ی پلاستیک، دچار گسیختگی می‌شوند؛ در حالی که گروهی از این قطعات قابلیت تحمل تعداد بسیار زیادی بارگذاری و بار برداری پیوسته را دارند. در این جا نیز بحث شاخه‌ی کرنش پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ به میان می‌آید.

رچتینگ یک نوع رفتار تغییر شکل سیکلی خاص از مواد می‌باشد که تحت تنش سیکلی با تنش میانگین غیر صفر است (شکل (۱-۲)) و باید در تعیین عمر ساختارهای مهندسی ارزیابی شود. از آن جایی که بسیاری از اجزای مهندسی، تنش سیکلی با تنش میانگین غیر صفر را تجربه می‌کنند، بررسی پدیده‌ی رچتینگ و تعیین عمر اجزا بسیار اهمیت دارد. به عنوان مثال در سال ۱۹۹۰، رفتار رچتینگ لوله‌های نیروگاه اتمی و اثرات مضر آن در طراحی راکتور اتمی، در نظر گرفته شده است.



شکل (۲-۱). مسیر بارگذاری در آزمایش رچتینگ [۴]

با توجه به شکل (۳-۱) در مواد تحت تنش سیکلی ، ممکن است چهار حالت از انباشتگی کرنش پلاستیک رخ دهد: ۱- پلاستیسیته سیکلی پایدار^۱ - ۲- شیک دان الاستیک^۲ - ۳- شیک دان پلاستیک^۳ - ۴- رچتینگ



شکل (۳-۱). چهار پدیده‌ی احتمالی از پلاستیسیته‌ی سیکلی [۵]

¹ Stabilized cyclic plasticity

² Elastic shakedown

³ Plastic shakedown

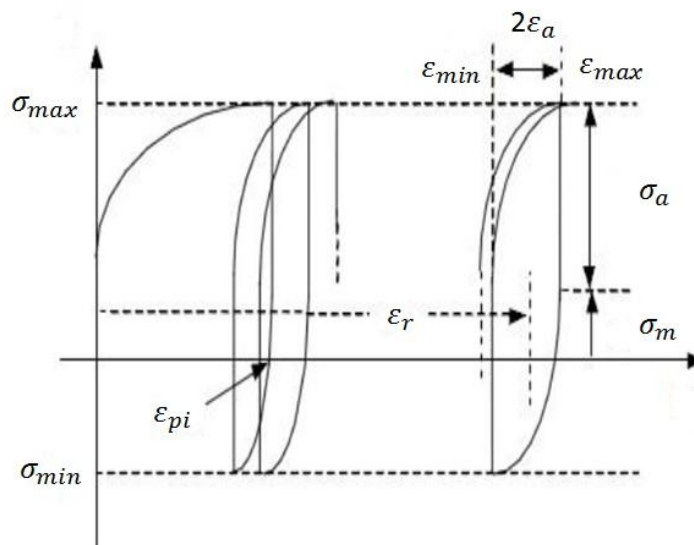
رچتینگ، انباشتگی کرنش پلاستیک تحت بار سیکلی با تنش میانگین غیر صفر می باشد که در اثر خزش سیکلی^۱ و انتقال حلقه ی هیستریزس تنش-کرنش ایجاد می شود. در این انتقال، به طور کلی کرنش رچتینگ از رابطه ی (۱-۱) تعیین می شود.

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}) \quad (1-1)$$

و در نتیجه کرنش رچتینگ حقیقی از رابطه ی (۲-۱) تعیین می شود.

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} [Ln(1 + \varepsilon_{max}) + Ln(1 + \varepsilon_{min})] \quad (2-1)$$

در روابط بالا ε_{min} ، ε_{max} بیشترین و کمترین کرنش پلاستیک از حلقه ی هیستریزس در هر سیکل می باشند (شکل (۴-۱)).



شکل (۴-۱). تعریف پارامترهای مختلف در آزمایش رچتینگ [۶]

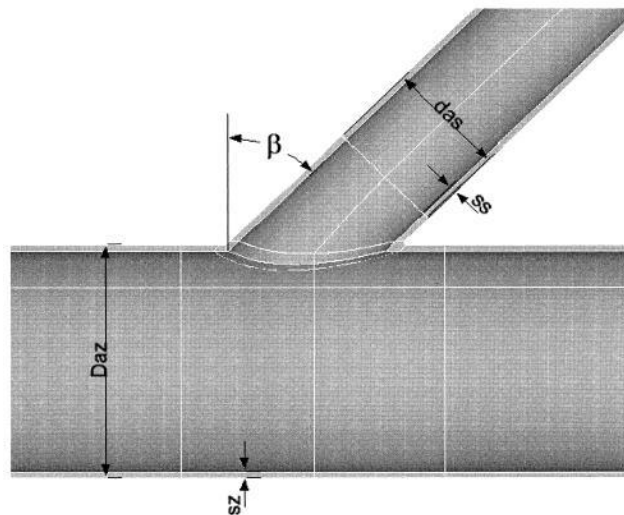
¹ Cyclic creep

۱-۶- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه رچتینگ

از آن جایی که رچتینگ یک انباشتگی تغییر شکل غیر الاستیک سیکل به سیکل می‌باشد. شبیه-سازی و تعیین رفتار آن به طور دقیق امکان پذیر نخواهد بود و علاوه بر آن مدل‌های ساختاری سیکلی رچتینگ بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی نیز قادر به تعیین دقیق رچتینگ نبودند. بنابراین در دو دهه گذشته، رچتینگ به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است. پیشرفت در پدیده‌ی رچتینگ و مدل‌های ساختاری آن در سال ۱۹۹۷ توسط اوهنو مشاهده شد. بعد از سال ۱۹۷۷، مدل‌های جدیدی شامل حسن-باری، مدل ویاد جیس، مدل دورینگ و... برای توضیح نتایج آزمایشگاهی ارائه شد [۷]. همچنین مطالعات بسیاری بر روی رفتار رچتینگ مواد با خصوصیت سخت‌شوندگی مثل SS304، 316FR و U71mn انجام شده است [۸و۹].

میر باقری در پایان نامه‌ی خود به بررسی رچتینگ و شیک دان پرداخته است. او از تئوری‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک و همچنین ترکیب این دو تئوری به منظور بررسی رفتار سیکلی سازه‌های تیر و مخازن استوانه‌ای، تحت بارهای سیکلی مکانیکی و حرارتی به کار گرفته است [۱۰].

ویب و همکاران در سال ۱۹۹۸، رفتار خستگی پوسته‌های استوانه‌ای مایل را تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی بررسی کردند (شکل ۱-۵). آن‌ها از تقریب تنش شیار موضعی و کدهای اجزاء محدود به عنوان روش‌های پیش‌بینی رفتار خستگی درزهای اطراف جوش در محل اتصال استفاده کردند و نشان دادند که روش اجزاء محدود حتی برای پوسته‌های استوانه‌ای پیچیده مایل نیز روش مناسبی است [۱۱].



شکل (۱-۵). پارامترهای هندسی پوسته استوانه‌ای مایل در بررسی رفتار خستگی توسط ویب و همکاران [۱۱]

یانگ در سال ۲۰۰۵ به بررسی رفتار خستگی کم‌تکرار و رچتینگ فولاد CK45 تحت بارگذاری تک‌محوره پرداخت. در این مقاله آزمایش‌های کرنش-کنترل با و بدون کرنش میانگین به منظور بررسی اثر کرنش میانگین بر عمر خستگی انجام شده است. همچنین او براساس نتایج آزمایش‌های کرنش-کنترل، معادلاتی برای پیش‌بینی عمر خستگی به دست آورد و از آن‌ها برای پیش-بینی آسیب خستگی در شکست رچتینگ استفاده کرد [۱۲].

چنا و همکارانش در سال ۲۰۰۵ نوعی لحیم قلع - سرب یوتکتیک را تحت بارگذاری چند محوره و تک‌محوره قرار داده و به مطالعه رفتار رچتینگ آن پرداختند. این ماده تحت بارگذاری‌های تک محوره، پیچش خالص و محوری - پیچشی از خود رفتار نرم‌شوندگی نشان داد. همچنین در این مطالعه اثرات نرخ کرنش اعمالی در حالت‌های مختلف بر کرنش رچتینگ مورد بررسی قرار گرفت [۱۳].

چنا و همکاران در سال ۲۰۰۵ عملکرد چهار مدل ساختاری را در پاسخ رچتینگ فولاد Ck45 برای بارگذاری محوری/پیچشی بررسی کردند. مشاهده شد که مدل اهنو-وانگ در بارگذاری چند محوره، رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. در حالی که مدل جیانگ-سهیتوگلو

پیش‌بینی خوبی برای بارگذاری چند محوره محوری/پیچشی با انتخاب ترم بازگشتی دینامیکی ارائه داد [۱۴].

کانگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ رفتار رچتینگ فولاد 25CDV4.11 و فولاد ضد زنگ SS304 را بررسی کردند. فولاد 25CDV4.11 دارای خصوصیت نرم‌شوندگی بود و با افزایش تعداد سیکل، نرخ کرنش رچتینگ افزایش یافته و هیچ‌گونه شیک‌دانی رخ نداد و در نهایت منجر به شکست نمونه شد. در فولاد با خصوصیات سخت‌شوندگی SS304، نرخ کرنش رچتینگ با افزایش تعداد سیکل کاهش یافت [۱۵].

کانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی تأثیرات رچتینگ و خستگی فولاد ضد زنگ SS304 در بارگذاری تک‌محوره تحت شرایط نیرو-کنترل و در دمای اتاق پرداختند. اثرات تنش میانگین، دامنه‌ی تنش و نسبت تنش حداکثر به حداقل برکرنش رچتینگ و عمر نمونه‌ها در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. آن‌ها مشاهده کردند که کرنش رچتینگ و عمر خستگی این ماده وابستگی زیادی به تنش میانگین، دامنه تنش و نسبت تنش دارد [۱۶].

گائو و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از فیکسچر خمش شبه سه نقطه ای به مطالعه‌ی تجربی رفتار رچتینگ فولادهای کربنی پرداختند و مشاهده کردند که در آزمایش خمش چند مرحله‌ای، نرخ کرنش رچتینگ با افزایش مقدار بار، افزایش می‌یابد؛ اما با اعمال مقدار بار کم پس از بارگذاری با بار زیاد، نرخ رچتینگ کاهش و یا حتی از بین می‌رود. در تحلیل شبیه‌سازی اجزا محدود^۱ رچتینگ با نرم افزار انسیس^۲ مشاهده گردید که مدل جیانگ سه‌تنگلو با کم‌ترین تغییرات نتایج قابل قبولی را نتیجه می‌دهد [۱۷].

چن در سال ۲۰۰۶، رفتار رچتینگ تک‌محوره‌ی 63sn37pb solder را به طور تجربی بررسی کرد. او در مقاله‌ی خود تأثیر تنش دامنه، تنش میانگین و پیش تنش را بر روی رفتار رچتینگ این آلیاژ تحلیل نمود و در آزمایش‌ها خود حتی در تنش‌های میانگین و دامنه‌ی بسیار کم، شاهد پدیده‌ی

¹ Finite Element

² ANSYS

شیک‌دان^۱ نبود. او مشاهده کرد که نرخ کرنش رچتینگ به جز در سیکل‌های اولیه، همواره مقداری ثابت است و با افزایش تنش دامنه یا تنش میانگین، کرنش رچتینگ (ϵ_r) و نرخ کرنش رچتینگ $\left(\frac{d\epsilon_r}{dN}\right)$ افزایش می‌یابد و نرخ کرنش رچتینگ به نرخ تنش به شدت وابسته است و با کاهش نرخ تنش، نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد [۱۸].

سید و همکاران در سال ۲۰۰۸، به طور تجربی رفتار کرنش رچتینگ شعاعی و محیطی یک لوله فولادی مستقیم را تحت بارگذاری خمشی و فشار داخلی ثابت بررسی کردند و با رسم نمودار ممان - جابجایی مشاهده کردند که شبیه‌سازی کرنش رچتینگ با استفاده از مدل‌های چند ساختاری بهتر است [۱۹].

گاوو و چن در سال ۲۰۰۹ طی آزمایش‌هایی به مطالعه‌ی اثر کرنش رچتینگ محوری بر عمر خستگی پیچشی نوعی لحیم بدون سرب پرداختند. آن‌ها با استفاده از بارگذاری‌های تنش - کنترل چند محوره در دمای اتاق دریافتند که با افزایش کرنش رچتینگ محوری عمر خستگی کاهش می‌یابد. همچنین معادلاتی را برای بیان عمر خستگی تحت بارگذاری‌های چند محوره بیان نمودند [۲۰].

لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ در تحلیل اجزای محدود از مدل‌های سخت‌شوندگی سیکلی برای بررسی رفتار تنش-کرنش آلیاژ آلومینیوم AC4C-T6 استفاده کردند. آزمایش‌های تجربی کشش ساده و کشش سیکلی در دمای اتاق و دمای ۱۶۵- درجه سانتیگراد انجام شد. پارامترهای هر مدل سخت‌شوندگی از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمد. آن‌ها نتایج حاصل از تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند و مشاهده کردند که مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک^۲ نسبت به سایر مدل‌ها پیش بینی بهتری ارائه داد [۲۱].

¹ Shake down

² Nonlinear isotropic/kinematic hardening

رضایی پزند و سینایی در سال ۲۰۰۹ یک روش ریاضی برای محاسبه‌ی پارامترهای مدل چابوچه ارائه دادند و برای مقایسه از نتایج آزمایشگاهی رچتینگ تک محوره‌ی حسن و کریاکیدس بر روی فولاد CS1026 استفاده کردند [۲۲].

لیم و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی رفتار رچتینگ و خستگی نوعی آلیاژ مس تحت بارگذاری تک محوره همراه با تنش میانگین پرداختند. آن‌ها با استفاده از آزمایش های تنش-کنترل در دمای اتاق با و بدون تنش میانگین، کرنش رچتینگ را تا زمان شکست اندازه‌گیری کردند و با ترسیم منحنی های کرنش رچتینگ برحسب تعداد سیکل نشان دادند که برای این آلیاژ، منحنی مربوطه شامل سه قسمت اولیه، پایدار و بحرانی می‌باشد [۲۳].

سانگ و شانگ در سال ۲۰۱۰ روی پوسته‌های استوانه‌ای آلیاژی تحت بارگذاری دو محوره مطالعه کرده و با روش‌های عددی و استفاده از مدل‌های سخت شوندگی، منحنی‌های هیستریزیس را شبیه‌سازی کرده‌اند [۲۴].

نیپ و همکارانش طی پژوهشی به بررسی خستگی کم تکرار و منحنی تنش-کنترل تک‌محوره عمر خستگی سه نوع فولاد را مورد مطالعه قرار دادند [۲۵].

یوشیدا و همکاران در سال ۲۰۱۰ ثابت کردند که حتی در دمای اتاق تعدادی از مواد از قبیل فولاد SS304L، خاصیت ویسکوزیته دارند و تغییر در نرخ تنش بر رچتینگ تأثیر می‌گذارند. یوشیدا تعدادی تست یک محوره و چند محوره بر روی تداخل رچتینگ و خزش در دمای اتاق و دمای ۶۵ سانتیگراد انجام داد و بر روی تأثیر نرخ تنش، زمان نگه داری قله تنش^۱ و نسبت تنش بر رچتینگ بحث کرد [۲۶].

کولکارینا و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از دستگاه تست خمش چهار نقطه‌ای به مطالعه‌ی رفتار رچتینگ لوله‌های مستقیم پرداختند و با نتایج عددی در نرم افزار انسیس مقایسه کردند [۲۷].

¹ Peak stress hold time

زکویا و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی رفتار رچتینگ لوله‌های فولادی ضد زنگ و لوله‌های فولادی کربنی با نسبت قطر میانگین به ضخامت در محدوده ۸-۲۸ پرداختند. لوله‌ها تحت ممان خمشی تناوبی قرار گرفته و کرنش‌های رچتینگ پوسته مشاهده شد. آن‌ها با استفاده از تحلیل اجزای محدود با مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک رفتار رچتینگ پوسته را مورد مطالعه قرار دادند. با مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی مشاهده شد که نرخ کرنش رچتینگ اولیه بسیار بزرگ است و با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد و همچنین مشاهده شد با نسبت قطر میانگین به ضخامت یکسان در لوله‌ها، نسبت ممان به ممان تسلیم در پدیده رچتینگ در نمونه‌های فولادی ضد زنگ کمتر از نمونه‌های فولادی کربنی است [۲۸].

آلبین موسا و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار سیکلی نمونه‌های لوله‌ای شکل از جنس آلیاژ منیزیم AZ31B را تحت بارگذاری محوری و پیچشی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند برخلاف حلقه‌های هیستریزس نامتقارن تحت بارگذاری محوری کرنش-کنترل، نمونه‌های AZ31B تحت بارگذاری پیچشی کرنش-کنترل U به صورت متقارن رفتار می‌کنند. آن‌ها همچنین نشان دادند که چگالی انرژی کلی، مجموع چگالی انرژی مثبت و پلاستیک در نیمه عمر، با داده‌های خستگی در هر دو بارگذاری محوری و پیچشی مربوط می‌شود [۲۹].

شریعتی و همکاران در سال ۲۰۱۰ روی نمونه‌های استاندارد پلی‌استال، بارگذاری محوری تناوبی انجام داده و تأثیر دامنه نیرو و نیروی متوسط را روی رفتار رچتینگ نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. افزایش کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ با افزایش پارامترهای دامنه نیرو و نیروی متوسط از نتایج بدست آمده طی این مطالعه می‌باشد [۳۰].

شریعتی و همکارانش در سال ۱۳۹۰ به طور تجربی و عددی به بررسی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری تنش-کنترلی محوری تناوبی پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که نرخ انباشتگی کرنش پلاستیک در چند سیکل ابتدایی زیاد می‌باشد و در سیکل‌های بعدی کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی عددی نیز نرخ انباشتگی کرنش پلاستیک در چند سیکل ابتدایی منطبق بر نتایج

تجربی می‌باشد و در سیکل‌های بعدی انباشت کرنش پلاستیک نسبت به نتایج تجربی سریع‌تر کاهش می‌یابد [۳۱].

ژو و همکاران در سال ۲۰۱۲ بطور تجربی خواص کششی و کرنش رچتینگ را تحت بار خمشی بر روی میله فولادی Z2CND18.12 بررسی کردند و به مطالعه رابطه بین مدول یانگ و دما پرداختند. انباشتگی کرنش غیر الاستیک در دما و بارگذاری‌های مختلف بطور آزمایشگاهی مشاهده شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییرات مدول یانگ بصورت خط با دما تغییر می‌کند و به تدریج با افزایش دما کاهش می‌یابد و کرنش رچتینگ به شدت به دما وابسته است [۳۲].

شریعتی و حاتمی در سال ۲۰۱۲ به طور تجربی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولاد ضد زنگ SS304 را تحت بارگذاری محوری سیکلی در شرایط نیرو-کنترل و جابه-جایی کنترل مطالعه کردند. در بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر، شاهد پدیده رچتینگ بودند و انباشتگی کرنش پلاستیک تا شکست پوسته ادامه یافت. آن‌ها مشاهده کردند که نرخ کرنش رچتینگ با افزایش نیروی دامنه، افزایش می‌یابد. در بارگذاری جابجایی-کنترل پوسته رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کماتش در بارگذاری فشاری، نرم شوندگی شدت یافت [۳۳].

دوتا و ری در سال ۲۰۱۲، رفتار رچتینگ و خواص کششی نمونه‌ی پس از رچتینگ را بر روی آلیاژ آلومینیم بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که کرنش رچتینگ در تنش میانگین ثابت با افزایش دامنه‌ی تنش برای نمونه ساده و نمونه‌ی کار سرد شده به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین خواص کششی نمونه‌ها را بعد از ۱۰۰ سیکل بارگذاری و ایجاد کرنش رچتینگ در آنها، بررسی کردند [۴].

شریعتی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به طور تجربی و عددی به بررسی رفتار رچتینگ و نرم-شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری سیکلی تنش-کنترل و کرنش-کنترل پرداختند و مشاهده کردند که نرخ انباشتگی کرنش پلاستیک در سیکل‌های اولیه زیاد و در سیکل‌های انتهایی

کاهش می‌یابد. تحلیل عددی به وسیله نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل‌های سخت-شوندگی انجام شد. آن‌ها مشاهده کردند که مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک، رفتار رچتینگ پوسته‌ها به خوبی شبیه‌سازی می‌کند [۳۹].

۱-۷- جمع بندی

با مطالعه مقاله‌های مختلف در رابطه با بارگذاری‌های سیکلی روی پوسته‌های استوانه‌ای، انواع بارگذاری‌های سیکلی محوری، پیچشی با تغییر پارامترهای مختلف مانند طول، شعاع و جنس ماده روی رفتار آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با مروری بر مقالات، بررسی پوسته‌های استوانه‌ای تحت تأثیر گشتاور خمشی بر رفتار رچتینگ پوسته‌ها تحلیل نشده است.

در این پژوهش با طراحی فیکسچر مناسب جهت اعمال بار خمشی به پوسته‌های جدارنازک، نیروی سیکلی عمودی دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ به گشتاور خمشی خالص تبدیل شده است. در این مطالعه آزمایش رچتینگ به صورت نیرو-کنترل و جابه‌جایی کنترل برای ترکیب‌های مختلف تنش میانگین و دامنه تنش‌های مختلف با اهداف زیر صورت گرفته است:

- ۱- مشاهده رفتار رچتینگ بر لوله‌های با سطح مقطع دایروی و چهارگوش تحت خمش خالص
- ۲- تأثیر مشخصه‌های بارگذاری (بار میانگین، دامنه بار) بر رفتار رچتینگ لوله‌ها تحت خمش خالص

۳- تأثیر هندسه بر رفتار رچتینگ تحت خمش خالص

۴- تأثیر طول لوله‌ها بر رفتار رچتینگ تحت خمش خالص

۵- تأثیر گشودگی بر رفتار رچتینگ تحت خمش خالص

جنس پوسته‌های جدارنازک مورد مطالعه از فولاد SS304 می‌باشد. این فولاد یکی از پرکاربردترین فولادهای به کار رفته در سازه‌های مهندسی است؛ که در قطعات با استحکام بالا به ویژه در خودروها و

هواپیماها که در معرض بارهای چرخه‌ای قرار دارند؛ مانند میل‌لنگ، شاتون، میل‌محور وسایل نقلیه، انواع شافت و چرخنده‌های کوچک کاربرد دارد.

فصل دوم - آزمایش‌های تجربی

۱-۲- مقدمه‌ای بر آزمایش‌های انجام شده

در این فصل آزمایش‌های تجربی مختلفی بر روی نمونه‌های جدارنازک با سطح مقطع دایروی و مستطیلی استاندارد از جنس SS304 درزدار انجام گرفته است. آزمایش‌ها به دو صورت نیرو-کنترل و جابه‌جایی-کنترل انجام گرفته‌اند. در آزمایش‌های نیرو-کنترل بارگذاری با نیروی میانگین غیر صفر وارد ناحیه پلاستیک می‌شود تا در نمونه‌ها کرنش رج‌تینگ ایجاد گردد. این مرحله تا مرحله شکست نمونه‌ها ادامه پیدا می‌کند.

۲-۲- دستگاه آزمایش

آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده‌اند، که توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت 250kN را دارد. همچنین برای نمونه‌های مورد آزمایش فیکسچر مناسب (شکل ۱-۲) جهت اعمال گشتاور خمشی طراحی شده است.

۱-۲-۲- هندسه و خواص مکانیکی

نمونه‌های آزمایش در این تحقیق با قطرهای 25,32mm با ضخامت 1.1mm و قوطی با سطح مقطع 2mm*2mm و 2mm*4mm مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱-۲). آزمایش کشش ساده نیز با استفاده از همین نمونه‌ها با فرکانس $0.1 \frac{Cycle}{s}$ (جابه‌جایی-کنترل 20mm معادل $2 \frac{mm}{s}$) انجام شده است؛ که نمودار آن در شکل (۲-۲) دیده می‌شود. هندسه و خواص مکانیکی ماده مورد بحث در جدول (۱-۲) نشان داده شده است.

۳-۲-۲- آزمایش کشش استاندارد

نمونه‌های مورد آزمایش، پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ SS304 می‌باشند. جهت به- دست آوردن خواص مکانیکی پوسته فولادی، از آزمایش کشش استاندارد بر طبق استاندارد ASTM-E8 [۳۵] استفاده شده است (شکل (۱-۲)).

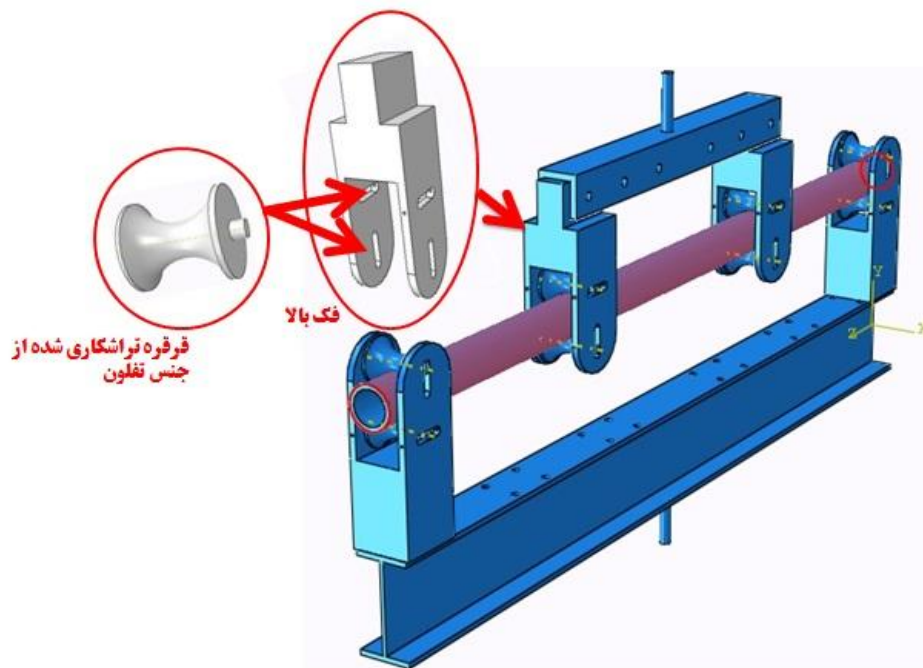
منحنی تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد در شکل (۲-۳) برای فولاد SS304 با فرکانس 0.1Cycle/S نشان داده شده است.

جدول (۱-۲). مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS304

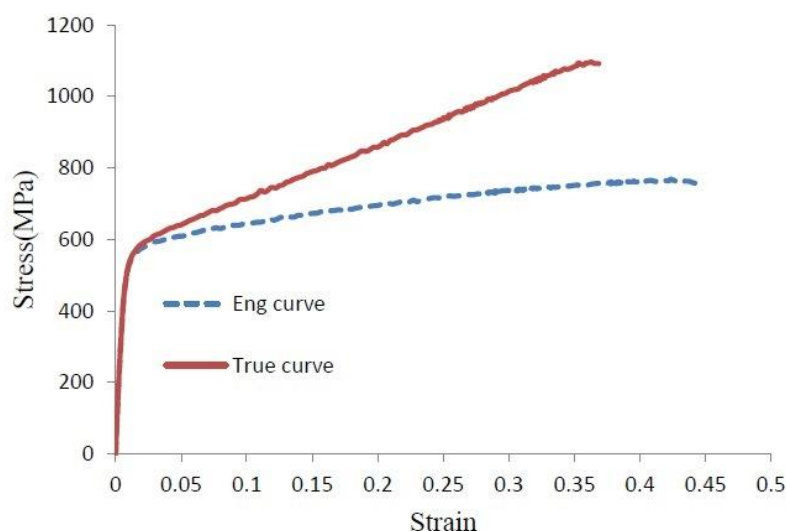
مقادیر	مشخصات نمونه
D=25,32	قطر خارجی (mm)
t= 1.1	ضخامت (mm)
L=280,650	طول مؤثر (mm)
E=204	مدول الاستیسیته (MPa)
$\sigma_y = 510.01$	تنش تسلیم (MPa)
$\sigma_u = 768.41$	تنش نهایی (MPa)
$\theta = 0.33$	ضریب پواسون



شکل (۲-۱). دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و استفاده از طول سنج برای تست کشش استاندارد



شکل (۲-۲). فیکسچر طراحی شده جهت اعمال گشتاور خمش خالص سیکلی



شکل (۲-۳). نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش کشش استاندارد برای فولاد SS304

برای محاسبه‌ی تنش و کرنش حقیقی با توجه به تنش و کرنش مهندسی حاصل از تست

کشش استاندارد، از روابط (۱-۲) و (۲-۲) استفاده می‌شود:

$$\epsilon_{\text{real}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{eng}}) \quad (1-2)$$

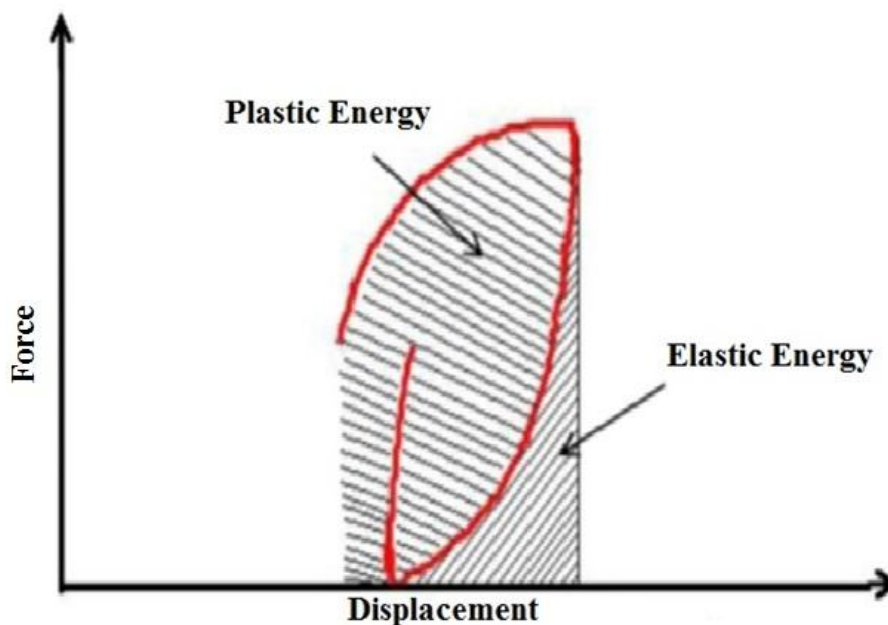
$$\sigma_{\text{real}} = \sigma_{\text{eng}}(1 + \epsilon_{\text{eng}}) \quad (2-2)$$

که در روابط بالا، پارامتر ϵ_{real} ، σ_{real} ، ϵ_{eng} ، σ_{eng} به ترتیب کرنش حقیقی، تنش حقیقی، کرنش مهندسی و تنش مهندسی می‌باشند.

۲-۴- انرژی و رابطه‌ی آن با نرخ تغییر شکل پلاستیک

انرژی به عنوان یک تابع با مقدار اسکالر و مستقل از جهت، قابل مقایسه برای بارگذاری مختلف مرکب سیکلی و بارگذاری عمودی سیکلی برای طول‌های مختلف می‌باشد. انرژی پلاستیک و انرژی کل (مجموع انرژی کرنشی پلاستیک و انرژی کرنشی الاستیک) با افزایش تعداد سیکل به مقدار پایداری می‌رسند و از این جهت به عنوان پارامترهای مناسب برای بررسی رفتار رچتینگ می‌باشند. در این

قسمت در شکل (۳-۴)، انرژی پلاستیک و انرژی الاستیک در حلقه‌ی هیستریزس نشان داده شده است.



شکل (۲-۴). انرژی آزاد شده الاستیک و پلاستیک در یک سیکل هیستریزس

اکثر مواد در اثر بارگذاری سیکلی تا یک تعداد مشخص از سیکل دچار سخت‌شوندگی و یا نرم‌شوندگی می‌شوند؛ سپس به حالت پایدار می‌رسند و یا تغییر اندازه‌ی سطح تسلیم متوقف می‌شوند. با این حال رچتینگ همچنان بعد از پایداری سیکلی مواد ادامه می‌یابد. از این رو می‌توان سخت‌شوندگی سینماتیک را به عنوان اصلی‌ترین دلیل وقوع رچتینگ دانست. به عبارت دیگر دخالت دادن سخت‌شوندگی ایزوتروپیک ضروری به نظر نمی‌رسد [۳۶].

۲-۵- بارگذاری خمشی

در این قسمت، رفتار پوسته‌های فولادی تحت بارگذاری خمشی بررسی می‌شود. بارگذاری‌ها به صورت سیکلی و تحت شرایط نیرو-کنترل و جابه‌جایی کنترل به نمونه‌ها اعمال می‌شود. در این تحقیق، میانگین بیشترین و کمترین جابه‌جایی عمودی نقطه اعمال بار در هر سیکل به عنوان جابه‌جایی رجتینگ تعریف می‌شود. و به منظور بی‌بعد کردن، پارامتر X_r به عنوان نسبت جابه‌جایی رجتینگ به طول مؤثر آن تعیین می‌شود.

تنش خمشی مومسان در حالت کرنش صفحه‌ای مطابق معادله (۲-۳) عبارت است از:

$$S = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f = 589.6 \text{ MPa} \quad (۲-۳)$$

از معادله (۲-۴) مدول کشسانی در حالت کرنش صفحه‌ای برابر است از:

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} = 228.93 \text{ GPa} \quad (۲-۴)$$

از معادله (۲-۵) گشتاور خمشی در محدوده کشسان در عرض واحد عبارت است از:

$$M_e = \frac{St^2}{6} = 118.9 \text{ Nm/m} \quad (۲-۵)$$

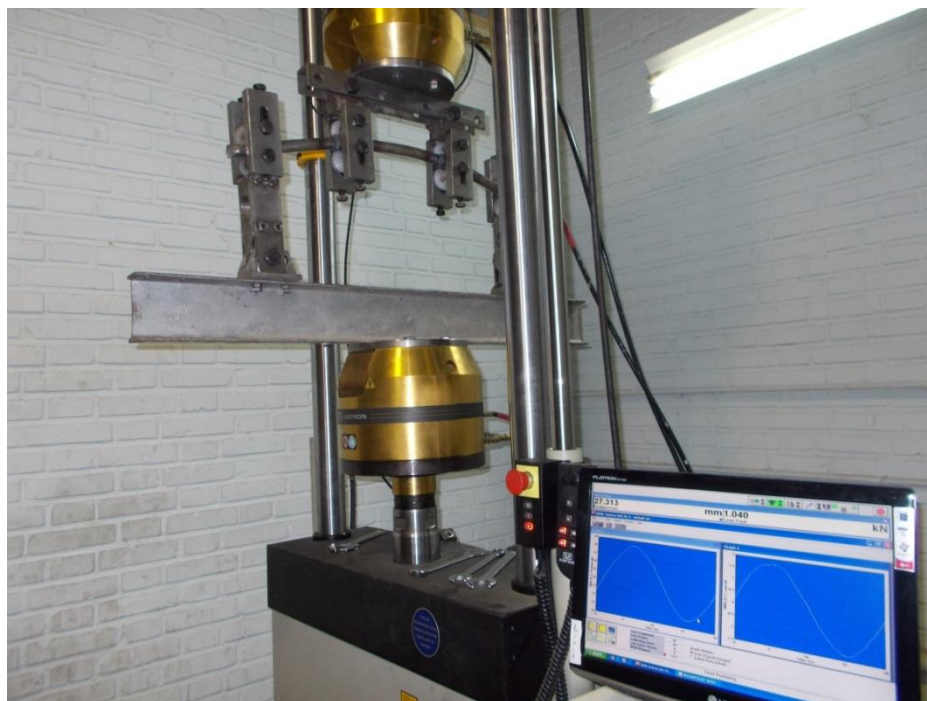
گشتاور مومسان کامل از معادله (۲-۶) عبارت است از:

$$M_p = \frac{3}{2} M_e = 178.354 \text{ Nm/m} \quad (۲-۶)$$

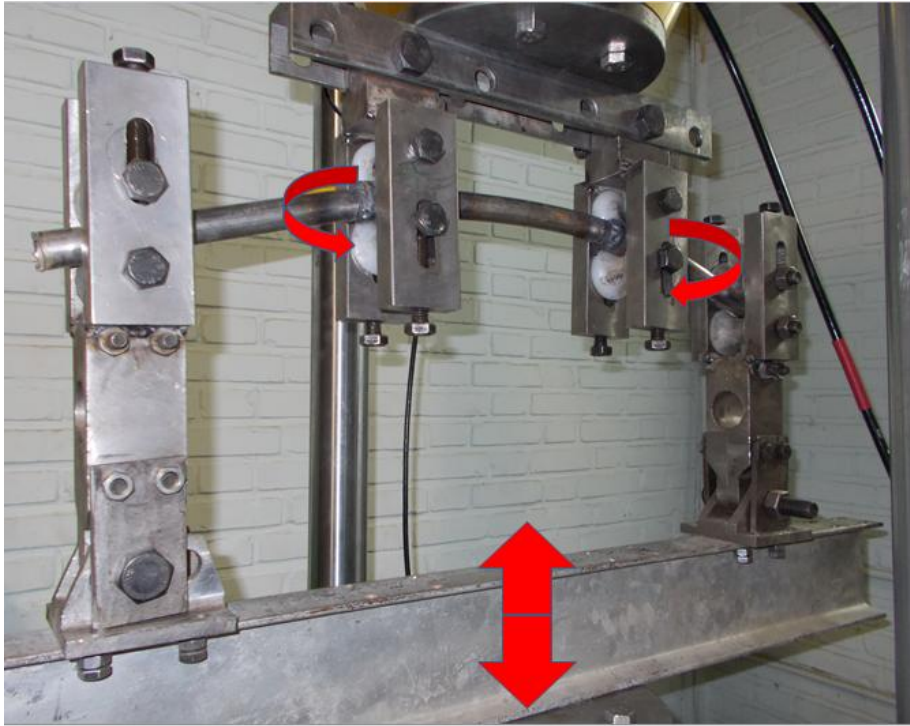
۲-۵-۱- شرایط مرزی

برای اعمال بارگذاری خمشی، فیکسچر شکل (۲-۵) طراحی شده است. جهت ثابت نگه داشتن پوسته‌ها در داخل فیکسچر، از قرقره‌های تفلون تراشکاری شده به دو صورت انحنای جهت لوله‌ها و پله-ای جهت قوطی‌ها استفاده شده است. قرقره‌ها طوری در داخل فیکسچر قرار گرفته‌اند که تا حدی در راستای خود پوسته چرخش داشته باشند. در لبه فک‌ها پیچ‌های قابل تنظیمی طراحی شده است که پوسته‌ها با هر قطری درون آن ثابت گردد. دو فک بالایی قابلیت حرکت به صورت ریلی در طول‌های

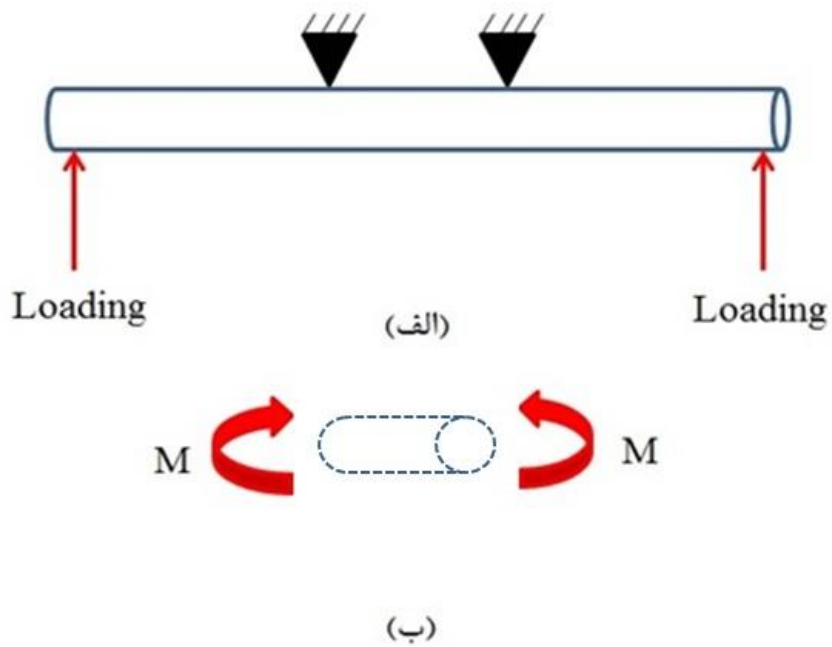
مؤثر 280,650mm را دارد. بار تناوبی از طریق فک پایین مطابق شکل (۲-۵) به ابتدای پوسته اعمال می‌گردد. با برش پوسته در طول‌های متفاوت، گشتاور خمشی به صورت تناوبی مطابق شکل (۲-۶) در مقطع ایجاد می‌شود. در شکل (۲-۵)، پوسته‌ی استوانه‌ای با طول 280mm نشان داده شده است که به صورت متقارن با استفاده از فیکسچرهای طراحی شده به دستگاه اینسترون متصل می‌شوند. با برش پوسته در طول‌های متفاوت، نیروی محوری، برشی و گشتاور خمشی به صورت تناوبی مطابق شکل (۲-۷) در مقطع ایجاد می‌شود که به دلیل ضخامت کم پوسته‌ها از اثر نیروی برشی صرف نظر می‌شود.



شکل (۲-۵). دستگاه اینسترون و پوسته استوانه‌ای تحت گشتاور خمشی خالص



شکل (۲-۶). اعمال نیروی کششی و فشاری توسط فک پایین دستگاه و اعمال گشتاور خالص به پوسته



شکل (۲-۷) الف) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه در بارگذاری مرکب، ب) بارگذاری ایجاد شده در مقطع

پوسته استوانه‌ای مرکب (V نیروی برشی، M گشتاور خمشی)

در آزمایش‌های اولیه در حین اعمال بار روی پوسته‌ها، در محل فک‌های میانی له‌شدگی، مشاهده گردید. (شکل ۲-۸-الف) این عیب باعث گردید که پوسته‌ها قبل از این‌که تحت گشتاور خمشی قرار گیرد، از این محل‌ها دچار له‌شدگی شود. به همین دلیل پوسته‌ها در این محل‌ها با جوش کارپیت تقویت گردید. (شکل ۲-۸-ب)



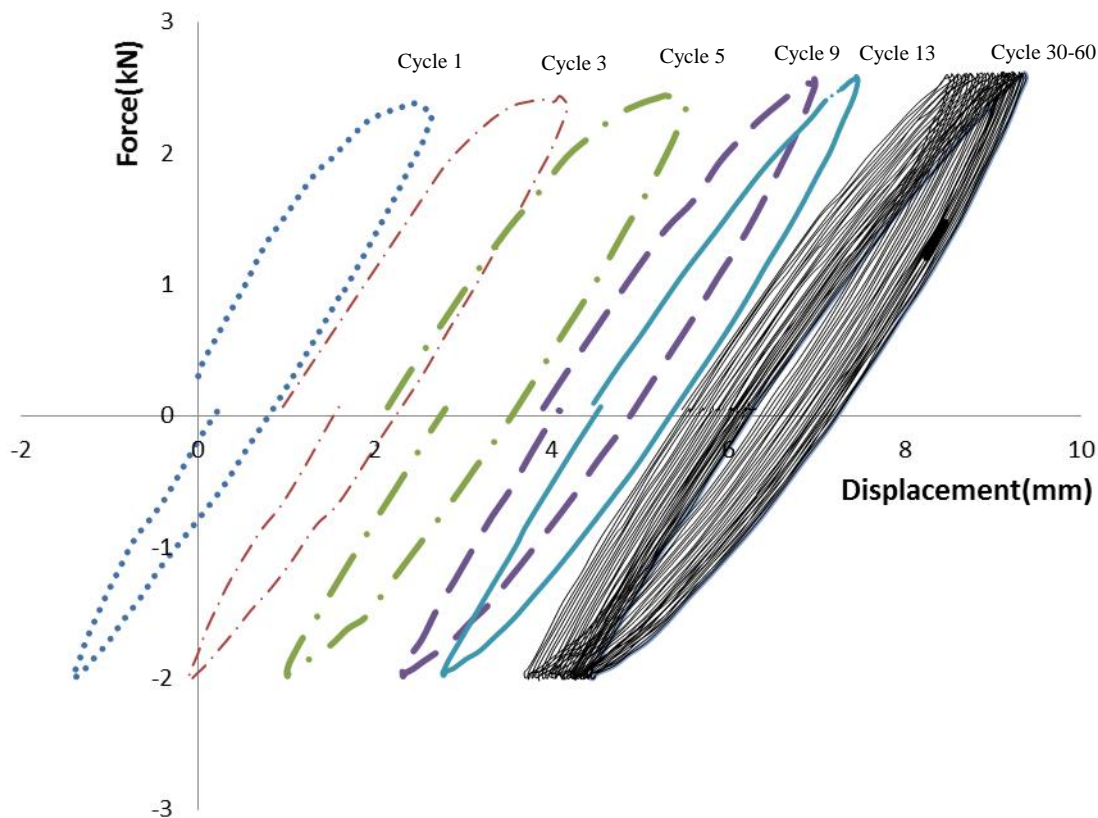
شکل (۲-۸). الف- له‌شدگی در محل فک‌های میانی ب- تقویت لوله در محل له‌شدگی

۲-۶- بارگذاری نیرو-کنترل

۲-۶-۱- تأثیر نیروی میانگین بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر 280 mm تحت بارگذاری خمشی با شرایط نیرو-کنترل قرار می‌گیرند. در این شرایط انباشتگی تغییر شکل پلاستیک یا پدیده رچتینگ مشاهده شد. تغییر شکل سیکلی، باعث بدست آمدن یک حلقه‌ی هیستریزیس برای هر سیکل بارگذاری می‌گردد و

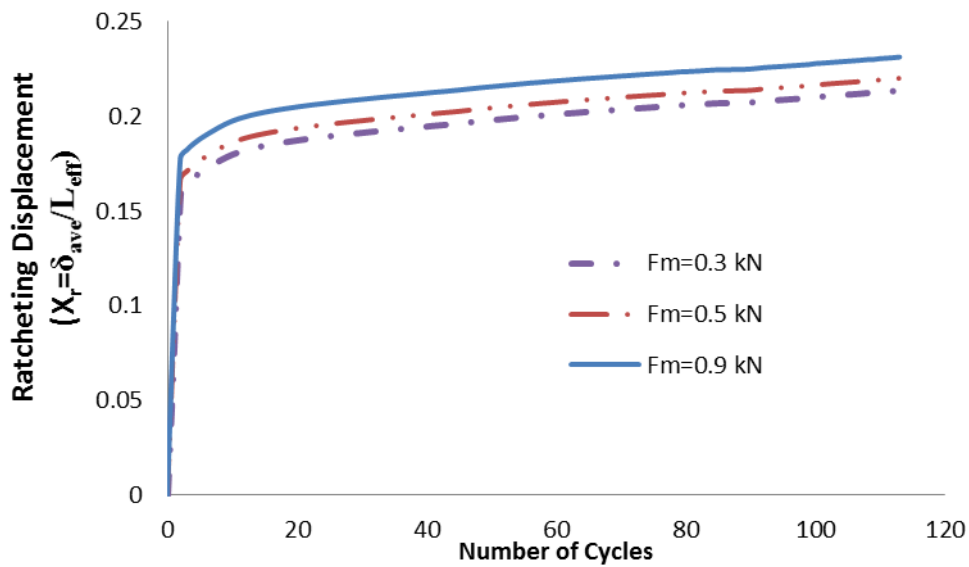
در آزمایشاتی که پدیده‌ی رچتینگ رخ می‌دهد، حلقه هیستریزیس بسته نمی‌شود. در شکل (۲-۹)، نمودار حلقه‌های هیستریزیس نیرو-جاب‌جایی ابتدای پوسته نشان داده شده است. آزمایش‌های نیرو-کنترل در ۱۲۰ سیکل انجام شد و در شکل (۲-۱۰)، نسبت جاب‌جایی رچتینگ به طول مؤثر پوسته بر حسب تعداد سیکل برای سه نیروی میانگین تحت دامنه نیروی 1.4kN نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای نیروی میانگین ثابت با افزایش تعداد سیکل، جاب‌جایی رچتینگ افزایش و نرخ رچتینگ کاهش می‌یابد که این رفتار رچتینگ در حرکت حلقه‌های هیستریزیس در شکل (۲-۹) نیز مشاهده شد.



شکل (۲-۹). رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با طول مؤثر 280mm و نیروی میانگین 0.3kN و دامنه نیروی 1.4kN

تحت بارگذاری خمشی خالص

همچنین با افزایش نیروی میانگین، جابه‌جایی رج‌تینگ افزایش می‌یابد که این تغییر به دلیل افزایش گشتاور خمشی در مقاطع مختلف پوسته‌های استوانه‌ای است. گشتاور خمشی در میانه پوسته دارای بیشترین مقدار است و در آزمایش‌های تجربی مشاهده شد که پوسته‌های استوانه‌ای در این ناحیه دچار خمش می‌شوند و شکست در این ناحیه اتفاق می‌افتد (شکل (۲-۱۱)).



شکل (۲-۱۰). جابه‌جایی رج‌تینگ پوسته بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیروی میانگین F_m

مختلف و دامنه نیروی 1.4kN تحت خمش خالص

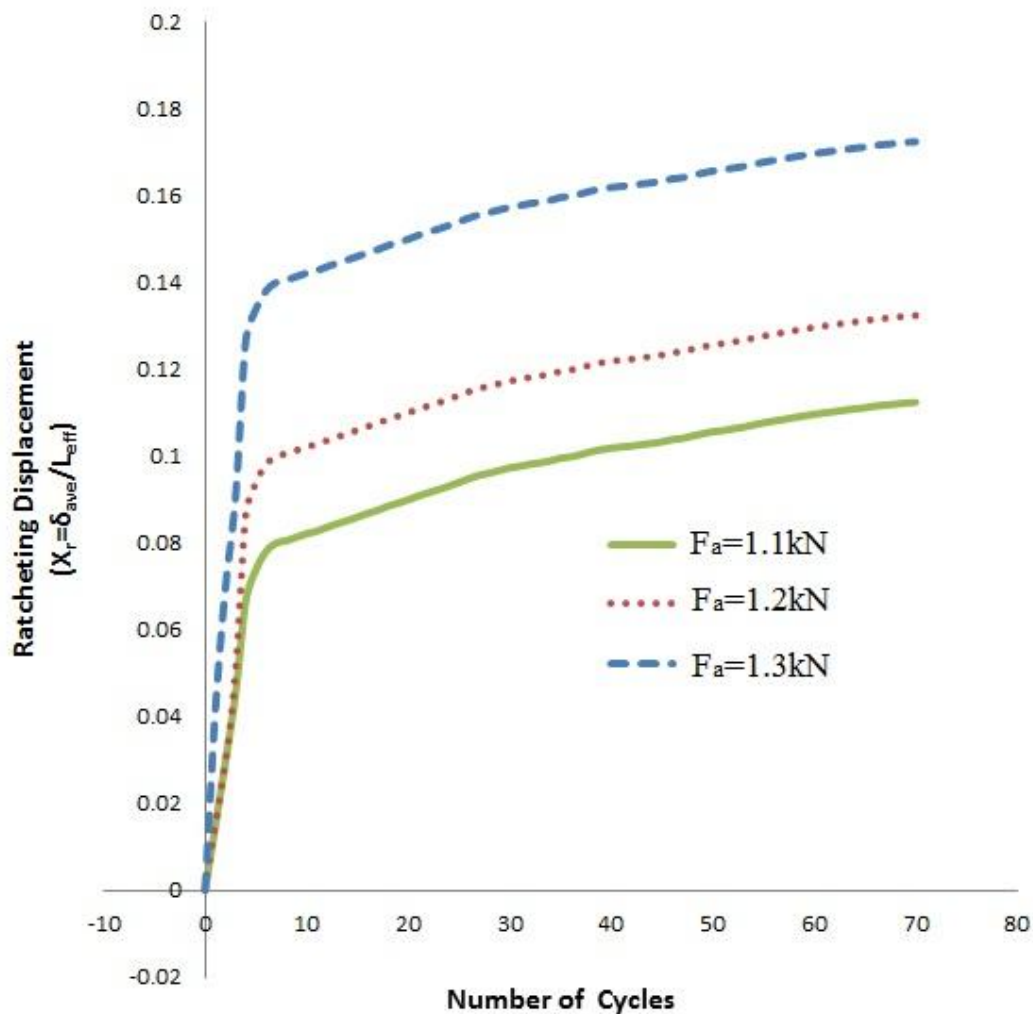


شکل (۲-۱۱). محل شکست در میانه پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی با طول مؤثر 280mm و نیروی میانگین

0.3kN و دامنه نیروی 1.4kN

۲-۶-۲- تأثیر دامنه بار بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای

در این قسمت هر یک از پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری نیروی میانگین 0.1kN و دامنه نیروی 1.1kN، 1.2kN و 1.3kN قرار گرفت. به دلیل بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن (نیروی میانگین غیرصفر) رفتار رچتینگ در پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد شده است. با توجه به شکل (۲-۱۲)، با افزایش دامنه نیرو، جابه‌جایی رچتینگ افزایش می‌یابد. در این شرایط بارگذاری، افزایش دامنه نیرو موجب افزایش نیروی ماکزیمم می‌شود و باعث تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگتر می‌شود و در نتیجه انباشتگی کرنش نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۱۲). جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل در نیروی میانگین 0.1kN و دامنه نیروهای F_d مختلف

۲-۶-۳- اشباع جابه‌جایی رچتینگ

در شکل (۲-۱۳)، تغییرات نرخ رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با دامنه نیروی 1.4kN و نیروهای میانگین 0.5 و 0.9kN نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نرخ جابه‌جایی رچتینگ برای هر دو نیرو با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد؛ اما در هر سیکل، نرخ جابه‌جایی رچتینگ برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیروهای میانگین اعمال شده اختلاف بسیار کمی نسبت به هم دارند و پوسته‌ی استوانه‌ای با نیروی میانگین 0.9kN دارای نرخ جابه‌جایی بالاتری است.

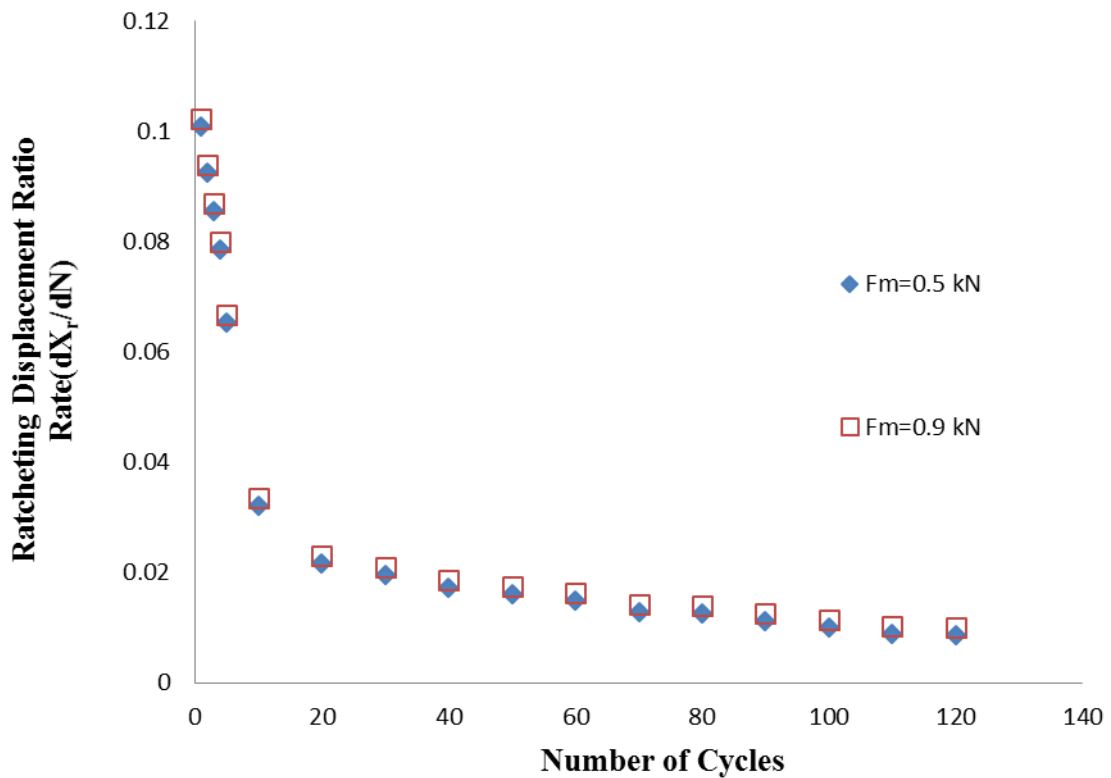
در ۱۰ سیکل ابتدایی، کاهش نرخ جابه‌جایی رچتینگ بسیار زیاد است؛ اما در ادامه این کاهش قابل چشم پوشی است. مقدار کاهش نرخ جابه‌جایی رچتینگ در سیکل‌های انتهایی تقریباً ثابت و به صفر میل می‌کند.

کاهش نرخ جابه‌جایی رچتینگ و میل کردن آن به صفر یا به عبارت دیگر توقف انباشتگی تغییر شکل پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ، به دلیل شکل‌گیری و گسترده‌ی نابجایی‌ها^۱ با تغییر شکل‌های سیکلی است. وقتی که ماده‌ای تحت تغییر شکل‌های سیکلی است، نابجایی‌هایی در نتیجه‌ی سخت‌شوندگی کرنشی تولید می‌شوند. این نابجایی‌ها، ابتدا به حالت آشفته قرار گرفته‌اند و سپس با افزایش تعداد سیکل، به شکل المان‌های نابجایی منظم در می‌آیند. پس از تعداد سیکل معین (بستگی به کرنش‌های سیکلی اعمالی دارد)، نابجایی‌های تولید شده‌ی جدید، شکل بندی پایدار و منظمی به خود می‌گیرند و این تغییر شکل موجب کاهش و صفر شدن نرخ جابه‌جایی رچتینگ می‌شود.

۳-۶-۴- انرژی پلاستیک و رابطه‌ی آن با جابه‌جایی رچتینگ

در شکل (۲-۱۴)، انرژی پلاستیک برای پوسته‌های استوانه‌ای با دامنه نیروی 1.4kN و نیروهای میانگین 0.5 و 0.9kN رسم شده است. مشاهده می‌شود که در سیکل‌های اولیه با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک به شدت کاهش می‌یابد و در ادامه به مقدار ثابتی می‌رسد.

¹ Dislocation



شکل (۲-۱۳). نرخ جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت خمش خالص به ازای

نیروهای میانگین F_m مختلف

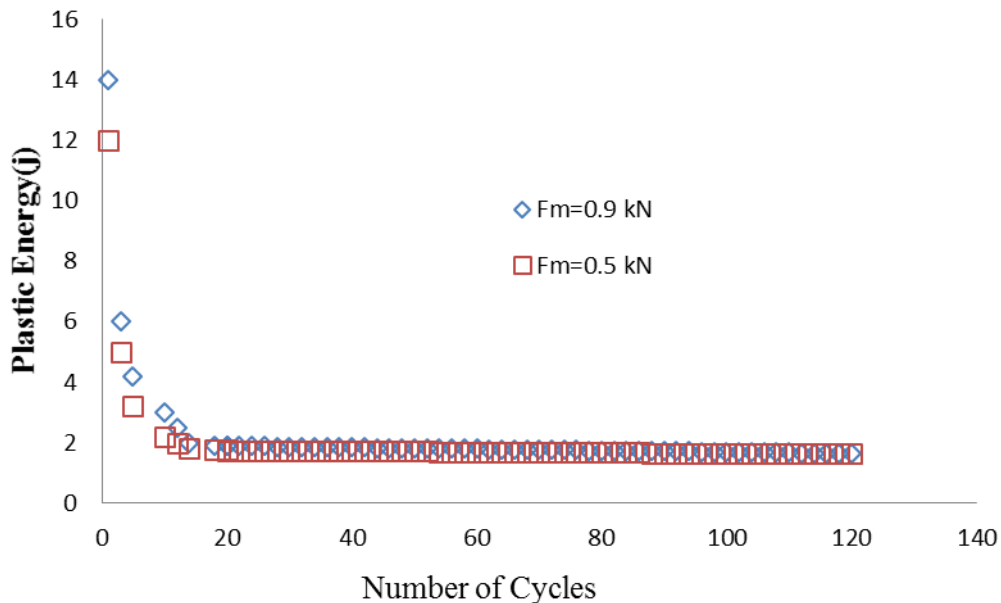
در هر سیکل، پوسته با نیروی میانگین 0.9kN دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به انرژی پلاستیک پوسته با نیروی میانگین 0.5kN است و این به دلیل ایجاد گشتاورهای خمشی بزرگتر در انتهای پوسته با نیروی میانگین بزرگتر با طول یکسان برای هر دو پوسته است؛ اما با افزایش تعداد سیکل این اختلاف کاهش می‌یابد.

۲-۶-۵- تأثیر وجود گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آنها تحت

گشتاور خمشی

در این قسمت پوسته استوانه‌ای تحت بار میانگین 0.3kN و بار دامنه‌ی 1.4kN تحت گشتاور خمشی قرار گرفته‌است. یک گشودگی دایروی به قطر 10mm در میانه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای مطابق شکل (۲-۲)

۱۵-الف) ایجاد شده است. همانطور که در شکل (۲-۱۵-ب) و شکل (۲-۱۶-الف) مشاهده می‌شود، نیروی اعمالی باعث باز و بسته شدن گشودگی می‌گردد.



شکل (۲-۱۴). انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیروی میانگین F_m مختلف و دامنه نیروی 1.4kN تحت خمش خالص

در شکل (۲-۱۷) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رجتینگ برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی آن، افزایش می‌یابد و جابه‌جایی رجتینگ برای پوسته‌ی استوانه‌ای با گشودگی دایروی بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی است. گشتاور خمشی در مقاطع شامل گشودگی در جهت باز شدن آن عمل می‌کند و گشودگی دایروی با افزایش تعداد سیکل، تبدیل به شکل بیضوی شکل (۲-۱۴-ب) می‌شود. از آنجایی که ایجاد گشودگی باعث تمرکز تنش در اطراف گشودگی می‌شود، در نتیجه شاهد کرنش‌های پلاستیک بزرگتری در اطراف گشودگی هستیم و اطراف

گشودگی به عنوان محل بحرانی در این پوسته‌ها می‌باشد و این امر باعث رشد ترک می‌گردد، که این ترک در سیکل ۲۴ اتفاق افتاد.



(الف)



(ب)

شکل (۲-۱۵). الف-گشودگی دایروی در میانه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای تحت گشتاور خمشی ب- تغییر شکل گشودگی

به بیضی



(الف)

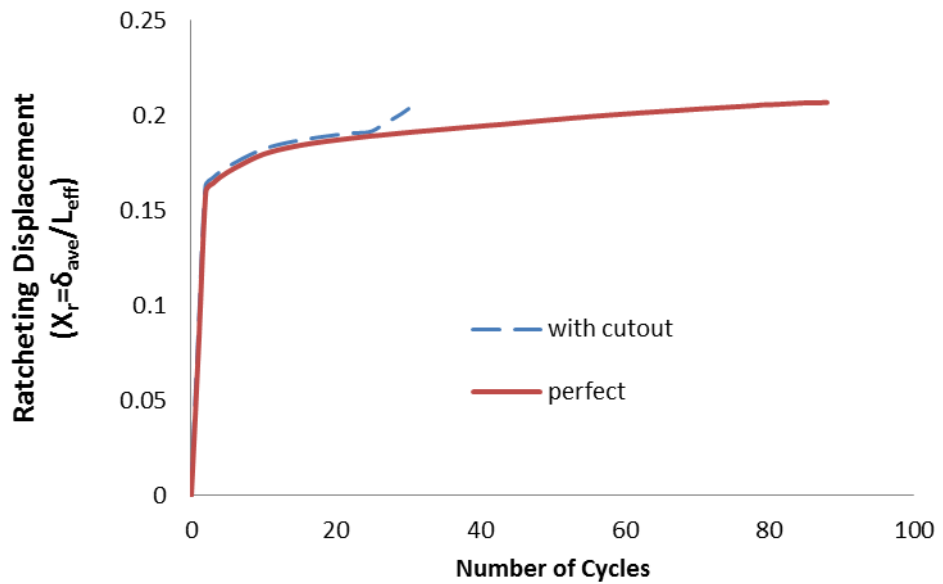


شکل (۲-۱۶). الف- جمع شدن گشودگی ب- شکست از محل گشودگی

۲-۶-۶- تأثیر محل گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته‌ای استوانه‌ای تحت خمش خالص

در این قسمت یک گشودگی در پوسته‌ای استوانه‌ای در یک چهارم طول محل تحت خمش ایجاد شده است. این پوسته تحت بار میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN قرار گرفته است. مطابق حالت قبل، اعمال بار باعث باز و بسته شدن گشودگی می‌گردد. مطابق شکل (۲-۱۸) در دو ناحیه‌ی میانه‌ی پوسته و محل گشودگی انباشتگی کرنش صورت می‌گیرد. که این امر سبب می‌گردد نسبت به حالت قبل، رشد ترک دیرتر یعنی در سیکل ۵۰ اتفاق افتد شکل (۲-۱۹). لازم به ذکر است زمانی که گشودگی در

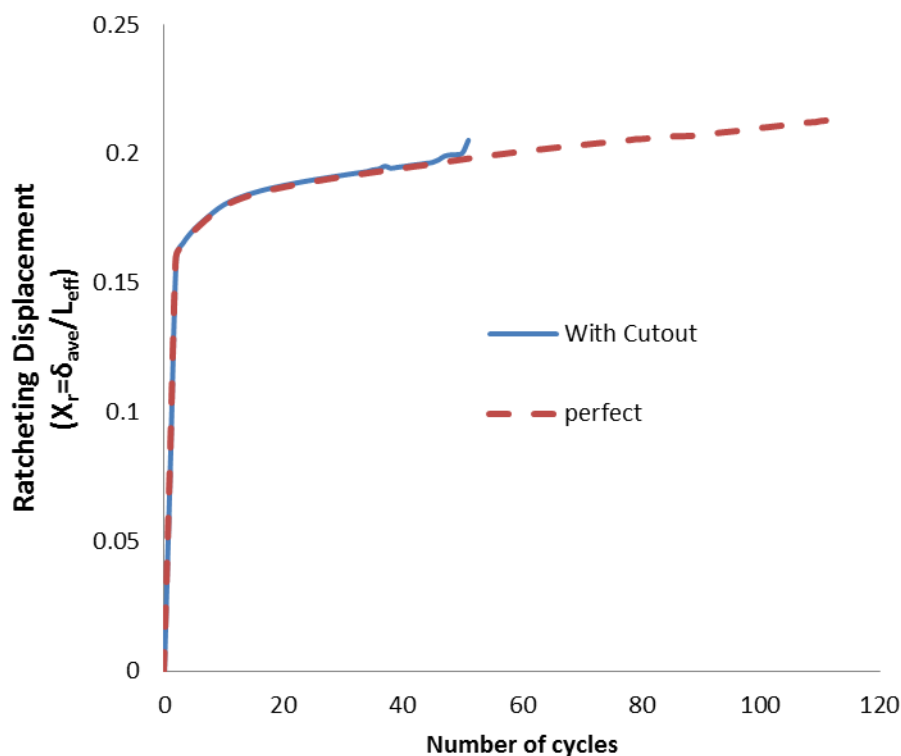
مرکز قرار دارد، گشتاور خمش و تمرکز تنش ناشی از گشودگی در میانه بیشترین می باشد؛ که باعث رشد ترک می گردد و در نهایت شکست پوسته در وسط و سریع تر به وقوع می پیوندد.



شکل (۲-۱۷). جابه جایی رجتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با بار میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN با و بدون گشودگی دایروی تحت خمش خالص



شکل (۲-۱۸). خمش در دونقطه ای میانی و محل گشودگی در پوسته ای استوانه ای

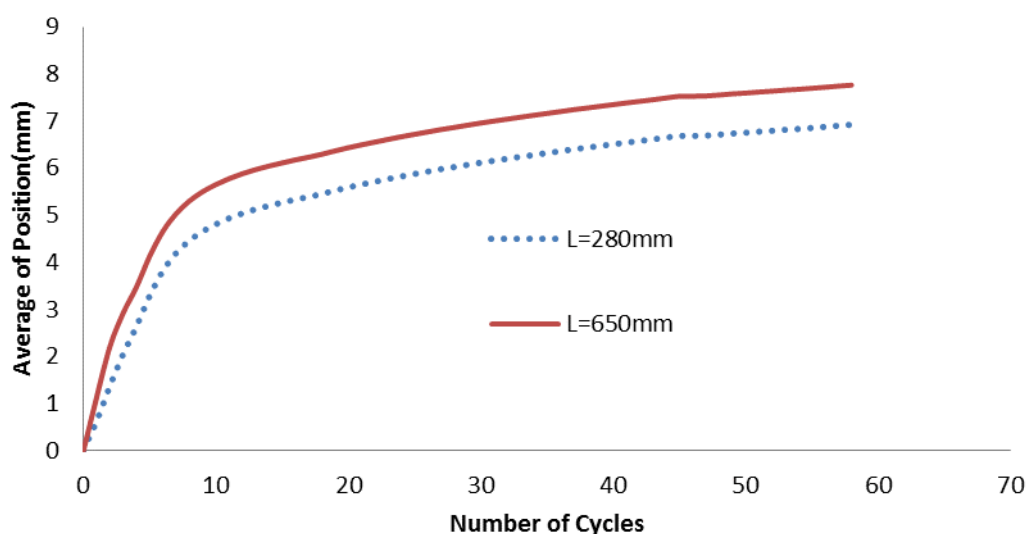


شکل (۲-۱۹). جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با بارمیانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN با گشودگی در محل یک چهارم طول تحت خمش و بدون گشودگی دایروی تحت خمش خالص

۲-۶-۷- تأثیر طول تحت خمش در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن‌ها تحت

بارگذاری نیرو خالص

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول‌های میانی 280mm و 650mm تحت بارگذاری خمشی قرار گرفته‌اند. بار میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN به مجموعه‌ی دو نمونه اعمال شد. در شکل (۲-۲۰) جابه‌جایی رچتینگ برای دو طول نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول پوسته‌های استوانه‌ای تحت خمش، جابه‌جایی رچتینگ افزایش می‌یابد که این تغییر به دلیل افزایش گشتاور خمشی ناشی از بزرگ‌شدن بازوی اعمال نیرو می‌باشد.



شکل (۲-۲۰). جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با بار میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN با طول‌های 280mm و 650mm تحت خمش خالص

۲-۶-۸- تأثیر قطر در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن‌ها تحت بارگذاری خمشی

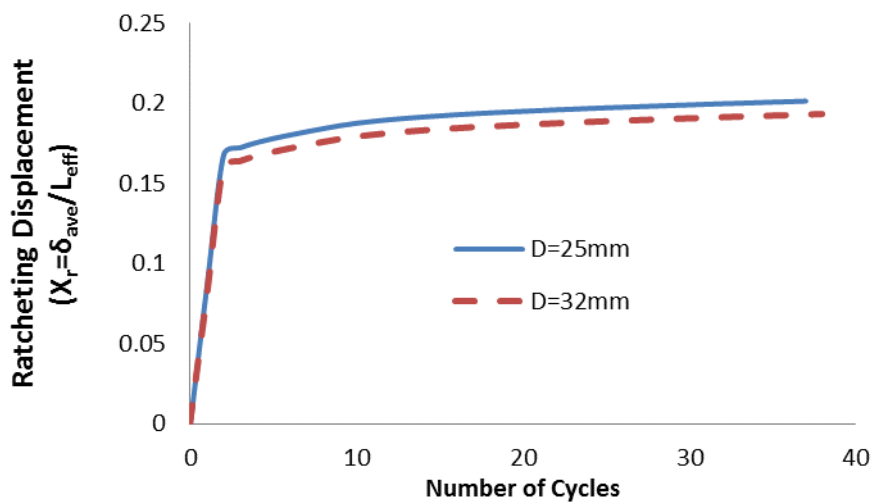
خالص

در شکل (۲-۲۱)، تغییرات جابه‌جایی رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با قطرهای 25mm و 32mm نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که جابه‌جایی رچتینگ برای پوسته‌ی استوانه‌ای با قطر 25mm به دلیل کاهش ممان اینرسی و در نتیجه افزایش تنش‌های عمودی ناشی از گشتاور خمشی، بیشتر است.

۲-۶-۹- بارگذاری نیرو-کنترل روی پوسته‌های استوانه‌ای با مقاطع مربعی و مستطیلی

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با مقاطع مربعی و مستطیلی تحت بارگذاری خمشی سیکلی قرار گرفته است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد به دلیل جوشکاری در محل تقویت و ضعیف شدن ماده در این محل، علیرغم تقویت در محل تکیه‌گاه‌ها مطابق شکل (۲-۲۲)، پوسته از محل تکیه‌گاه دچار لهیدگی

می‌گردد و پس از ۱۰ سیکل پوسته دچار شکست می‌گردد و تحت بارگذاری خمشی خاص قرار نمی‌گیرد. با اضافه نمودن محل تقویت نیز مجدداً دچار لهیدگی می‌گردد. شکل (۲-۲۳).



شکل (۲-۲۱). جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با بارمیانگین 0.3kN و دامنه بار

1.4kN با طول تحت خمشی 280mm و قطرهای D مختلف



(الف)



(ب)

شکل (۲-۲۲). الف) تقویت محل له شدگی در محل تکیه‌گاه ب) شکست بعد از محل تقویت



شکل (۲-۲۳). اضافه نمودن تقویت در محل تکیه‌گاه

۲-۶-۱۰- اثر درز پوسته بر نحوه شکست

در تمامی بارگذاری‌ها شکل (۲-۲۴)، پوسته از نوع درزدار استفاده شده است. مشاهده می‌شود که هیچ‌گونه شکستی در محل درز پوسته اتفاق نمی‌افتد. و درز پوسته هیچ‌گونه خللی در خمش خالص وارد نمی‌کند شکل (۲-۲۵). ماکزیمم تنش خمشی در پایین‌ترین نقطه اتفاق می‌افتد، زیرا بیشترین فاصله تا تار خنثی دارد؛ همان‌طور در شکل (۲-۲۵) الف مشاهده می‌شود هیچ‌گونه شکستی در محل درز اتفاق نمی‌افتد.



شکل (۲-۲۴). پوسته از نوع درزدار تحت بارگذاری خمش خالص



(الف)



(ب)

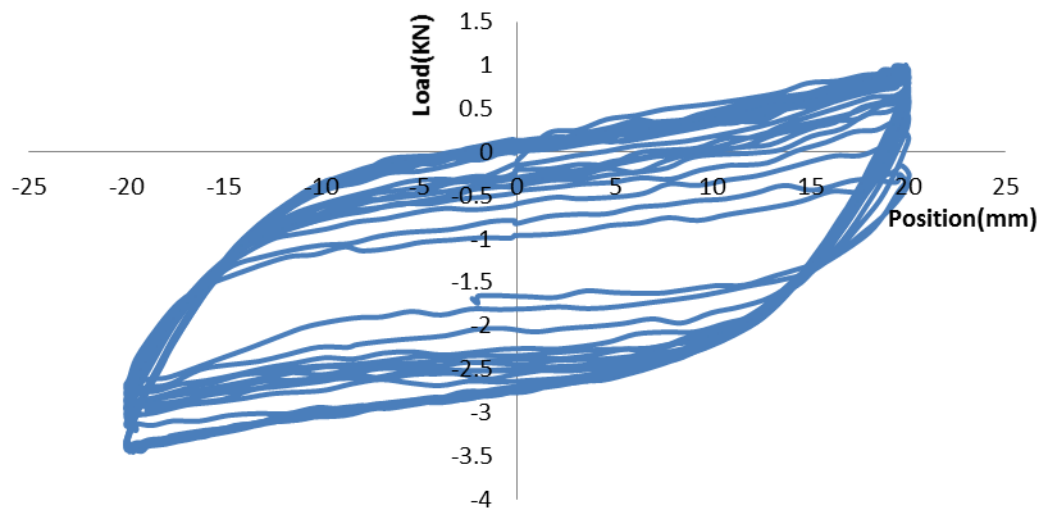
شکل (۲-۲۵). الف) محل درز در نیمه پایینی پوسته ب) محل درز روی تار خنثی

۷-۲- بارگذاری جابه‌جایی-کنترل

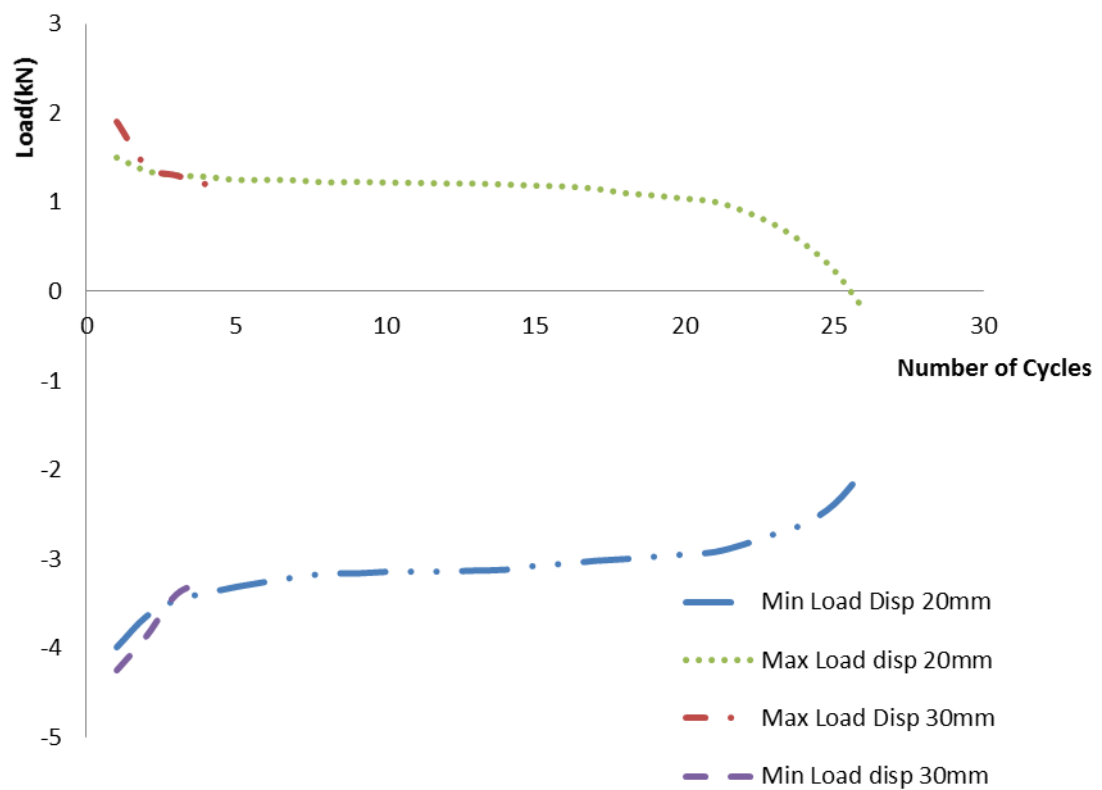
در بارگذاری جابه‌جایی-کنترل به بررسی رفتار سخت شوندگی/نرم شوندگی سیکلی ماده پرداخته می‌شود. این نوع بارگذاری نیز همانند نیرو-کنترل شامل یک مرحله می‌باشد.

۲-۷-۱- بررسی رفتار سخت شوندگی/نرم شوندگی سیکلی ماده

برای بررسی سخت شوندگی/نرم شوندگی سیکلی ماده، نمونه‌ها تحت بارگذاری جابه‌جایی-کنترل قرار گرفت. شکل (۲-۲۶) حلقه‌های هیستریزیس برای دامنه جابه‌جایی 20mm را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، نرم شوندگی در قسمت فشاری بیشتر از قسمت کششی می‌باشد. رفتار سیکلی ماده در دامنه جابه‌جایی 20mm به صورت رفتار نرم شونده می‌باشد به صورتی که برای دامنه جابه‌جایی 30mm شیب نرم شوندگی به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد. شکل (۲-۲۷)



شکل (۲-۲۶). حلقه‌های هیستریزیس برای دامنه‌ی جابه‌جایی 20mm پوسته‌ی استوانه‌ای تحت خمش خالص

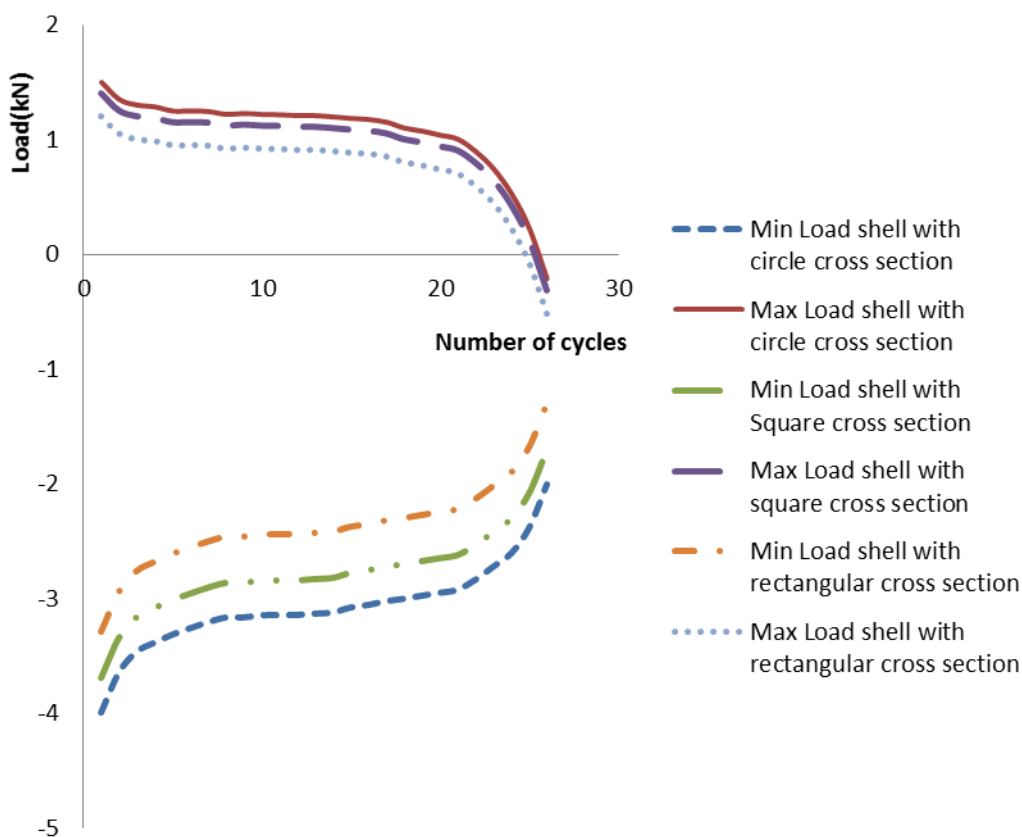


شکل (۲-۲۷). نیرو بر حسب تعداد سیکل پوسته‌ی استوانه‌ای با دامنه‌ی جابه‌جایی 20mm و 30mm تحت خمش

خالص

۲-۷-۲- بررسی رفتار سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی ماده در هندسه‌های مختلف

در این قسمت سه هندسه پوسته‌ی استوانه‌ای و پوسته‌های با سطح مقطع مربعی ۲×۲ و مستطیلی ۴×۲ تحت دامنه جابه‌جایی 20mm قرار گرفته است. در شکل (۲۸-۲) مشاهده می‌گردد که هر سه هندسه در سیکل اولیه به صورت رفتار نرم‌شوندگی با شیب زیاد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که نرم‌شوندگی اولیه پوسته‌ی با سطح مقطع دایروی به ترتیب از پوسته‌ی با سطح مقطع مربعی و مستطیلی بیش‌تر است. رفتار نرم‌شوندگی ماده با افزایش سیکل ثابت می‌گردد و در هر سه هندسه نرم‌شوندگی در قسمت فشاری بیشتر از کششی می‌باشد.



شکل (۲۸-۲). تغییرات نیرو نسبت به تعداد سیکل برای بارگذاری جابه‌جایی کنترل

فصل سوم-تحليل عددی

۳-۱- مقدمه‌ای در رابطه با تحلیل عددی

افزایش روز افزون نیازهای بشر و تلاش برای برآورده ساختن آن‌ها، منجر به خلق مسائل تازه و پیچیده‌ای در همه‌ی زمینه‌های علمی و فنی شده که حوزه‌ی مهندسی مکانیک و سازه نیز از این امر مستثنی نبوده است.

در اغلب موارد، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و خواص پیچیده تحت بارگذاری‌های نامنظم ایجاد می‌شود و به‌کارگیری روش‌های کلاسیک موجود (به عنوان مثال تئوری الاستیسیته در مورد توزیع تنش) منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده، با شرایط مرزی و اولیه متنوع می‌شود که عملاً حل این معادلات به روش تحلیلی را غیر ممکن می‌سازد و باید برای حل از روش‌های عددی کمک گرفت.

در این میان روش‌های عددی متعدد موجود برای حل این‌گونه مسائل، سه شاخه را می‌توان به عنوان اصلی‌ترین روش‌های شناخته شده نام برد که به ترتیب پیدایش عبارتند از روش اجزاء محدود (FEM)، روش المان مرزی (BEM) و روش بدون المان (EFM).

۳-۱-۱- روش اجزاء محدود

روش اجزای محدود روشی است که برای حل بسیاری از مسائل شاخه مهندسی به کار می‌رود و دارای دو تقسیم بندی اولیه است. در یکی از این تقسیم‌بندی‌ها برای بدست آوردن تغییر مکان در نقاط اتصال اجزا و محاسبه‌ی نیروی اعضای سازه‌ها از اجزای مجزا استفاده می‌شود. این روش که تحلیل ماتریسی سازه‌ها نام دارد، دارای نتایجی مطابق با تحلیل کلاسیک سازه‌هاست. در تقسیم‌بندی نوع دوم از اجزای محیط پیوسته برای تعیین حل‌های تقریبی در مباحث انتقال گرما، مکانیک سیالات و

مکانیک جامدات استفاده می‌شود. در این روش حل تقریبی پارامترهای مطلوب در نقاطی که گره^۱ نامیده می‌شود بدست می‌آیند. اگرچه مفهوم اجزای محدود در واقع برای شاخه‌ی دوم تقسیم‌بندی فوق مصداق پیدا می‌کند؛ ولی این روش هر دو تقسیم بندی را در بر می‌گیرد به طوری که برنامه‌های جامع رایانه‌ای که بر اساس این روش نوشته می‌شوند، قابلیت حل هر دو گروه از مسائل را دارند.

توسط روش اجزای محدود، مفاهیم متعددی از ریاضیات باهم پیوند خورده تا دسته‌ای از معادلات خطی و یا غیر خطی ایجاد شوند این معادلات که تعداد آن‌ها گاه از ۲۰۰۰۰ معادله نیز فراتر می‌رود، به قدرت محاسباتی بالا توسط رایانه نیاز دارند. بنابراین در صورت عدم دسترسی به رایانه، این روش ارزش کاربردی چندانی نخواهد داشت.

در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ مهندسان از این روش برای حل تقریبی مسائل تحلیل تنش، جریان سیال، انتقال گرما و... استفاده کردند. انتشار کتابی در سال ۱۹۵۵ توسط آرجیریس^۲ درباره‌ی تئوری-های انرژی و روش‌های ماتریسی، پایه گسترش بیشتر در بررسی اجزای محدود را بنا نهاد. اولین کتاب در زمینه‌ی روش اجزای محدود در سال ۱۹۶۷ به وسیله چونگ^۳ و زنگویچ^۴ منتشر شد. در اواخر دهه-ی ۱۹۷۰ تحلیل اجزای محدود برای مسائل غیر خطی و تغییر شکل‌های بزرگ بکاربرده شد. کتاب ادن^۵ درباره‌ی محیط‌های پیوسته‌ی غیرخطی در سال ۱۹۷۲ به چاپ رسیده و پایه‌های ریاضیاتی این روش در دهه ۱۹۷۰ بنیان نهاده شد.

امروزه با پیشرفت و توسعه‌ی کامپیوترهای بزرگ، نسخه‌های تجاری نرم‌افزارهایی که بر اساس این روش به تحلیل مسائل پیچیده‌ی مهندسی می‌پردازند، با بازار آمده و سهم بسزایی را در طراحی و تحلیل قطعات جدید بر عهده گرفته است. از مهم‌ترین این نرم‌افزارها می‌توان به آباکوس و انسیس اشاره نمود.

¹ Node

² Argyris

³ Chung

⁴ Zienkiewicz

⁵ Oden

روند کلی در اجزای محدود، تقسیم‌بندی مدل به اجزای کوچک‌تر (المان)، تبدیل معادلات دیفرانسیل حاکم بر المان‌ها به دستگاه معادلات چند مجهولی، حل معادلات در گره‌ها و یافتن جواب در دیگر نقاط مدل به کمک توابع شکل المان‌ها می‌باشد. المان‌ها متناسب با شکل مسأله می‌توانند یک، دو و یا سه بعدی باشند. یکی از روش‌های مرسوم جهت یافتن معادلات در مکانیک جامدات قانون مینیمم انرژی پتانسیل می‌باشد که در اجزای محدود نیز کاربرد فراوان دارد. با استفاده از این قانون می‌توان به معادلات مربوط به تغییر مکان اتصالات یک سیستم سازه‌ای رسید.

۳-۱-۲- معرفی نرم افزار Abaqus/CAE

آباکوس یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزای محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به صورت مجازی توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت شده، فوم‌های فبری و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد.

نظر به این‌که آباکوس یک ابزار مدل‌سازی عمومی و گسترده می‌باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل‌های مکانیک جامدات و سازه (تنش-تغییر مکان) نمی‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسائل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزای الکتریکی، اکوستیک، مکانیک خاک و پیزو الکتریک را در مورد مطالعه قرار داد.

استفاده از نرم‌افزار آباکوس با وجود این‌که مجموعه قابلیت‌های بسیار گسترده‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد، کار ساده‌ای می‌باشد؛ به طوری که می‌توان پیچیده‌ترین مسایل را می‌توان به آسانی

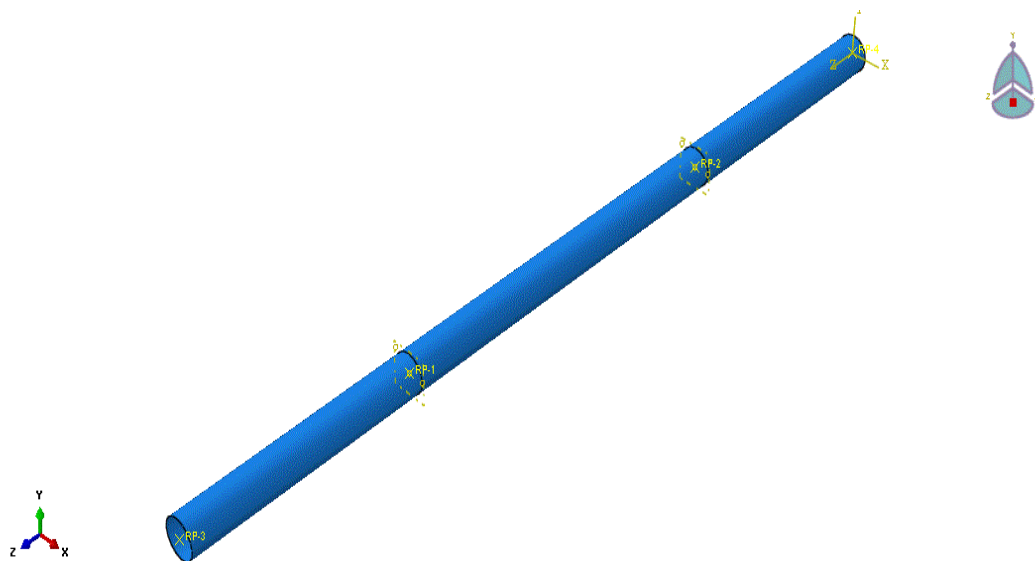
با آن مدل کرد. به عنوان مثال مسایل شامل بیش از یک جز را می توان با ایجاد مدل هندسی هر جز و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جز و سپس مونتاژ اجزای مختلف، مدل کرد. در بیشتر مدل سازی ها، حتی مدل های با درجه غیر خطی بالا، کاربر می بایست تنها داده های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری آن مساله را تعیین کند. در یک تحلیل غیرخطی، آباکوس به طور خودکار میزان نمو بار و تیرانس های همگرایی را انتخاب و همپنین در طول تحلیل مقادیر آن ها را جهت دستیابی به یک پاسخ صحیح تبدیل می کند. در نتیجه کاربر به ندرت می بایست مقادیر پارمترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند. در این پژوهش از نسخه Abaqus/CAE/6.12.1 برای تحلیل های عددی استفاده شده است [۳۷].

۳-۲-۱- تحلیل عددی

در این بخش مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای SS304 تحت بارگذاری سیکلی گزارش شده است. پوسته های استوانه ای مشابه آزمایش های تجربی تحت بارگذاری نیرو-کنترل شبیه سازی شده اند و نتایج بدست آمده با نتیج تجربی روی پوسته استوانه ای با هم مقایسه شده است.

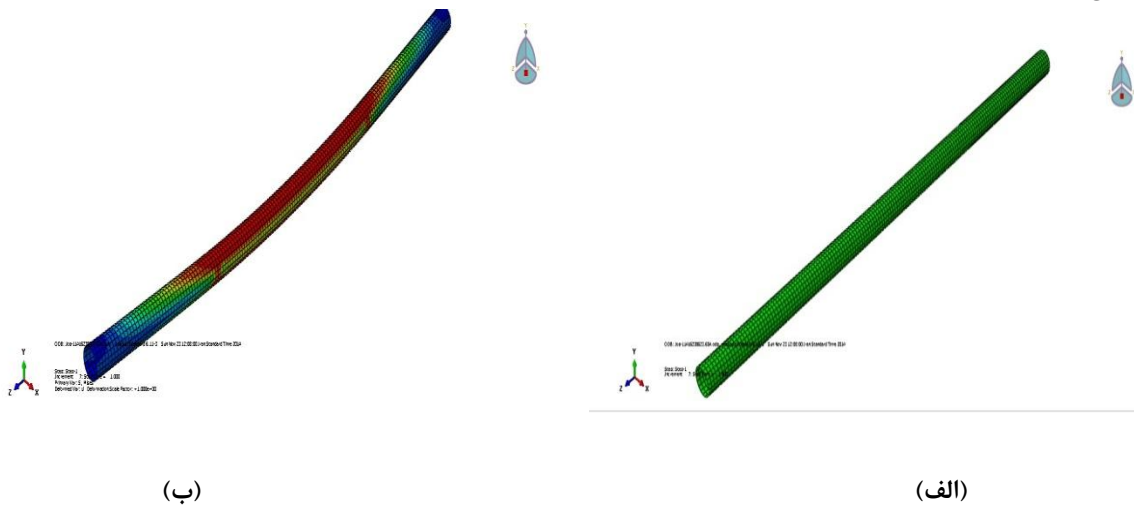
در این تحلیل پوسته به صورت Shell با ۴ نقطه انتگرال گیری در راستای ضخامت مدل شده است. در محل فک های میانی از دو صفحه صلب استفاده شده است، که در راستای بعد اول و دوم ثابت شده است (شکل (۳-۷))، هر دو نمونه صلب دارای نقطه مرجع می باشند. یک گشتاور به میزان 280 N/mm به انتهای نمونه اعمال شده است و رچتینگ آن محاسبه می شود.

در این تحلیل تکنیک مش بندی از نوع Sweep و طول المان 4mm استفاده شده است، نوع المان S4R که یک المان پوسته ای با ۴ گره می باشد.



شکل (۳-۷). شماتیک بارگذاری نمونه

در شکل (۳-۸)، رچتینگ بر حسب اندازه المان در نرم افزار آباکوس برای پوسته استوانه‌ای فولادی نشان داده شده است.



(ب)

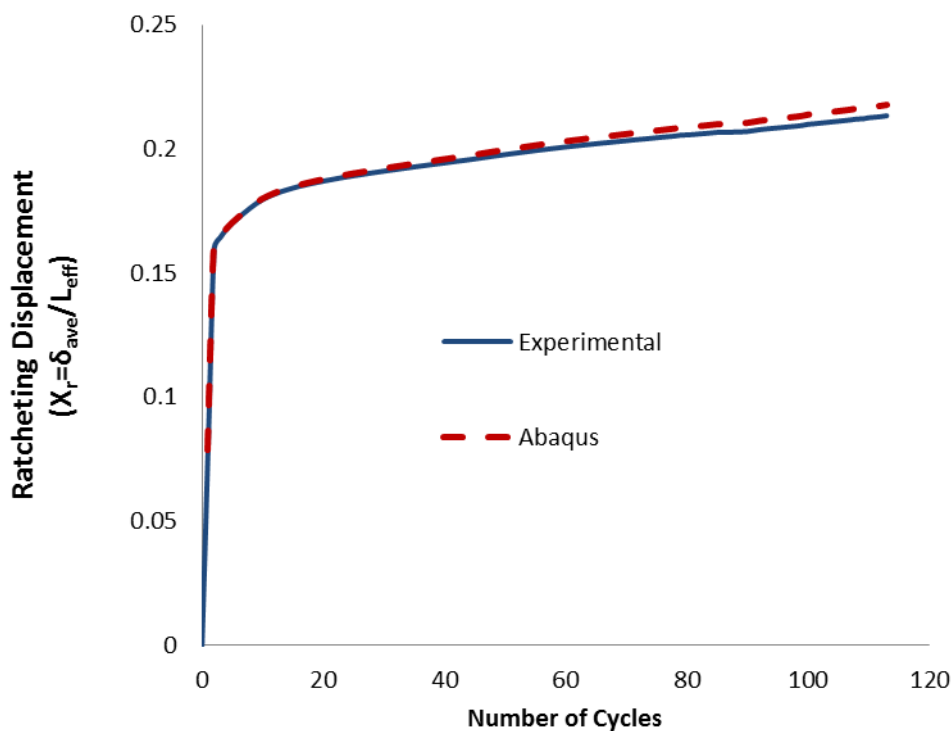
(الف)

شکل (۳-۸). الف) نمونه مش بندی شده ب) نمونه تحت بارگذاری

۳-۲-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه‌ای SS304

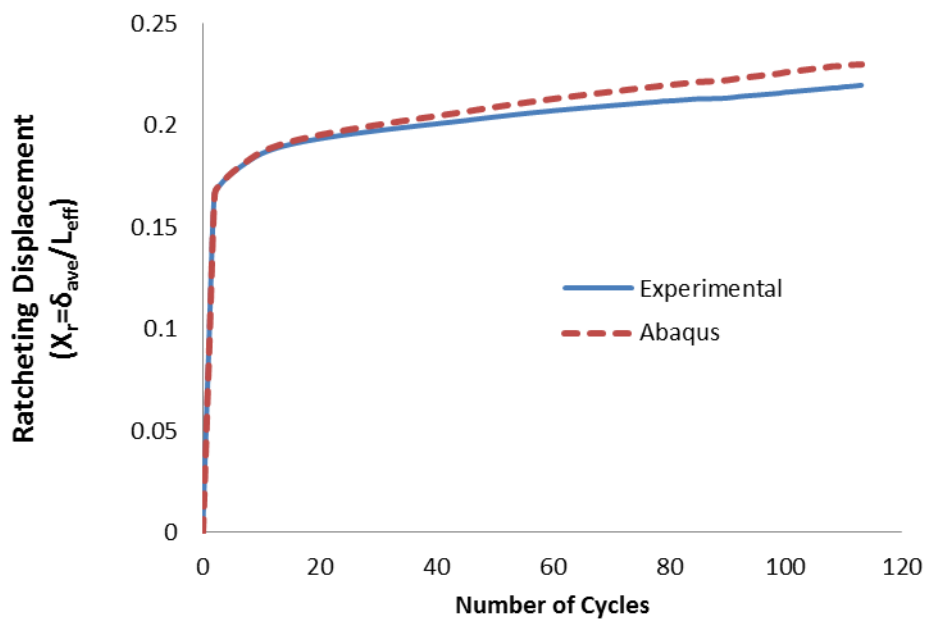
در شکل‌های (۳-۸)، (۳-۹) و (۳-۱۰) نتایج حاصل از تحلیل عددی برای چند نمونه با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در منحنی‌های عددی مشابه منحنی‌های تجربی، جابه‌جایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد. در سیکل‌های ابتدایی، منحنی‌های عددی و تجربی مطابقت خوبی دارند؛ اما در ادامه نرم افزار آباکوس جابه‌جایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. همچنین در نیروهای میانگین بالاتر اختلاف بیشتری با هم دارند.

در پوسته استوانه‌ای دارای گشودگی در شکل (۳-۱۱)، میزان جابه‌جایی رچتینگ در نمونه‌ی واقعی بیشتر از نتایج عددی است و به سرعت نمونه دچار شکست می‌شود. علت این امر وجود ترک‌های ریز در اطراف گشودگی در نمونه‌ی واقعی می‌باشد که سرعت افزایش رچتینگ و شکست نمونه را افزایش می‌دهد، حال آن‌که در نمونه‌ی ایده‌آل عددی، این عیوب لحاظ نشده‌اند.



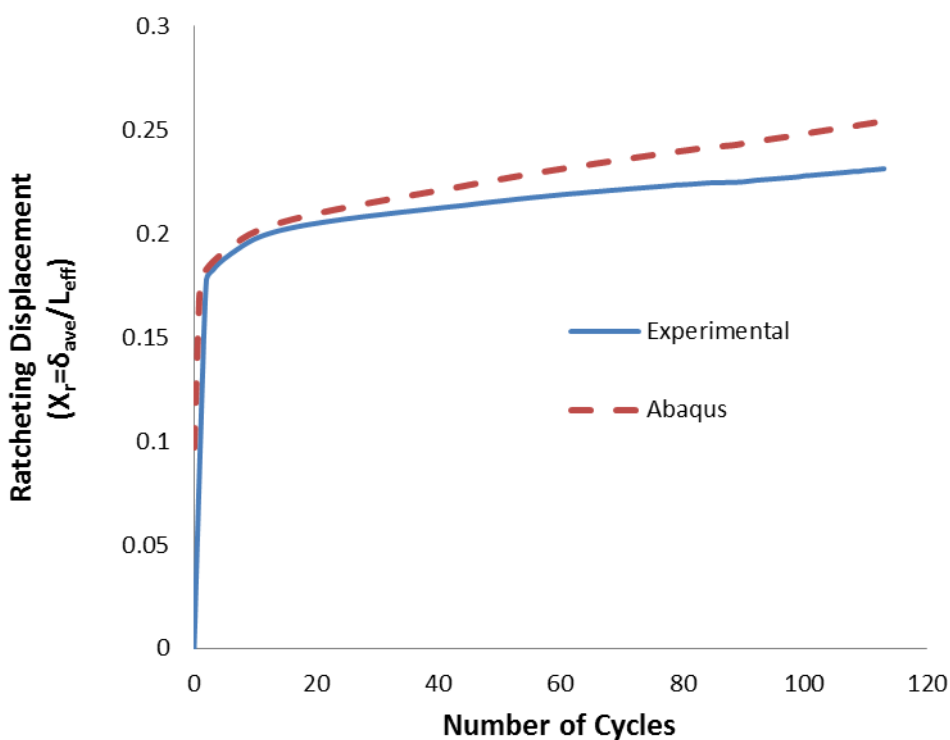
شکل (۳-۸). مقایسه مقادیر جابه‌جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه‌ای با نیروی میانگین 0.3kN و

دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمشی خالص



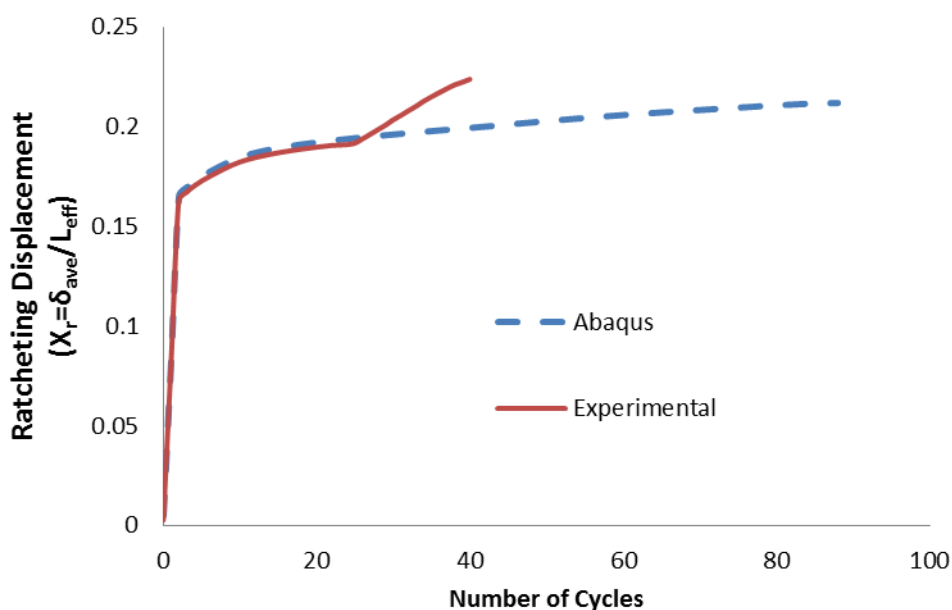
شکل (۳-۹). مقایسه مقادیر جابه‌جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه‌ای با نیروی میانگین 0.5kN و

دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمش خالص



شکل (۳-۱۰). مقایسه مقادیر جابه‌جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه‌ای با نیروی میانگین 0.9kN و

دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمش خالص



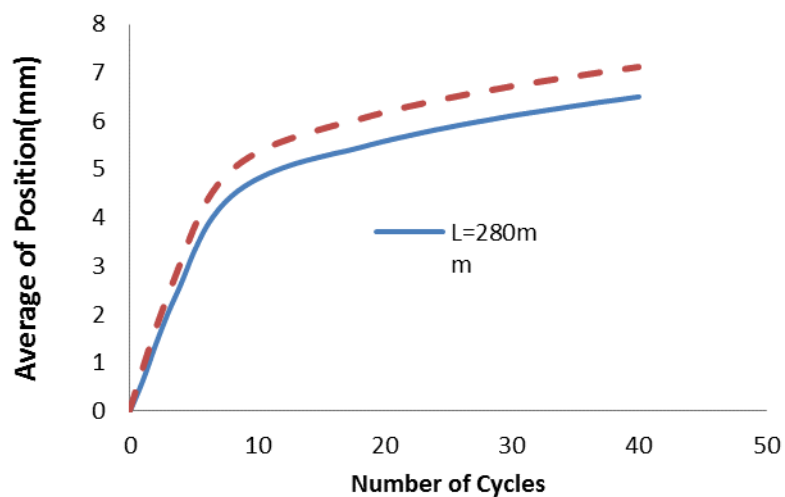
شکل (۳-۱۱). مقایسه مقادیر جابه‌جایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه‌ای دارای گشودگی در مرکز با

نیروی میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN تحت بارگذاری خمشی خالص

۳-۲-۳- تأثیر طول پوسته استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری خمشی خالص در

تحلیل عددی

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر 280mm، 650mm تحت بار خمشی خالص تناوبی نیرو-کنترل و با مقدار بار و موج سینوسی یکسان قرار گرفته‌اند و توسط نرم افزار آباکوس و به صورت عددی تحلیل شده‌اند. مشاهده می‌شود که با توجه به شکل (۳-۱۲) با افزایش طول پوسته استوانه‌ای، جابه‌جایی رچتینگ نیز برای تعداد سیکل معین کاهش می‌یابد که این به دلیل وجود گشتاور خمشی کوچکتر با طول کمتر است. این نتایج با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مطابقت دارد.



شکل (۳-۱۲). مقایسه مقادیر جابه‌جایی رج‌تینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه‌ای با نیروی میانگین 0.3kN و

دامنه بار 1.4kN در طول‌های L مختلف تحت بارگذاری خمشی خالص

فصل چهارم - نتیجه گیری و پیشنهادها

۴-۱- نتیجه گیری

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری سیکلی خمش خالص و همچنین مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی بدست آمده توسط نرم‌افزار آباکوس می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

۱. در بارگذاری خمش خالص سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل با دامنه بار یکسان برای یک طول معین با افزایش نیروی میانگین برای یک سیکل معین، جابه‌جایی رجتینگ به دلیل افزایش گشتاور خمشی، افزایش می‌یابد.

۲. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط نیرو-کنترل برای یک طول معین پوسته‌ی استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابه‌جایی رجتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۳. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط نیرو-کنترل، پوسته استوانه‌ای در نقطه میانی به دلیل وجود گشتاور خمشی در این ناحیه دچار خمش می‌گردد و شکست در این نقطه اتفاق می‌افتد.

۴. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته‌ی استوانه‌ای جابه‌جایی رجتینگ افزایش می‌یابد زیرا طول بازو جهت انتقال گشتاور بزرگتر می‌گردد.

۵. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط نیرو-کنترل در طول یکسان با کاهش دامنه‌ی نیرو، نرخ جابه‌جایی رجتینگ کاهش می‌یابد زیرا ماکزیمم نیروی وارده کاهش می‌گردد؛ در نتیجه گشتاور خمشی کمتری وارد می‌گردد.

۶. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط نیرو-کنترل با کاهش دامنه‌ی نیرو، نرخ جابه‌جایی رجتینگ صفر و انباشتگی تغییر شکل پلاستیک متوقف می‌شود.

۷. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، پوسته با نیروی میانگین بیشتر دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به پوسته با نیروی میانگین کمتر

است که با افزایش سیکل این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین برای یک طول معین، با افزایش تعداد سیکل انرژی پلاستیک در هر سیکل کاهش می‌یابد تا این‌که به مقدار ثابتی برسد.

۸. در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، جابه‌جایی رچتینگ و نرخ آن بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی در بارگذاری خمش خالص سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بارمیانگین و دامنه‌ی یکسان است و این به دلیل افزایش تنش‌های نرمال در اطراف گشودگی و افزایش تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگتر می‌باشد که منجر به شکست نمونه از این نقاط می‌گردد.

۹. در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، با جابه‌جا کردن محل گشودگی از مرکز پوسته در بارگذاری خمش خالص سیکلی تحت خمش خالص تحت شرایط نیرو-کنترل و بار و دامنه‌ی یکسان جابه‌جایی رچتینگ و نرخ آن بیشتر می‌گردد. لازم به ذکر است زمانی که گشودگی در مرکز قرار دارد، گشتاور خمش و تمرکز تنش ناشی از گشودگی در میانه بیشترین می‌باشد؛ که باعث می‌گردد رشد ترک و در ادامه شکست پوسته دیرتر وقوع پیوندد.

۱۰. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط نیرو کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان در طول یکسان با افزایش قطر پوسته نرخ جابه‌جایی رچتینگ کاهش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش ممان اینرسی است؛ که موجب کاهش تنش‌های عمودی ناشی از گشتاور خمشی می‌گردد.

۱۱. در منحنی‌های عددی جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای استوانه‌ای تحت بارگذاری خمش خالص، جابه‌جایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۱۲. در پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی، منحنی‌های عددی جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل در سیکل‌های ابتدایی مطابقت خوبی با منحنی‌های تجربی دارند؛ اما در ادامه، جابه‌جایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.

۱۳. در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، به دلیل وجود تمرکز تنش و عیوب‌های ریز در اطراف گشودگی در نمونه‌ی واقعی، جابجایی رجتینگ بیشتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی در پوسته‌هاست استوانه‌ای ایده‌آل است.

۱۴. در نتایج عددی، به دلیل وجود گشتاور خمشی کوچکتر در پوسته‌های استوانه‌ای با طول بلندتر، جابه‌جایی رجتینگ برای تعداد سیکل معین بیشتر است.

۱۵. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط جابه‌جایی کنترل رفتار سیکلی ماده در یک دامنه جابه‌جایی برای تعداد کمی سیکل به صورت نرم شونده با شیب زیاد است و سپس شروع به رفتار نرم شونده با شیب ملایم می‌کند.

۱۶. در بارگذاری خمش خالص تحت شرایط جابه‌جایی کنترل بر سه هندسه پوسته استوانه‌ای، مستطیلی $۴*۲$ و مربعی $۲*۲$ مشاهده می‌شود؛ هر سه هندسه در سیکل اولیه در سیکل اولیه به صورت رفتار نرم‌شوندگی با شیب زیاد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که نرم‌شوندگی اولیه پوسته‌ی با سطح مقطع دایروی به ترتیب از پوسته‌ی با سطح مقطع مربعی و مستطیلی بیشتر است. رفتار نرم‌شوندگی ماده با افزایش سیکل ثابت می‌گردد و در هر سه هندسه نرم‌شوندگی در قسمت فشاری بیشتر از کششی می‌باشد.

۱۷. علت له‌شدگی در پوسته‌های با مقاطع چهارگوش، جوشکاری ناشی از تقویت پوسته در محل فک‌های میانی بوده است، زیرا جوشکاری در این مقاطع باعث تنش دمایی بیشتری نسبت به مقاطع دایروی شده است.

۱۸. تمامی پوسته‌ها از نوع درزدار بوده است، با توجه به نتایج آزمایش و نحوه له‌شدگی درزدار بودن پوسته تأثیری در نتایج ندارد.

۴-۲- پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌های تجربی متعدد و بارگذاری‌های گوناگونی که بر روی نمونه‌های آزمایش انجام گردیده است و همچنین با توجه به مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی بدست آمده از نرم‌افزار آباکوس، پیشنهادات زیر جهت تحقیق و مطالعه بیشتر در این زمینه ارائه می‌گردند:

۱. بالابردن دقت تراشکاری و صافی سطح با استفاده از عملیات سنگ‌زنی دقیق که می‌تواند به از

بین بردن نقص‌های بسیار ریز در حد میکرون و همچنین یکدستی نمونه‌ها کمک کند. البته

این امر مستلزم هزینه بسیار زیاد جهت تهیه نمونه‌های آزمایش می‌باشد.

۲. می‌توان تأثیر فرکانس بارگذاری و همچنین تأثیر دما و فشار داخلی هیدرولیکی بر روند آزمایش

را در بارگذاری چرخه‌ای مورد مطالعه قرار داد.

۳. می‌توان با قراردادن فوم در پوسته‌های استوانه‌ای رفتار رچتینگ آن‌ها را تحت بارگذاری سیکلی

بررسی کرد.

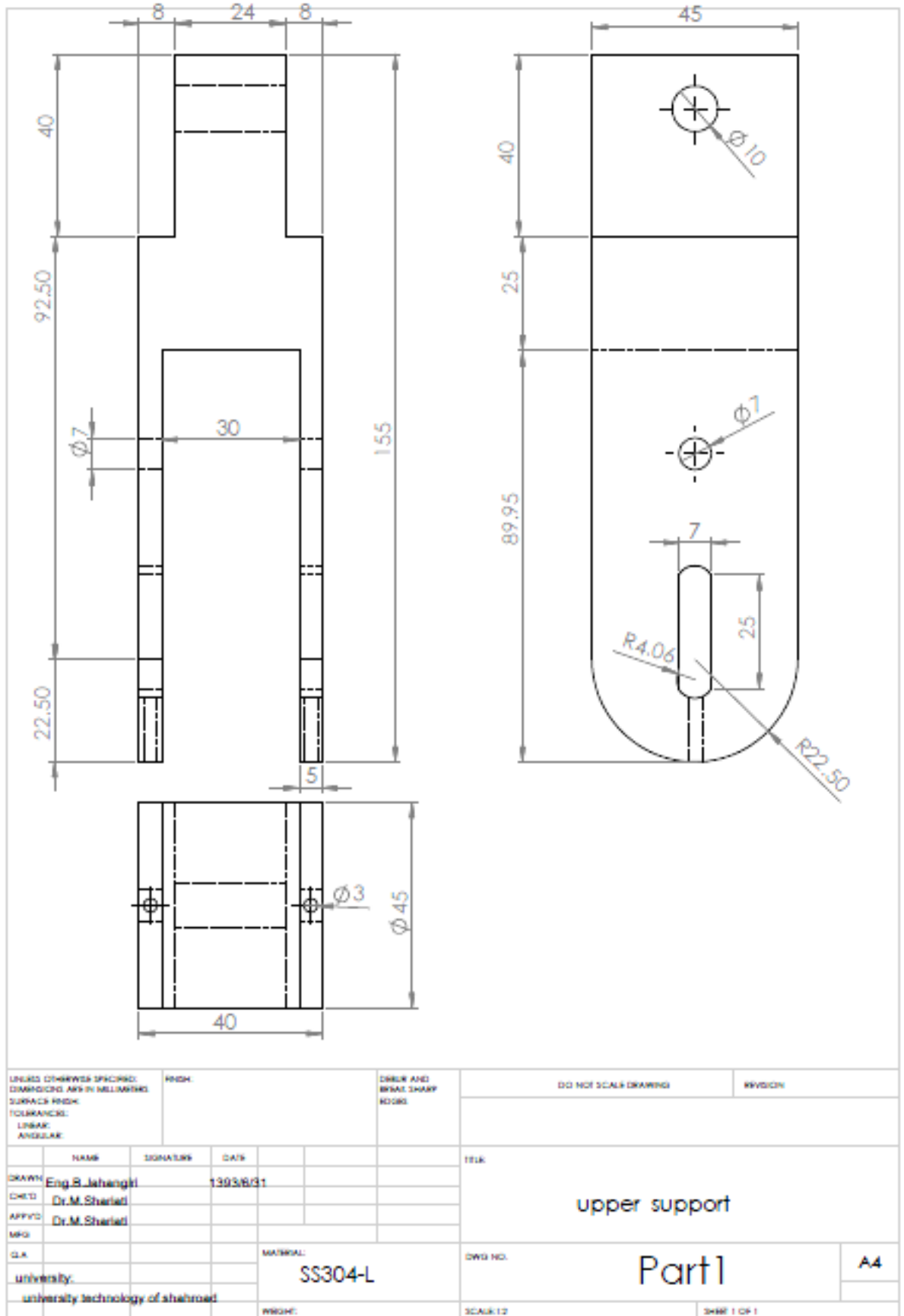
فهرست مراجع

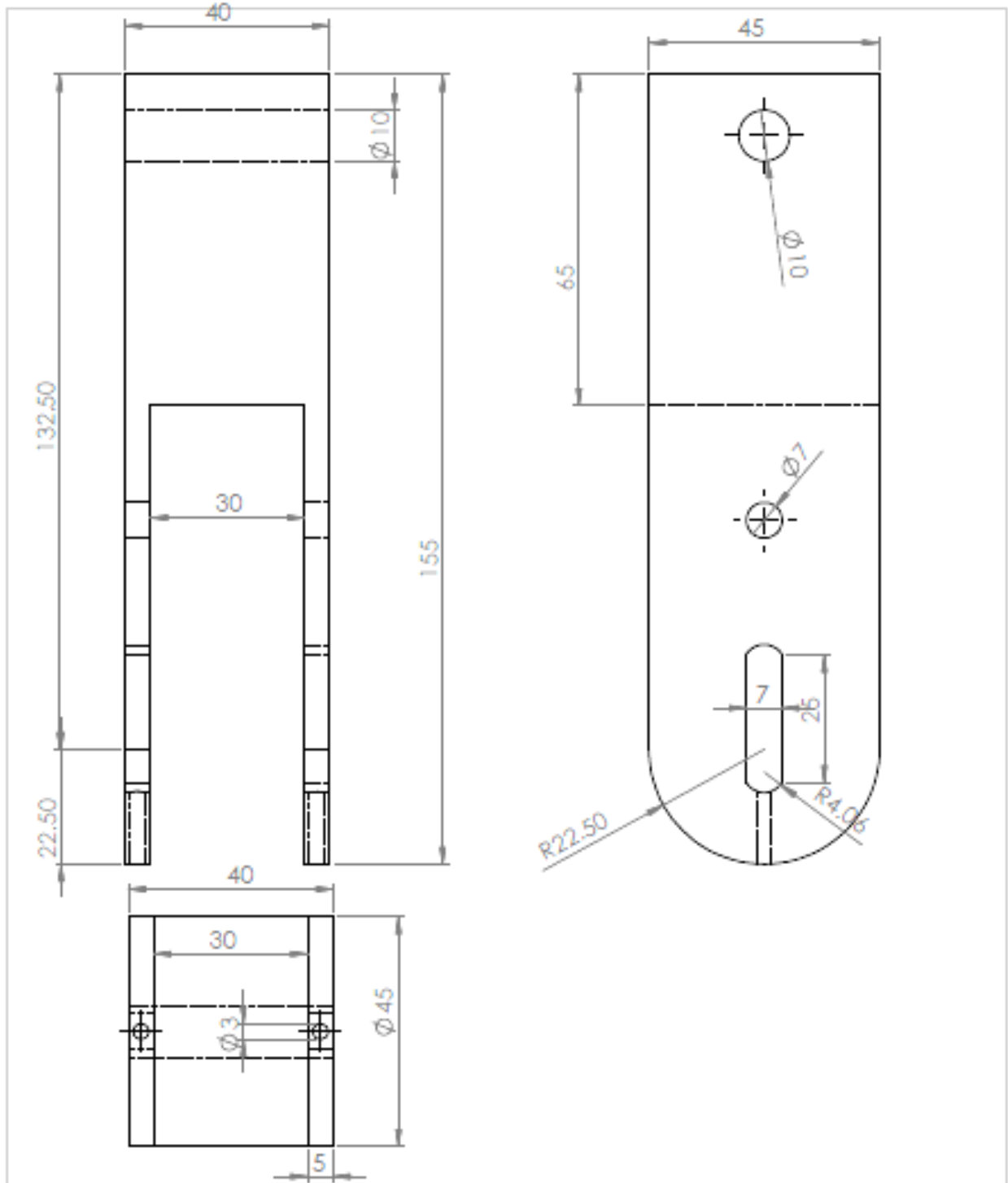
- [1] Farshad, M., (1992), "Design and analysis of shell structures", Dordrecht: Kluwer.
- [2] Gang Tao, Zihui Xia., (2007), "Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life", *Polymer Testing*, n. 26, pp. 451–460.
- [3] Syed M. Rahman, Tasnim Hassan, Edmundo Corona., (2008), " Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure" , *International Journal of Plasticity*, n. 24, pp. 1756–1791.
- [4] Dutta, K. and Ray, K.K., (2012), "Ratcheting phenomenon and post-ratcheting tensile behaviour of an aluminum alloy", *Material Science & Engineering A*, vol.540, pp. 30-37.
- [5] Weib, E., Postberg, B., Nicak, T. and Rudolph, J., (2004), "Simulation of ratcheting and low cycle fatigue", *Pressure Vessels and Piping*, vol. 81, pp. 235-242.
- [6] Gaudin, C. and Feaugas, X., (2004), "Cyclic creep process in AISI 316L stainless steel in terms of dislocation patterns and internal stresses", *Acta Material*, vol.52, pp. 3097-3110.
- [7] Bari, S., Hassan, T. (2002), "An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation", *Int plasticity*, vol. 18, pp. 873-894.
- [8] McDowell, D.L., (1998), "Stress rate dependence of cyclic ratcheting behavior of two rail steels", *International Journal of Plasticity*, vol. 14, pp. 355-390.
- [9] Kang, G. and Gao, Q., (2002), "Uniaxial and non-proportionally multiaxial ratcheting of U71Mn rail steel: experiments and simulations", *Mechanics of Materials*, vol. 34, pp. 809–820.
- [۱۰] میرباقری آ؛ (۱۳۸۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی و تفکیک واماندگی‌های ناشی از رچتینگ و شیک‌دان در مخازن تحت فشار"، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت.
- [11] Weib, E., Rauth, M., and Rudolph, J., (1998), "Fatigue behavior of oblique nozzles on cylindrical shells submitted to internal pressure and axial forces", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, pp. 473-481.

- [12] Yang, X., (2005), "Low cycle fatigue and cyclic stress ratcheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading", *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, pp. 1124-132.
- [13] Chena, X. et al, (2005), "Experimental study on ratcheting behavior of eutectic tin-lead solder under multi axial loading", *Material Science and Engineering A*, vol. 406, pp. 86-94.
- [14] Chen, X., Jia, R. and Soo Kim, K., (2005), "On the Ohno–Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel" , *International Journal of Plasticity*, vol .21, pp. 161–184.
- [15] Kang, G., Li, Y.G., Zhang, J., Sun, Y.F. and Gao, Q., (2005), "Uniaxial ratcheting and failure behaviors of two steels", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol.43, pp. 199-209.
- [16] Kang G. et al, (2006), "Experimental study on ratcheting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing", *Materials science & engineering*, Vol. 435-436, pp. 396-404.
- [17] Gao, B., Chen, X., Chen, G., (2006), "Ratcheting and ratcheting boundary study of pressurized straight low carbon steel pipe under reversed bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, pp. 96-106.
- [18] Chen, G., Chen, X. and Chang-Dong, N., (2006), "Uniaxial ratcheting behavior of 63Sn37Pb solder with loading histories and stress rates", *Materials science & engineering*, vol. 421, pp. 238-244.
- [19] Syed, M.R., Tasnim, H., Edmundo, C., (2008),"Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure", *International Journal of Plasticity*, vol. 24, pp. 1756–1791.
- [20] Gao, H., and Chen, X., (2009), "Effect of axial ratcheting deformation on torsional low cycle fatigue life of lead-free solder Sn-3.5Ag", *International Journal of Fatigue*, vol. 31, pp.276-283.
- [21] Lee, J.H., Kim, K.S., Lee, J.B., Yang, Y.S. and Yoo, M.J., (2009), "A numerical simulation model of cyclic hardening behavior of AC4C-T6 for LNG cargo pump using finite element analysis", *Journal of loss prevention in the process Industries*, vol. 22, pp. 889-896.

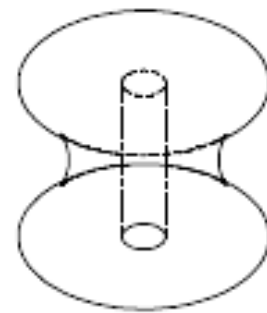
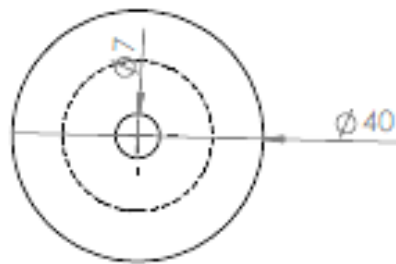
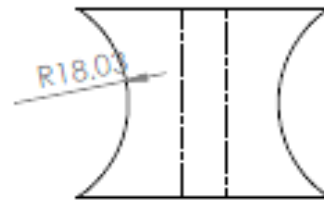
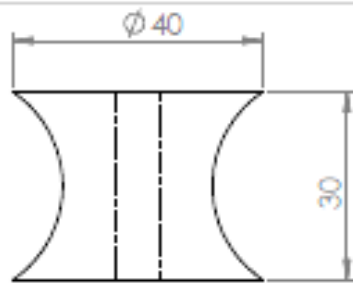
- [22] Rezaiee-pajand, M. and Sinaie, S., (2009), "On the calibration of the chaboche hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 3009-3017.
- [23] Lim, C.B., Kim, K.S. and Seong, J.B., (2009), "Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress", *International Journal of Fatigue*, vol. 31, pp. 501-507.
- [24] Sun, G.Q. and Shang, D.G., (2010), "Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis", *Material & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 126-133.
- [25] Nip, K.H., Gardner L., Davies C.M., and Elghazouli A.Y., (2010), "Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, pp. 96-110.
- [26] Yoshida, F., Kondo, J., Kikuchi, Y., (2010), "Viscoplastic behaviour of SUS 304 stainless steel under cyclic loading at room temperature", *JSME International Journal*, vol. 32, pp. 136-141.
- [27] Kulkarnia, S.C., Desai, Y.M., Kanta, T., Reddy, G.R., Prasad, P., Vaze, K.K., et al., (2004), "Uniaxial and biaxial ratcheting in piping materials—experiments and analysis", *Int J Pressure Vessel Piping*, vol. 81, pp. 609–17.
- [28] Zakavia, S.J., Zehsaza, M., and Eslamib, M.R., (2010), "The ratcheting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 726–737.
- [29] Albinmoussa, J., Jahed, H. and Lambert, S., (2011), "Cyclic axial and cyclic torsional behavior of extruded AZ31B magnesium alloy", *International Journal of Fatigue*, vol. 33, pp. 1403-1416.
- [30] Shariati, M., Hatami, H., Yarahmadi, H., Epakchi, H.R., (2011), "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading", *Materials & Design*, vol. 34, pp. 302-312.
- شریعتی. م و حاتمى، ح؛ اردیبهشت ۱۳۹۰. " بررسی تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت [۳۱]
- بارگذاری محوری تناوبی"، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، جلد ۲، صفحه ۶۵، دانشگاه بیرجند.
- [32] Zhu, J., Chen, X., Xue, F. and Yu, W., (2012), "Bending ratcheting tests of Z2CND18.12 stainless steel", *International Journal of Fatigue*, vol. 35, pp. 16-22.

- [33] Shariati, M., Hatami, H., (2012), "Experimental study of SS304L cylindrical shell with/ without cutout under cyclic axial loading", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 58, pp. 35-43.
- [34] Shariati, M., Hatami, H., Torabi, H. and Epakchi, H.R., (2012), "Experimental and numerical investigations on the ratcheting characteristics of cylindrical shell under cyclic axial loading", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 44, no. 6, pp. 753-762.
- [35] ASTM A370-05, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.
- [36] Bari, S., and Hassan, T., (2000), "Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation", *International Journal of Plasticity*, vol. 16, pp. 381-409.
- [37] ABAQUS Analysis User's manual, (2012), v6.12.1, section 20.2.2: models for metals subjected to cyclic loading.

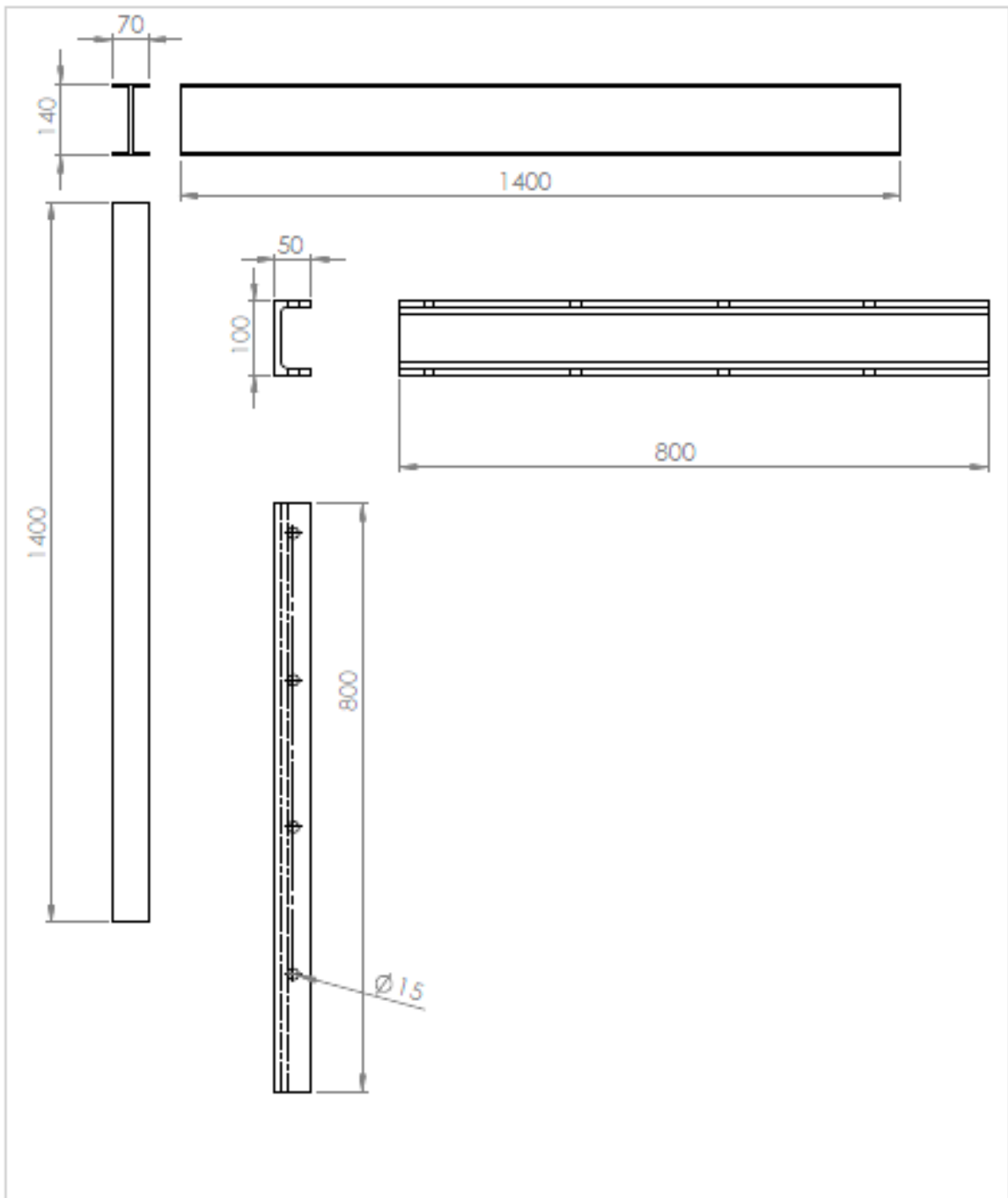




UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DRILL AND BREAT SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME		SIGNATURE	DATE		TITLE	
DRAWN: Eng. B. Jahangiri			1303/6/31		down support	
CHECKED: Dr. M. Sherati						
APPROVED: Dr. M. Sherati						
MFG:					DWG. NO. Part2	
Q.A.				MATERIAL: SS304-L	A4	
UNIVERSITY:					SCALE: 1:2	
UNIVERSITY TECHNOLOGY OF AHAZROOD					SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINER: ANGULAR:		FINISH:	DRAW AND BRIST SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME		SIGNATURE	DATE		TITLE	
DRAWN	Eng. B. Jahangir		1303/6/31		pulley	
CHECKED	Dr. M. Sheriat					
APPROVED	Dr. M. Sheriat					
MFG					DWG. NO.	
Q.A.				MATERIAL: teflon	Part3	
university:					A4	
university technology of shahrood				WRGHT:	SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	ORDER AND DRAW SHARP EDGES.	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE	
DRAWN: Eng.B. Jehangir		13/03/13			main support	
CHEK: Dr.M. Sharief						
APPVD: Dr.M. Sharief						
MFG:						
Q.A.				MATERIAL: iron	DWG NO. Part4-5	A4
university:				WEIGHT:	SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 1
university technology of shahroad						

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

Finite Element	اجزای محدود
Elastic Shakedown	الاستیک پایدار
Stabilized Cyclic Plasticity	پلاستیسیته سیکلی پایدار
Accumulation of Plastic Strain	انباشتگی کرنش پلاستیک
Shell	پوسته
Cutout	گشودگی
Hardening	سخت‌شوندگی
Ratcheting	رچتینگ
Low Cycle Fatigue	خستگی کم چرخه
Dislocation	نابه‌جایی

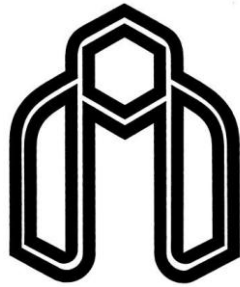
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

Accumulation of Plastic Strain	انباشتگی کرنش پلاستیک
Cutout	گشودگی
Dislocation	نابه‌جایی
Elastic Shakedown	الاستیک پایدار
Finite Element	اجزای محدود
Low Cycle Fatigue	خستگی کم چرخه
Plastic Shakedown	پلاستیک پایدار
Ratcheting	رچتینگ
Shell	پوسته

Abstract

In this research, ratcheting behavior of stainless steel 304 cylindrical and Quadrangle shells with cutout and without cutout under cyclic Pure bending moment were studied numerically and experimentally. In ratcheting analysis, the shells were fixed horizontally and subjected to force-controlled cycling with non-zero mean force at the end of them which causes the accumulation of plastic strain or ratcheting phenomena. Loading is involved load-Control and Displacement-control. Experimental tests were performed by a servo-hydraulic INSTRON 8802 machine. The numerical analysis was carried out by Abaqus using the advanced nonlinear isotropic/kinematic hardening model and results of numerical analysis were compared to experimental results. In this research, the effect of Load's amplitude, Load's mean, displacement's amplitude, length of under pure bending, Diameter and geometry of shells on ratcheting behavior were investigated. Based on the results, it was found that with increasing of Load's amplitude and Mean's load increase in plastic deformations due to the fact of pure bending increasing and rate of ratcheting displacement decrease reaches a constant value. Also, circular cutout effect on cylindrical shells under these kinds of loading has been studied and observed that creating of cutout increases the plastic deformation and it's rate.

Keywords: Ratcheting, shells, cyclic loading, pure bending



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

**Experimental and numerical analysis of ratcheting
in thin-walled shells with circle and square cross
sections with cutout under pure bending**

Behzad Jahangiri

Supervisors:
Dr. M. Shariati
Dr. H. R. Epakchi

Date: Summer 2014