

پہو ا لعظیم



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پوسته های منشوری فولادی با
گشودگی دایروی و مربعی تحت بارگذاری پیچشی

نگارش:

هادی گلمکانی

اساتید راهنما:

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمیدرضا ایپکچی

زمستان ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۴۱/۲۷/۳

تاریخ: ۹۱/۱۲

ویرایش:

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای هادی گل‌مکانی رشته مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پوسته های منشوری فولادی با گشودگی دایروی و مربعی تحت بارگذاری پیچشی که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: خوب امتیاز: ۱۷/۹۴) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

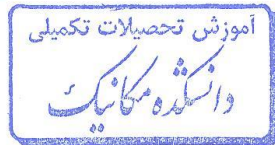
۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر محمود شریعتی	استاد	
۲- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر حمیدرضا ایپچی	استادیار	
۳- استاد ممتحن	دکتر رضا طاهریان	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر محمد جعفری	استادیار	
	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	

تأیید رئیس دانشکده



تقدیرم به
خدای که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

تقدیرم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، عشق ها را به جان خریدند و خود را سپر
بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم

تقدیرم به خواهرم:

که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش است.

و برادرم:

که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودش
مایه دلگرمی می باشد.

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز... بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ: "

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محمود شریعتی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاد فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر حمیدرضا ایپکچی که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یابوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

هادی گلکانی

زمستان ۱۳۹۱

تعهد نامه

اینجانب **هادی گلمکانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پوسته های منشوری فولادی با گشودگی دایروی و مربعی تحت بارگذاری پیچشی " تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا ایپکچی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این تحقیق به تحلیل تجربی و عددی رفتار نرم‌شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ و پوسته‌های مکعبی از جنس St37 تحت بارگذاری پیچش خالص در حالت‌های گشتاور-کنترل و زاویه پیچش-کنترل با و بدون گشودگی پرداخته شده است. آزمایش‌های مورد نظر توسط دستگاه سروهیدرولیک ۸۸۰۲ و به کمک فیکسچری مخصوص که حرکت خطی را به دورانی تبدیل می‌کند، انجام گردیده است. تحلیل‌های عددی توسط نرم افزار آباکوس با استفاده از مدل ترکیبی چابوچی و سینماتیک انجام شده و دقت این مدل‌ها با نتایج تجربی سنجیده شده است. تحت بارگذاری گشتاور-کنترل به علت وجود گشتاور میانگین غیر صفر، کرنش پلاستیک در سیکل‌های متوالی در پوسته استوانه‌ای انباشته می‌گردد و رفتار رچتینگ را نشان می‌دهد. تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل، رفتار نرم‌شوندگی در پوسته‌ها مشاهده می‌گردد و این رفتار در جهت ساعتگرد به دلیل جهت اولیه چرخش کمی بیشتر است. تأثیر انواع گشودگی در رفتار منحنی‌های هیسترزیس پوسته‌های منشوری، نیز تحت این نوع بارگذاری‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. مشاهده شد که گشودگی باعث تسریع رفتار نرم‌شوندگی و رچتینگ پوسته می‌گردد. پس از اعمال چندین سیکل بارگذاری، ترک شروع به رشد کرده و در نهایت باعث زوال پوسته تحت آزمایش می‌شود. مدل غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک، رفتار نرم‌شوندگی را به خوبی شبیه سازی می‌کند؛ ولی این مدل قادر به شبیه سازی کامل رفتار رچتینگ نمی‌باشد.

کلید واژه: پوسته استوانه‌ای، پوسته مکعبی، بارگذاری پیچشی، رچتینگ، نرم‌شوندگی، گشودگی

فصل اول: بارگذاری سیکلی	۱
۱-۱- خستگی کم چرخه	۲
۲-۱- حلقه هیستریزیس	۳
۱-۲-۱- ویژگی‌های حلقه هیستریزیس	۳
۳-۱- رچتینگ	۴
۱-۳-۱- مدل‌های ساختاری ارائه شده	۱۱
۴-۱- مروری بر کارهای انجام شده مرتبط با رچتینگ	۱۱
۵-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه پیچش	۱۳
۶-۱- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه بارگذاری سیکلی پیچشی	۱۵
۷-۱- جمع‌بندی	۱۶
فصل دوم: تحلیل تجربی	۱۷
۱-۲- مقدمه ای درباره آزمایش‌های تجربی	۱۸
۲-۲- دستگاه آزمایش	۱۸
۳-۲- آزمایش‌های کشش و پیچش استاندارد	۱۹
۴-۲- هندسه، خواص مکانیکی و شیمیایی پوسته	۲۳
۵-۲- بارگذاری پیچشی	۲۴
۶-۲- فیکسچر مورد استفاده و شرایط مرزی	۲۵
۷-۲- بارگذاری گشتاور-کنترل	۲۶
۱-۷-۲- تأثیر دامنه گشتاور بر رفتار منحنی‌های هیستریزیس	۲۷
۲-۷-۲- تأثیر دامنه و گشتاور میانگین بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای	۲۸
۸-۲- آزمایش‌های کرنش-کنترل	۳۲
۱-۸-۲- تأثیر دامنه زاویه پیچش بر رفتار منحنی‌های هیستریزیس	۳۳
۲-۸-۲- تأثیر تاریخچه دامنه‌ی زاویه پیچش بر رفتار منحنی‌های هیستریزیس	۳۵
۹-۲- تأثیر تاریخچه بارگذاری روی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای	۳۷
۱۰-۲- تأثیر گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری سیکلی	۳۸
۱-۱۰-۲- تأثیر گشودگی روی رفتار نرم‌شوندگی تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل	۳۹
۲-۱۰-۲- تأثیر گشودگی بر رفتار رچتینگ، تحت بارگذاری گشتاور-کنترل	۴۴
۳-۱۰-۲- تأثیر مکان گشودگی بر رفتار رچتینگ، تحت بارگذاری گشتاور-کنترل	۴۶
۴-۱۰-۲- تأثیر قطر گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای، تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل	۴۸
۴-۱۰-۲- تأثیر هندسه گشودگی روی رفتار رچتینگ، تحت بارگذاری گشتاور-کنترل	۵۰
۱۱-۲- تأثیر بارگذاری پیچشی بر رفتار پوسته‌های مکعبی	۵۳
۱-۱۱-۲- تأثیر دامنه گشتاور بر رفتار رچتینگ پوسته‌های مکعبی	۵۳

۲-۱۱-۲	تأثیر گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته‌های مکعبی	۵۶
۱۲-۲	نتیجه‌گیری	۵۸
	فصل سوم: تحلیل عددی و مقایسه با نتایج تجربی	۶۱
۱-۳	آشنایی با ABAQUS	۶۲
۱-۱-۳	پیش پردازش (ABAQUS/CAE)	۶۳
۲-۱-۳	پردازش (استاندارد و یا صریح ABAQUS)	۶۳
۳-۱-۳	مرحله پس پردازش (ABAQUS/CAE)	۶۳
۲-۳	تحلیل مسایل سیکلی توسط نرم‌افزار ABAQUS	۶۴
۱-۲-۳	مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی	۶۴
۲-۲-۳	مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک	۶۵
۳-۲-۳	اطلاعات بدست آمده از نیم سیکل	۶۶
۴-۲-۳	اطلاعات بدست آمده از چندین سیکل ثابت	۶۷
۳-۳	تأثیر پارامترهای ایزوتروپیک و سینماتیک	۶۹
۳-۳	بررسی حساسیت مش	۶۹
۵-۳	تحلیل عددی و تجربی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی	۷۵
۶-۳	تحلیل عددی و تجربی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای با گشودگی دایروی	۷۶
۷-۳	تأثیر طول بر روی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل	۷۸
۸-۳	بررسی رفتار نرم شوندگی پوسته‌های منشوری با سطح مقطع‌های دایروی، مکعبی و مثلثی	۸۰
۹-۳	بررسی مکان گشودگی بر رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای	۸۳
۱۰-۳	نتیجه‌گیری	۸۵
	فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۸۷
۱-۴	نتیجه‌گیری	۸۸
۲-۴	پیشنهادها	۹۲
	فهرست مراجع	۹۴
	واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی	۹۸
	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی	۹۹

فهرست علائم و نشانه‌ها

علامت اختصاری

عنوان

α	تنش زمینه
σ_y	تنش تسلیم
S_u	تنش نهایی
γ	ثابت ماده
C	ثابت ماده
b	ثابت ایزوتروپیک
Q	ثابت ایزوتروپیک
T_a	دامنه گشتاور
R_c	شعاع گشودگی
L	طول پوسته استوانه‌ای
ε^{pl}	کرنش پلاستیک
T_m	گشتاور متوسط
G	مدول برشی
E	مدول یانگ
ν	ضریب پواسون

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲: مشخصات فیزیکی دستگاه INSTRON 8802 ۲۳

جدول ۲-۲: ترکیب شیمیایی فولاد SS316L ۲۳

فهرست شکل‌ها

عنوان

صفحه

- شکل ۱-۱: حلقه‌ی هیستریزیس ۳
- شکل ۱-۱: حالات مختلف ماده تحت بارگذاری های سیکلی ۶
- شکل ۱-۲: پارامترهای مختلف رچتینگ ۷
- شکل ۱-۲: دستگاه سروهیدرولیکی INSTRON 8802 ۱۸
- شکل ۲-۲: آزمایش کشش استاندارد با استفاده از دستگاه INSTRON 8802 ۱۹
- شکل ۲-۳: هندسه نمونه استاندارد آزمایش کشش ساده (ابعاد برحسب میلیمتر) ۲۰
- شکل ۲-۴: دستگاه آزمایش پیچش به همراه نمونه آزمایش پیچش ۲۰
- شکل ۲-۵: اندازه و ابعاد نمونه آزمایش پیچش استاندارد (ابعاد برحسب میلیمتر) ۲۰
- شکل ۲-۶: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش ساده ۲۱
- شکل ۲-۷: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش پیچش ۲۱
- شکل ۲-۸: دامنه کرنش برشی در مقابل طول عمر خستگی از نتایج تجربی و پیش بینی ۲۲
- شکل ۲-۹: بارگذاری پیچشی بر روی پوسته استوانه ای ۲۴
- شکل ۲-۱۰: منحنی گشتاور-زاویه پیچش بدست آمده از بارگذاری پیچشی ۲۴
- شکل ۲-۱۱: فیکسچر ساخته شده جهت اعمال بار پیچشی سیکلی خالص ۲۵
- شکل ۲-۱۲: آزمایش پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری پیچشی ۲۶
- شکل ۲-۱۳: منحنی های هستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلیمتر تحت بارگذاری گشتاور پیچشی با گشتاور میانگین صفر و دامنه گشتاور ۰/۲۳۸ کیلونیوتن متر ۲۷
- شکل ۲-۱۴: منحنی های هستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلیمتر تحت بارگذاری گشتاور پیچشی با گشتاور میانگین صفر و دامنه گشتاور ۰/۲۷۲ کیلونیوتن متر ۲۸
- شکل ۲-۱۵: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۶۸ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچشی خالص ۲۹
- شکل ۲-۱۶: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچشی خالص ۲۹
- شکل ۲-۱۷: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل برای پوسته به طول ۱۷۰ میلیمتر با دامنه گشتاور ۰/۱۷ کیلونیوتن متر و گشتاور متوسط ۰/۰۳۴ و ۰/۰۵۱ و ۰/۰۶۸ و ۰/۱۰۲ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچشی خالص ۳۰
- شکل ۲-۱۸: رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۱۰۲ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچش خالص ۳۱
- شکل ۲-۱۹: تغییرات زاویه پیچش نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری گشتاور-کنترل با دامنه و گشتاور میانگین متفاوت ۳۲
- شکل ۲-۲۰: رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری کرنش-کنترل ۳۳

- شکل ۲- ۲۱: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل با زاویه‌های پیچشی ۱۶/۸ و ۱۰/۱۱ و ۶/۸ درجه ۳۴
- شکل ۲- ۲۲: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل برای پوسته‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با زاویه پیچش ۶/۸ و ۱۰/۱۱ و ۱۶/۸۶ درجه ۳۴
- شکل ۲- ۲۳: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با افزایش زاویه پیچش از ۶/۸ تا ۲۰/۲۳ درجه ۳۵
- شکل ۲- ۲۴: (a) پوسته استوانه‌ای در ابتدای بارگذاری (b) پوسته استوانه‌ای در انتهای سیکل بارگذاری ۳۶
- شکل ۲- ۲۵: تغییرات دامنه زاویه پیچش نسبت به تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با افزایش دامنه زاویه پیچش ۶/۸ تا ۲۰/۲۳ درجه ۳۶
- شکل ۲- ۲۶: رفتار رچتینگ در پوسته استوانه‌ای در بارگذاری گشتاور-کنترل (تاریخچه بارگذاری) ۳۷
- شکل ۲- ۲۷: تأثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای ۳۸
- شکل ۲- ۲۸: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل برای پوسته‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر و زاویه پیچش ۳/۴ و ۶/۸ درجه دارای گشودگی و ۶/۸ و ۱۶/۸۶ درجه بدون گشودگی ۴۰
- شکل ۲- ۲۹: مراحل مختلف گسیختگی پوسته استوانه‌ای (a) پوسته با گشودگی، نصب شده بر روی فیکسچر (b) جوانه زنی ترک و رشد ترک از ناحیه ساعتگرد (c) جوانه زنی و رشد ترک دوم (d) ترک در چهار طرف گشودگی (e) نمونه پوسته استوانه‌ای با گشودگی بعد از انجام آزمایش ۴۲
- شکل ۲- ۳۰: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی با گشتاور میانگین ۰/۰۶۸ کیلونیوتن متر و به ترتیب دامنه گشتاور ۰/۱۳۶، ۰/۱۷ و ۰/۱۸۷ کیلونیوتن متر ۴۵
- شکل ۲- ۳۱: کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری روی پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی ۴۵
- شکل ۲- ۳۲: رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای با تأثیر گشودگی بر نمونه‌ها ۴۶
- شکل ۲- ۳۳: مقایسه کرنش رچتینگ برای سه پوسته استوانه‌ای با گشودگی در مرکز، ابتدا و انتهای آن ۴۷
- شکل ۲- ۳۴: نمونه‌های آزمایشگاهی (a): قبل از بارگذاری (b): در زمان بارگذاری (c): پس از بارگذاری ۴۷
- شکل ۲- ۳۵: مقایسه کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی‌هایی با قطر ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر در میانه پوسته استوانه‌ای ۴۸
- شکل ۲- ۳۶: حلقه‌های اولیه و نهایی برای سه پوسته استوانه‌ای با گشودگی‌های به ترتیب ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر در میانه پوسته ۴۹
- شکل ۲- ۳۷: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با گشودگی مربعی به طول ۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی مربعی تحت بارگذاری گشتاور کنترل با گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر و دامنه گشتاور ۰/۱۳۶ کیلونیوتن متر ۵۰

- شکل ۲-۳۸: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با گشودگی مثلثی به طول ۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی مثلثی تحت بارگذاری گشتاور پیچشی - کنترل با گشتاور میانگین 0.034 کیلونیوتن متر و دامنه گشتاور 0.136 کیلونیوتن متر ۵۱
- شکل ۲-۳۹: مقایسه کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته استوانه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی‌هایی با شکل هندسی دایروی، مربعی و مثلثی در میانه پوسته استوانه‌ای ۵۱
- شکل ۲-۴۰: پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌هایی با اشکال هندسی (a) دایروی، (b) مربعی و (c) مثلثی در میانه نمونه، قبل و بعد از اعمال بارگذاری ۵۲
- شکل ۲-۴۱: اتصال پوسته مکعبی به صفحات با جوشکاری سرد ۵۳
- شکل ۲-۴۲: رفتار رچتینگ پوسته مکعبی به طول ۲۱۰ میلی‌متر در بارگذاری گشتاور پیچشی - کنترل، با دامنه گشتاور 0.170 کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین 0.034 کیلو- نیوتن متر ۵۴
- شکل ۲-۴۳: تغییر شکل در پوسته مکعبی در انتهای بارگذاری گشتاور-کنترل ۵۴
- شکل ۲-۴۴: نمودار کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته‌های مکعبی با طول ۲۱۰ میلی‌متر با دامنه‌های 0.136 ، 0.170 و 0.204 کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین 0.034 کیلونیوتن متر ۵۵
- شکل ۲-۴۵: منحنی کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته مکعبی با طول ۲۱۰ میلی‌متر بدون گشودگی، با گشودگی در میانه، ابتدا و انتهای پوسته در بارگذاری گشتاور-کنترل با دامنه گشتاور 0.170 کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین 0.034 کیلونیوتن متر ۵۶
- شکل ۲-۴۶: تغییر شکل‌های بوجود آمده در پوسته مکعبی (a): در حین بارگذاری (b): پس از بارگذاری گشودگی در ابتدا، (c): پس از بارگذاری، گشودگی در انتها و (d): پس از بارگذاری، گشودگی در میانه ۵۷
- شکل ۲-۴۷: پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی پس از بارگذاری ۵۷
- شکل ۳-۱: محاسبه پارامترهای سختی ماده با استفاده از معادله ۴-۷ و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های کرنش-کنترل بر روی نمونه‌های تست استاندارد کشش ساده ۶۸
- شکل ۳-۲: بررسی تأثیر مقدار پارامتر γ در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی در عدم حضور پارامتر-های ایزوتروپیک ۷۰
- شکل ۳-۳: بررسی اثر مقدار پارامتر γ در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی در حضور پارامترهای ایزوتروپیک ۷۱
- شکل ۳-۴: تأثیر مقدار پارامتر C در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی در عدم حضور پارامترهای ایزوتروپیک ۷۲
- شکل ۳-۵: تأثیر مقدار پارامتر b در رفتار ماده در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی ۷۳
- شکل ۳-۶: تأثیر مقدار پارامتر Q در رفتار ماده در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی ۷۳
- شکل ۳-۷: مقایسه اندازه‌های مان‌ها برای تحلیل عددی رفتار نرم‌شوندگی پوسته استوانه‌ای با گشودگی در انتها ۷۳

- شکل ۳-۸: تحلیل عددی و تجربی رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل با دامنه پیچش ۳/۴ درجه ۷۵
- شکل ۳-۹: تحلیل عددی و تجربی رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل با دامنه پیچش ۶/۸ درجه ۷۵
- شکل ۳-۱۰: تحلیل عددی و تجربی رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل با دامنه پیچش ۱۰/۲ درجه ۷۶
- شکل ۳-۱۱: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل برای پوسته‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با زاویه پیچش ۳/۴ و ۶/۸ درجه با گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر ۷۷
- شکل ۳-۱۲: تغییر شکل‌های ایجاد شده در پوسته‌های استوانه‌ای در حالت زاویه پیچش-کنترل در هر دو تحلیل عددی و تجربی ۷۸
- شکل ۳-۱۳: بررسی تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری برای سه پوسته استوانه‌ای با طول‌های ۱۷۰، ۲۵۰، ۳۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل ۷۹
- شکل ۳-۱۴: تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای در تحلیل عددی با طول‌های ۱۷۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل ۸۰
- شکل ۳-۱۵: اولین و پنجاهمین سیکل بارگذاری پوسته مکعبی در بارگذاری زاویه پیچش-کنترل ۸۱
- شکل ۳-۱۶: اولین و پنجاهمین سیکل بارگذاری پوسته مثلثی در بارگذاری زاویه پیچش-کنترل ۸۱
- شکل ۳-۱۷: اولین و پنجاهمین سیکل بارگذاری پوسته استوانه‌ای در بارگذاری زاویه پیچش-کنترل ۸۲
- شکل ۳-۱۸: بررسی تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری بر روی پوسته‌هایی با شکل هندسی متفاوت با سطح مقطع یکسان تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل ۸۲
- شکل ۳-۱۹: تغییر شکل‌های ایجاد شده در پوسته‌های منشوری پس از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل، الف) مقطع دایروی، ب) مقطع مثلثی، ج) مقطع مربعی ۸۳
- شکل ۳-۲۰: حلقه‌های هیستریزس ایجاد شده برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی در ابتدا، انتها و میانه نمونه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترلی در دو سیکل ابتدایی و انتهایی ۸۴
- شکل ۳-۲۱: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل برای پوسته استوانه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی در ابتدا، انتها و میانه نمونه ۸۴

فصل اول

بارگذاری سبکی

۱-۱- خستگی کم چرخه

تا چند دهه پیش طراحی در مهندسی تنها به استفاده از مواد در ناحیه الاستیک محدود می‌شد. اما به تدریج با توجه به نیازهای روز افزون برای طراحی قطعاتی با ظرفیت تحمل بار بالا و در عین حال سبک، ایده استفاده از ظرفیت ماده در محدوده 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 قطعه منتفی نیست. پس از گذشت مدت زمان اندک از طراحی چنین قطعاتی، دیده شد که برخی از این قطعات در اثر چند سیکل بارگذاری و بار برداری در محدوده پلاستیک، دچار گسیختگی می‌شوند، در حالی که گروهی از این قطعات نیز قابلیت تحمل تعداد بسیار زیادی سیکل بارگذاری و بار برداری پیوسته را دارند. بررسی این پدیده منجر به ایجاد شاخه‌ای در علم پلاستیسیته به نام خستگی کم تکرار شد. عامل حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی می‌باشد [۱].

عمده‌ترین دلیل شکست‌های خستگی، عوامل مکانیکی بخصوص تنش‌های متناوب که به قطعات وارد می‌شوند، تشخیص داده می‌شوند [۲]. فرایند خستگی با تغییرات برگشت ناپذیر در ریز ساختار ماده آغاز می‌شود [۳].

نمونه‌هایی که در معرض خستگی کم چرخه قرار می‌گیرند در تعداد نسبتاً کمی از سیکل‌های تنش-کنترل یا کرنش-کنترل تا هنگامی که به زوال برسند، تحت بارگذاری قرار می‌گیرند. حد بالایی عمر سیکل‌های خستگی کم چرخه توسط بررسی‌های محققین و با توجه به خواص ماده مورد نظر تعیین می‌شود؛ اما عموماً حداکثر عمر 10^4 تا 10^5 سیکل بارگذاری است.

بارگذاری سیکلی با یک دامنه بزرگ می‌تواند تنشی در سازه القا کند که از حد مجاز الاستیک فراتر رود. تنش‌های سیکلی می‌تواند باعث شکست کم چرخه شود که میزان آن بستگی به تمرکز تنش، بسته به هندسه، ناپیوستگی ماده، صافی سطح و عیوب ساختاری در حد میکرو و یا ماکرو دارد،

و نوع بارگذاری تنش-کنترل و یا کرنش-کنترل و میزان تناسب بین این دو حد و یا وجود یک تنش باقیمانده از فرایند ماشین کاری و ساخت و یا جوشکاری تأثیرگذار است.

تحقیقات در محدوده خستگی کم چرخه برای یکی از دو منظور زیر انجام می‌شود:

الف) ارائه اطلاعات مربوط به یک مشکل خاص

ب) بدست آوردن اطلاعات خاص درباره یک ماده خاص

۲-۱- حلقه هیستریزیس

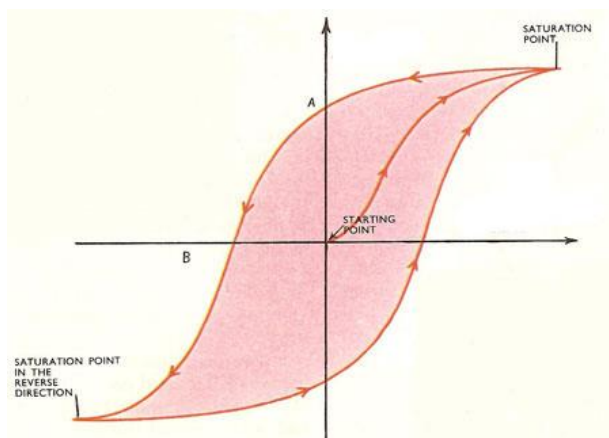
اطلاعات پایداری رفتار سیکلی یک ماده، در فرم حلقه هیستریزیس تنش-کرنش سیکلی تأمین می‌شود. تغییر شکل سیکلی باعث دسترسی به یک حلقه هیستریزیس برای هر سیکل بارگذاری می‌گردد. برخی از کمیت‌های مهم مانند کرنش‌های الاستیک و پلاستیک سیکلی را می‌توان مستقیماً از روی این حلقه محاسبه کرد.

۱-۲-۱ ویژگی‌های حلقه هیستریزیس

۱- حلقه‌های هیستریزیس متقارن می‌باشند.

۲- برای هر مقدار کرنش، دو مقدار متفاوت تنش بدست می‌آید.

۳- بعد از نقطه برگشت بار، بار برداری در طول شیئی (زاویه‌ای) که نشان دهنده مقدار مدول یانگ است رخ می‌دهد.



شکل ۱-۱: حلقه ی هیستریزیس

- ۴- مساحت حلقه بیانگر انرژی مصرف شده یا ذخیره شده در ماده برای هر سیکل دارد.
- ۵- با تغییر عملیات مکانیکی و نوع بارگذاری و مقدار بارگذاری شکل این منحنی برای یک ماده خاص تغییر می‌کند.
- ۶- شکل منحنی هیستریزس بیان کننده نوع خاصیت ماده در یک مقدار بارگذاری مشخص می‌باشد.
- ۷- برخی از کمیت‌های مهم همانند کرنش الاستیک، کرنش پلاستیک و تنش میانگین به همراه دامنه تنش را از روی این حلقه می‌توان تعیین کرد.

۱-۳- رچتینگ

رچتینگ یکی از حالت‌های ویژه و با اهمیت در طراحی در خستگی کم تکرار می‌باشد. رچتینگ به پدیده تجمع افزایش یافته و تصاعدی کرنش‌های پلاستیک در ماده، در حین بارگذاری سیکلی است. بارگذاری در رچتینگ به صورت تنش-کنترل با مقدار میانگین غیر صفر می‌باشد. اگر بارگذاری به صورت کرنش-کنترل باشد، به آن نرم‌شوندگی گویند. برای مواد فلزی وقتی که تنش از میزان تنش تسلیم ماده فراتر رود و تغییر شکل پلاستیک ایجاد کند، رچتینگ اتفاق می‌افتد.

در طی بارگذاری برگشت پذیر، زوال خستگی شامل رشد و پیشرفت، تجمع و انباشتگی تغییر شکل و یا کرنش در منطقه تغییر شکل پلاستیک است که به عنوان رچتینگ شناخته می‌شود. وجود رچتینگ در حین بارگذاری سیکلی باعث کاهش زمان شروع رشد ترک شده و در نهایت منجر به فروپاشی سازه می‌شود [۴].

در حالت تنش-کنترل تغییر شکل پلاستیک باعث پدیده رچتینگ می‌شود و تجمع آن باعث کاهش عمر خستگی می‌شود و این دلیلی بر این است که در یک تست تنش-کنترل هم تنش میانگین و هم کرنش رچتینگ به طور همزمان باعث کاهش عمر خستگی می‌شود، که می‌بایست با

یکدیگر مورد توجه قرار بگیرند. رفتار رچتینگ پدیده بسیار پیچیده‌ای می‌باشد که باعث شده است تا روش‌های بسیار زیادی در جهت تعیین مدل دقیق‌تری در جهت تحلیل این پدیده ایجاد شود [۵].

به طور کلی وقتی که جسمی تحت بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرد، ممکن است که یکی از حالت های زیر رخ دهد:

۱- الاستیک مطلق^۱

۲- الاستیک پایدار^۲

۳- پلاستیک پایدار^۳

۴- رچتینگ^۴

۵- فروپاشی^۵

این حالت ها در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود [۶].

در صورتی که دامنه بارگذاری کوچک باشد به گونه‌ای که محدوده آن فقط در محدوده الاستیک باشد، در این صورت بارگذاری الاستیک نامیده می‌شود. پدیده الاستیک پایدار یا پلاستیک پایدار مربوط به رفتار دراز مدت یک ماده تحت بارگذاری سیکلی متغیر می‌باشد و بیان کننده این حقیقت است که در پاسخ‌های مکانیکی اگر دامنه بارگذاری به اندازه کافی کوچک باشد، کاملاً در محدوده الاستیک رخ می‌دهند. اگر مقادیر کرنش پلاستیک مقادیر کوچکی باشد در این صورت الاستیک پایدار نامیده می‌شود و اگر این مقادیر میزان ثابتی باشند و روند افزایشی را طی نکنند در این صورت این پدیده، پلاستیک پایدار نامیده می‌شود. و اگر از روند افزایشی برخوردار باشد و در هر سیکل مقدار کرنش پلاستیک بزرگتر از مقدار کرنش برای سیکل قبلی باشد، در این صورت به این رفتار ماده رچتینگ اطلاق می‌شود.

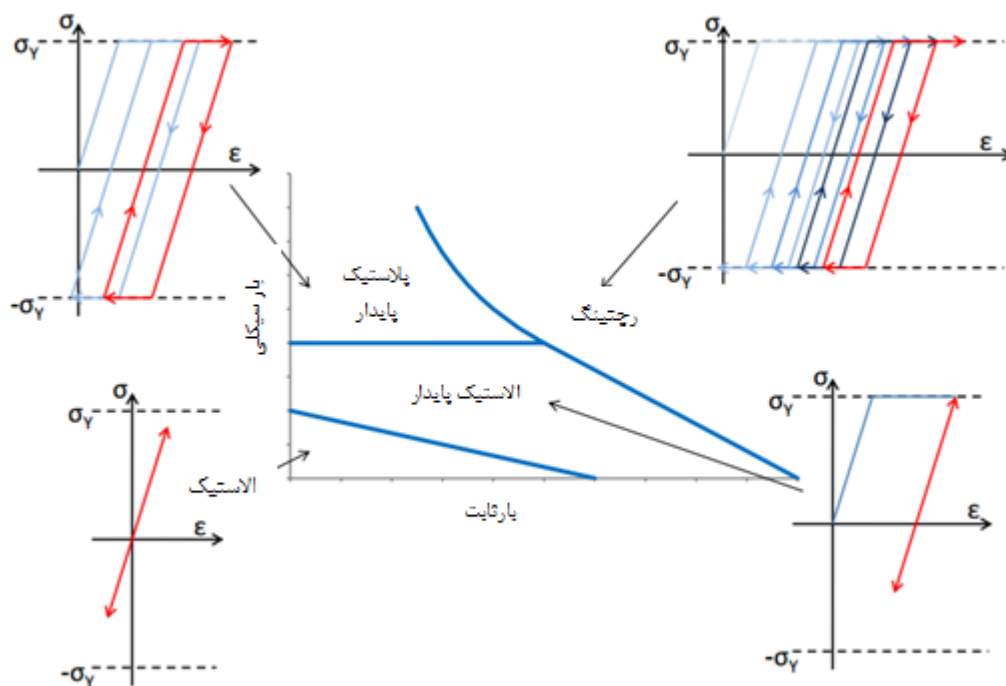
^۱ Pure Elastic

^۲ Elastic shakedown

^۳ Plastic shakedown

^۴ Ratcheting

^۵ Collapse



شکل ۱-۲: حالات مختلف ماده تحت بارگذاری های سیکلی [۶]

در میان چهار حالت بارگذاری شکل ۱-۱، رچتینگ از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد که به عنوان انباشتگی کرنش پلاستیک تحت بار سیکلی با تنش میانگین غیر صفر تعریف می شود و در اثر خزش سیکلی و انتقال حلقه های هیستریزس تنش-کرنش ایجاد می شود. با توجه به حلقه های باز هیستریزس در سیکل های تنش کنترل، کرنش رچتینگ در سیکل های تنش محوری ϵ_r و بارگذاری های چند محوره γ_r به شکل زیر تعریف می شود [۷].

$$\epsilon_r = \frac{1}{2}(\epsilon_{max} + \epsilon_{min}) \quad (1-1)$$

و در نتیجه کرنش رچتینگ واقعی از رابطه ی زیر تعیین می شود.

$$\epsilon_r = \frac{1}{2}(\ln(1 + \epsilon_{max}) + \ln(1 + \epsilon_{min})) \quad (2-1)$$

روابط بالا برای حالت هایی با بارگذاری محوری صادق است، در هنگامیکه بارگذاری به صورت چند محوره یا به صورت برشی اعمال می شود، کرنش رچتینگ با معادله زیر تعریف خواهد شد:

$$\gamma_r = \frac{1}{2}(\gamma_{max} + \gamma_{min}) \quad (3-1)$$

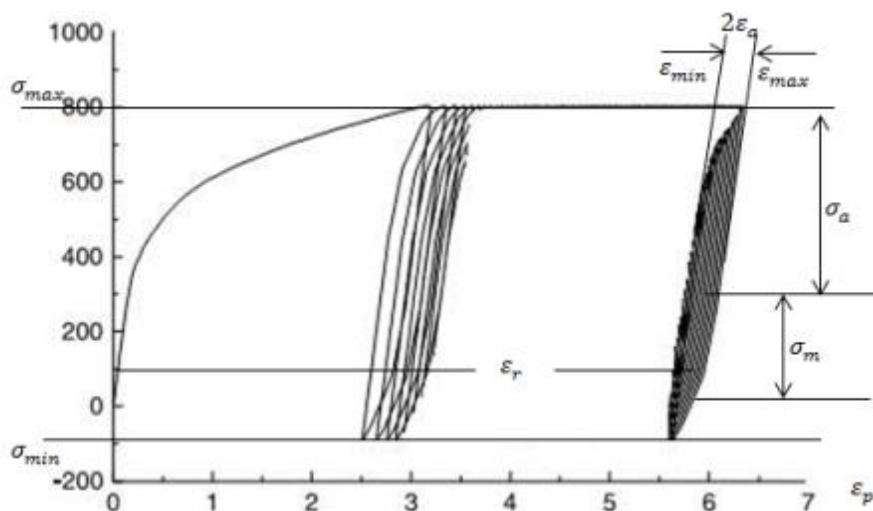
از این رو کرنش رچتینگ واقعی برابر خواهد بود با:

$$\gamma_r = \frac{1}{2} (\ln(1 + \gamma_{max}) + \ln(1 + \gamma_{min})) \quad (4-2)$$

که در آن ϵ_{min} و ϵ_{max} بیشترین و کمترین کرنش پلاستیک از حلقه‌های هیستریزیس در هر سیکل در بارگذاری محوری و γ_{min} و γ_{max} بیشترین و کمترین کرنش برشی در هر سیکل می‌باشد. نرخ

کرنش رچتینگ نیز به صورت $\frac{d\epsilon_r}{dN}$ و $\frac{d\gamma_r}{dN}$ تعریف می‌شود.

شکل ۱-۲ پارامترهای مختلف در آزمایش رچتینگ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: پارامترهای مختلف رچتینگ

۱-۳-۱- مدل‌های ساختاری ارائه شده

الف: مدل خطی

پراگر^۱ در سال ۱۹۵۶ ساده‌ترین قانون سخت شوندگی سینماتیک را به منظور شبیه سازی پاسخ پلاستیک مواد را ارائه داد. این مدل برای یک سیکل تنش تک محوره همراه با تنش میانگین نمی‌تواند تفاوتی را بین شکل بارگذاری و باربرداری منحنی هیستریزیس قائل شود و در نتیجه یک حلقه‌ی بسته بدون رچتینگ را تولید می‌کند. این مدل برای همه بارگذاری‌های دو محوره رچتینگ را که پیش-

^۱ Prager

بینی می‌کند، بعد از همان پیش‌بینی اولیه حالت پایدار به خود می‌گیرد. به عبارتی دیگر این مدل بعد از مرحله‌ی اولیه به جای پیش‌بینی رچتینگ حالت shakedown را پیش‌بینی می‌کند. از همین رو این مدل رفتار رچتینگ را به خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند.

ب: مدل چند خطی

روز^۱ در سال ۱۹۶۷ به منظور بهبود مدل سخت‌شوندگی سینماتیک یک مدل چند سطحی را ارائه نمود، به طوری که هر سطح بیان‌کننده‌ی یک مدول ثابت کار سختی در فضای تنش باشد. در بارگذاری تک‌محوره این مدل منحنی تنش-کرنش را به چندین قسمت خطی تقسیم می‌کند که اگر تعداد این قسمت‌های خطی به اندازه کافی باشد، شبیه‌سازی حلقه‌ی هیستریزیس توسط این مدل به خوبی انجام می‌گیرد. ولی شبیه به مدل سخت‌شوندگی خطی این مدل نیز تحت شرایط تنش-کنترل تک‌محوره با تنش میانگین غیر صفر حلقه‌ی بسته‌ای را تولید می‌کند و قادر به نشان دادن رچتینگ نمی‌باشد.

ج: مدل غیر خطی

آرمسترانگ^۲ و فردریک^۳ در سال ۱۹۹۶ اولین مدل سخت‌شوندگی غیرخطی را پیشنهاد نمودند. آنها قانون سخت‌شوندگی را معرفی کردند که شامل جمله بازگشتی است که در حذف اثر حافظه‌ی مربوط به مسیر کرنش^۴ و غیر خطی کردن این قانون تأثیر بسزایی دارد.

برای بارگذاری‌های تک‌محوره، این قانون به صورت یک تابع نمایی بیان می‌شود ولی منحنی‌های تنش-کرنش تجربی الزاماً به طور طبیعی نمایی نیستند و تلاش برای شبیه‌سازی آنها با یک معادله‌ی نمایی نتیجه چندان مطلوبی را در بر نخواهد داشت. در این مدل نمی‌توان یک مدول

^۱ Mroz

^۲ Armstrong

^۳ Fredrick

^۴ memory effect of the strain path

پلاستیک مشخص به وسیله‌ی آزمایش برای یک دامنه‌ی وسیع کرنش اختصاص داد، زیرا این مدل همواره به سمت مدول پلاستیک صفر میل می‌کند.

این مدول قادر به بیان رچتینگ خواهد بود اما حلقه‌ی تنش-کرنش بدست آمده، انحراف قابل توجهی از نتایج تجربی دارد و کرنش رچتینگ را به درستی پیش‌بینی نمی‌کند. در این مدل برای همه سیکل‌ها یک حلقه‌ی هیستریزیس در نظر گرفته می‌شود، بنابراین یک نرخ کرنش رچتینگ ثابتی را ارائه می‌دهد. در بارگذاری‌های دو محوره نرخ کرنش رچتینگ ثابت است و این مقدار از مقدار واقعی رچتینگ برای کلیه‌ی بارگذاری‌های دو محوره بیشتر است. به طور کلی می‌توان گفت که این مدل جهش بزرگی در بیان پاسخ پلاستیک مواد بوده اما به قدر کافی در پیش‌بینی پاسخ رچتینگ قوی نیست.

ج: مدل سه مولفه‌ای چابوچی^۱

بین سال‌های ۱۹۷۹ و ۱۹۸۶ چابوچی و همکارانش یک قانون سخت شوندگی سینماتیک غیرخطی تجزیه شده را ارائه کردند. با استفاده از مدل چابوچی، شبیه‌سازی حلقه‌های هیستریزیس پایدار نسبت به مدل آرمسترانگ بهبود می‌یابد. البته منحنی هیستریزیس شبیه‌سازی شده هنوز اندکی با منحنی تجربی فاصله داشت که این مشکل را می‌توان با استفاده از مولفه‌های بیشتر در مدل مرتفع کرد. این مدل باز هم رچتینگ را بیشتر از آنچه که بود نشان می‌داد. به علت وجود قانون سخت شوندگی خطی در سومین جمله‌ی این مدل، این مدل در ادامه‌ی بارگذاری shakedown را پیش‌بینی می‌کند و نرخ کرنش رچتینگ را به صفر می‌رساند.

د: مدل چهار مولفه‌ای چابوچی با حد آستانه

عملکرد مدل قبلی چابوچی در پیش‌بینی رچتینگ چندان رضایت بخش نبود و افزایش تعداد مولفه‌ها نیز بهبودی در آن ایجاد نکرد. این نقص باعث شد تا چابوچی در سال ۱۹۹۱ چهارمین قانون سخت شوندگی با مفهوم حد آستانه را به مدلش اضافه کند. این قانون سخت شوندگی به صورت

^۱ Chaboche

خطی تا حد آستانه‌ای از سطح تنش رشد می‌کند و پس از آن بر اساس قانون سخت شونده‌گی مدل آرمسترانگ به رشد خود ادامه می‌دهد. به دلیل عدم استفاده از ترم بازگشتی در محدوده‌ی حد آستانه و استفاده از سخت شونده‌گی خطی شبیه سازی رچتینگ بهبود زیادی پیدا کرد.

ن: مدل اهانو-وانگ^۱

این مدل در سال ۱۹۹۳ ارائه شد و حاصل برهم‌نهی چندین قانون سخت شونده‌گی است. این مدل در حالت تک محوره به یک مدل چند خطی تبدیل می‌شود، اما مدل‌های چند خطی به علت تولید حلقه‌ی هیستریزس تنش-کنترل بسته، قادر به شبیه سازی رچتینگ چند محوره نمی‌باشند. برای حل این مشکل اهانو-وانگ مقدار کمی غیر خطی شدن را در هر قانون سخت شونده‌گی بعد از رسیدن به مقدار بحرانی توسط جایگزینی یک تابع نمایی به جای تابع پله‌ای هویساید اعمال کردند. مدل اهانو-وانگ حلقه‌ی هیستریزس تنش-کنترل را بسیار با دقت تر از مدل چابوچی پیش‌بینی می‌کند و شبیه سازی رچتینگ با این مدل نتایج کاملاً رضایت بخشی دارد.

و: مدل گوینت^۲

مدل‌های چابوچی و اهانو-وانگ شامل پارامترهایی هستند که فقط از آزمایشات تک محوره تعیین می‌شوند. این مدل‌ها پیش‌بینی رچتینگ تک محوره را به خوبی انجام می‌دهند اما برای پیش‌بینی رچتینگ دو محوره عملکرد رضایت بخشی ندارند. به همین علت گوینت در سال ۱۹۹۲ مدلی را پیشنهاد کرد که در آن پارامترهایی استفاده می‌شود که با آزمایشات دو محوره تعیین می‌شوند. این مدل حلقه‌ی هیستریزس تنش-کنترل را چندان دقیق پیش‌بینی نمی‌کند. نقطه‌ی قوت این مدل در شبیه سازی رچتینگ تحت بارگذاری دو محوره می‌باشند.

^۱ Ohno-Wang

^۲ Guionnet

۱-۴- مروری بر کارهای انجام شده مرتبط با رچتینگ

شبه سازی و تعیین رفتار رچتینگ به علت اینکه رچتینگ یک انباشتگی تغییر شکل غیرالاستیک سیکل به سیکل است، به آسانی میسر نخواهد بود و مدل‌های ساختاری سیکلی رچتینگ بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی نیز قادر به تعیین دقیق رچتینگ نیستند. این نتایج سبب شد که محققان تلاش زیادی جهت مطالعه رفتار رچتینگ انجام دهند. مدل‌های مک داوول در سال ۱۹۹۵ [۸]، عبدالکریم و اهانو [۹] و در سال ۲۰۰۰ مدل باری و حسن [۱۰] برای توضیح نتایج آزمایشگاهی ارائه شده‌اند.

ژیا و همکارانش در سال ۱۹۹۴ به بررسی اثر تنش متوسط و کرنش رچتینگ بر روی عمر خستگی فولادها پرداختند. آنها در نتایج خود عنوان کردند که تنش متوسط مثبت و کرنش رچتینگ اثرات مضر بر روی عمر خستگی مواد دارند. رفتار رچتینگ به تاریخچه بارگذاری آن وابسته است. با افزایش رویه بارگذاری، رچتینگ به تدریج کاهش می‌یابد؛ از این رو سبب افزایش عمر خستگی می‌شود [۱۱].

شریعتی و همکاران در سال ۲۰۱۱ روی نمونه‌های استاندارد پلی‌استال، بارگذاری‌های محوری تناوبی انجام دادند و تأثیر دامنه نیرو و نیروی متوسط را بر روی رفتار رچتینگ نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ با افزایش پارامترهای دامنه نیرو و نیروی متوسط افزایش می‌یابد [۱۲].

چیانو و همکارانش به بررسی رچتینگ و فروپاشی لوله‌ها تحت بار سیکلی محوری پرداختند. آنها بیان کردند که در نمونه‌هایی که تحت بارگذاری سیکلی محوری منجر به گسیختگی می‌شوند؛ پارامترهایی مثل تعداد سیکل بارگذاری، تنش متوسط و دامنه تنش، فاکتورهای اساسی و بحرانی هستند [۱۳].

شریعتی و همکارانش به طور تجربی و عددی به بررسی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری تنش-کنترل محوری تناوبی پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که نرخ انباشت کرنش پلاستیک در چند سیکل ابتدایی زیاد بوده و در سیکل‌های بعدی کاهش می‌یابد. در شبه سازی

عددی نیز نرخ انباشت 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 [۱۴].

در سال ۲۰۰۹، چن و همکارانش آزمایش‌هایی را در رابطه با مطالعه خواص خستگی و رچتینگ فولادهای نیتروژن دار، تحت بارگذاری تک محوره انجام دادند. در این آزمایش‌ها، آنها به بررسی اثرات دامنه‌ی تنش، تنش میانگین، تاریخچه بارگذاری و نرخ تنش بر رفتار رچتینگ این نوع فولادها پرداختند. بحث در مورد تأثیر اندازه‌ی نمونه‌ها بر رفتار خستگی این مواد از دیگر مباحثی می‌باشد که در این مطالعه به آن پرداخته می‌شود [۱۵].

شریعتی و حاتمی به طور تجربی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولاد ضد زنگ SS304 را در بارگذاری جابجایی-کنترل با بار سیکلی محوری 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 بارگذاری‌های جابجایی-کنترل پوسته رفتار نرم شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کمناش در بارگذاری فشاری، نرم شوندگی شدت یافت [۱۶].

گانگ و ژیا به بررسی رفتار رچتینگ یک اپوکسی رزین و اثرات آن بر روی عمر خستگی در سال ۲۰۰۷ به صورت تست آزمایشگاهی پرداختند. آنها نشان دادند که کرنش رچتینگ و نرخ انباشتگی آن به دامنه تنش و مقدار تنش میانگین حساس است. عمر خستگی این تست‌ها با نمونه‌هایی که قبلاً مورد آزمایش قرار گرفته بودند مقایسه شد و مشاهده شد که کرنش رچتینگ تأثیر مشهودی بر روی عمر خستگی برای اپوکسی پلیمر ندارد [۱۷].

ووفی در سال ۲۰۰۶ به بررسی اثر رچتینگ بر روی لوله تحت اثر بارهای محوری سیکلی و تنش متوسط کششی پرداخت. او در نتایج آزمایش خود بیان کرد که برای دامنه تنش معین، رچتینگ یا همان خزش سیکلی با افزایش تنش متوسط کششی افزایش می‌یابد. این افزایش در ابتدا تدریجی و آهسته است اما در تنش‌های متوسط بالاتر شدیدتر می‌شود [۱۸].

شریعتی و یزدان‌نژاد در تحلیل تجربی رفتار رچتینگ لوله پلی‌استال تحت بارگذاری متناوب تک محوره و فشار داخلی بیان کردند که در یک سیکل بارگذاری معین، برای نمونه‌ای که عامل سخت شوندگی آن بزرگتر باشد، عمر خستگی کمتری مشاهده می‌شود. نرم شوندگی ماده با افزایش تعداد سیکل بارگذاری بیشتر می‌شود. آنها همچنین عنوان کردند که نمونه‌ای که مقدار کرنش رچتینگ بیشتری دارد، عمر خستگی کمتری دارد [۱۹].

۱-۵ - مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه پیچش

اغلب خواص خستگی^۱ موجود امروزه در خصوص بارگذاری های محوری است و اطلاعات پیچشی کلی برای مواد نرم موجود است [۲۰]. این کار از آنجا عجیب است که قطعات زیادی در صنایع مختلف موجود می‌باشند که تحت شرایطی با بارگذاری پیچشی قرار دارند. به عنوان مثال، فنرهای پیچشی که از فولادهای ترد با مقاومت بالا ساخته شده اند کاربردهای فراوانی دارند و در معرض تنش‌ها و کرنش‌های برشی سیکلی قرار دارند. خواص خستگی برشی و رفتارهای خستگی برشی این مواد ترد با مقاومت بالا عموماً از داده‌های محوری با به کارگیری معیارهای گسیختگی مثل تئوری حداکثر تنش اصلی یا تئوری کولمب - مور^۲ تخمین زده شده اند.

برناسکونی و همکارانش تأثیر فرکانس‌های مختلف تنش را در بارگذاری محوری و پیچشی آزمایش کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش انتگرالی برای تحلیل داده‌های تجربی و عددی دقت بیشتری نسبت به شیوه صفحه بحرانی دارد و به طور کلی افزایش فرکانس پیچش با توجه به فرکانس بار محوری منجر به کاهش دامنه تنش می‌شود [۲۱].

ژو و بائیس در سال ۲۰۱۰ مسیر ترک در بارگذاری پیچشی در خستگی با تعداد سیکل‌های زیاد را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که در پوسته مورد آزمایش آنها، رشد ترک خستگی

^۱ Fatigue

^۲ Coulomb-Mohr

از مرکز سطح نمونه‌هایی که تنش برشی حداکثر است شروع می‌شود و شکست در صفحه کششی ۴۵ درجه رخ می‌دهد [۲۲].

شمسایی و فاطمی تغییر شکل و رفتار خستگی فولادهای سخت را در پیچش مورد آنالیز قرار دادند و بیان کردند که پیش‌بینی خوبی از عمر خستگی این فولادها در پیچش با بکارگیری روش روسل-فاطمی در ارتباط با معیار حداکثر کرنش برشی بدست می‌آید [۲۳].

گیاوتو در سال ۱۹۹۱، نتایج تجربی از پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت بار محوری و پیچشی ارائه داد [۲۴]. پس از آن می‌یر و همکارانش در سال ۲۰۰۱، بررسی‌های تجربی و عددی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده پلیمری انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که پوسته‌ها با نقص هندسی اولیه در بارگذاری ترکیبی محوری-پیچشی نسبت به بارگذاری محوری حساسیت کمتری دارند [۲۵].

آبرو و همکارانش در سال ۲۰۰۹ رفتار نمونه‌های استوانه‌ای تحت بار خمشی و پیچشی تحت آزمایش قرار دادند و در یکی از نتایجشان بیان کردند که ارتباط خوبی بین تحلیل‌های عددی و تجربی در نمونه‌های جوشی و ترک دار بدست می‌آید [۲۶].

نوروزی بارگذاری پیچشی-خمشی را بر روی نمونه‌های SS316l انجام داد و عنوان کرد که تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن محوری، در بارگذاری مرکب خمشی-پیچشی با افزایش طول بازوی گشتاور پیچشی سرعت نرم‌شوندگی در هر دو حالت راستگرد و چپگرد تغییر قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد، ولی با افزایش طول بازو، مقدار حداکثر گشتاور پیچشی در حالت راستگرد کاهش می‌یابد. همچنین بیان داشت که ترک بوجود آمده در این بارگذاری به صورت مایل رشد کرده و سبب شکست نمونه می‌شود [۲۷].

ژانگ و همکارانش آنالیز گسیختگی خستگی در تعداد سیکل‌های بالا با نسبت‌های مختلف تنش را تحت بارگذاری کششی-پیچشی انجام دادند، آنها نشان دادند که تأثیر نسبت تنش محوری در خستگی در بارگذاری کششی و پیچشی، نسبت به حالت خستگی محوری شدیدتر است [۲۸].

بک و کیومیا آزمایش‌هایی را بر روی عضوهای استوانه‌ای با پرشدگی با بتن تحت بار پیچشی انجام دادند و متوجه شدند که به خاطر اینکه کمانش لوله‌های فولادی با توجه به پرشدگی با بتن از بین می‌رود، ظرفیت تحمل بار پیچشی^۱ آنها نسبت به لوله‌های فولادی توخالی بسیار بیشتر است [۲۹]. در همین ارتباط گانگ [۳۰]، لی و همکارانش [۳۱] تعداد ۴۷ تست بر روی اعضای استوانه‌ای که با بتن پر شده‌اند و در معرض بار فشاری و پیچشی بودند؛ انجام دادند.

۱-۶- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه بارگذاری سیکلی پیچشی

فومیکو کاواشیما و همکاران در سال ۱۹۹۹ تغییر شکل رچتینگ نمونه‌های استوانه‌ای با سوراخ داخلی از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶ را در دمای ۹۲۳ کلین تحت بار محوری سیکلی و بار ثابت پیچشی بررسی کردند. نتیجه آنها نشان داد که انباشتگی کرنش برشی رچتینگ با تغییر بار محوری و بار پیچشی ثابت تغییر می‌کند و با افزایش آن، افزایش می‌یابد [۳۲].

چن و همکاران در سال ۲۰۰۵ عملکرد رفتار رچتینگ در چهار مدل ساختاری را در پیچش نسبی در فولاد S45C برای بارگذاری محوری پیچشی بررسی کردند. مشاهده شد که مدل اهانو-وانگ در بارگذاری چند محوره، رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند در حالیکه مدل جیانگ-سهیتوگلو پیش‌بینی خوبی برای بارگذاری چند محوره/ پیچشی با در نظر گرفتن اثر ترم بازگشتی دینامیکی ارائه می‌دهد [۳۳].

فری و همکارانش در سال ۱۹۹۸ با بررسی رفتار خستگی میله‌های کامپوزیتی اپوکسی تحت بارگذاری پیچشی و خمشی پرداختند. آنها با آزمایش‌های مختلف معیار شکست شبه استاتیکی و رفتار خستگی نمونه را تحت شرایط تنش مختلف توصیف و شکست فایبر، ترک و لایه لایه شدن آن را نیز مورد مطالعه قرار دادند. این تست نشان داد که در میله‌های کامپوزیتی زمانی که نسبت خمش به پیچش زیاد باشد، شکست فایبر اتفاق می‌افتد و زمانی که سازه تحت نیروی پیچشی بیشتر نسبت به خمش قرار گیرد، ترک و لایه لایه شدن آن ظاهر می‌شود [۳۴].

^۱ Torsional

۱-۷- جمع بندی

با مطالعه مقاله‌های مختلف در رابطه با بارگذاری‌های سیکلی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای، انواع بارگذاری‌های محوری، پیچشی سیکلی و ... بررسی شده و تأثیر پارامترهایی چون ابعاد هندسی، جنس ماده و ... عمر خستگی و رفتار آنها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

با مروری بر مقالات و همچنین بازنگری در مقاله‌هایی که در بخش‌های قبلی بیان شده است؛ مشاهده می‌شود که رفتار پوسته‌های منشوری تحت بارگذاری پیچش خالص سیکلی به علت شرایط آن در زمینه نحوه اعمال بار پیچشی خالص به پوسته‌ها و همچنین نیازمندی به فیکسچرهای اختصاصی برای پوسته‌های مکعبی، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اغلب کارهای صورت گرفته در زمینه بارگذاری‌های پیچشی در محدوده بارگذاری خستگی بوده و یا شامل بارهایی غیر سیکلی می‌باشد. از طرفی نمونه‌های به کار گرفته شده در این تحقیقات نمونه‌های توپر بوده و بررسی بر روی نمونه‌های جدارنازک انجام نگرفته است.

در این تحقیق تلاش شده است که رفتار نرم شونده‌گی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری پیچش خالص سیکلی مورد مطالعه قرار گیرد و همچنین اثر پارامترهایی چون دامنه تنش، تنش میانگین، طول و تاریخچه بارگذاری و اثر گشودگی و هندسه گشودگی بر روی آنها بررسی شود.

فصل دوم

تخلیل تجربی

۱-۲- مقدمه ای درباره آزمایش های تجربی

در این فصل نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش های پیچش خالص که به ترتیب در دو قسمت گشتاور-کنترل و زاویه پیچش-کنترل انجام شده است مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش ها اثرات بارگذاری، دامنه بارگذاری، طول نمونه ها، گشودگی دایره ای و مربعی در قسمت گشتاور-کنترل و اثرات بارگذاری و گشودگی در قسمت زاویه پیچش-کنترل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده با رسم منحنی های هیستریزیس مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- دستگاه آزمایش

آزمایش ها با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک INSTRON8802 [۳۵]، که توانایی اعمال بار دینامیکی تا ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن را دارا می باشد، انجام گرفته است. همچنین از نیروسنج با ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن با توجه به نوع فیکسچر اعمالی، جهت انجام آزمایش ها کمک گرفته شده است.



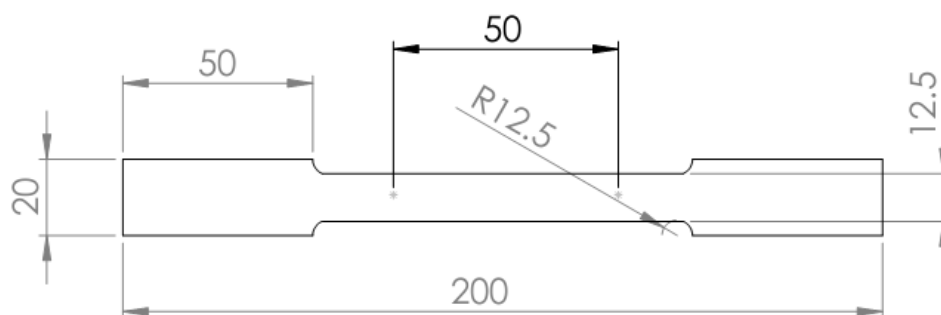
شکل ۱-۲: دستگاه سروهیدرولیکی INSTRON 8802

۳-۲- آزمایش های کشش و پیچش استاندارد

نمونه های مورد آزمایش، پوسته های استوانه ای از جنس فولاد SS316L می باشند. جهت بدست آوردن خواص مکانیکی پوسته فولادی، از آزمایش کشش استاندارد بر اساس استاندارد ASTM-E8 [۳۶] استفاده شده است (شکل ۲-۲). ابعاد نمونه استاندارد نیز براساس شکل ۲-۳ می باشد. برای بدست آوردن خواص برشی، از آزمایش پیچش استاندارد بر اساس استاندارد ASTM-E143 استفاده شده است. می توان خواص برشی را به طور مستقیم برای آنالیز در قسمت های بعدی استفاده کرد، یا اینکه از خواص کششی در جهت بدست آوردن تنش و کرنش معادل استفاده کرد [۳۷]. منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد و منحنی تنش-کرنش برشی از آزمایش پیچش استاندارد در شکل ۲-۶ و شکل ۲-۷ برای فولاد SS316L در فرکانس ۰,۰۰۱ به ترتیب آورده شده است.



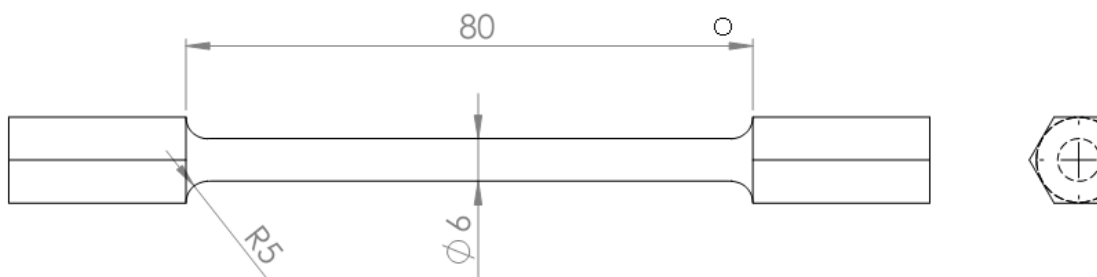
شکل ۲-۲: آزمایش کشش استاندارد با استفاده از دستگاه Instron 8802



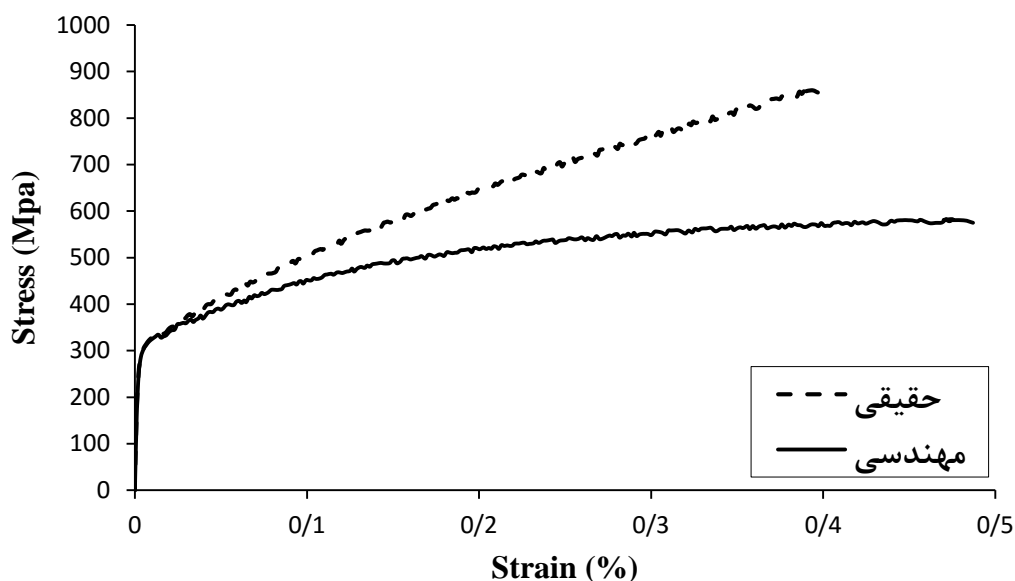
شکل ۲-۳: هندسه نمونه استاندارد آزمایش کشش ساده (ابعاد برحسب میلیمتر)



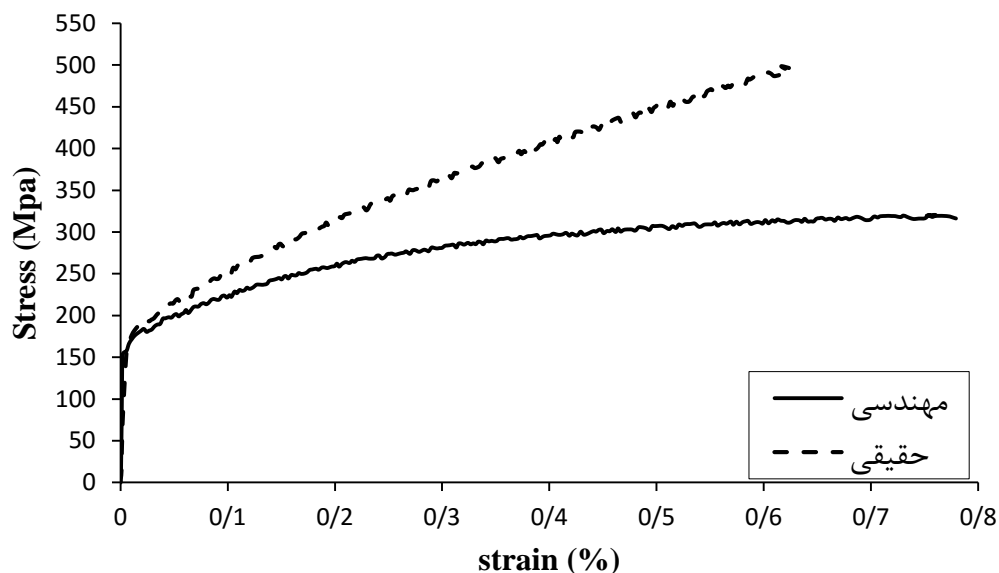
شکل ۲-۴: دستگاه آزمایش پیچش به همراه نمونه آزمایش پیچش



شکل ۲-۵: اندازه و ابعاد نمونه آزمایش پیچش استاندارد (ابعاد برحسب میلیمتر)



شکل ۲-۶: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش ساده



شکل ۲-۷: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش پیچش

برای محاسبه تنش و کرنش حقیقی با توجه به تنش و کرنش مهندسی حاصل از آزمایش کشش

و پیچش از روابط زیر استفاده می شود.

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (۱-۲)$$

$$\sigma_{real} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (۲-۲)$$

کشش ساده حالت تنش تک محوری است. از این رو $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 = \sigma$ است و وقتی در

حالت تغییر شکل پلاستیک قرار می گیرد، $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \nu\varepsilon_1 = -\frac{1}{2}\varepsilon$ ، $\nu = \frac{1}{2}$ ، $\varepsilon_1 = \varepsilon$. روابط بین

تنش معادل و کرنش معادل در این حالت $\sigma \sim \varepsilon \Leftrightarrow \bar{\sigma} \sim \bar{\varepsilon}$ می باشد. در پیچش خالص که حالت

تنش برشی خالص است، $\sigma_1 = \tau$ و $\sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\tau$ می باشد. در حالت پیچش خالص: $\varepsilon_1 =$

$$-\varepsilon_3 = \nu = \frac{1}{2}, \varepsilon_2 = 0$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij}s_{ij}} = \sqrt{3J_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3-2)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{I_2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (4-2)$$

تنش و کرنش معادل برابر خواهد بود با:

$$\bar{\sigma} \sim \bar{\varepsilon} \Leftrightarrow \sqrt{3}\tau \sim \frac{1}{\sqrt{3}}\gamma \quad (5-2)$$

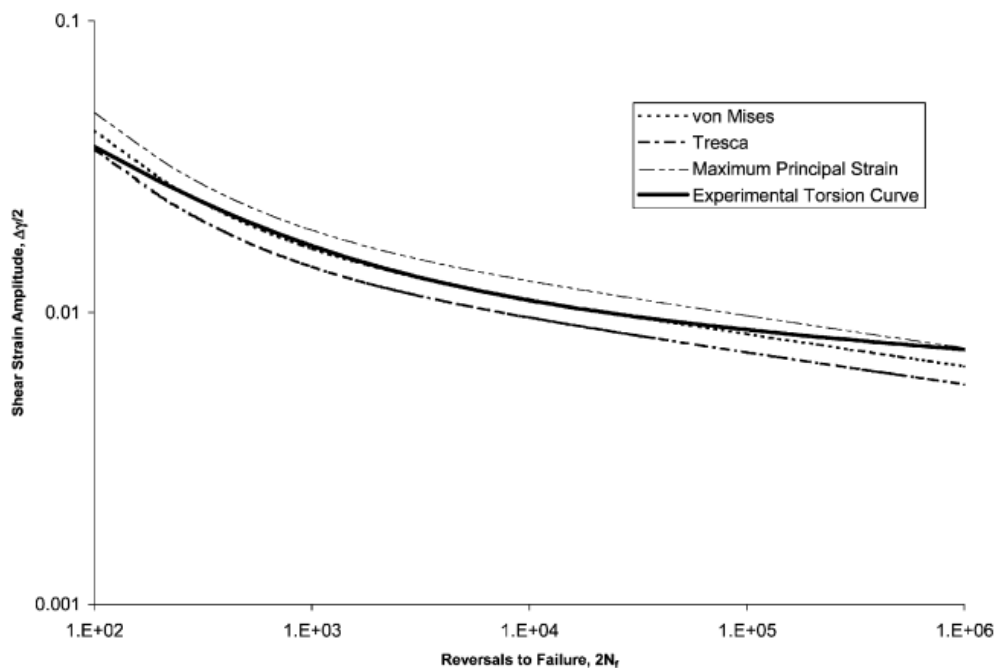
این معیار به نام معیار فون مایزس شناخته می شود و دو معیار دیگر عبارتند از:

معیار ترسکا:

$$\tau_f' = \frac{\sigma_f}{2}, \quad \gamma_f' = 1.5\varepsilon_f \quad (6-2)$$

معیار حداکثر کرنش برشی:

$$\tau_f' = \frac{\sigma_f}{(1+\nu)}, \quad \gamma_f' = 2\varepsilon_f \quad (7-2)$$



شکل ۲-۸: دامنه کرنش برشی در مقابل طول عمر خستگی از نتایج تجربی و پیش بینی

از روی سه معیار فوق و با توجه به شکل ۲-۸ نتیجه گیری می‌شود که معیار فون مایزز بهترین تقریب رفتار خستگی پیچشی در کرنش کنترل را دارد. اگرچه منحنی بالایی و پایینی مشابه یکدیگر هستند ولی طول عمرهای متفاوتی دارند.

۲-۴- هندسه، خواص مکانیکی و شیمیایی پوسته

در این تحقیق از پوسته های استوانه‌ای با ضخامت ۱ میلی‌متر، قطر خارجی ۳۴ میلی‌متر برای آزمایشات کرنش-کنترل و تنش-کنترل استفاده شده است. مقدار تنش تسلیم بدست آمده برای فولاد SS316L از ترسیم خط ۰.۰۲٪ بدست آمده است. هندسه و خواص مکانیکی پوسته مورد آزمایش در جدول ۱-۲ نشان داده شده است که با خواص منابع مختلف مطابقت دارد [۳۸]. همچنین در جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی فولاد SS316L آورده شده است. لوله های فولادی SS316L دارای مقاومت خوردگی بیشتری نسبت به سایر لوله های فولادی همین خانواده مثل لوله های فولادی SS304L هستند.

جدول ۱-۲: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی فولاد SS316L

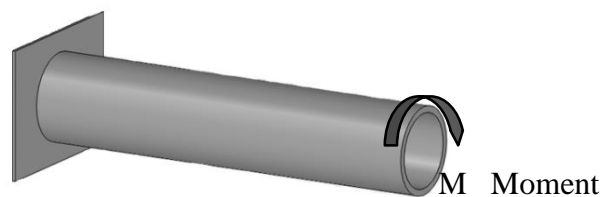
مشخصات	مقدار
قطر خارجی	۳۴ mm
طول	۱۷۰ mm
ضخامت	۱ mm
مدول برشی	۷۷ Gpa
تنش تسلیم برشی	۱۵۷ Mpa
تنش نهایی	۴۵۰ Mpa
ضریب پواسون	۰/۳۳

جدول ۲-۲: ترکیب شیمیایی فولاد SS316L

Grade	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
Min	-	-	-	۰	-	۱۶	۲	۱۰	-
Max	۰/۰۸	۰/۲	۰/۷۵	۰/۰۴۵	۰/۰۳	۱۸	۳	۱۴	۰/۱۰

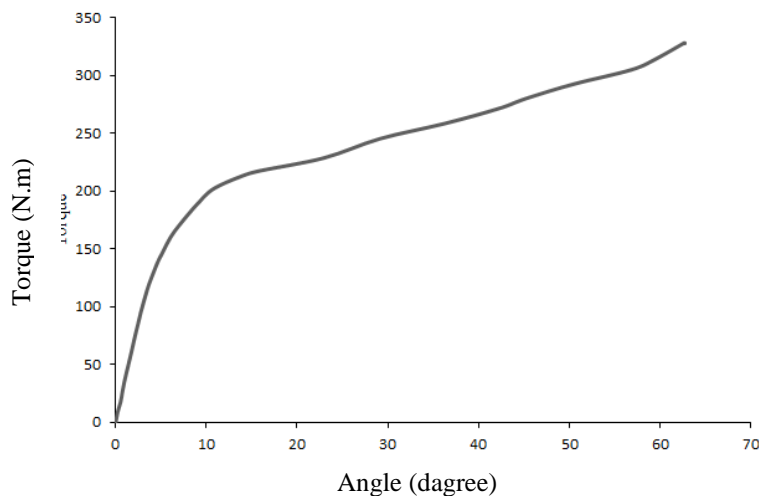
۵-۲- بارگذاری پیچشی

در این بخش رفتار پوسته های استوانه‌ای فولادی یک سرگردار تحت بارگذاری پیچش خالص بررسی می شود (شکل ۲-۹). ابتدا برای تعیین مقادیر زاویه پیچش و گشتاور اعمالی جهت بدست آوردن مقادیر کرنش پلاستیک و بررسی رفتار پدیده‌ی رچتینگ در پوسته‌های استوانه‌ای، یک نمونه پوسته تحت بارگذاری پیچش خالص قرار می گیرد.



شکل ۲-۹: بارگذاری پیچشی بر روی پوسته استوانه ای

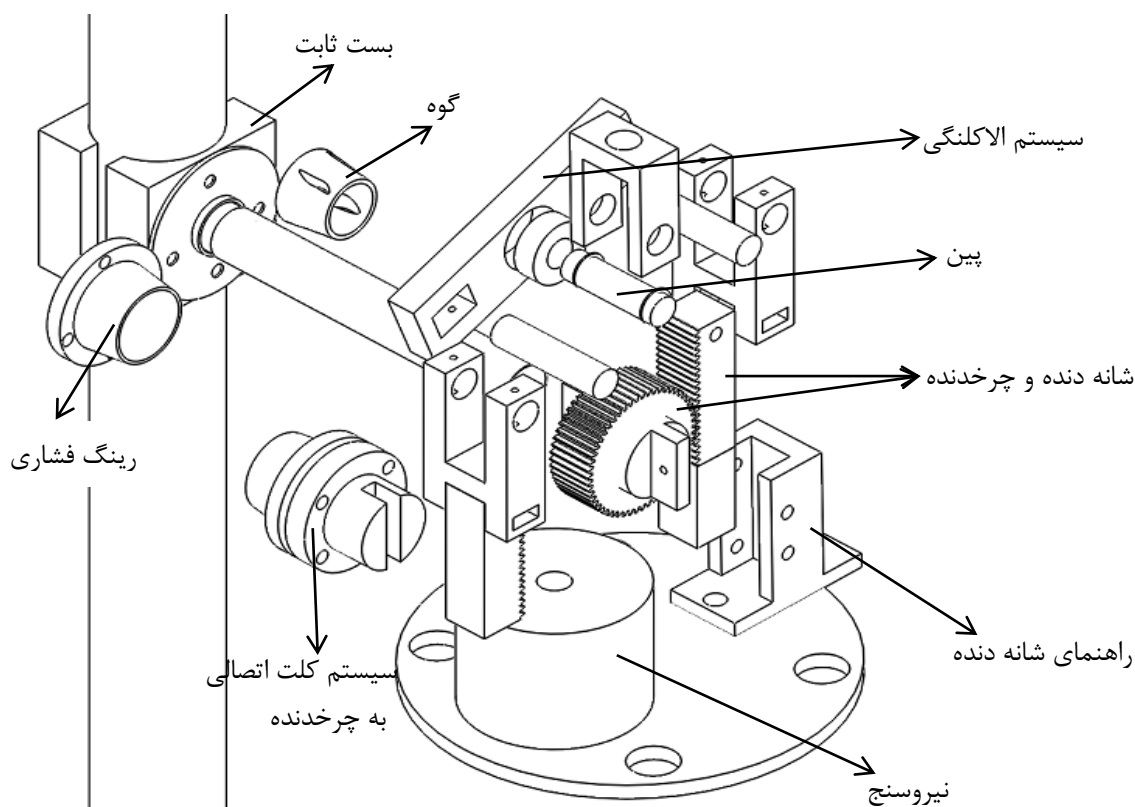
پس از انجام آزمایش بارگذاری پیچشی، منحنی گشتاور-زاویه پیچش همانگونه که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است، بدست می آید. با توجه به این نمودار می توان محدوده گشتاور اعمالی و مقادیر زاویه پیچش مجاز برای انباشتگی کرنش پلاستیک و بررسی رفتار پدیده رچتینگ در پوسته-های استوانه‌ای ضدزنگ ۳۱۶ را مشخص نمود.



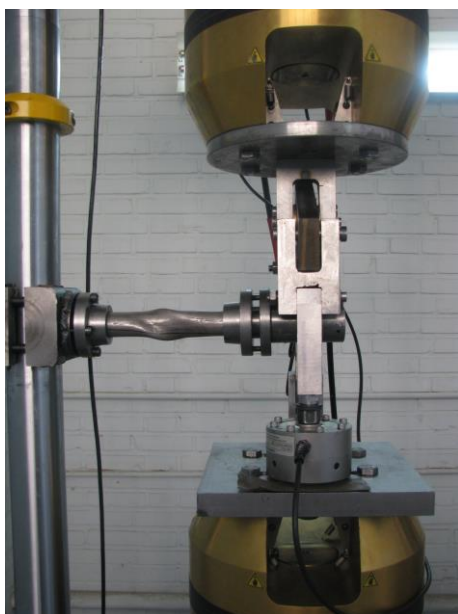
شکل ۳-۱۰: منحنی گشتاور-زاویه پیچش بدست آمده از بارگذاری پیچشی

۲-۶- فیکسچر مورد استفاده و شرایط مرزی

جهت اعمال گشتاور پیچشی خالص به یک زوج نیرو نیاز است که فقط گشتاور را به پوسته استوانه‌ای اعمال کند و سبب چرخش پوسته فولادی بر روی محور خودش شود. بدین منظور مطابق شکل‌های ۲-۱۱ و ۲-۱۲ از یک سیستم الاکلنگی که شامل دو شانه دنده موازی می‌باشد، استفاده می‌شود. مرکز محور الاکلنگ به روی یک بلبرینگ قرار گرفته است تا بتواند به راحتی با اصطکاک ناچیز بچرخد. در قسمت ابتدایی پوسته یک چرخنده از جنس VCN که دارای تنش تسلیم بالایی است، استفاده شده است که با توجه به مکانیزم چرخنده‌ها سبب ایجاد پیچش خالص می‌شود [۳۹]. در قسمت ابتدایی و انتهایی پوسته استوانه‌ای نیز از سیستم کلت استفاده شده است که به کمک آن می‌توان از اتصال پوسته به چرخنده و بست‌ها با جوش که تمرکز تنش در اطراف قسمت جوشکاری شده ایجاد می‌شود، جلوگیری کند.



شکل ۲-۱۱: فیکسچر ساخته شده جهت اعمال بار پیچشی سیکلی خالص



الف

شکل ۲- ۱۲: آزمایش پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری پیچشی



ب

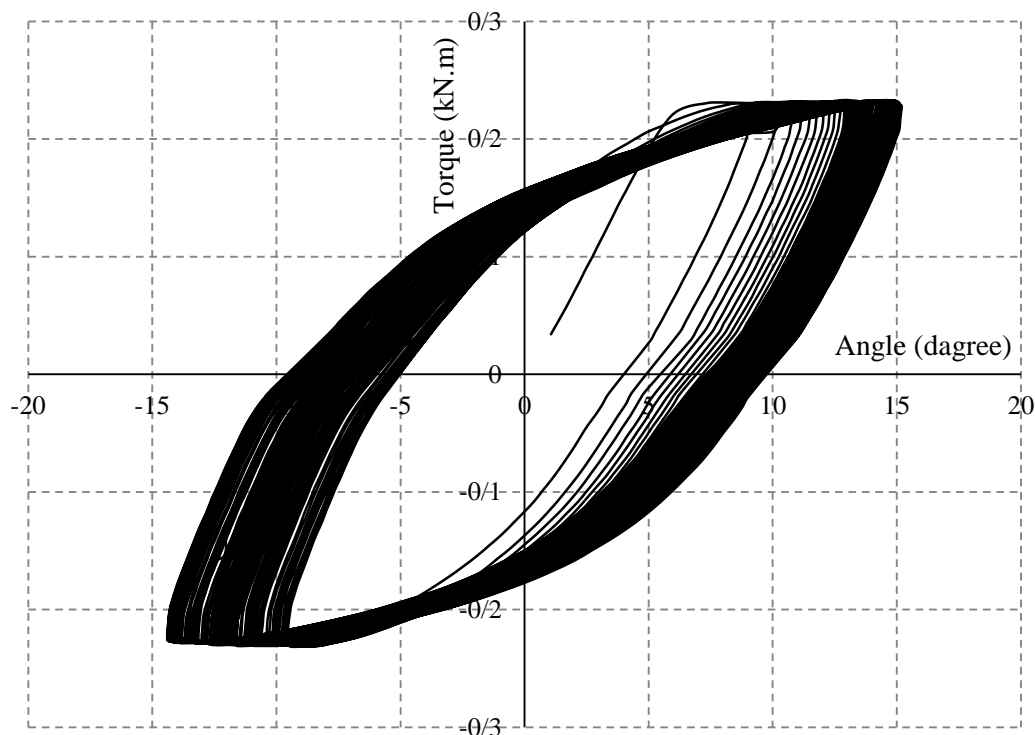
۷-۲- بارگذاری گشتاور-کنترل

برای بدست آوردن رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای، بارگذاری به صورت تنش-کنترلی با تنش متوسط و دامنه تنش مختلف روی نمونه‌هایی با طول ۱۷۰ میلی‌متر اعمال می‌گردد. هر چه از دامنه تنش بزرگتری استفاده گردد، نرخ انباشت کرنش پلاستیک بیشتر می‌شود و رفتار رچتینگ بهتر نمایش داده می‌شود. همچنین با افزایش تنش میانگین، زوال^۱ سریعتر رخ می‌دهد. لذا تنش میانگین مقداری انتخاب گردیده است تا زوال نمونه در تعداد سیکل بیشتری روی دهد؛ هر چند که آزمایش‌هایی با تنش میانگین بزرگتر که منجر به تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار زیاد در همان سیکل‌های ابتدایی شده است نیز انجام شده است. همچنین اگر دامنه تنش و تنش میانگین کوچک انتخاب شوند، باعث متوقف شدن افزایش نرخ کرنش رچتینگ در ادامه بارگذاری روی پوسته استوانه‌ای خواهد شد [۴۰]. در این گونه بارگذاری کرنش پلاستیک در پوسته انباشته می‌گردد و این رفتار منجر به زوال پوسته استوانه‌ای در ادامه بارگذاری می‌گردد.

^۱ مرحله قبل از فروپاشی کامل که در نمونه تغییر شکل‌های پلاستیک مشاهده شود.

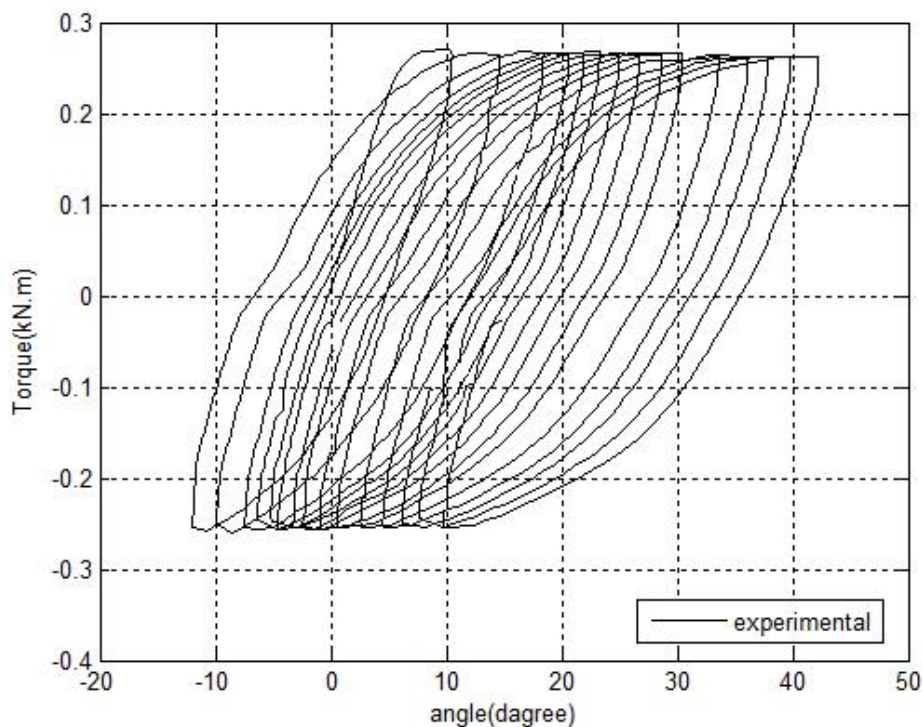
۲-۷-۱- تأثیر دامنه گشتاور بر رفتار منحنی های هیستریزیس

شکل های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ حلقه های هیستریزیس مربوط به نمودارهای گشتاور-زاویه پیچش^۱ با بارگذاری متقارن پیچشی تحت گشتاور متوسط صفر برای پوسته های استوانه ای SS316L را به طول ۱۷۰ میلیمتر نشان می دهد. مشاهده می شود که از همان سیکل های اولیه پس از هر سیکل، تحمل گشتاور وارد شده به پوسته استوانه ای کاهش می یابد؛ یعنی در پوسته استوانه ای تحت اینگونه بارگذاری رفتار نرم شوندگی از خود نشان می دهد. همانگونه که در شکل های زیر مشاهده می شود، در بارگذاری متقارن با گشتاور اعمالی ۰/۲۳۸ کیلونیوتن متر در سیکل های بالاتر، رفتار نرم شوندگی ثابتی را از خود نشان می دهد؛ در حالیکه در بارگذاری با گشتاور ۰/۲۷۲ کیلونیوتن متر، پوسته میزان نرم شوندگی بیشتری را از خود نشان می دهد. در این حال با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی پس از ۸۵ سیکل بارگذاری، پوسته دچار گسیختگی می شود.



شکل ۲-۱۳: منحنی های هیستریزیس برای پوسته استوانه ای با طول ۱۷۰ میلیمتر تحت بارگذاری گشتاور پیچشی با گشتاور میانگین صفر و دامنه گشتاور ۰/۲۳۸ کیلونیوتن متر

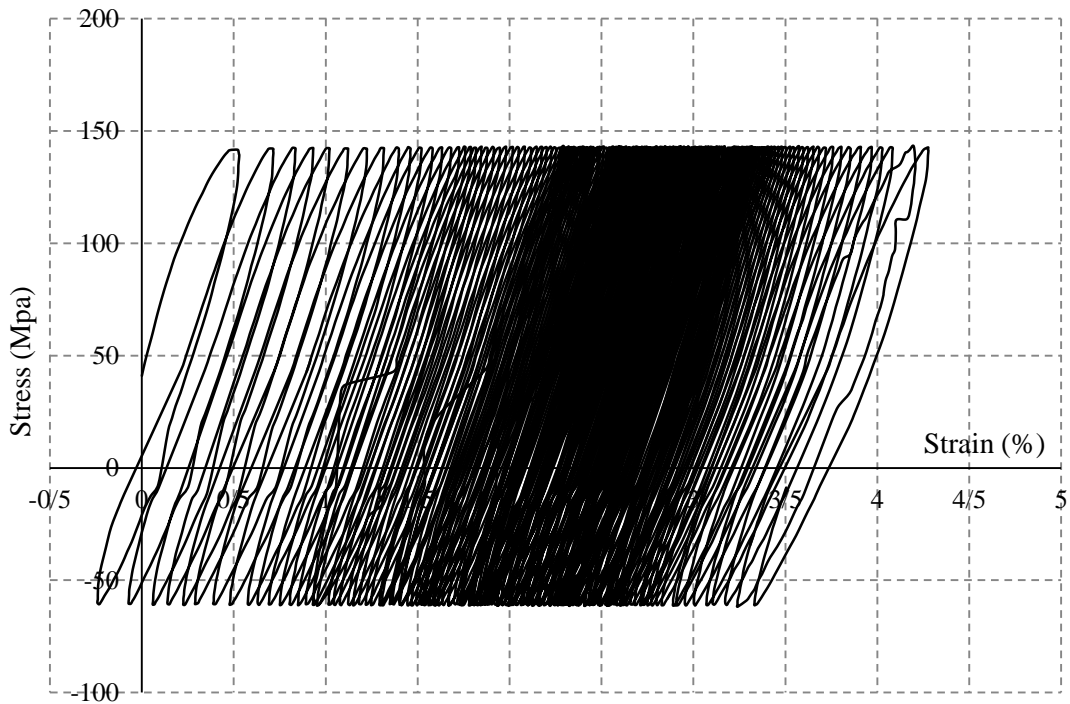
^۱ Torque-angle



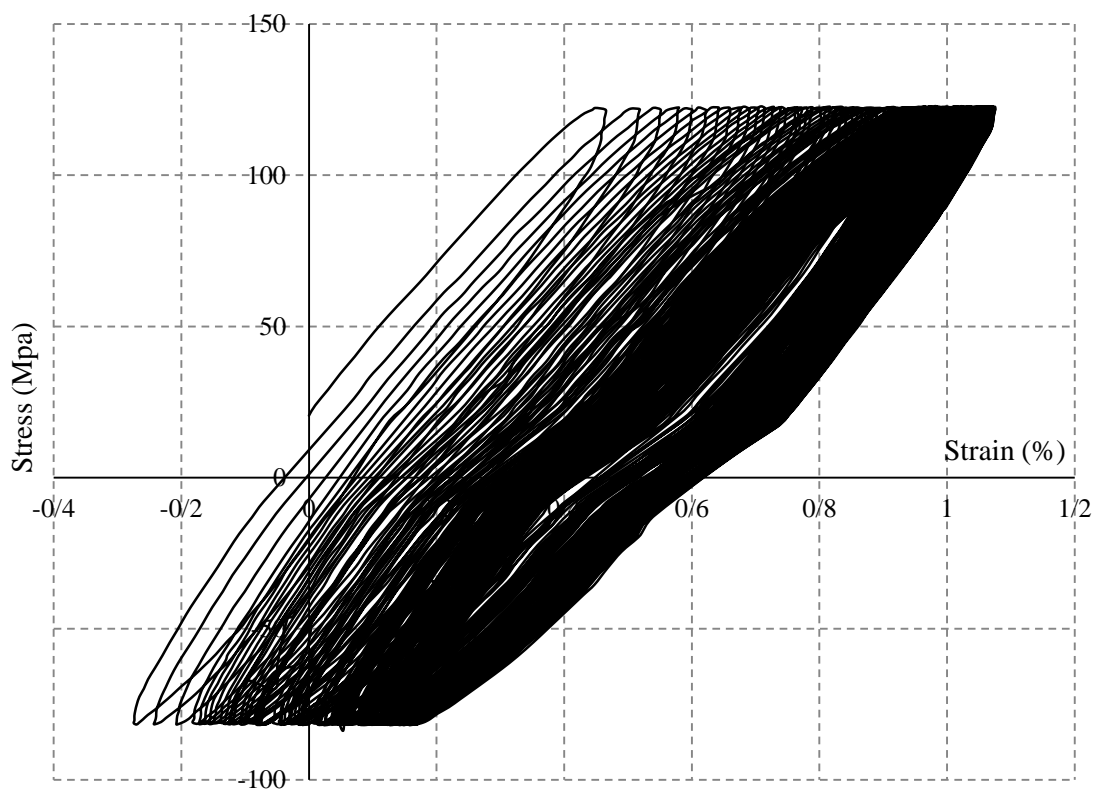
شکل ۲-۱۴: منحنی های هسترزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری گشتاور پیچشی با گشتاور میانگین صفر و دامنه گشتاور ۰/۲۷۲ کیلونیوتن متر

۲-۷-۲- تأثیر دامنه و گشتاور میانگین بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای

برای بدست آوردن رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل، گشتاور پیچشی با دامنه ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاورهای میانگین ۰/۰۳۴، ۰/۰۶۸ و ۰/۱۰۲ کیلونیوتن متر بر نمونه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر اعمال می‌گردد. دامنه گشتاور و گشتاور میانگین اعمالی به گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان نتایج را با نتایج قسمت قبلی مقایسه کرد. منحنی تنش و کرنش بدست آمده تحت این نوع بارگذاری برای حالتی با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۶۸ کیلونیوتن متر به ترتیب در شکل ۲-۱۵ و ۲-۱۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پس از هر سیکل، کرنش پلاستیک در پوسته استوانه‌ای انباشته می‌گردد و حلقه‌های ایجاد شده در سیکل‌های بالاتر تا قبل از زوال نمونه به هم نزدیک می‌گردند. یعنی نرخ افزایش کرنش رچتینگ در سیکل‌های بالاتر کاهش می‌یابد.

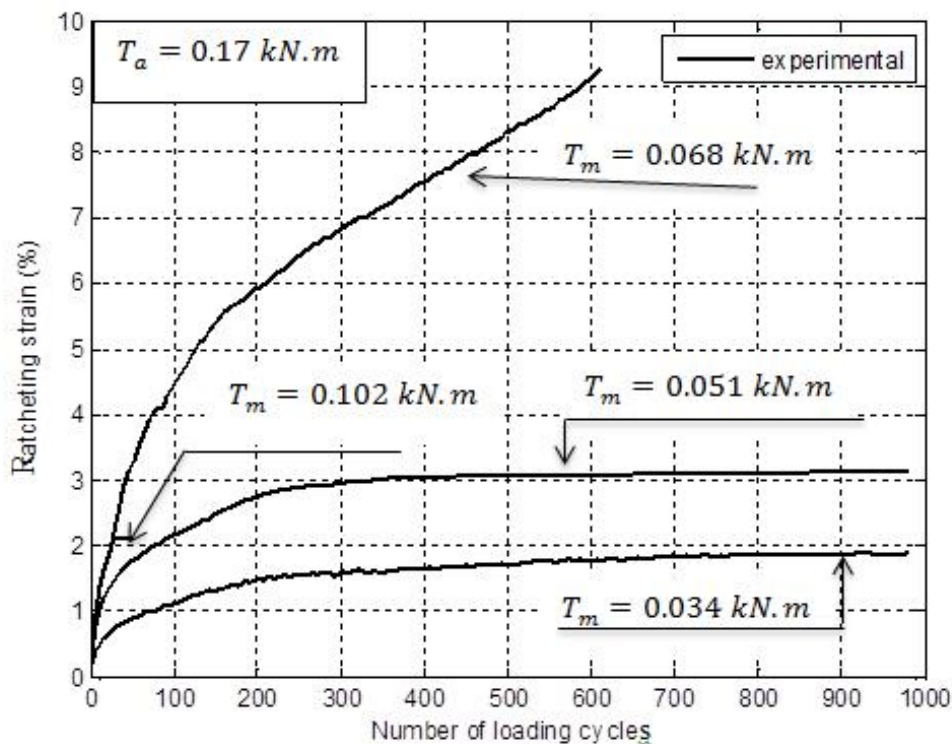


شکل ۲-۱۵: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی - کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۶۸ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچشی خالص



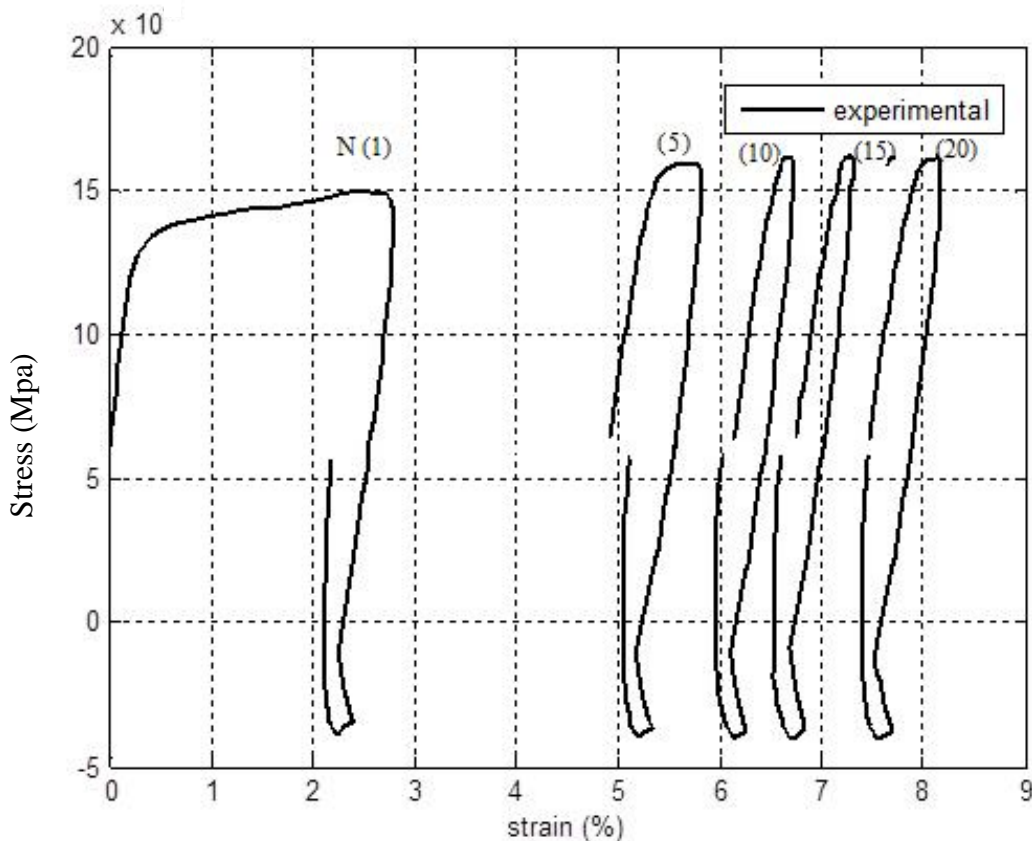
شکل ۲-۱۶: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی - کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچشی خالص

همانگونه که مشاهده می‌شود با تغییر گشتاور میانگین اعمالی به پوسته‌ها، شیب منحنی تنش- کرنش نیز تغییر می‌کند، به عبارتی دیگر با افزایش گشتاور میانگین شیب منحنی تنش-کرنش بیشتر شده و منجر به زوال سریعتر نمونه می‌گردد. در شکل ۲-۱۷ کرنش رچتینگ چهار پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری گشتاور-کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور متوسط ۰/۰۶۸ و ۰/۰۳۴ و ۰/۰۵۱ و ۰/۱۰۲ کیلونیوتن متر بر حسب تعداد سیکل بارگذاری ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش گشتاور متوسط، میزان کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد. این افزایش کرنش رچتینگ برای نمونه‌ای با گشتاور متوسط ۰/۰۶۸ کیلونیوتن متر تا زمانی که نمونه دچار زوال می‌شود ادامه می‌یابد و برای نمونه دیگر نرخ کرنش رچتینگ کاهش یافته تا به مقدار ثابتی برسد و آنگاه انباشتگی کرنش رچتینگ متوقف می‌شود. نمونه دیگری که مورد آزمایش قرار گرفت، نمونه ای با گشتاور پیچشی میانگین ۰/۱۰۲ کیلونیوتن متر و دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر بود. مطابق نتایج آزمایشگاهی در شکل ۲-۱۸

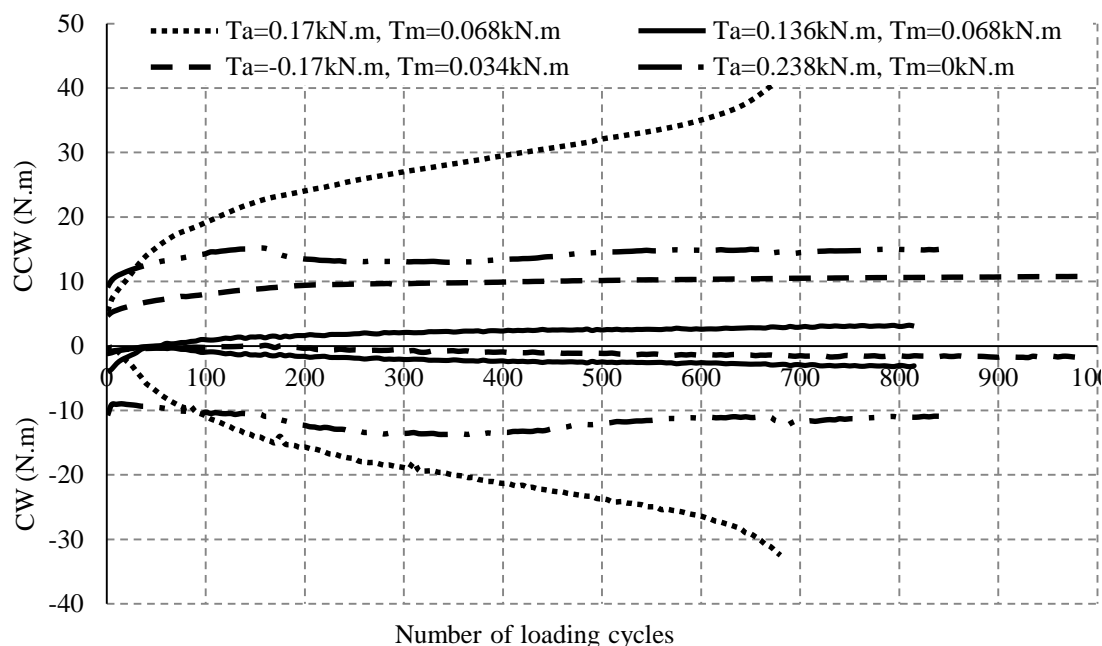


شکل ۲-۱۷: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل برای پوسته‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور متوسط ۰/۰۶۸ و ۰/۰۵۱ و ۰/۰۳۴ و ۰/۱۰۲ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچشی خالص

ملاحظه می‌شود، این نمونه در همان سیکل اولیه دچار تغییر شکل پلاستیک بیش از حد شد؛ حال آنکه در قسمت قبلی برای نمونه‌ای که با دامنه گشتاور $0/272$ کیلونیوتن متر مورد آزمایش قرار گرفت، نمونه پس از ۸۵ سیکل دچار زوال شد که این شرایط نشان دهنده تأثیر گشتاور میانگین بر عمر نمونه‌ای یکسان می‌باشد. یعنی اینکه با اعمال گشتاور میانگین، نمونه در سیکل‌هایی پایین‌تر دچار زوال می‌شود ولی منجر به شکست نمونه نمی‌گردد. شکل ۲-۱۹ تغییرات زاویه پیچش نسبت به تعداد سیکل بارگذاری برای دامنه گشتاور و گشتاور میانگین متفاوت را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش گشتاور، دامنه تغییرات زاویه پیچش در قسمت پادساعتگرد برای زمانی که بارگذاری به صورت گشتاور-کنترل اعمال می‌شود، بیشتر است. نمودارها نشان می‌دهند که تغییرات زاویه پیچش تحت دامنه گشتاور $0/170$ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین $0/068$ کیلونیوتن متر بیشتر است.



شکل ۲-۱۸: رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل با دامنه گشتاور $0/170$ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین $0/068$ کیلونیوتن متر در بارگذاری پیچش خالص



شکل ۲-۱۹: تغییرات زاویه پیش نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری گشتاور- کنترل با دامنه و گشتاور میانگین متفاوت

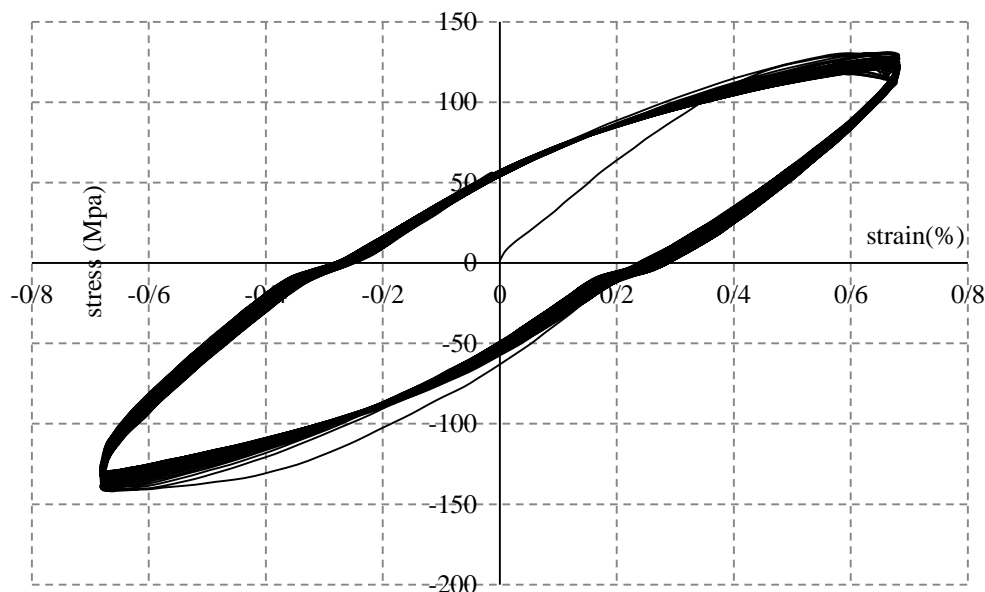
۲-۸- آزمایش‌های کرنش-کنترل

برای بدست آوردن رفتار نرم شوندگی یا سخت شوندگی پوسته استوانه‌ای، بارگذاری به صورت کرنش-کنترل با دامنه کرنش 0.680 درصد روی نمونه‌ای با طول 170 میلی‌متر اعمال شد. بارگذاری به صورت متقارن بر نمونه اعمال شده و کرنش میانگین صفر در نظر گرفته شده است تا رفتار رهاسازی^۱ در پوسته ایجاد نگردد [۴۱]. این رفتار که بر اثر بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن محوری بوجود می‌آید، به علت وجود تنش متوسط غیر صفر ایجاد می‌شود و در منحنی‌های هیستریزیس، در ادامه بارگذاری این تنش، به تدریج به سمت صفر میل می‌کند که نشانه ایجاد پدیده رها سازی تنش متوسط در ماده می‌باشد.

منحنی تنش-کرنش بدست آمده تحت این نوع بارگذاری در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پس از هر سیکل بارگذاری، تحمل بار پوسته استوانه‌ای کاهش می‌یابد؛ یعنی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیش-کنترل، رفتار نرم شوندگی از خود نشان می‌دهد. در

^۱ relaxation

نزدیکی محور افقی، منحنی‌ها به شیب صفر درجه میل می‌کنند که به علت لقی بین چرخ دنده و شانه دنده می‌باشد.



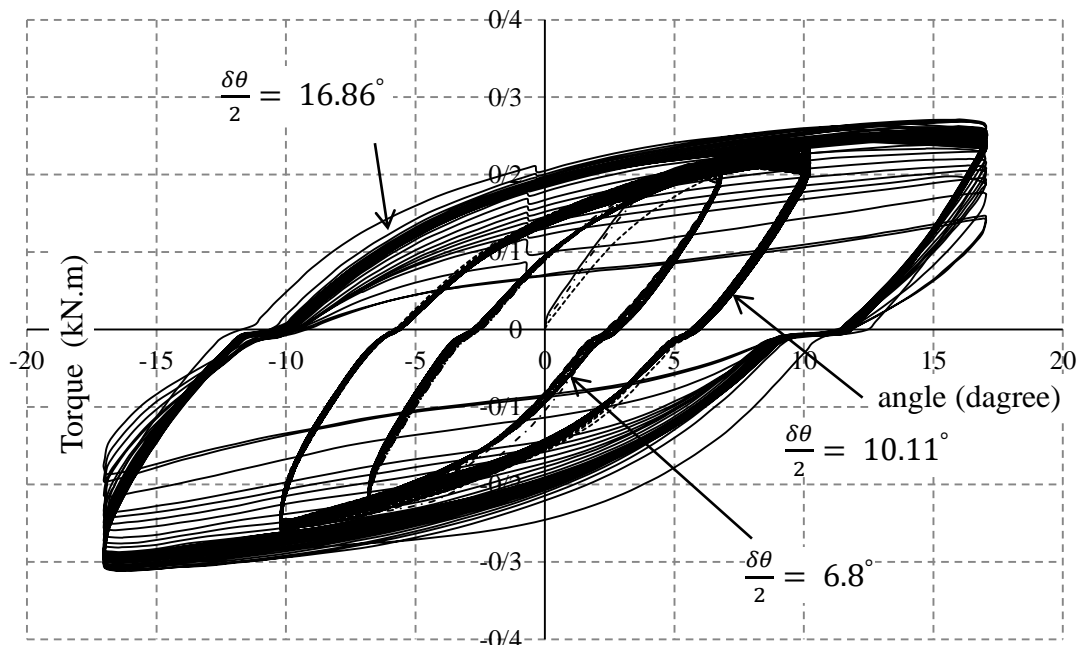
شکل ۲-۲۰: رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری کرنش-کنترل

۲-۸-۱- تأثیر دامنه زاویه پیچش بر رفتار منحنی‌های هیستریزیس

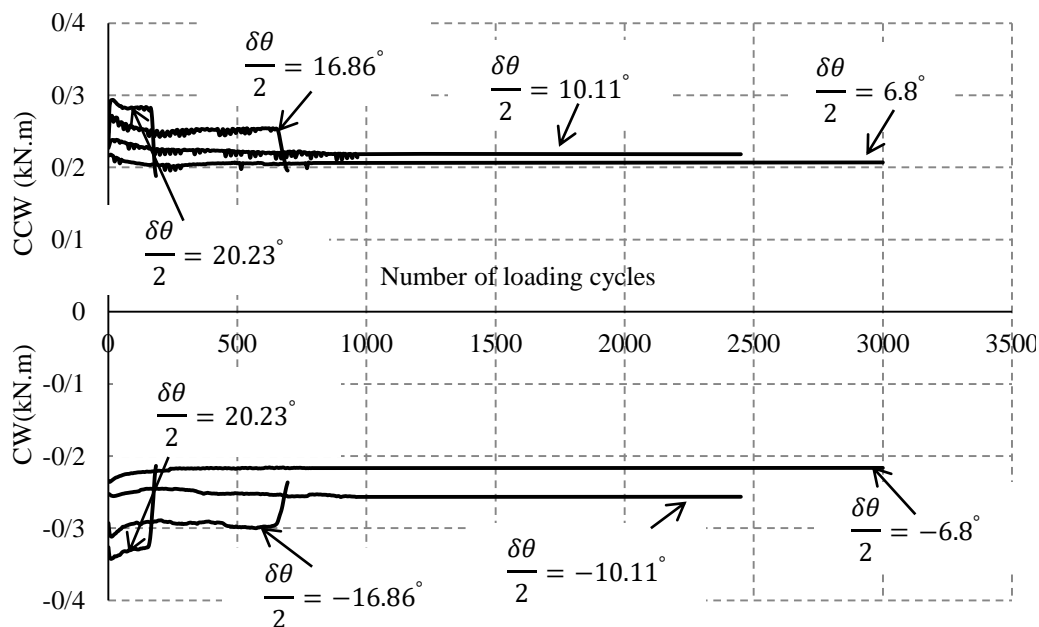
شکل ۲-۲۱ حلقه‌های هیستریزیس برای سه نمونه از پوسته‌های استوانه‌ای SS316L به طول ۱۷۰ میلی‌متر، تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل متقارن را نشان می‌دهد. بارگذاری تحت چهار دامنه زاویه پیچشی با مقادیر $\frac{\delta\theta}{2} = 6.8^\circ, 10.11^\circ, 16.86^\circ, 20.23^\circ$ تا شکست نمونه‌ها اعمال شده است. برای هر سه نمونه در تمام سیکل‌ها تا پایداری منحنی‌ها و در نهایت شکست پوسته، رفتار نرم شوندگی دیده می‌شود. این رفتار در قسمت ساعتگرد و پادساعتگرد متقارن نیست و همانگونه که مشاهده می‌شود، گشتاور اعمالی در قسمت ساعتگرد کمتر است.

در شکل ۲-۲۲ مقادیر حداکثر گشتاور در قسمت‌های ساعتگرد و پادساعتگرد در هر سیکل نسبت به تعداد سیکل‌ها تا مشاهده تغییر شکل پلاستیک زیاد در نمونه ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه چرخش، شکست نمونه در تعداد سیکل کمتری ایجاد می‌شود که به

ترتیب افزایش زاویه چرخش، شکست در تعداد سیکل ۲۴۹۵ و ۶۶۵ بارگذاری رخ می‌دهد و در $\frac{\delta\theta}{2} = 6.8^\circ$ تا تعداد سیکل ۳۰۰۰ بارگذاری رفتار نمونه هم چنان ثابت است.



شکل ۲۱-۲: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلیمتر تحت بارگذاری زاویه پیش-کنترل با زاویه های پیچشی ۱۶/۸ و ۱۰/۱۱ و ۶/۸ درجه

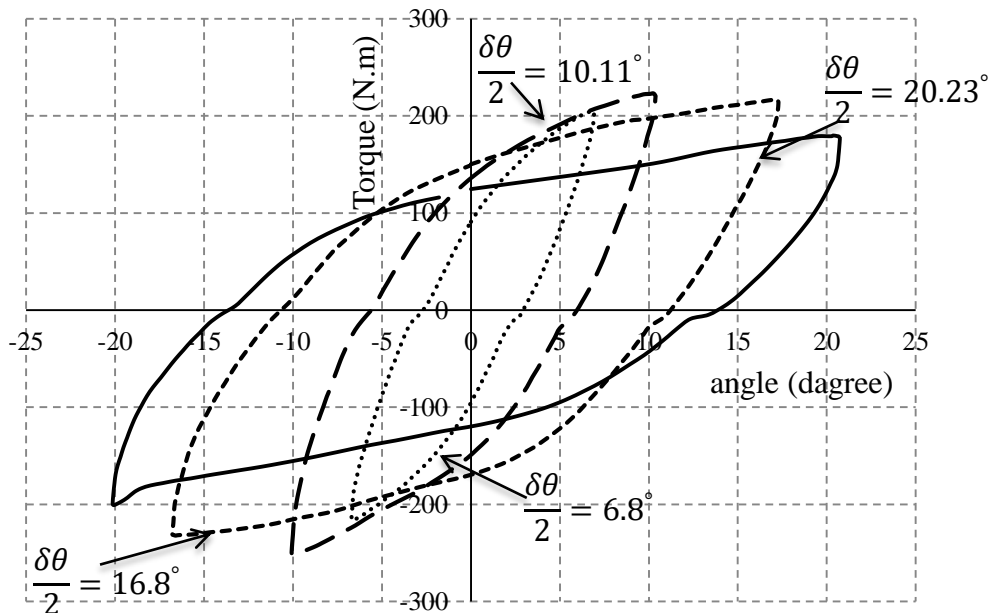


شکل ۲۲-۲: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیش-کنترل برای پوسته‌ای با طول ۱۷۰ میلیمتر با زاویه پیش‌کنترل ۶/۸ و ۱۰/۱۱ و ۱۶/۸ و ۲۰/۲۳ درجه

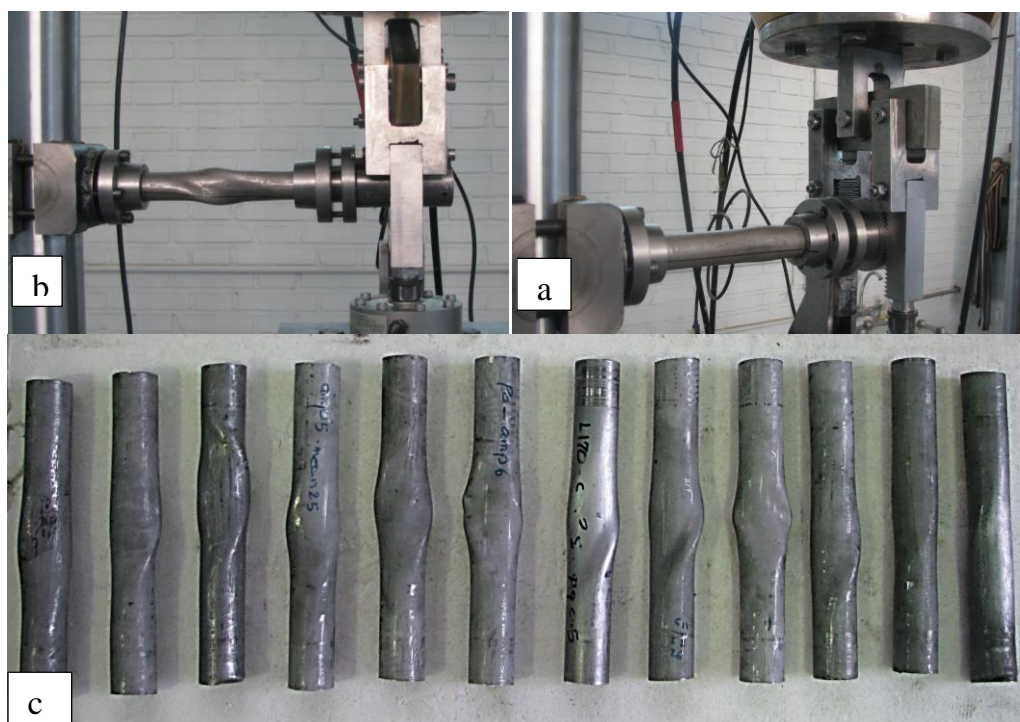
۲-۸-۲- تأثیر تاریخچه دامنه‌ی زاویه پیچش بر رفتار منحنی‌های هیستریزیس

نمونه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل به صورت مرحله‌ای با دامنه زاویه پیچش ۶/۸، ۱۰/۱۱، ۱۶/۸ درجه که هر یک به تعداد ۴۰۰ سیکل و دامنه زاویه پیچش ۲۰/۲۳ درجه به تعداد ۵۰ سیکل (در نمونه‌ای که تحت بارگذاری ثابت قرار گرفت پوسته استوانه‌ای در سیکل ۱۹۸ بارگذاری به زوال رسید) تا مرحله زوال پوسته تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. آخرین منحنی هیستریزیس برای هر دامنه زاویه پیچش در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است.

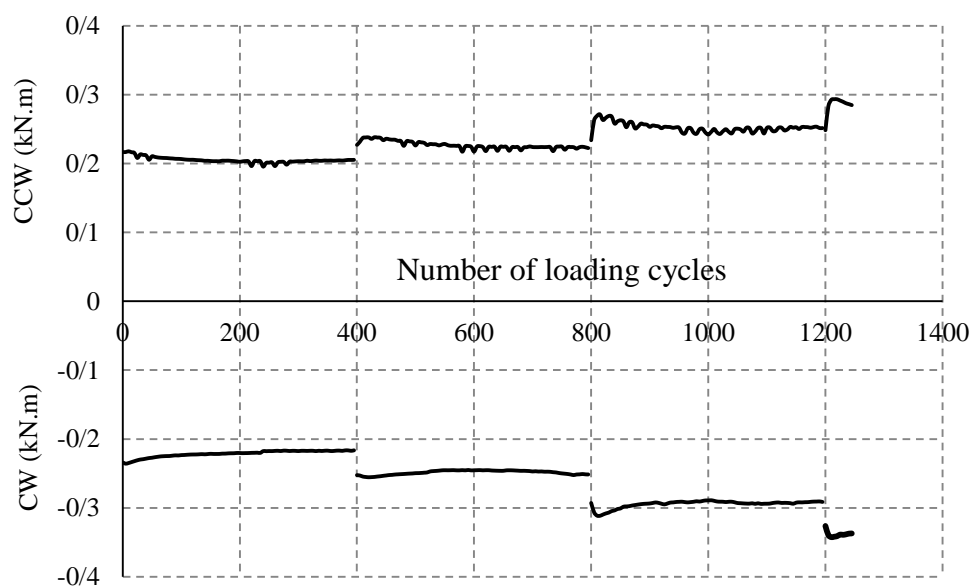
پوسته استوانه‌ای در ابتدا تحت پیچش با زاویه ۶/۸ درجه قرار گرفت و بعد از انجام ۴۰۰ سیکل بارگذاری پیچشی متوقف و سپس باربرداری شد و در ادامه زاویه پیچش به مقدار ۱۰/۱۱ درجه افزایش پیدا کرد و در انتها زاویه پیچش به ۲۰/۲۳ افزایش یافته و بعد از انجام ۳۰ سیکل بارگذاری پوسته دچار تغییر شکل پلاستیک در میانه آن شد و بعد از ۵۰ سیکل دچار پارگی از قسمت میانی گردید. تغییر شکل پلاستیک در پوسته استوانه‌ای در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۳: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با افزایش زاویه پیچش از ۶/۸ تا ۲۰/۲۳ درجه



شکل ۲-۲۴: (a) پوسته استوانه‌ای در ابتدای بارگذاری (b) پوسته استوانه‌ای در انتهای چرخه بارگذاری (c) تعدادی از نمونه‌های آزمایش شده

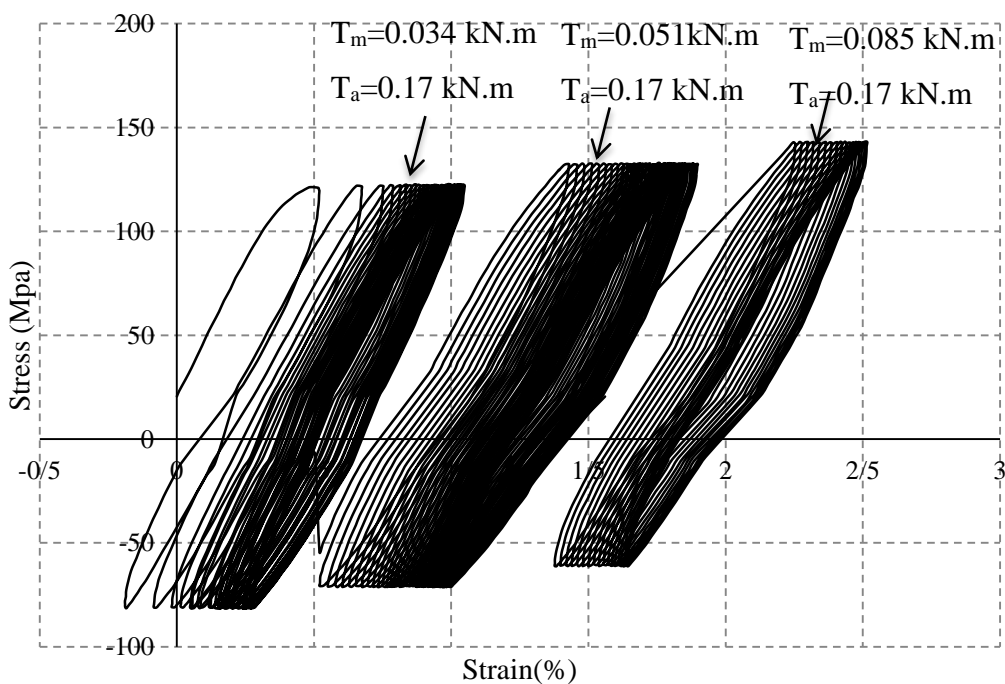


شکل ۲-۲۵: تغییرات دامنه زاویه پیچش نسبت به تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با افزایش دامنه زاویه پیچش ۶/۸ تا ۲۰/۲۳ درجه

در شکل ۲-۲۵ تغییرات دامنه زاویه پیچش نسبت به تعداد سیکل برای پوسته استوانه ای فوق-الذکر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه زاویه پیچش، سرعت نرم شوندگی در قسمت‌های ساعتگرد و پادساعتگرد بیشتر می‌شود ولی این نرم شوندگی در قسمت ساعتگرد در دامنه زاویه پیچش بالاتر بیشتر می‌شود.

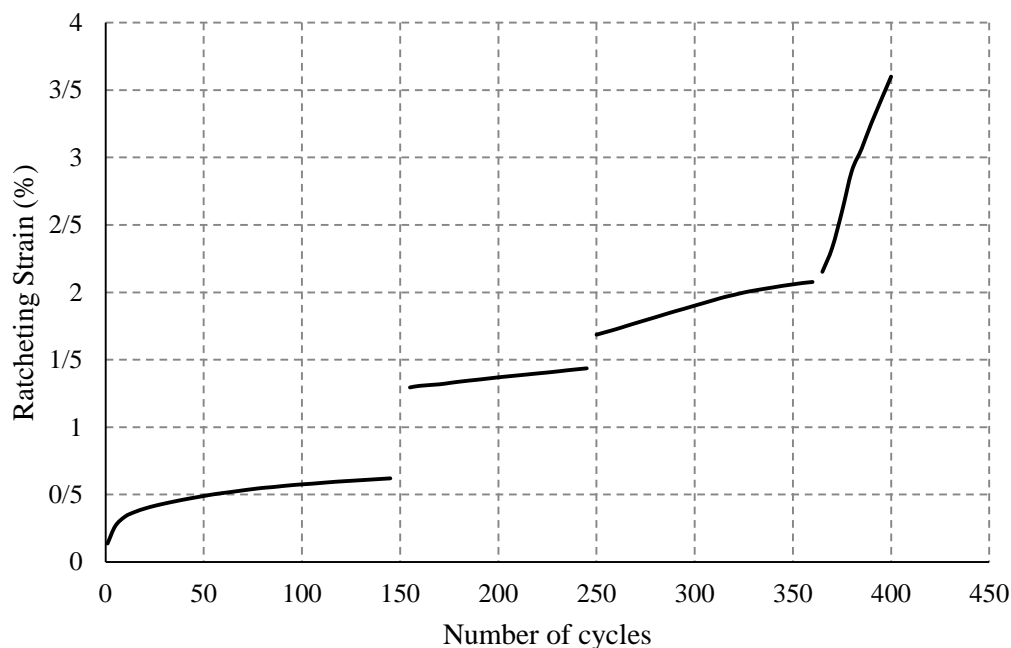
۲-۹- تأثیر تاریخچه بارگذاری روی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای

بر روی پوسته استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر بارگذاری گشتاور-کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور متوسط ۰/۰۳۴، ۰/۰۵۱، ۰/۰۶۸، ۰/۰۸۵ کیلونیوتن متر به صورت افزایشی انجام شده است. تحت این بارگذاری همانگونه که از شکل ۲-۲۶ مشاهده می‌شود، به علت نامتقارن بودن بارگذاری گشتاور-کنترل، در پوسته استوانه‌ای رفتار رچتینگ ایجاد می‌گردد و با افزایش گشتاور متوسط سرعت رچتینگ در پوسته افزایش می‌یابد. تحت این بارگذاری با افزایش گشتاور متوسط سرعت رچتینگ در پوسته افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۲۶: رفتار رچتینگ در پوسته استوانه‌ای در بارگذاری گشتاور-کنترل (تاریخچه بارگذاری)

در این بارگذاری با افزایش گشتاور میانگین کرنش رچتینگ هم افزایش می‌یابد، شیب کرنش رچتینگ در بارگذاری با گشتاور میانگین $0/085$ کیلونیوتن متر افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و این به دلیل ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید در پوسته استوانه‌ای در این گشتاور می‌باشد. این افزایش ناگهانی شیب کرنش رچتینگ به علت تاریخچه بارگذاری نیز می‌باشد. تأثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ در شکل ۲-۲۷ کاملاً مشخص می‌باشد. همانگونه که در تصاویر هم مشاهده شد، محدوده طولی نمونه‌ها بگونه‌ای انتخاب شده است که تکیه گاهها اثری در تغییر شکل بوجود آمده نداشته باشند و بین آخرین مکان تغییر شکل یافته تا تکیه گاهها فاصله باشد.



شکل ۲-۲۷: تأثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای

۲-۱۰- تأثیر گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری سیکلی

آزمایش‌های زاویه پیچش-کنترل و گشتاور-کنترل روی پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی نیز انجام گرفته‌است تا تأثیر شعاع گشودگی، مکان قرارگیری گشودگی، شکل هندسی گشودگی (دایره‌ای، مربعی و مثلثی) و تغییر شکل‌های متقارن و نامتقارن بوجود آمده بر اثر گشودگی یک طرفه و راه به در، روی پوسته استوانه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۱۷۰mm بدون گشودگی و نیز با گشودگی با قطرهای ۱۰mm، ۸mm و ۶mm در میانه پوسته استوانه‌ای برای بررسی تأثیر شعاع گشودگی بر روی رفتار نرم‌شوندگی پوسته استوانه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین گشودگی با شعاع ۵mm به فاصله ۳۵mm از ابتدای نمونه و گشودگی مشابهی به فاصله ۳۵mm از انتهای پوسته استوانه‌ای ایجاد گردیده تا تأثیر مکان گشودگی بر روی رفتار نرم‌شوندگی پوسته‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

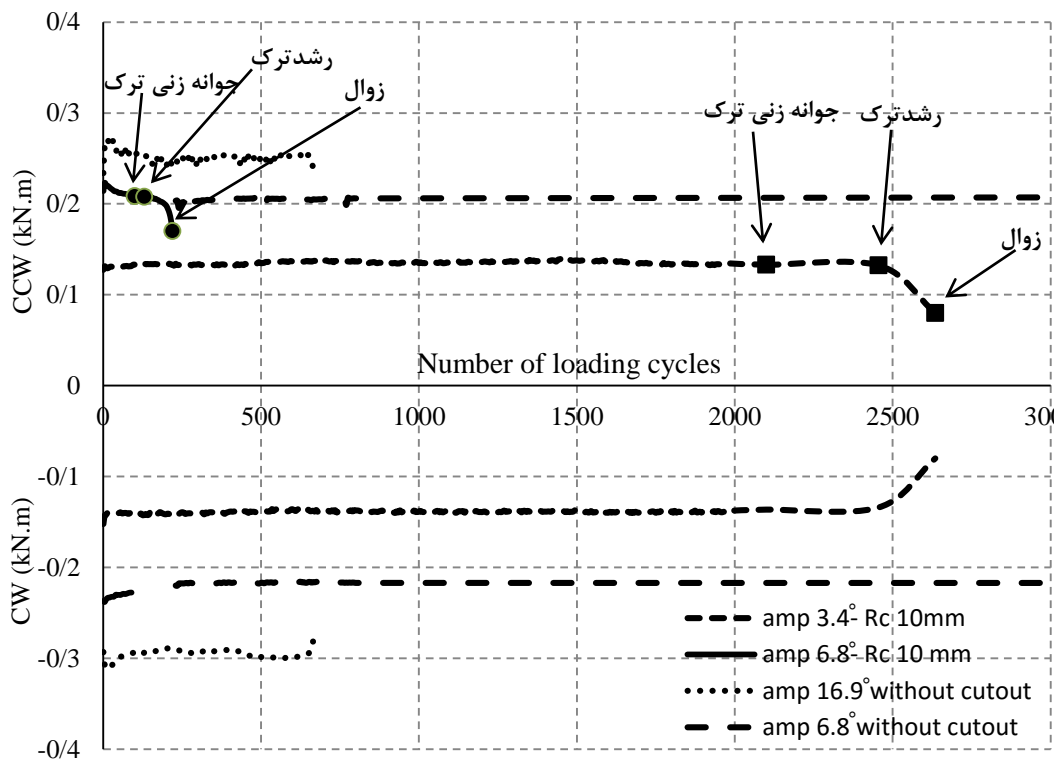
گشودگی با شکل هندسی مربعی با طول هر ضلع ۸/۸۵mm که دارای سطح مقطعی برابر با گشودگی دایره‌ای است و گشودگی دیگری که دارای شکل هندسی مثلثی با طول ارتفاع ۱۵/۷۵mm و طول قاعده ۱۰mm برای بررسی تأثیر شکل هندسی گشودگی نیز بر روی سطح پوسته استوانه‌ای ایجاد گردید.

گشودگی دایره‌ای به شعاع ۱۰mm در میانه نمونه با مدل گشودگی یک طرفه و همچنین با همین شعاع ولی با مدل گشودگی راه به در جهت بررسی تغییر شکل متقارن و نامتقارن هندسه پوسته استوانه‌ای، ایجاد شد؛

۲-۱۰-۱ - تأثیر گشودگی روی رفتار نرم‌شوندگی تحت بارگذاری زاویه پیش-کنترل

آزمایش‌های بارگذاری زاویه پیش-کنترل بر روی پوسته‌های استوانه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر با دامنه‌های زاویه پیش ۳/۴ و ۶/۸ درجه انجام شده است. روی این نمونه‌ها گشودگی‌هایی دایره‌ای با شعاع $Rc = 5mm$ در وسط نمونه آزمایش ایجاد شده است تا تأثیر وجود گشودگی روی پوسته استوانه‌ای با پوسته بدون گشودگی مقایسه شود. همان‌طور که در شکل ۲-۲۸ مشاهده می‌گردد، پیک‌های گشتاور برای قسمتی از نمونه که در حال پیش ساعتگرد و پیش پادساعتگرد می‌باشد، برای دو نمونه دارای گشودگی و نیز دو نمونه بدون گشودگی رسم شده است.

در قسمت ساعتگرد گشتاور بیشتری در جهت نرم شدگی به نمونه اعمال می‌شود. در نمونه‌ای با زاویه پیچش ۶/۸ درجه که دارای هر دو حالت با گشودگی و بدون گشودگی^۱ است حداکثر گشتاور آنها رسم شده است. ملاحظه می‌شود که این دو نمونه در سیکل‌های ابتدایی کاملاً منطبق بر یکدیگر می‌باشند؛ ولی به دلیل وجود گشودگی نمونه‌ای که دارای گشودگی می‌باشد در تعداد ۲۲۰ سیکل بارگذاری، دچار زوال می‌گردد، این در حالی است که در نمونه بدون گشودگی تا ۳۰۰۰ سیکل بارگذاری در آن تغییر شکل پلاستیک مشهودی دیده نمی‌شود و رفتار نرم شدگی ثابتی را از خود نشان می‌دهد. حتی در بارگذاری که دامنه (amp) زاویه پیچش آنها در حالت بدون گشودگی به ۱۶/۹ درجه می‌رسد، نمونه تا ۶۶۵ سیکل بارگذاری رفتار ثابتی را نشان می‌دهد و بعد از آن دچار زوال می‌شود.



شکل ۲- ۲۸: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل برای پوسته-ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر و زاویه پیچش ۳/۴ و ۶/۸ درجه دارای گشودگی و ۶/۸ و ۱۶/۸۶ درجه بدون گشودگی

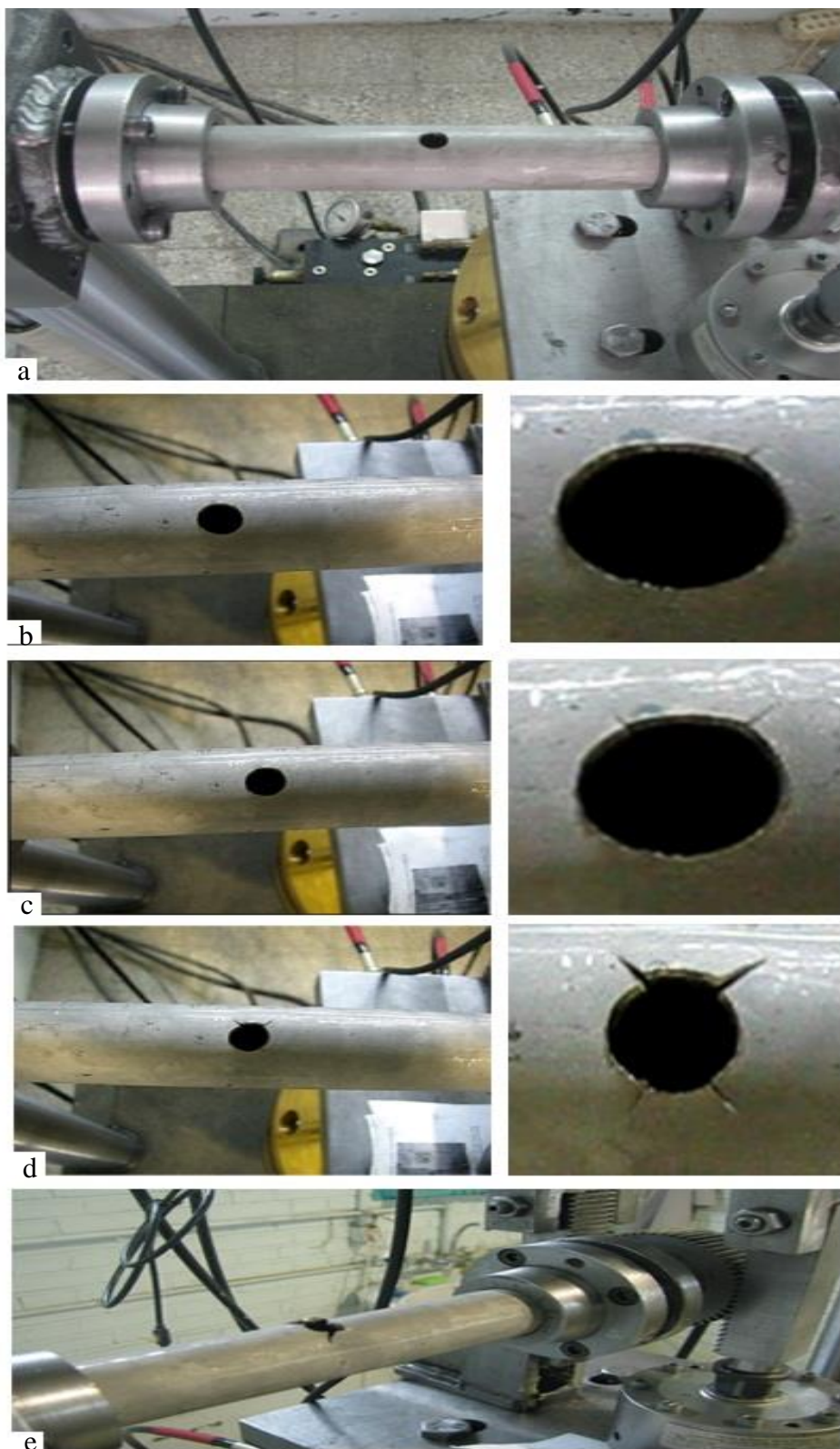
^۱ Cutout

در بار گذاری‌های زاویه پیچش-کنترل نمونه تا قبل از زوال از قسمت‌های میانی دچار تغییر شکل نمی‌شود و زوال بوجود آمده در نمونه به علت جوانه زنی ترک، رشد ترک و نهایتاً زوال به علت رشد زیاد ترک می‌باشد. جوانه زنی ترک از قسمت‌های زیرین سطح پوسته در نواحی نزدیک به گشودگی آغاز می‌شود. مثلاً برای نمونه‌ای که دارای زاویه پیچش $6/8$ درجه می‌باشد در سیکل ۷۱ بارگذاری جوانه‌زنی ترک در قسمت زیرین سطح نمونه و در ناحیه ای مجاور با نزدیک‌ترین مکان به گشودگی آغاز می‌شود و رشد ترک در سیکل ۱۱۰ بارگذاری شروع می‌شود و نمونه در انتها در اثر این ترک‌ها که از هر چهار گوشه گشودگی با زاویه‌ای بیش از 40 درجه ایجاد و شروع به رشد کرده‌اند از هر دو ناحیه چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد شروع به پارگی می‌کنند.

رفتار پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر در مجاورت گشودگی با شعاع ۵ میلی‌متر در وسط پوسته و همچنین پوسته با گشودگی ولی بدون ترک خوردگی و نیز پوسته‌های دارای گشودگی در حالت، جوانه‌زنی ترک، شروع رشد ترک و زوال پوسته در شکل ۲-۲۹ مشاهده می‌گردد.

در تحقیقات قبلی که بر روی نمونه‌های پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی تحت بارگذاری‌های مختلف انجام شده است، رفتار ترک در نزدیکی گشودگی مورد تحلیل و بررسی قرار نگرفته است، حاتم‌ی [۴۲] در پایان نامه خود فقط به بررسی تغییر شکل بوجود آمده در ناحیه گشودگی پرداخته و به چگونگی رشد آن اشاره نکرده است.

در مواد نرم عمر نمونه‌های توپر در بارگذاری پیچش سیکلی به علت ایجاد ترک روی سطح و رشد آرام آن به سمت درون نمونه سبب عمر بیشتر نمونه‌های توپر می‌شود. در این حالت تنش‌های کمتری به سمت مرکز نمونه به علت گرادیان تنش وجود دارد [۴۳]. حال آنکه در نمونه‌های جدارنازک مشابه آنچه که مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت جوانه زنی و رشد ترک از لایه‌های زیرین سطح پوسته استوانه‌ای به سمت سطح بیرونی پوسته می‌باشد که سبب زوال سریعتر نمونه‌های مورد آزمایش می‌شود.



شکل ۲- ۲۹: مراحل مختلف گسیختگی پوسته استوانه ای (a) پوسته با گشودگی، نصب شده بر روی فیکسچر (b) جوانه زنی ترک و رشد ترک از ناحیه ساعتگرد (c) جوانه زنی و رشد ترک دوم (d) ترک در چهار طرف گشودگی (e) نمونه پوسته استوانه‌ای با گشودگی بعد از انجام آزمایش

وقتی نمونه‌ها تحت یک تنش متوسط فشاری قرار می‌گیرند به علت وجود نیروهای اصطکاکی در سطح نمونه‌ها، دهانه ترک بوجود آمده بر روی سطح نمونه به سمت بسته شدن میل می‌کند و در نتیجه تنش متوسط فشاری افزایش می‌یابد و وقتی که بار کششی باعث باز شدن دهانه ترک می‌شود، تنش فشاری کاهش می‌یابد [۴۴]. ولی در نمونه‌هایی که تحت پیچش سیکلی خالص قرار می‌گیرند، به علت ایجاد ترک از چهار سمت گشودگی، هنگامی که نمونه در حالت پیچش ساعتگرد باشد ترک‌ها در قسمت پادساعتگرد بسته می‌شوند و در قسمت ساعتگرد به رشد خود ادامه می‌دهند و بالعکس. این نحوه اعمال نیرو سبب می‌شود که ترک همیشه در حال رشد باشد و بر خلاف نمونه‌هایی که در حالت فشاری قرار دارند و رشد ترک در این حالت اتفاق نمی‌افتد، در حالت بارگذاری پیچشی، وجود ترک سبب کاهش مشهودی در عمر پوسته‌های استوانه‌ای می‌شود.

در نمونه‌های توپر ترک بر روی یکی از صفحه‌هایی که تنش برشی حداکثر است، شروع می‌شود. این ترک می‌تواند به طول چند میکرون از مکان انشعاب آن رشد کند. ترک عموماً بر روی صفحه‌ای که تنش نرمال حداکثر است رشد می‌کند، یعنی صفحه‌ای با زاویه ۴۵ درجه [۴۵]. در نمونه‌های مورد تحقیق نیز با توجه به شکل ۲-۲۹ می‌توان مشاهده کرد که ترک‌ها دارای زاویه‌ای بیش از ۴۰ درجه نسبت به قطر افقی گشودگی هستند.

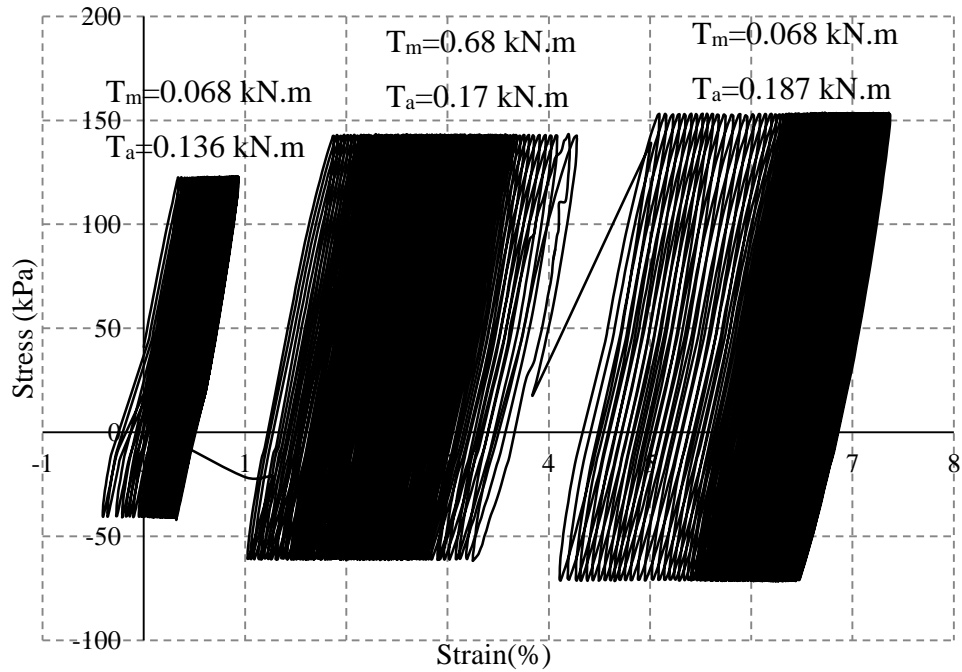
همان‌طور که در شکل ۲-۲۸ مشاهده می‌گردد، از زمان شروع جوانه‌زنی ترک تا رشد ترک و زوال کامل نمونه زمان کوتاهی می‌گذرد، بر اساس یافته‌های پاریس^۱ و همکارانش زمان سپری شده برای ظاهر شدن ترک مهم‌تر از زمان انتشار آن است، و بیشتر از ۹۰ درصد از کل طول عمر خستگی بوسیله مرحله شروع ترک تعیین می‌شود. در نمونه‌های پوسته‌های جدارنازک نیز که در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت، تقریباً این عدد به واقعیت نزدیک بود. در این نمونه‌ها رشد ترک از قسمت ساعتگرد شروع می‌شد.

^۱ Paris

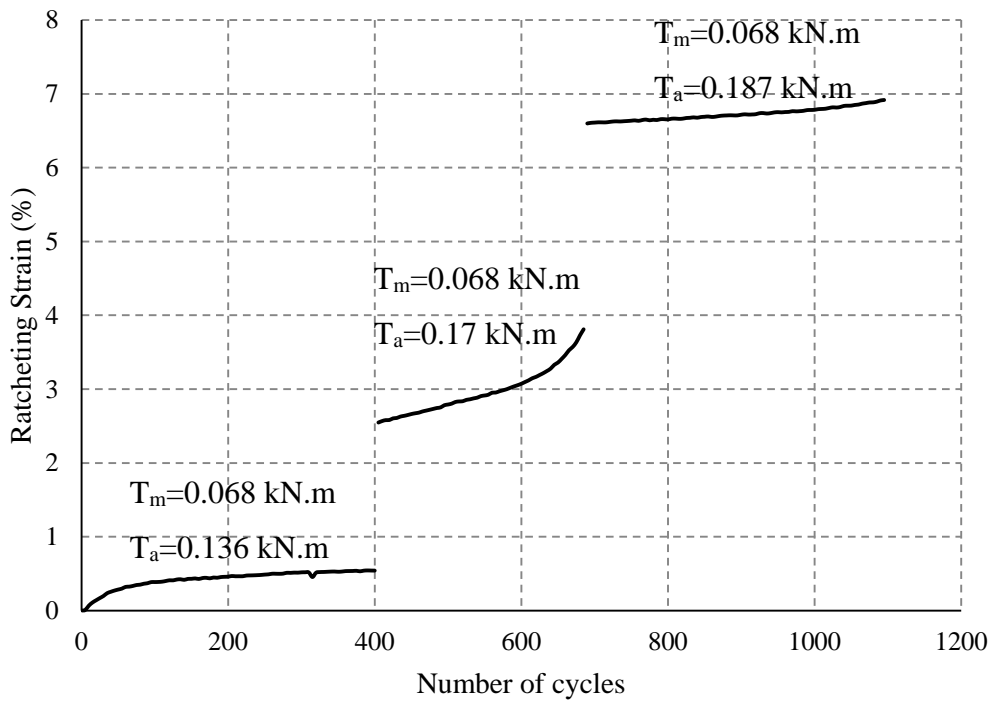
رشد ترک در پوسته‌های نازک از سطوح زیرین به سطوح بالایی می‌باشد که متفاوت با رشد ترک در نمونه‌های توپر می‌باشد. در نمونه‌های توپر رشد ترک از سطوح بالایی به سمت سطوح داخلی می‌باشد.

۲-۱۰-۲- تأثیر گشودگی بر رفتار رچتینگ، تحت بارگذاری گشتاور-کنترل

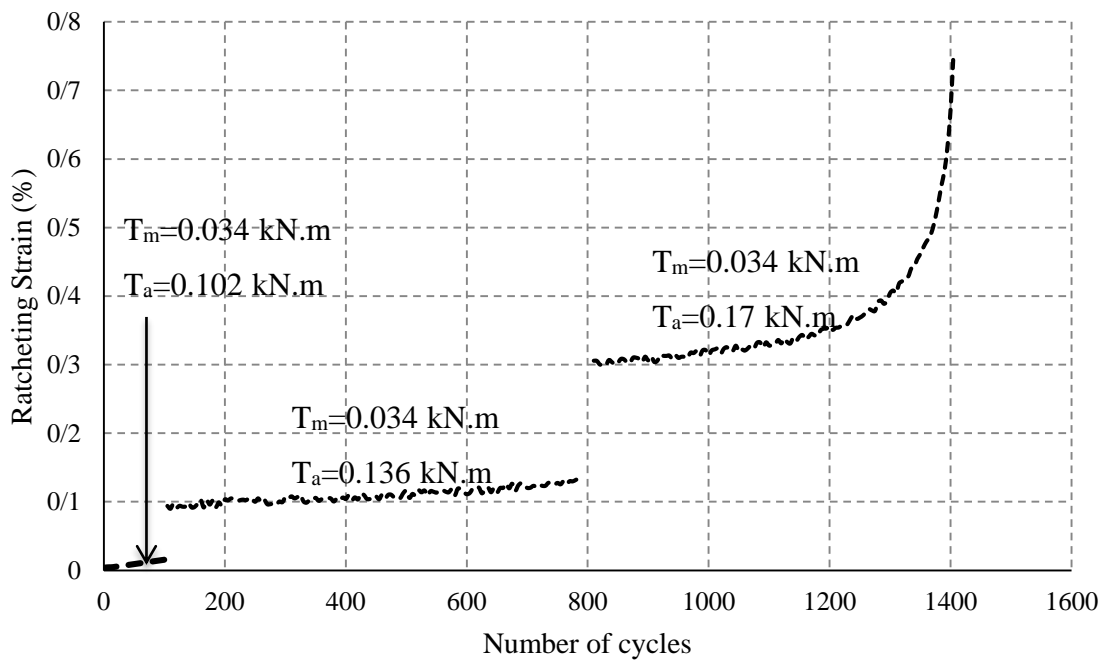
جهت بررسی اثر وجود گشودگی و گشتاور میانگین، بارگذاری‌های گشتاور پیچشی-کنترل با گشتاور متوسط $0/034$ کیلونیوتن متر و دامنه گشتاور $0/102$ ، $0/136$ و $0/170$ کیلونیوتن متر روی پوسته‌های استوانه‌ای اعمال شد. تأثیر وجود گشودگی، شعاع گشودگی و مکان گشودگی در این نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲-۳۰ رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲-۳۱ کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری رسم شده است. از شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه نیرو، سرعت انباشت کرنش پلاستیک بیشتر شده و سبب می‌شود تا پوسته استوانه‌ای در سیکل‌های پایین‌تری دچار زوال شود. در شکل ۲-۳۲ کرنش رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی را در مقابل تعداد سیکل بارگذاری نشان می‌دهد. به دلیل زوال بسیار سریع پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی با دامنه و گشتاور متوسط به کار رفته برای پوسته بدون گشودگی و همچنین توقف انباشت کرنش رچتینگ و عدم خزش سیکلی در بارگذاری‌های در نظر گرفته شده برای نمونه‌های با گشودگی در نمونه‌های بدون گشودگی، امکان مقایسه این دو حالت در یک شکل میسر نمی‌باشد. از مقایسه منحنی‌های کرنش رچتینگ می‌توان مشاهده کرد، نمونه‌ای که دارای گشودگی به شعاع ۵ میلیمتر در وسط آن می‌باشد، با دامنه و گشتاور متوسط پایین‌تری نسبت به نمونه بدون گشودگی دچار زوال می‌شود. قبل از زوال و مشاهده تغییر شکل‌های پلاستیک زیاد به علت لغزش لایه‌های ساختاری ماده، دما در نقاط میانی پوسته استوانه‌ای به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، مقدار این حرارت به اندازه‌ای است که در صورت لمس شدن موجب سوختگی پوست خواهد شد.



شکل ۳۰-۲: رفتار رجتینگ پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی با گشتاور میانگین 0.068 کیلونیوتن متر و به ترتیب دامنه گشتاور 0.136 ، 0.17 و 0.187 کیلونیوتن متر



شکل ۳۱-۲: کرنش رجتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری روی پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی

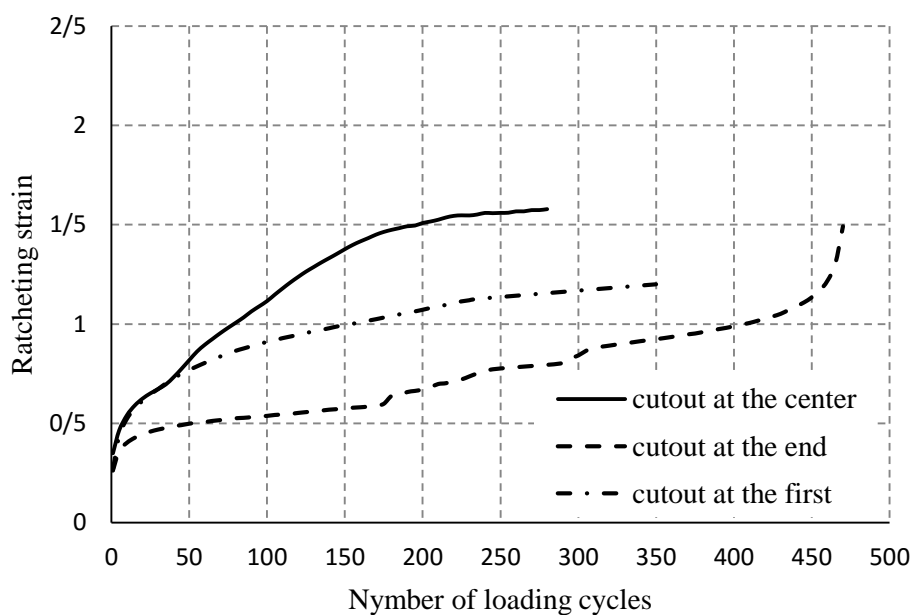


شکل ۲-۳۲: رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای با تأثیر گشودگی بر نمونه‌ها

شکل ۲-۳۲ نشان می‌دهد که وجود گشودگی باعث می‌شود تا نمونه‌ها به کرنش رچتینگ بالایی جهت زوال نیاز نداشته باشند و در کرنش‌های رچتینگ پایین نیز به علت جوانه زنی و انتشار ترک در اطراف گشودگی‌ها نمونه‌ها سریعتر از حالت‌های بدون گشودگی به زوال برسند.

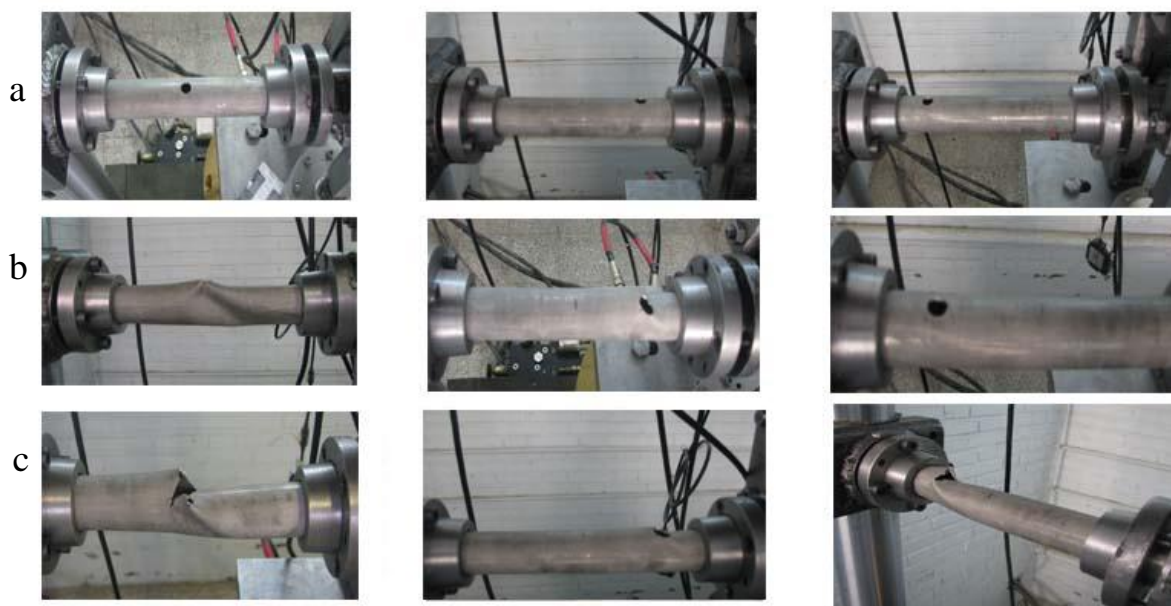
۲-۱۰-۳- تأثیر مکان گشودگی بر رفتار رچتینگ، تحت بارگذاری گشتاور-کنترل

از مقایسه منحنی کرنش رچتینگ (شکل ۲-۳۳) می‌توان مشاهده کرد، نمونه‌ای که دارای گشودگی در وسط نمونه می‌باشد، دارای کرنش رچتینگ بیشتری می‌باشد و در سیکل‌هایی پایین‌تر (۲۸۰ سیکل) دچار زوال می‌شود. نمونه‌هایی که دارای گشودگی در ابتدا (نزدیک به چرخنده) و انتها (نزدیک به بست) می‌باشند، دارای کرنش رچتینگ کمتری می‌باشند؛ و نرخ کرنش رچتینگ آنها نیز نسبت به نمونه دارای گشودگی در مرکز، کمتر می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌ای که دارای گشودگی در انتها می‌باشد در سیکل بالاتر بارگذاری (۴۷۰ سیکل) از نمونه دیگر که دارای گشودگی در ابتدا می‌باشد دچار زوال می‌شود.



شکل ۲-۳۳: مقایسه کرنش رچتینگ برای سه پوسته استوانه‌ای با گشودگی در مرکز، ابتدا و انتهای آن

شکل ۲-۳۴ نمونه‌های آزمایشگاهی هر یک از سه پوسته استوانه‌ای که دارای گشودگی‌هایی با شکل هندسی مشابه و قطر مساوی هستند؛ ولی مکان گشودگی در آنها متفاوت است را قبل از اعمال بار، در حین اعمال بار و پس از اعمال بار نشان می‌دهد.

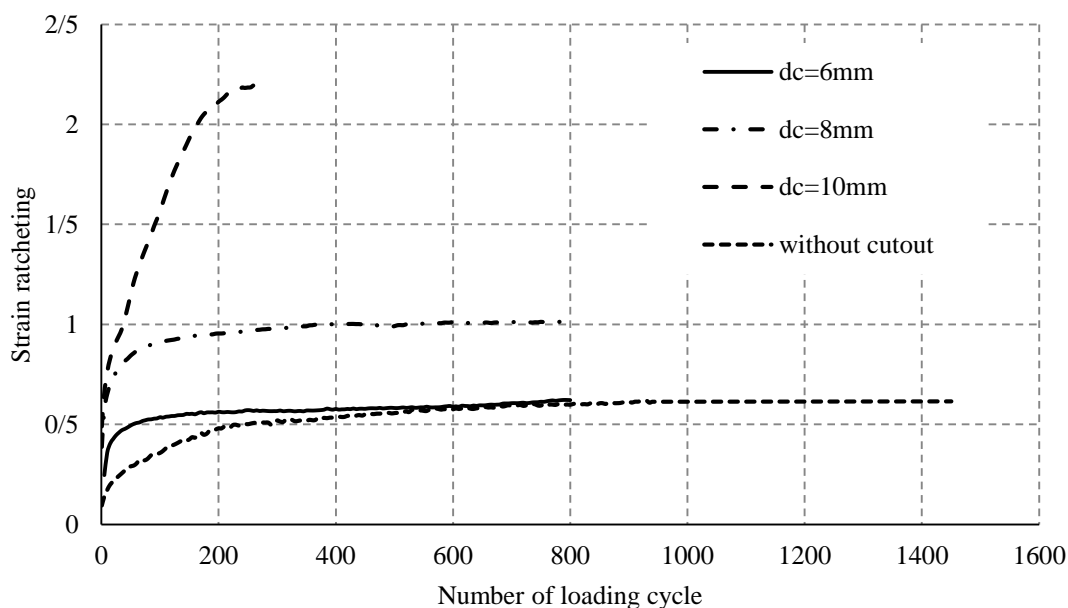


شکل ۲-۳۴: نمونه‌های آزمایشگاهی (a): قبل از بارگذاری (b): در زمان بارگذاری (c): پس از بارگذاری

۲-۱۰-۴- تأثیر قطر گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای، تحت

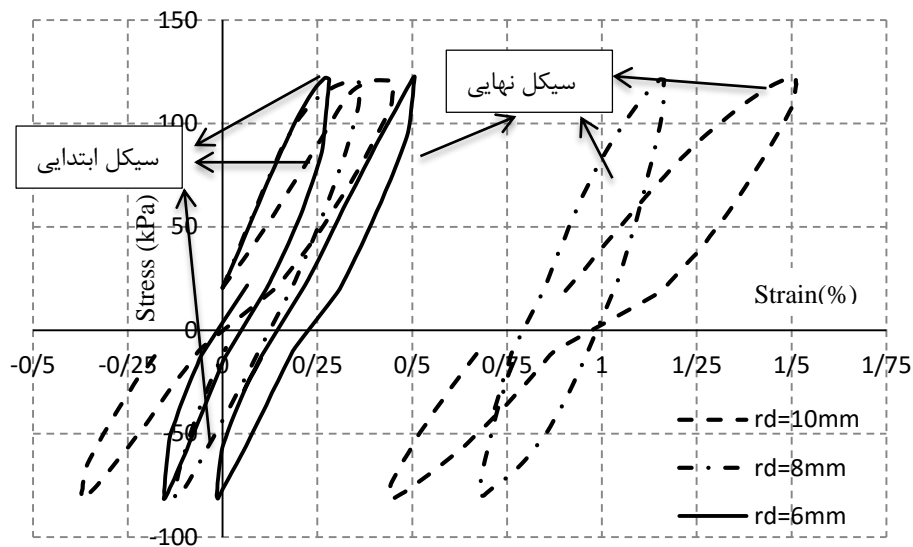
بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل

در این قسمت به بررسی اثر قطر گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای پرداخته می‌شود. با افزایش قطر گشودگی، نرخ کرنش رچتینگ و رفتار نرم‌شوندگی در پوسته استوانه‌ای افزایش پیدا می‌کند. همان گونه که در شکل ۲-۳۵ ملاحظه می‌شود هرچه قطر گشودگی کمتر باشد، رفتار پوسته استوانه‌ای به رفتار پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی بیشتر مشابه است و هرچه قطر گشودگی بیشتر باشد، کرنش رچتینگ افزایش پیدا می‌کند و پوسته در تعداد سیکل‌های پایین تری دچار زوال می‌شود. شکل ۲-۳۶ حلقه‌های هیستریزیس ایجاد شده در سیکل اولیه و نهایی برای هر یک از سه پوسته استوانه‌ای با قطر گشودگی ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. هرچه قطر گشودگی بیشتر باشد حلقه‌های ایجاد شده چاق‌تر می‌باشند که بیان‌کننده انرژی کرنشی بیشتری است که نهایتاً منجر به زوال در پوسته استوانه‌ای می‌شود. در گشودگی با قطر کمتر پس از طی ۱۴۳۰ سیکل بارگذاری، حلقه‌های ایجاد شده شباهت بیشتری با حلقه اولیه دارد در حالیکه در گشودگی‌های بزرگتر حلقه‌های ایجاد شده بزرگتر از حلقه‌های اولیه می‌باشند.



شکل ۲-۳۵: مقایسه کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته استوانه‌ای به طول

۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی‌هایی با قطر ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر در میانه پوسته استوانه‌ای

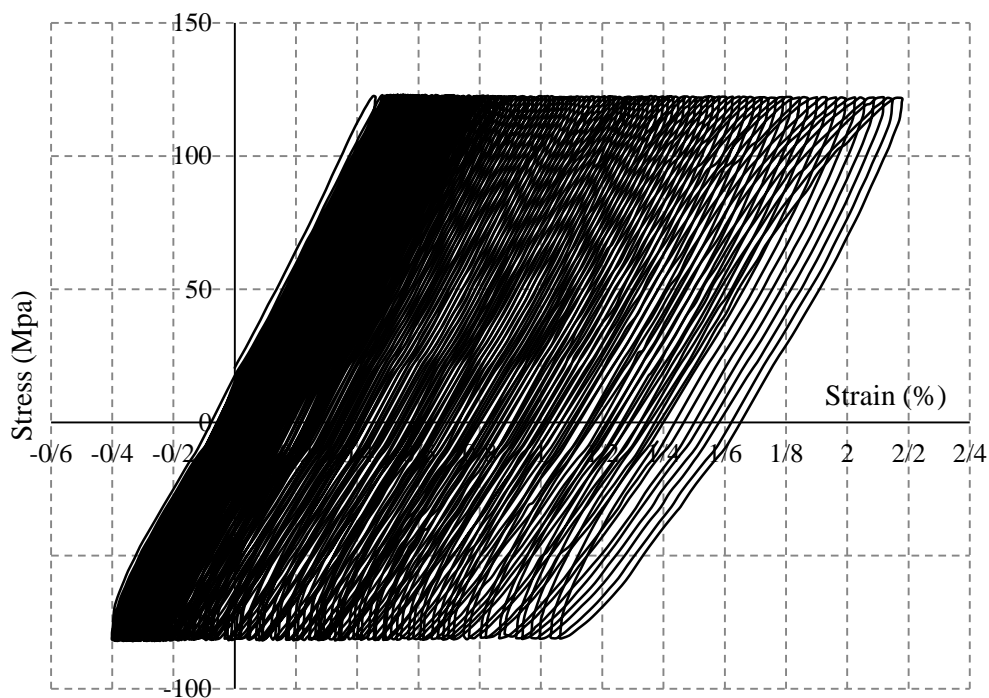


شکل ۲-۳۶: حلقه‌های اولیه و نهایی برای سه پوسته استوانه‌ای با گشودگی‌های به ترتیب ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر در میانه پوسته

هرچه قطر گشودگی در پوسته استوانه‌ای بزرگتر باشد، مدت زمان لازم برای جوانه زنی و رشد ترک در نمونه کمتر می‌باشد. در نمونه‌ای با قطر گشودگی ۱۰ میلی‌متر که تحت بارگذاری گشتاور پیچشی کنترل، با دامنه گشتاور $0/170$ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین $0/034$ کیلونیوتن متر می‌باشد، نمونه در سیکل ۲۱۰ بارگذاری شروع به جوانه زنی ترک کرده و در سیکل ۲۸۵ بارگذاری انتشار ترک آغاز می‌شود؛ در حالیکه در نمونه‌ای با قطر گشودگی ۶ میلی‌متر پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل با دامنه گشتاور $0/204$ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین $0/034$ کیلونیوتن متر می‌باشد، در نمونه در سیکل ۱۷۰۰ بارگذاری جوانه زنی ترک آغاز می‌شود و در سیکل ۱۶۰۰ رشد ترک آغاز می‌شود که پس از طی کمتر از ۷۰ سیکل بارگذاری دیگر، نمونه به پارگی می‌رسد. هرچه گشودگی بزرگتر باشد، رفتار تغییر شکل بر اثر بارگذاری پیچشی در نمونه کمتر مشاهده می‌شود و پوسته به علت رشد ترک و گشودگی دچار زوال می‌شود. در گشودگی‌هایی با قطر کمتر تا قبل از جوانه‌زنی ترک و رشد ترک در نمونه، تغییر شکل‌هایی غیر متقارن در میانه پوسته استوانه‌ای به دلیل بارگذاری پیچشی و گشودگی مشاهده می‌شود.

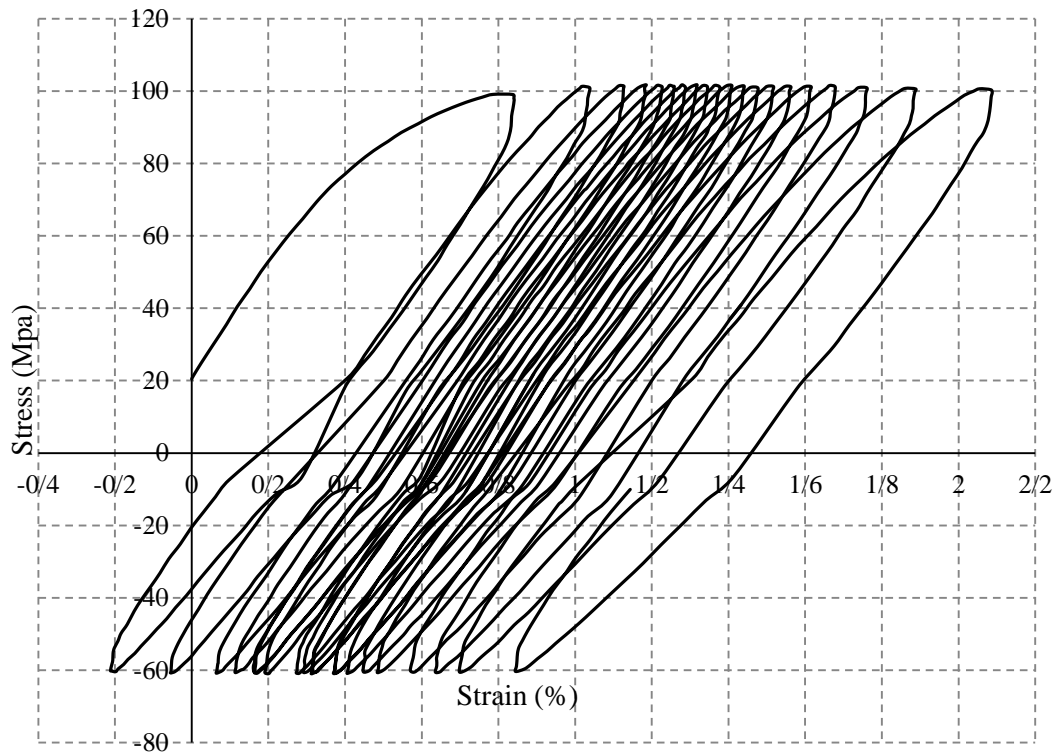
۲-۱۰-۴- تأثیر هندسه گشودگی روی رفتار رچتینگ، تحت بارگذاری گشتاور-کنترل

در این قسمت به بررسی هندسه گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای پرداخته می‌شود. گشودگی‌ها دارای هندسه‌های دایروی، مربع و مثلثی می‌باشند. گشودگی‌ها به گونه‌ای ایجاد شده‌اند که دارای سطح مقطع یکسان باشند؛ از همین رو گشودگی دایره‌ای با شعاع ۵ میلی‌متر، طول ضلع گشودگی مربعی ۸/۸۵ میلی‌متر و گشودگی مثلثی دارای ارتفاع ۱۵/۷ میلی‌متر و طول قاعده ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. شکل ۲-۳۷ و ۲-۳۸ رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی مربعی و مثلثی را به ترتیب نشان می‌دهند.

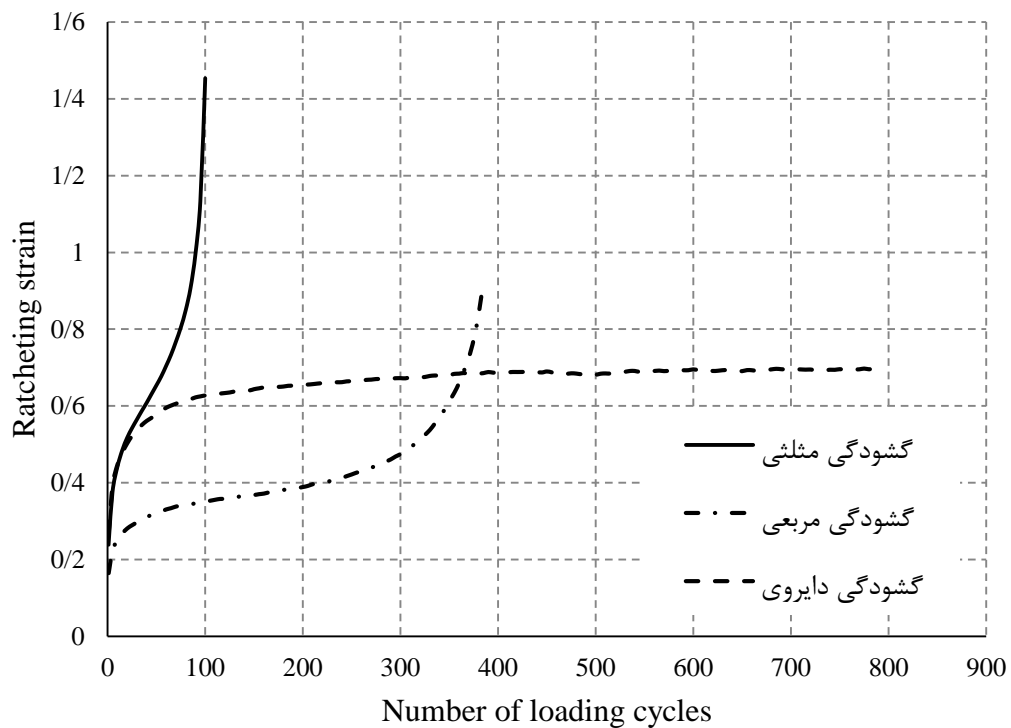


شکل ۲-۳۷: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با گشودگی مربعی به طول ۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی مربعی تحت بارگذاری گشتاور کنترل با گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر و دامنه گشتاور ۰/۱۳۶ کیلونیوتن متر

براساس شکل‌های ۲-۳۷ و ۲-۳۸، شیب منحنی تنش-کرنش در پوسته استوانه‌ای با گشودگی مثلثی کمتر از پوسته استوانه‌ای با گشودگی مربعی است. شکل ۲-۳۹ به بررسی کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری می‌پردازد.

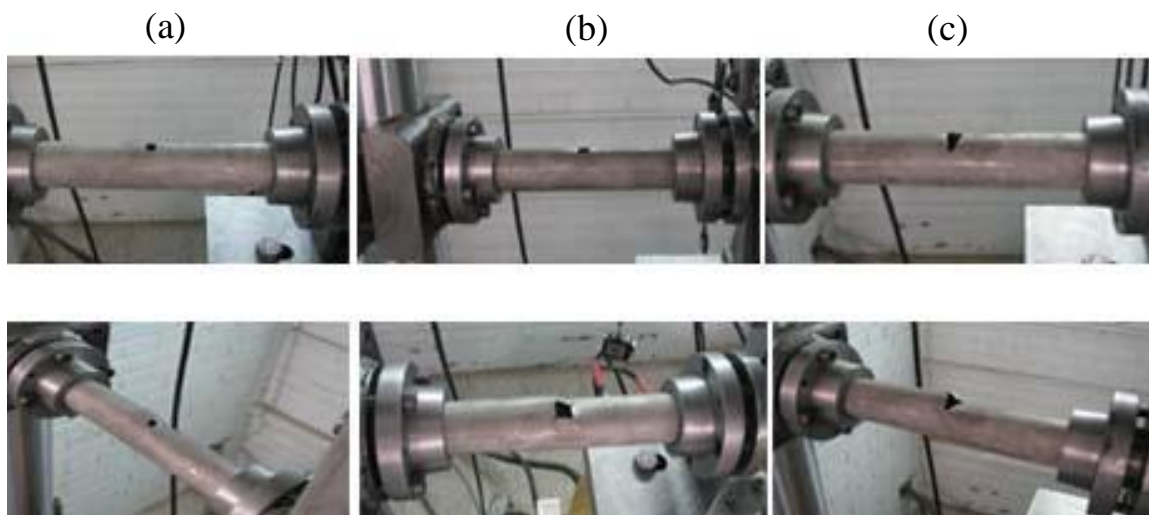


شکل ۲- ۳۸: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با گشودگی مثلثی به طول ۱۷۰ میلیمتر با گشودگی مثلثی تحت بارگذاری گشتاور پیچشی- کنترل با گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر و دامنه گشتاور ۰/۱۳۶ کیلونیوتن متر



شکل ۲- ۳۹: مقایسه کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته استوانه‌ای به طول ۱۷۰ میلیمتر با گشودگی‌هایی با شکل هندسی دایروی، مربعی و مثلثی در میانه پوسته استوانه‌ای

شکل ۲-۳۹ نشان می‌دهد که میزان کرنش رچتینگ در سیکل‌های ابتدایی در گشودگی دایروی بیشتر از دو هندسه دیگر می‌باشد؛ ولی آنچه که سبب افزایش نرخ کرنش رچتینگ در گشودگی‌های مربعی و مثلثی نسبت به هندسه دایروی می‌باشد، وجود گوشه‌های نوک تیز در این نوع هندسه‌ها می‌باشد. به گونه‌ای که در گشودگی مربعی جوانه زنی ترک از سیکل ۱۶۵ بارگذاری آغاز می‌شود و پس از رشد در سیکل ۳۸۹ بارگذاری موجب پاره‌گی می‌شود؛ ولی اثری از تغییر شکل در پوسته مشاهده نمی‌شود. در این گشودگی ترک‌ها با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر ایجاد می‌شود و از تقاطع دو ضلع مربع شروع به رشد می‌کنند و در گشودگی مثلثی نیز رشد ترک از سیکل ۷۴ بارگذاری از نوک مثلث شروع می‌شود و همانگونه که در شکل ۲-۴۰ مشاهده می‌شود تغییر شکل باعث ایجاد زوال در نمونه‌ها نمی‌شود و جوانه‌زنی و رشد ترک از گوشه‌های تیز گشودگی می‌باشد که موجب زوال و پارگی را در پوسته است. در گشودگی دایروی تحت بارگذاری مشابه نیز، باز هم رشد ترک عامل اصلی در فروپاشی می‌باشد؛ اما در این بارگذاری با گشتاور میانگین 0.34 کیلونیوتن متر و دامنه گشتاور 0.136 کیلونیوتن متر قبل از پاره‌گی تغییر شکل‌هایی نیز در قسمت‌های میانی پوسته استوانه‌ای به علت ماهیت بارگذاری پیچشی ایجاد می‌شود.



شکل ۲-۴۰: پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌هایی با اشکال هندسی (a) دایروی، (b) مربعی و (c) مثلثی در میانه نمونه قبل و بعد از اعمال بارگذاری

۱۱-۲- تأثیر بارگذاری پیچشی بر رفتار پوسته‌های مکعبی

در این قسمت به بررسی رفتار پوسته‌های مکعبی در بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل در حالت‌های بدون گشودگی و با گشودگی پرداخته می‌شود. در این تحقیق از پوسته‌های مکعبی با ضخامت $0/9$ میلیمتر، با طول هر ضلع 30 میلیمتر استفاده شده است. طول پوسته‌های مکعبی 210 میلیمتر بوده و جنس پوسته‌ها از پروفیل‌های سبک (پروفیل صنعتی) می‌باشند. پوسته‌ها همانگونه که در شکل ۴۱-۲ مشاهده می‌شود، با فرایند جوشکاری سرد به صفحات مربوطه جوش شده و به فیکسچر متصل شده است. جوشکاری سرد تغییر زیادی در خواص مکانیکی ماده ایجاد نمی‌کند، از این رو برتری زیادی نسبت به جوشکاری معمولی دارد.

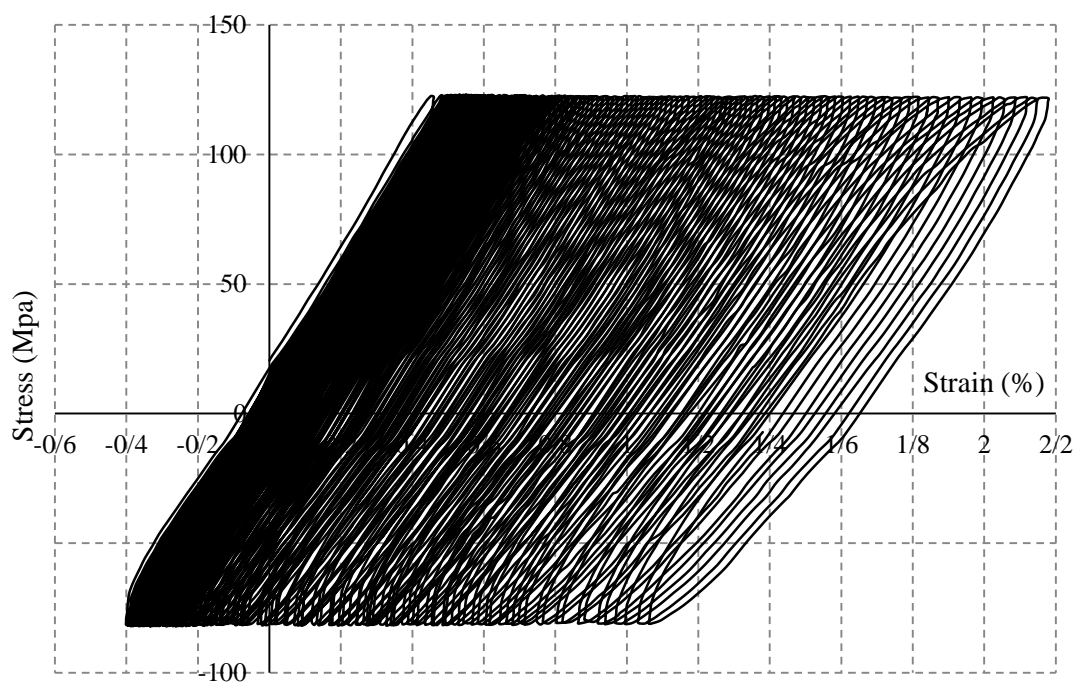


شکل ۲-۴۱: اتصال پوسته مکعبی به صفحات با جوشکاری سرد

۱۱-۲-۱- تأثیر دامنه گشتاور بر رفتار رچتینگ پوسته‌های مکعبی

برای بدست آوردن رفتار رچتینگ پوسته مکعبی تحت بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل، گشتاور پیچشی با دامنه‌های گشتاور $0/136$ ، $0/170$ ، $0/204$ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین $0/34$ کیلونیوتن متر بر نمونه‌ای به طول 210 میلیمتر اعمال می‌گردد. دامنه و میانگین تنش اعمالی به گونه‌ای انتخاب شده است که نمونه مورد آزمایش تعداد سیکل‌های بیشتری را طی کند. منحنی تنش و کرنش بدست آمده تحت این نوع بارگذاری برای حالتی با دامنه گشتاور $0/170$ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین $0/34$ کیلونیوتن متر در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که

پس از هر سیکل، کرنش پلاستیک در پوسته استوانه‌ای انباشته می‌گردد و با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، فاصله حلقه‌ها از یکدیگر بیشتر شده و نهایتاً منجر به زوال نمونه می‌شوند. تغییر شکل‌های بوجود آمده در این نوع پوسته‌ها بر خلاف پوسته‌های استوانه‌ای در میانه پوسته رخ نمی‌دهد. تغییر شکل‌ها همانگونه که در شکل ۲-۴۳ نیز مشاهده می‌شود در انتهای نمونه باعث مقرر شدن اضلاع می‌شود.



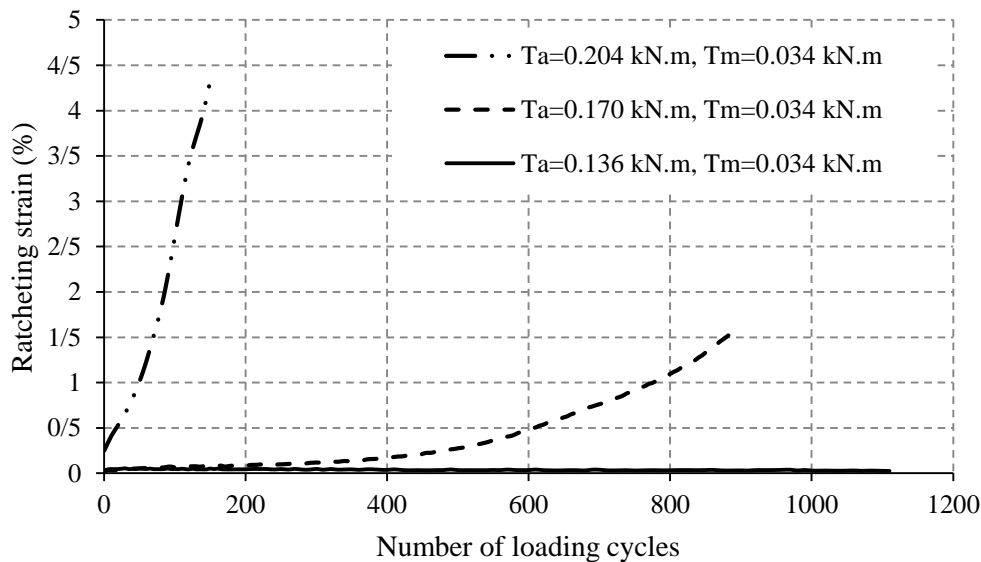
شکل ۲-۴۲: رفتار رچتینگ پوسته مکعبی به طول ۲۱۰ میلی‌متر در بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل، با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر



شکل ۲-۴۳: تغییر شکل در پوسته مکعبی در انتهای بارگذاری گشتاور-کنترل

در پوسته‌های استوانه‌ای در همان سیکل‌های اولیه تغییر شکل کوچکی دیده می‌شد و در سیکل‌های اولیه نیز رفتار نرم‌شوندگی مشاهده می‌شد؛ ولی در پوسته‌های مکعبی سیکل‌های اولیه هیچ رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان نمی‌دهند.

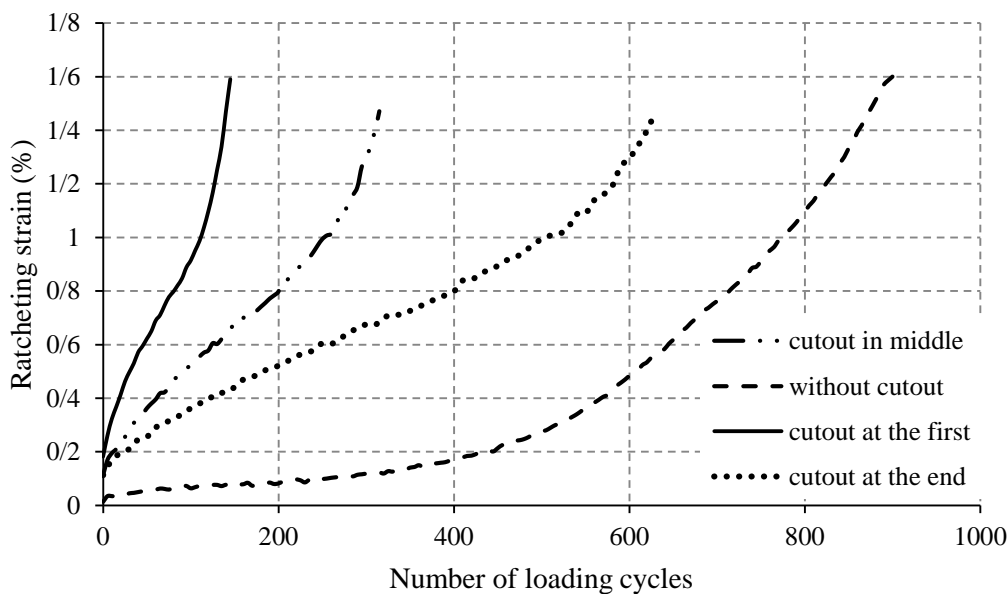
شکل ۲-۴۴ کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری را در پوسته مکعبی با دامنه‌های گشتاور ۰/۱۳۶، ۰/۱۷۰، ۰/۲۰۴ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر، در بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هر چه دامنه گشتاور بیشتر باشد، نرخ افزایش کرنش رچتینگ در نمونه‌ها بیشتر می‌شود. در نمونه با دامنه گشتاور ۰/۱۳۶ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر، نرخ افزایش کرنش رچتینگ به دلیل کم بودن دامنه گشتاور مقداری ثابت و کوچک است. در این بارگذاری حلقه‌های هیستریزیس پس از تعداد ۱۲۵۰ سیکل بارگذاری افزایشی را نشان نمی‌دادند، از این رو بارگذاری متوقف و دامنه بارگذاری تغییر یافت.



شکل ۲-۴۴: نمودار کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته‌های مکعبی با طول ۲۱۰ میلیمتر با دامنه‌های ۰/۱۳۶، ۰/۱۷۰ و ۰/۲۰۴ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر

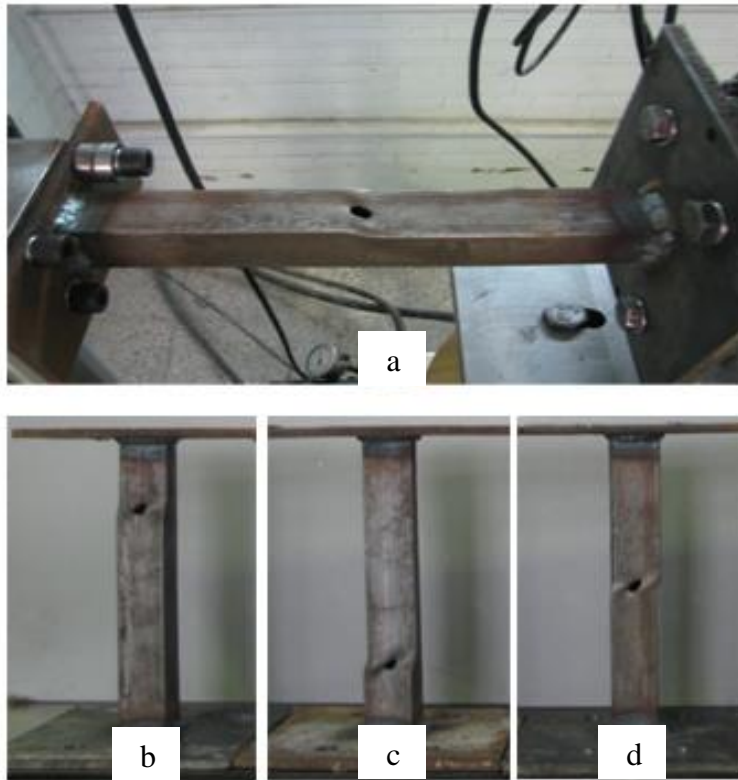
۲-۱۱-۲- تأثیر گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته‌های مکعبی

از مقایسه منحنی کرنش رچتینگ (شکل ۲-۴۵) می‌توان مشاهده کرد، وجود گشودگی باعث تسریع در زوال پوسته می‌شود. نمونه‌ای که دارای گشودگی در ابتدای نمونه (نزدیکتر به چرخنده) می‌باشد، دارای کرنش رچتینگ بیشتری می‌باشد و در سیکل‌هایی پایین‌تر (۱۴۷ سیکل) دچار زوال می‌شود. نمونه‌هایی که دارای گشودگی در مرکز و انتها (نزدیک به بست) هستند، دارای کرنش رچتینگ کمتری می‌باشند؛ و نرخ کرنش رچتینگ آنها نیز نسبت به نمونه دارای گشودگی در ابتدا، کمتر می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌ای که دارای گشودگی در انتها می‌باشد در سیکل‌های بالاتر بارگذاری (۶۳۳ سیکل) از دو نمونه دیگر دچار زوال می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده در مورد پوسته استوانه‌ای با گشودگی مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده برای تأثیر مکان گشودگی بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای و مکعبی متفاوت از یکدیگر می‌باشد. در پوسته مکعبی، نزدیکی گشودگی به محل اعمال بار موجب افزایش نرخ کرنش رچتینگ می‌شود؛ حال آنکه در پوسته استوانه‌ای، نمونه‌ای که دارای گشودگی در مرکز می‌باشد، نرخ کرنش رچتینگ بیشتری نسبت به دو نمونه آزمایش دیگر دارد.



شکل ۲-۴۵: منحنی کرنش رچتینگ در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته مکعبی با طول ۲۱۰ میلی‌متر بدون گشودگی، با گشودگی در میانه، ابتدا و انتهای پوسته در بارگذاری گشتاور-کنترل با دامنه گشتاور ۰/۱۷۰ کیلونیوتن متر و گشتاور میانگین ۰/۰۳۴ کیلونیوتن متر

شکل ۲-۴۶ و ۲-۴۷ به ترتیب پوسته‌های مکعبی و استوانه‌ای با گشودگی را بعد از اعمال بارگذاری گشتاور پیچشی-کنترل را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴۶: تغییر شکل‌های بوجود آمده در پوسته مکعبی (a): در حین بارگذاری، (b): پس از بارگذاری، گشودگی در ابتدا، (c): پس از بارگذاری، گشودگی در انتها و (d): پس از بارگذاری، گشودگی در میانه



شکل ۲-۴۷: پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی پس از بارگذاری

۱۲-۲- نتیجه گیری

در این فصل رفتار تجربی پوسته‌های استوانه‌ای SS316L تحت بارگذاری سیکلی پیچشی مورد بررسی قرار گرفت. بارگذاری تحت شرایط گشتاور-کنترل و زاویه پیچش-کنترل روی نمونه‌ها اعمال گردید و تأثیر پارامترهایی مانند وجود گشودگی، شعاع گشودگی، مکان گشودگی، دامنه گشتاور، گشتاور متوسط، دامنه زاویه پیچش، ترتیب بارگذاری و تاریخچه بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به شرح ذیل حاصل گردید.

۱- در بارگذاری گشتاور-کنترل متقارن محوری، با گشتاور متوسط صفر، رفتار نرم شوندگی در نمونه مشاهده شد. با افزایش تعداد سیکل‌های اعمالی، تحمل گشتاور اعمالی وارد شده، کمتر می‌شود، زاویه پیچش بیشتر می‌شود و باعث ایجاد رفتار نرم‌شوندگی می‌گردد.

۲- در بارگذاری گشتاور-کنترل نامتقارن محوری، رفتار رچتینگ در نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. در تمامی نمونه‌ها با ادامه بارگذاری سیکلی در دامنه نیروی یکسان، نرخ کرنش رچتینگ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دامنه نیرو، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد و نمونه در تعداد سیکل کمتری دچار زوال می‌شود.

۳- تحت بارگذاری زاویه گشتاور-کنترل متقارن محوری، پس از هر سیکل بارگذاری، تحمل بار پوسته استوانه‌ای کاهش می‌یابد. یعنی در پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش کنترلی، رفتار نرم‌شوندگی در پوسته مشاهده می‌شود.

۴- افزایش دامنه زاویه پیچش سبب افزایش سرعت نرم‌شوندگی در پوسته استوانه‌ای می‌گردد. همانطور که ملاحظه شد، رفتار نرم‌شوندگی در قسمت ساعتگرد و پاد ساعتگرد متقارن نیست و آنگونه که مشاهده شد، گشتاور اعمالی در قسمت ساعتگرد کمتر است.

۵- به علت نامتقارن بودن بارگذاری گشتاور-کنترلی، در پوسته استوانه‌ای رفتار رچتینگ ایجاد می‌گردد و با افزایش گشتاور متوسط، سرعت رچتینگ در پوسته افزایش می‌یابد. تاریخچه بارگذاری در این آزمایش سبب ایجاد افزایش ناگهانی شیب کرنش رچتینگ می‌شود.

- ۶- در بارگذاری زاویه پیچش-کنترل که نمونه دارای گشودگی می‌باشد، نمونه تا قبل از زوال از قسمت‌های میانی دچار تغییر شکل نمی‌شود و زوال بوجود آمده در نمونه به علت جوانه‌زنی، ایجاد ترک، رشد ترک و در نهایت زوال به علت افزایش سرعت رشد ترک می‌باشد.
- ۷- ترک‌ها در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی از قسمت‌های زیرین سطح شروع به جوانه‌زنی و رشد می‌کنند و دارای زاویه‌ای بیش از ۴۰ درجه می‌باشند. زمان سپری شده برای ظاهر شدن ترک مهم‌تر از زمان انتشار آن است و پس از ایجاد ترک، سرعت رشد ترک در بازه زمانی کمتری سبب ایجاد زوال در پوسته استوانه‌ای می‌شود.
- ۸- ایجاد گشودگی باعث می‌شود تا نمونه‌های دارای گشودگی به کرنش رچتینگ بالایی جهت گسیختگی نیاز نداشته باشند و در کرنش‌های رچتینگ پایین نیز به دلیل وجود گشودگی، زوال در نمونه‌ها به خاطر انتشار و رشد ترک در اطراف گشودگی می‌باشد.
- ۹- هرچه قطر گشودگی بزرگتر باشد، رفتار نرم‌شوندگی بیشتری از خود نشان می‌دهند و نرخ کرنش رچتینگ آنها بیشتر می‌باشد. همچنین ملاحظه شد که وجود گشودگی در میانه پوسته‌های استوانه‌ای باعث می‌شود که نمونه‌ها در تعداد سیکل پایین تری نسبت به نمونه‌هایی با گشودگی در ابتدا و یا انتهای آنها دچار زوال شوند.
- ۱۰- در پوسته‌های استوانه‌ای، نمونه‌ای که دارای گشودگی در میانه پوسته می‌باشد، دارای نرخ کرنش رچتینگ بالاتری است؛ در حالیکه در پوسته‌های مکعبی، گشودگی که به محل اعمال بار نزدیک‌تر می‌باشد، دارای نرخ کرنش رچتینگ بیشتری است و زودتر به زوال می‌رسد.
- ۱۱- میزان کرنش رچتینگ در سیکل‌های ابتدایی در گشودگی دایروی بیشتر از هندسه‌های مثلثی و مربعی می‌باشد؛ ولی وجود گوشه‌های نوک تیز در این نوع هندسه‌ها باعث افزایش نرخ کرنش رچتینگ در سیکل‌های بعدی می‌باشد. گشودگی با هندسه مثلثی در تعداد سیکل بارگذاری کمتری به زوال می‌رسد. تغییر شکل باعث ایجاد زوال در نمونه‌ها نمی‌شود و جوانه-

زنی و رشد ترک از گوشه‌های تیز گشودگی می‌باشد که شرایط زوال و پاره‌گی را در پوسته فراهم می‌کنند.

۱۲- در پوسته‌های استوانه‌ای در همان سیکل‌های اولیه تغییر شکل کوچکی دیده می‌شد و در سیکل‌های اولیه نیز رفتار نرم‌شوندگی مشاهده می‌شد؛ ولی در پوسته‌های مکعبی سیکل‌های اولیه هیچ رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان نمی‌دهند.

فصل سوم

تحلیل عددی و مقایسه با نتایج تجربی

۳-۱- آشنایی با ABAQUS

CAE یا Computer Aided Engineering به معنای مهندسی به کمک کامپیوتر است که عبارتی کلی برای تمامی روش‌هایی است که در ۴۰ سال گذشته معرفی شده‌اند می‌باشد تا با استفاده از قابلیت‌های کامپیوترها بتوان مقادیر و پارامترهای مهندسی در تحلیل و طراحی انواع سازه‌ها و محیط‌ها را محاسبه کرد.

متداولترین روش CAE در جامدات (Finite Element Method) FEM و در سیالات CFD (Computational Fluid Dynamics) است. پس CAE عنوانی کلی است که FEM و CFD زیرمجموعه‌های اصلی آن هستند. از دیگر زیرمجموعه‌های آن می‌توان به روش‌های Mesh less در جامدات و Voxel در سیالات اشاره کرد.

از سال ۱۹۶۰ که روش‌های اجزای محدود بوجود آمد، نرم افزارهای متفاوتی متولد شدند که از روش CAE استفاده می‌کردند. از آنجا که نرم افزارهای تحلیلی و دیگر نرم افزارها بازاری کاملاً رقابتی دارند؛ تقریباً کلیه نرم افزارهای تولید شده نرم افزارهایی قوی هستند. در این میان ABAQUS بسیاری از نقاط ضعف و اشکالات نرم افزارهای اجزای محدود دیگر را ندارد و سهولت در استفاده، مدلسازی قوی، تحلیل دقیق و سرعت بالا، آن را به یک نرم افزار اجزای محدود متفاوت تبدیل کرده است.

امروزه آباکوس در اغلب رشته‌های مهندسی و در سراسر جهان به کار می‌رود. مخاطبین اصلی این نرم افزار مهندسين مکانیک، عمران، برق، مواد، شیمی، صنایع و... می‌باشند. از آباکوس می‌توان در تحلیل‌های استاتیکی، تحلیل‌های دینامیکی، شبه استاتیکی، شبیه سازی سازه‌ها و غیره استفاده کرد.

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

۱- مرحله پیش پردازش

۲- مرحله پردازش

۳- مرحله پس پردازش

۳-۱-۱- پیش پردازش (ABAQUS/CAE)

در این مرحله باید مدل مسأله ساخته شده و یک فایل ورودی ABAQUS ایجاد گردد. مدل را معمولاً می توان به صورت گرافیکی با استفاده از ABAQUS/CAE و یا سایر پیش پردازنده ها ایجاد کرد و یا بتوان فایل ورودی ABAQUS را با استفاده از یک ویرایشگر متن مثل Notepad ساخت.

۳-۱-۲- پردازش (استاندارد و یا صریح ABAQUS)

پردازش که معمولاً به صورت یک پروسه در پس زمینه اجرا می شود، مرحله ای است که در آن ABAQUS استاندارد و یا صریح مسأله عددی را که در مدل تعریف شده حل می کند. مثال هایی از خروجی تحلیل تنش عبارت است از تغییر مکان ها و تنش هایی که در فایل های باینری ذخیره می - شود و برای مرحله پس از پردازش مورد استفاده قرار می گیرد. بسته به پیچیدگی مسأله ای که باید تحلیل شود و سرعت پردازش کامپیوتری که تحلیل را انجام می دهد، زمان تحلیل می تواند بین چند ثانیه تا چند روز طول بکشد.

۳-۱-۳- مرحله پس پردازش (ABAQUS/CAE)

ارزیابی نتایج را می توان بعد از اتمام مرحله پردازش یعنی وقتی که تنش ها، تغییر مکان ها و سایر متغیرهای اساسی محاسبه شده اند انجام داد. ارزیابی معمولاً با استفاده از مدول بصری یا سایر پس پردازنده ها انجام می شود. مدول بصری داده های فایل خروجی باینری را می خواند و گزینه های متفاوتی مانند کانتورهای رنگی، انیمیشن، فرم تغییر شکل یافته و یا نمایش داده ها به صورت نمودار برای نمایش نتایج دارد.

۲-۳- تحلیل مسایل سیکلی توسط نرم افزار ABAQUS

نرم افزار آباکوس در حل و تحلیل مسایل پوسته‌ای کارآیی فراوانی دارد و یکی از استفاده‌های آن در تحلیل مسایل تحت بارگذاری سیکلی می‌باشد. برای تحلیل اینگونه مسائل باید از مدل سخت شوندگی سینماتیکی استفاده کرد. مدل سخت شوندگی سینماتیکی به منظور مدل سازی رفتار فلزاتی است که در معرض بارگذاری سیکلی قرار داشته و در آن تسلیم فلزات مستقل از تنش‌های فشاری معادل است. مدل سخت شوندگی سینماتیکی خطی یک مدول سخت شوندگی ثابت دارد و مدل سخت شوندگی سینماتیک غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک دو مولفه سخت شوندگی سینماتیک غیرخطی و ایزوتروپیک غیر خطی دارد. هر دو این مدل‌ها از کامل‌ترین مدل‌ها برای تحلیل مسایل تحت بارگذاری سیکلی می‌باشند [۴۶ و ۴۷].

۳-۲-۱- مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی

این مدل شامل مولفه‌های سخت شوندگی خطی سینماتیکی است که حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار α را توصیف می‌کند، اما تغییر شکل نمی‌دهد. وقتی که از این مدل وابستگی به درجه حرارت حذف شود، این مدل سخت شوندگی زیگنر نامیده می‌شود.

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}^{pl} \quad (۱-۳)$$

که در آن C ثابت ماده، پارامتر σ^0 تنش تسلیم جاری و $\dot{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. در این مدل اندازه سطح تسلیم ثابت باقی می‌ماند. برای استفاده از این مدل در آباکوس لازم است تا مسیر زیر در منو درختی نرم افزار دنبال شود.

Material

Plastic, hardening=Kinematic

و مقادیر σ^0 و $\dot{\epsilon}^{pl}$ در قسمت تنش و کرنش پلاستیک معادل وارد شود.

۳-۲-۲- مدل سخت شوندهی غیر خطی ایزوتروپیک / سینماتیک

این مدل همان طور که قبلاً گفته شد، شامل دو مولفه است. مولفه سخت شوندهی غیرخطی سینماتیک که بیان کننده حرکت سطح تسلیم در فضای تنش با مقدار α است و مولفه سخت شوندهی غیر خطی ایزوتروپیک که بیان کننده تغییرات اندازه سطح تسلیم متناسب با تغییر شکل پلاستیک است.

اگر یک جمله غیر خطی برای نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به رابطه خطی سینماتیک (معادله ۳-۱) اضافه شود، مدل سخت شوندهی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک ایجاد می‌شود.

$$\dot{\alpha} = C_k \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma_k \alpha_k \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (۳-۲)$$

در جمله غیر خطی اضافه شده، γ_k ثابت ماده است که از اطلاعات سیکلی تعیین می‌شود [۴۸]. البته با استفاده از این مدل امکان آنالیز مسایل پلاستیسیته که در آنها تسلیم وابسته به نرخ کرنش است از کاربر گرفته می‌شود؛ اما برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری سیکلی، به ناچار از این مدل استفاده شده است. به منظور معرفی این مدل به نرم‌افزار لازم است بخش ایزوتروپیک^۱ (رشد سطح تسلیم در فضای تنش) و بخش سینماتیک (حرکت سطح تسلیم در فضای تنش) به صورت جداگانه برای نرم‌افزار تعریف شود و اطلاعات آن وارد شود.

برای تعیین رشد سطح تسلیم از روش معرفی اندازه σ^0 به عنوان تابعی نمایی به صورت رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_w (1 - e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad (۳-۳)$$

در رابطه بالا $\hat{\sigma}_0$ تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر می‌باشد و پارامترهای Q_w و b ثابت‌های ماده می‌باشند. Q_w بیشترین تغییر در اندازه سطح تسلیم بوده و b نسبت اندازه تغییرات سطح تسلیم به افزایش کرنش پلاستیک می‌باشد [۴۹].

^۱ Isotropic

برای دست آوردن پارامترهای سخت‌شوندگی ایزوتروپیک با استفاده از قانون تابع نمایی که در بالا ذکر شد از تست استاندارد کشش ساده استفاده می‌شود و پارامترهای ماده یعنی C و γ برای مدل سخت‌شومندگی سینماتیک باید با استفاده از انجام آزمایش‌های دیگری که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد بدست می‌آید. به طور کلی از سه روش مختلف برای بدست آوردن اطلاعات تجربی به منظور بدست آوردن این پارامترها استفاده می‌شود. این سه روش عبارتند از:

۱- اطلاعات بدست آمده از نیم سیکل

۲- اطلاعات بدست آمده از یک سیکل ثابت

۳- اطلاعات بدست آمده از چندین سیکل ثابت

۳-۲-۳- اطلاعات بدست آمده از نیم سیکل

برای تعیین حرکت سطح تسلیم در فضای تنش از آزمون کشش ساده استفاده شده است. اگر نیم سیکل نخست از آزمون کشش در اختیار باشد، نرم افزار با استفاده از اطلاعات بدست آمده از این نیم سیکل، می‌تواند پارامترهای C و γ را محاسبه کند. البته بکارگیری این روش تنها برای حالتی که تعداد سیکل‌های بارگذاری کم باشد، بیشتر مورد توجه است. اگر بر روی نمودار تنش بر حسب کرنش پلاستیک بدست آمده از تست کشش ساده نقاط مختلفی در نظر گرفته شود در این صورت مقدار α_i با استفاده از معادله ۳-۴ استخراج می‌شود.

$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma_i^0 \quad (4-3)$$

با انتگرال‌گیری از معادله ۳-۲ که معادله بدست آمده برای مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک می‌باشد، برای α بر روی یک نیم سیکل، نتیجه زیر حاصل می‌شود.

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \varepsilon^{pl}}) \quad (5-3)$$

با استفاده از دو معادله اخیر و مقادیر تنش و کرنش پلاستیک که به نرم افزار وارد می شود، نرم-افزار توانایی محاسبه ضرایب C و γ را خواهد داشت و به کمک دستورهای زیر داده ها را وارد نرم افزار کرده تا رشد سطح تسلیم و حرکت سطح تسلیم در فضای تنش نیز همزمان شبیه سازی شود.

Cyclic Hardening , Parameters

$\hat{\sigma}_0, Q_w, b$

Plastic, Hardening=Combine, Data type=Half cycle

σ_i, σ_i^{pl}

به طور کلی می توان بیان نمود که مدل سخت شونده گی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک (که با دستور Combine وارد می شود) رفتار نرم شونده گی و رچتینگ پوسته های استوانه ای را به خوبی شبیه سازی می کند. زیرا در این مدل اندازه سطح تسلیم در فضای تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر کرده و مرکز آن نیز انتقال می یابد. دو مدل سخت شونده گی ایزوتروپیک و سخت شونده گی سینماتیک خطی قادر به شبیه سازی رفتار نرم شونده گی و رچتینگ این گونه پوسته ها نیستند. زیرا در مدل سخت شونده گی ایزوتروپیک تنها اندازه سطح تسلیم در فضای تنش تغییر می کند و در مدل سخت شونده گی سینماتیک خطی تنها مرکز سطح تسلیم انتقال می یابد. لذا این دو مدل تنها حلقه-های بسته ای را شبیه سازی می کنند.

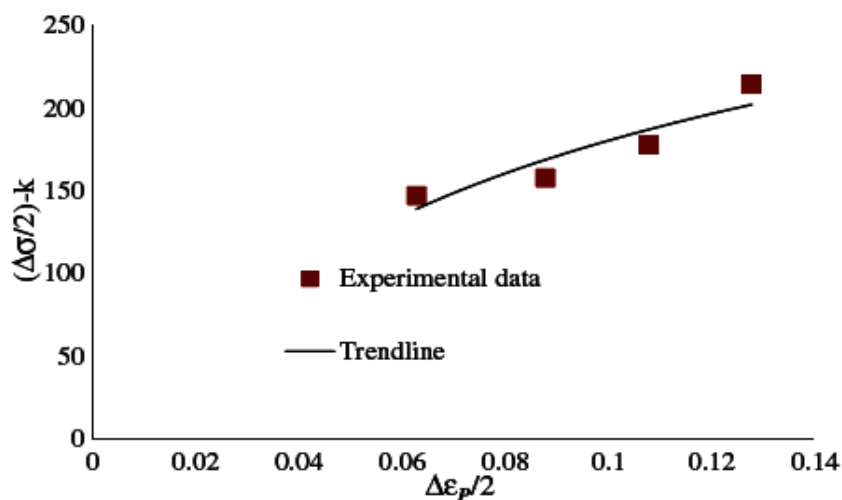
۳-۲-۴- اطلاعات بدست آمده از چندین سیکل ثابت

زین الدینی و پیکانو [۵۰] برای بدست آوردن پارمترهای مواد با استفاده از اطلاعات بدست آمده از چندین سیکل ثابت بیان کردند که کرنش پلاستیک مجموع قدر مطلق تغییرات طولی کرنش پلاستیک در نمونه های تست استاندارد می باشد.

$$\varepsilon_p = \sum |\Delta \varepsilon_p| = \sum |\Delta \varepsilon_i - \Delta \sigma_{exp} E| \quad (۳-۶)$$

که در آن کرنش پلاستیک، ε_i کرنش کلی، σ_{exp} مقادیر تنش اندازه‌گیری شده و E مدول الاستیسیته می‌باشد. پارامتر سختی کششی معادل^۱ که بیان‌کننده مرکز صفحه تنش تسلیم در فضای تنش است و با X نشان داده می‌شود مساوی با نصف تفاضل بین آخرین بارگذاری کششی و اولین تنش فشاری بعد از آن می‌باشد. زوج‌های مرتب بدست آمده در شکل زیر رسم شده است. پارامترهای سختی ماده C و γ با مرتبط کردن معادله ۷-۳ به اطلاعات شکل ۱-۳ تخمین زده می‌شود.

$$X = v \frac{C}{\gamma} + (X_0 - v \frac{C}{\gamma}) \exp[-v\gamma(\varepsilon_p - \varepsilon_{p0})] \quad (7-3)$$



شکل ۱-۳: محاسبه پارامترهای سختی ماده با استفاده از معادله ۷-۴ و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های کرنش-کنترل بر روی نمونه‌های تست استاندارد کشش ساده

در معادله بالا $\nu = \pm 1$ ، که علامت مثبت وقتی که جهت جریان منفی می‌باشد، یا به عبارتی منحنی نزولی می‌شود انتخاب می‌شود و علامت منفی وقتی که جهت جریان مثبت یا به عبارتی منحنی افزایش می‌یابد انتخاب می‌گردد.

همانگونه که اشاره شد، نتایج بدست آمده از تست کشش استاندارد برای بدست آوردن اطلاعات برای تنش معادل در مقابل کرنش پلاستیک معادل تا نقطه گلوبی استفاده می‌شود. با استفاده از

^۱ Back stress

معادله تجربی و اطلاعات بدست آمده از منحنی سختی یکنواخت، تنش معادل در کرنش‌های معادل اختیاری تا نقطه گلویی را می‌توان از معادله زیر بدست آورد.

$$\sigma = \sigma_y \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{m}\right)^n \quad (۸-۳)$$

در این معادله، σ تنش معادل، σ_y تنش تسلیم محوری و m و n پارامترهای ماده می‌باشند. با مرتبط کردن معادله ۷-۳ و ۸-۳ به نتایج تجربی، σ و \bar{X} در هر کرنش پلاستیک معادلی تخمین زده می‌شود. مولفه سختی ایزوتروپیک σ^0 به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک بدین گونه تعریف می‌شود.

$$\sigma^0(\bar{\varepsilon}_p) = \sigma(\bar{\varepsilon}_p) - \bar{X}(\bar{\varepsilon}_p) \quad (۹-۳)$$

پارامترهای ایزوتروپیک ماده Q و b با استفاده از نتایج معادله ۹-۳ و ۱۰-۳ تعیین می‌شود.

$$\sigma_0 = k + Q\{1 - \exp(-b\varepsilon_p)\} \quad (۱۰-۳)$$

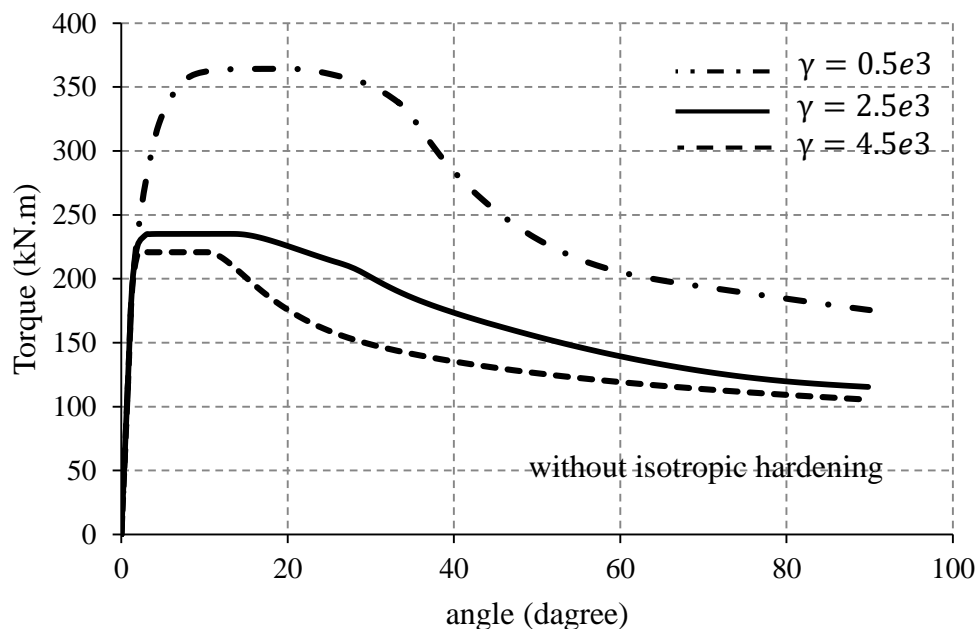
۳-۳- تأثیر پارامترهای ایزوتروپیک و سینماتیک

رچتینگ به عنوان انباشت کرنش پلاستیک در طی هر بارگذاری سیکلی در حضور تنش‌های میانگین غیر صفر است. تلاش‌های بسیار زیادی برای تعیین مشخصات سیکلی مواد در بارگذاری‌های محوری و چندگانه انجام شده است. کرنش‌های پلاستیک که وابسته به زمان هستند به طور همزمان گسترش می‌یابند. مدل‌ها و قواعد پنج‌گانه مختلفی عموماً برای تعریف و توصیف رفتار سیکلی مواد فلزی به کار می‌رود، که به شرح زیر می‌باشد [۵۱].

- Bilinear Isotropic Hardening rule (BISO)
- Bilinear Kinematic Hardening rule (BKIN)
- Non-Linear Isotropic Hardening rule (NLISO)
- Non-Linear Kinematic Hardening rule (Chaboche)
- Combination of NLISO and Chaboche rules

همان‌گونه که قبلاً عنوان شد، مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک برای شبیه‌سازی رفتار رچتینگ فلزات وقتی آنها در معرض بارگذاری سیکلی قرار دارند، استفاده می‌شود. در این

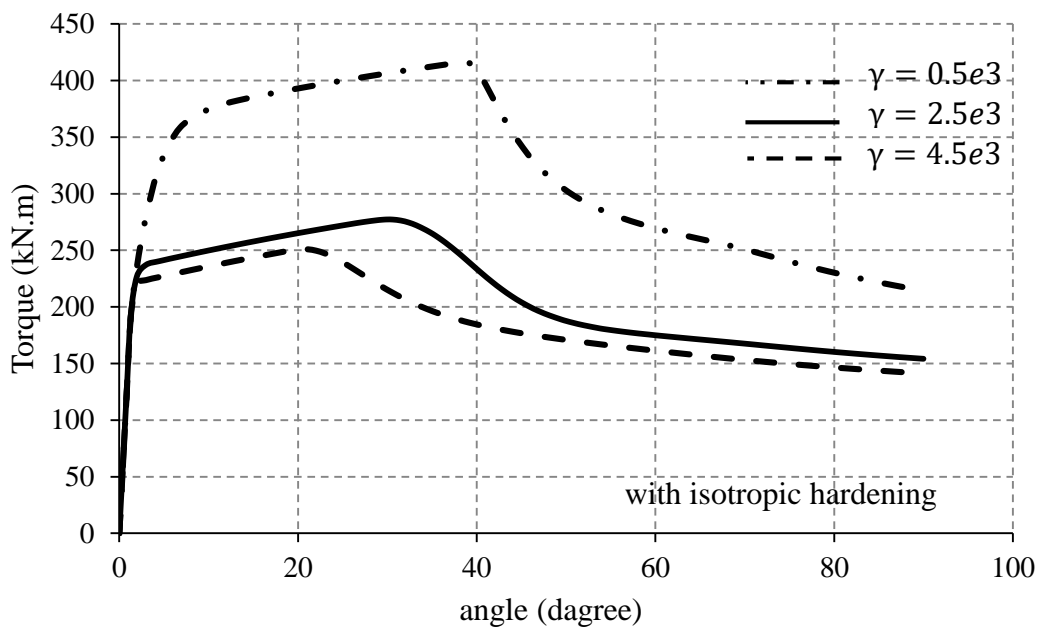
قسمت به تأثیر پارامترهای ایزوتروپیک و سینماتیک C, γ و Q, b پرداخته می‌شود. شبیه سازی‌ها بگونه‌ای انجام گرفته است که یکی از پارامترها افزایش یافته و حال آنکه سایر پارامترها ثابت فرض می‌شود. در شکل ۲-۳ به بررسی افزایش پارامتر γ بدون حضور پارامترهای ایزوتروپیک b و Q پرداخته شده است و مشاهده می‌شود که افزایش پارامتر γ در معادله ترکیبی ایزوتروپیک و سینماتیک غیرخطی باعث کاهش سخت شوندگی ماده می‌شود. مارسینو آراچو [۵۲] نیز قبلاً نشان داده بود که افزایش γ در قانون پراگر^۱ سبب می‌شود که قسمت‌های غیرخطی در مدل افزایش پیدا کنند.



شکل ۲-۳: بررسی تأثیر مقدار پارامتر γ در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی در عدم حضور پارامترهای ایزوتروپیک

در شکل ۳-۳ نشان داده شده است که با افزودن پارامترهای ایزوتروپیک b و Q در معادله، زاویه پیچش نسبت به حالتی که بدون پارامترهای ایزوتروپیک شبیه سازی شده بودند، دارای شیب بیشتری می‌باشد. در حالی که در شکل قبل این شیب در این ناحیه دارای مقدار صفر می‌باشد. یا به عبارتی می‌توان آن را صفر در نظر گرفت.

^۱ Prager rule



شکل ۳-۳: بررسی اثر مقدار پارامتر γ در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی در حضور پارامترهای ایزوتروپیک

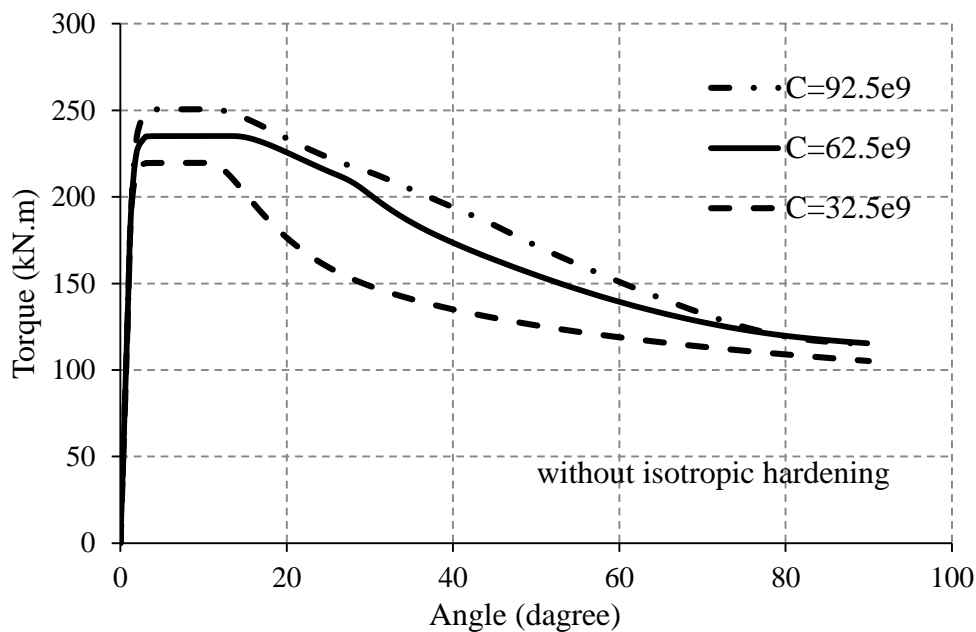
شکل ۳-۴ پارامتر C را در حالت نرم شدگی مورد مقایسه قرار داده است و ملاحظه می‌شود که برخلاف پارامتر γ ، افزایش C سبب افزایش قسمت‌های خطی در مدل می‌شود. یا به عبارتی سخت شوندگی ماده را افزایش می‌دهد. این شکل نیز بدون در نظر گرفتن پارامترهای ایزوتروپیک مورد مقایسه قرار گرفته است.

آراچو^۱ نشان داد که تأثیر افزایش C در قانون پراگر در مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی کلاسیک سبب افزایش سخت شوندگی در ماده می‌شود. در نتیجه کرنش پلاستیک در یک میزان تنش ثابت کاهش پیدا می‌کند.

شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶ به بررسی پارامترهای ایزوتروپیک یعنی b و Q در مقدار ثابت γ و C پرداخته می‌شود. آنگونه که در شکل ۳-۵ ملاحظه می‌شود، افزایش یا کاهش b سبب تغییر در قسمت خطی نمی‌شود؛ آنچه که از b تأثیر می‌پذیرد، زاویه پیچش است. مشاهده می‌شود که با افزایش این پارامتر مقاومت و سخت شوندگی ماده در ناحیه پلاستیک افزایش پیدا می‌کند و در سیکل‌های بالاتر و به تبع

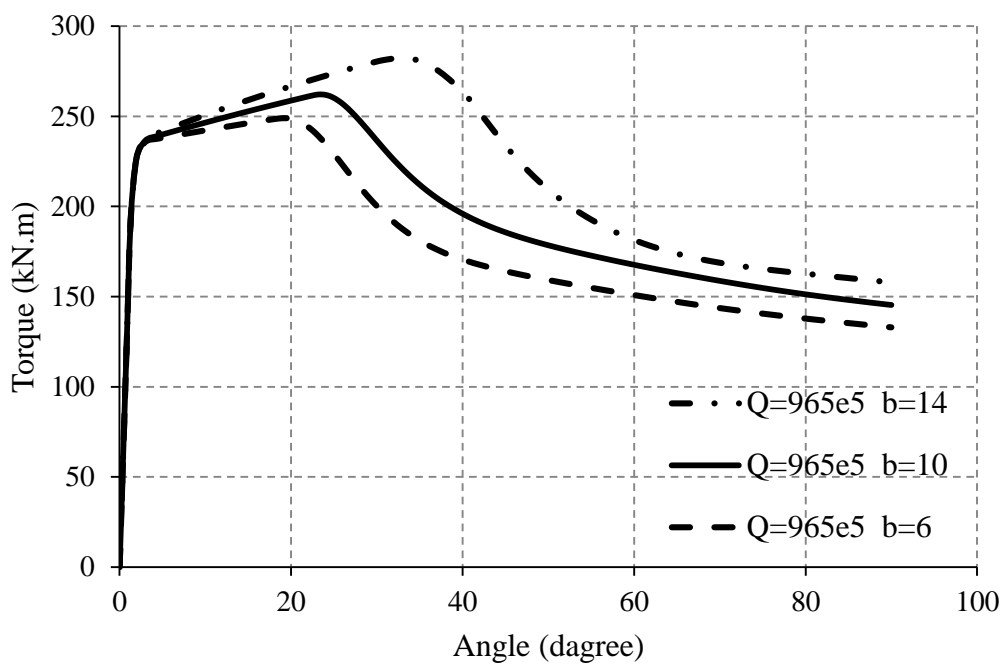
^۱ Marcio Costa Araújo

آن در زاویه پیچش بالاتر دچار زوال می‌شود و در مقدار b کمتر، زاویه پیچش کمتری برای گسیختگی پوسته استوانه‌ای مورد نیاز است. بررسی پارامتر Q نیز همین نتایج را نشان می‌دهد که با افزایش مقدار Q زوال در زاویه پیچش بالاتر رخ می‌دهد.

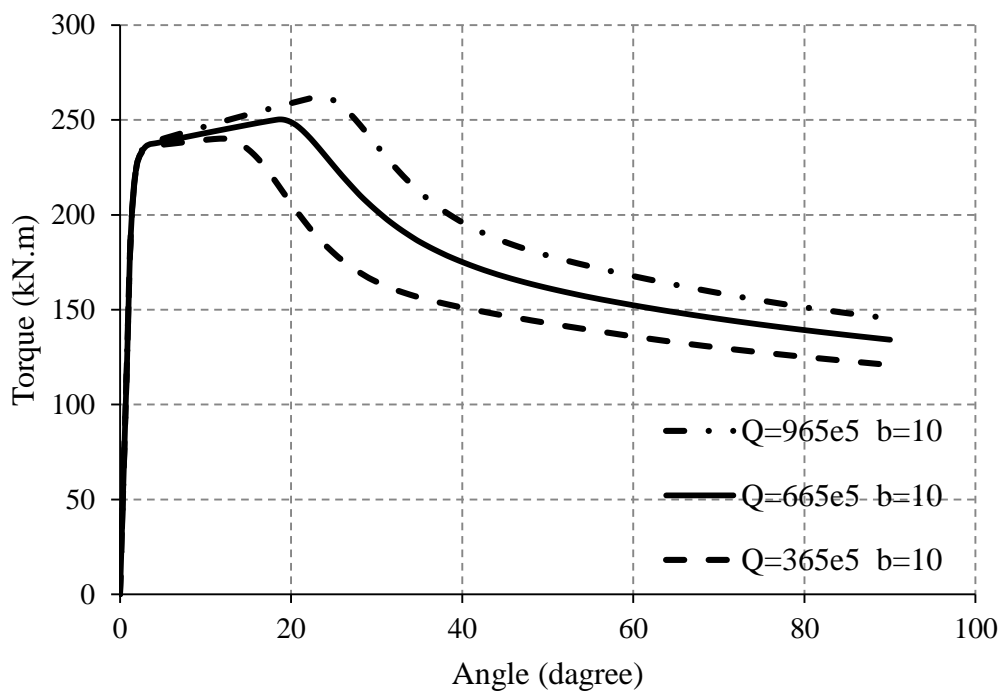


شکل ۳-۴: تأثیر مقدار پارامتر C در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی در عدم حضور پارامترهای ایزوتروپیک

در این قسمت نشان داده شد که پارامترهای γ و C از تأثیری متفاوت بر رفتار بار-جابجایی ماده برخوردار می‌باشند به گونه‌ای که افزایش C باعث افزایش سخت شوندگی، حال آنکه افزایش γ سبب کاهش سخت شوندگی ماده می‌شود و در ارتباط با پارامترهای b و Q نیز مشاهده شد که افزایش این دو پارامتر همان طور که از معادله ۳-۱۰ نیز معلوم است، سبب افزایش زاویه پیچش تا رسیدن به زوال می‌شود.



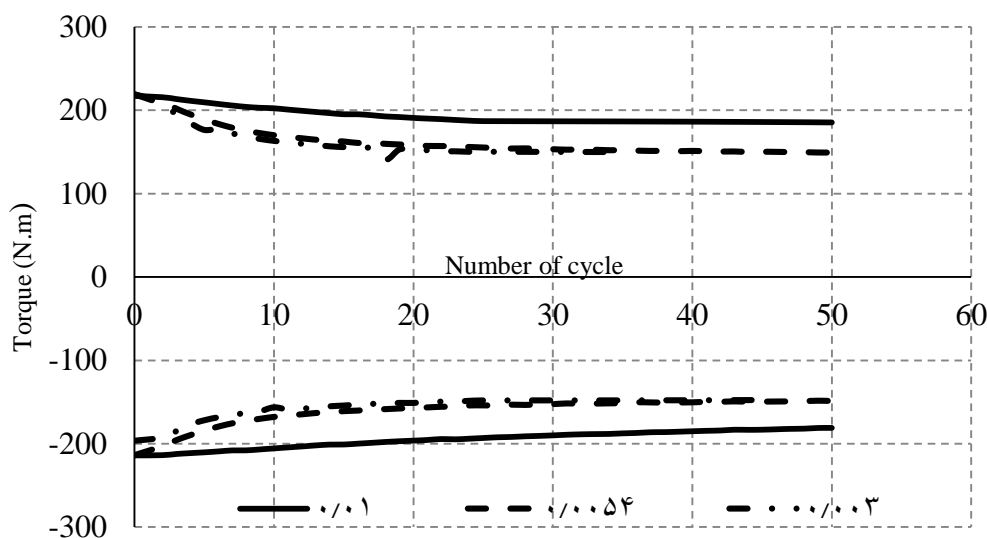
شکل ۳-۵: تأثیر مقدار پارامتر b در رفتار ماده در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی



شکل ۳-۶: تأثیر مقدار پارامتر Q در رفتار ماده در معادله ترکیبی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی

۳-۴- بررسی حساسیت مش

شکل ۳-۷ تأثیر مش‌بندی و اندازه المان‌های استفاده شده در تحلیل عددی برای مکان گشودگی‌ها در انتهای نمونه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود مناسب‌ترین اندازه برای مش‌بندی، به کارگیری المان‌هایی با اندازه هر ضلع 0.0054 متر می‌باشد. ملاحظه می‌شود که المان‌های بزرگتر باعث نادرستی جواب می‌باشد و به کارگیری المان‌های کوچک‌تر تأثیری بر حل عددی نداشته و استقلال حل عددی را نسبت به مش‌بندی نشان می‌دهد. همچنین استفاده از مش بندی ریزتر زمان حل عددی را بطور چشمگیری افزایش می‌دهد.

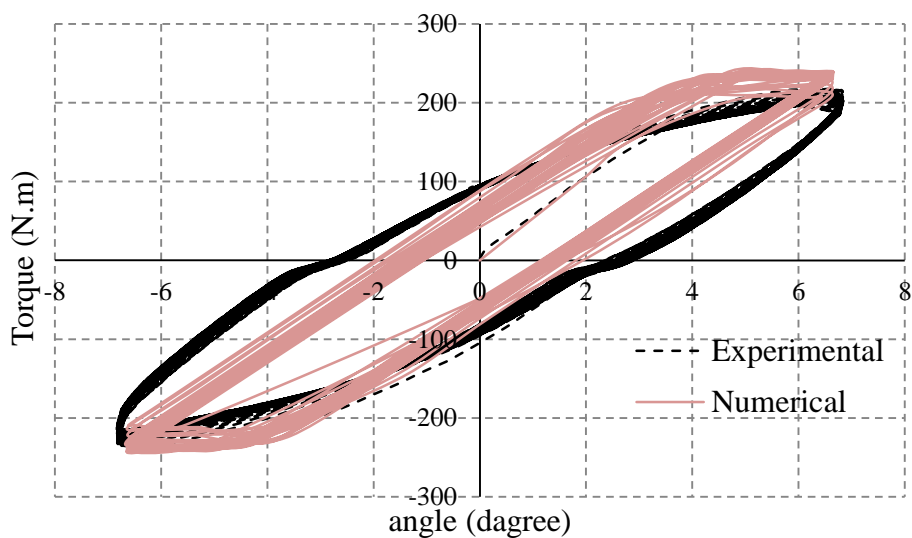


شکل ۳-۷: مقایسه اندازه المان‌ها برای تحلیل عددی رفتار نرم شونده‌گی پوسته استوانه‌ای با گشودگی در انتها

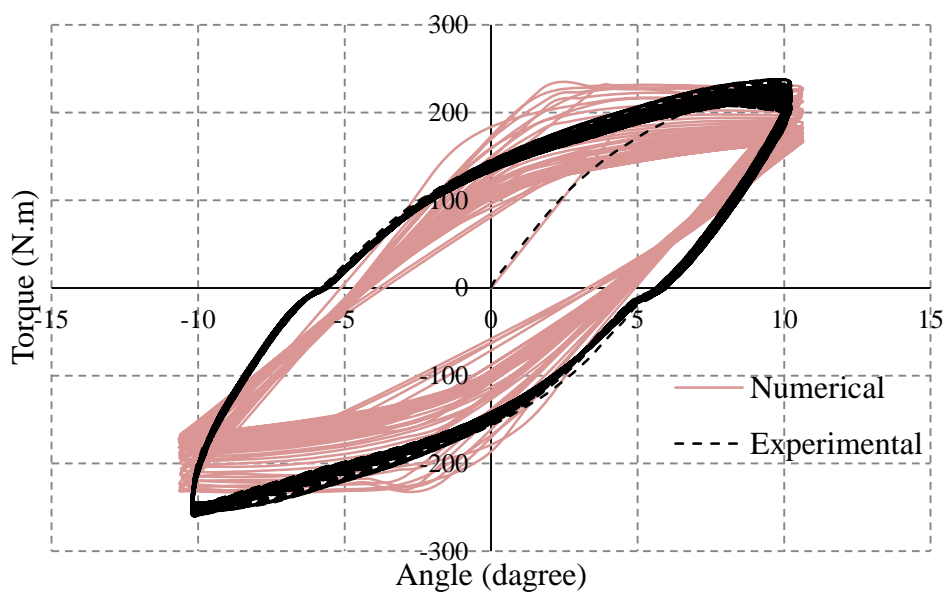
المان‌ها از نوع چهار گره‌ای (S4R) انتخاب شده است که برای تحلیل پوسته‌های جدارنازک و جدار ضخیم مناسب می‌باشند و در تحلیل‌های عددی حل با آباکوس به عنوان پیش فرض وجود دارد. این المان‌ها کرنش غشایی محدودی دارند و برای کنترل زمان حل، مناسب هستند.

۳-۵- تحلیل عددی و تجربی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی

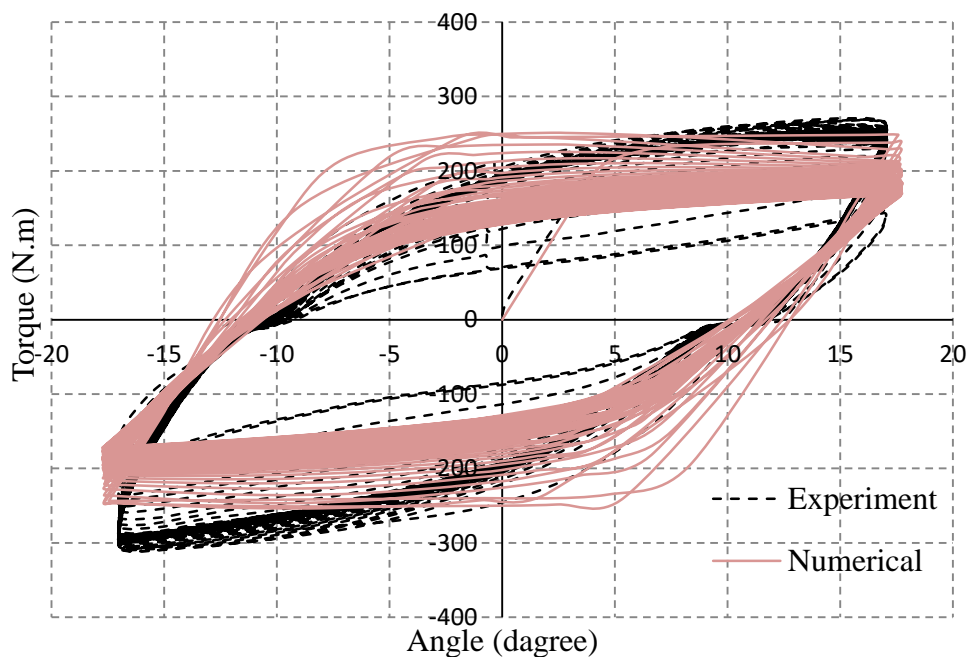
شکل‌های ۳-۸، ۳-۹ و ۳-۱۰، به ترتیب مقایسه منحنی‌های رفتار نرم شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل به صورت تجربی و عددی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود تغییرات منحنی هیستریزیس در آنالیز عددی در سیکل‌های پایین‌تری به ثبات می‌رسند و اثر نرم شوندگی در این آنالیز بیشتر است. در تحلیل‌های عددی رفتار نرم شوندگی در سیکل‌های ابتدایی نسبت به تحلیل تجربی دارای انباشت کرنش پلاستیک بیشتری است.



شکل ۳-۸: تحلیل عددی و تجربی رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل با دامنه پیچش ۳/۴ درجه



شکل ۳-۹: تحلیل عددی و تجربی رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل با دامنه پیچش ۶/۸ درجه



شکل ۳-۱۰: تحلیل عددی و تجربی رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش - کنترل با دامنه پیچش ۱۰/۲ درجه

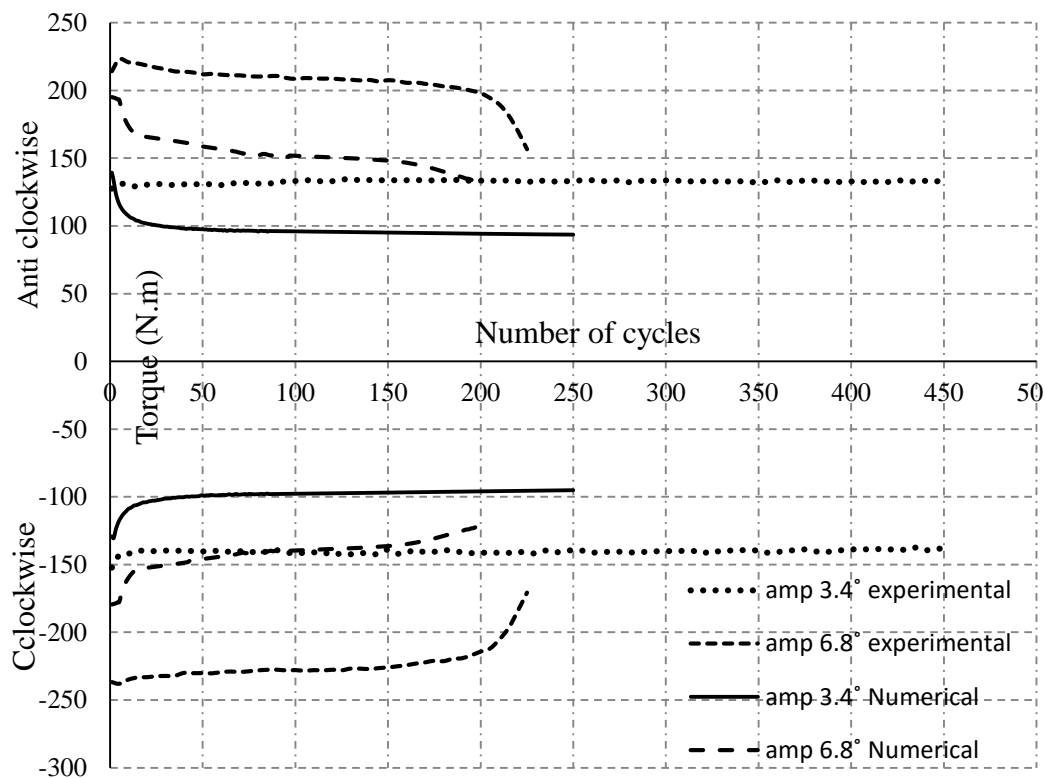
۳-۶- تحلیل عددی و تجربی رفتار نرم شونده‌ی پوسته استوانه‌ای با گشودگی

دایروی

شکل ۳-۱۱ به بررسی اثر گشودگی در حالت زاویه پیچش-کنترل در تحلیل‌های عددی و تجربی می‌پردازد. همانگونه که مشاهده می‌شود در تحلیل‌های عددی، ماهیت ماده بگونه‌ای تعریف شده است که ماده رفتار نرم شونده‌ی بیشتری از خود نشان می‌دهد، و با گشتاور کمتری به مقدار زاویه پیچش مورد نظر می‌توان دست یافت. در این بررسی دو زاویه پیچش مختلف ۳/۴ و ۶/۸ درجه با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و نشان داده شد که زاویه پیچش ۳/۴ درجه در هر دو تحلیل عددی و تجربی پس از طی ۲۵۰ و ۲۰۰۰ سیکل دچار زوال نشده و سیکل‌های نرم شونده کاملاً بر روی یکدیگر منطبق می‌شدند. در تحلیل‌های عددی افزایش مقدار کرنش در سیکل‌های بسیار پایین‌تری به ثبات و یکنواختی می‌رسند. (در شکل ۳-۱۱ تعداد ۴۵۰ سیکل بارگذاری برای حالت تجربی در زاویه پیچش مربوطه رسم شده است تا بتوان نمودارهایی که تعداد سیکل کمتری دارند، بهتر نمایش داد. تحلیل

عددی برای رسیدن به تعداد سیکل مورد نظر نیاز به کامپیوترهایی با حافظه بسیار زیاد جهت ذخیره سازی اطلاعات دارد. از این رو تعداد سیکل‌های کمتری مورد بررسی قرار گرفت) در حالیکه در زاویه پیچش ۶/۸ درجه گسیختگی در تحلیل تجربی در تعداد سیکلی کمتر از ۲۰۰ سیکل بارگذاری شروع شده و به زوال و تغییر شکل پلاستیک زیاد می‌رسد.

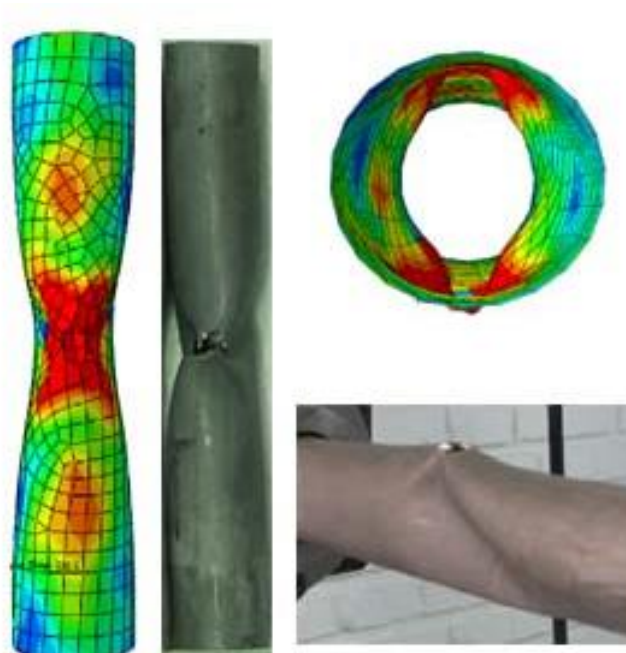
در تحلیل‌های تجربی پوسته استوانه‌ای در ابتدا کمی رفتار سخت شوندگی نشان می‌دهد که در تحلیل عددی این رفتار با این نرخ قابل مشاهده نمی‌باشد. هر دو تحلیل تجربی و عددی نشان می‌دهند که زاویه گشتاور بیشتری را پوسته در جهت ساعتگرد متحمل می‌شود که متأثر از جهت پیچش می‌باشد.



شکل ۳-۱۱: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل برای پوسته‌ای با طول ۱۷۰ میلی‌متر با زاویه پیچش ۳/۴ و ۶/۸ درجه با گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر

شکل ۳-۱۲ پوسته استوانه‌ای را پس از گسیختگی در هر دو تحلیل عددی و تجربی نشان می‌دهد. در هر دو تحلیل در قسمت میانی پوسته استوانه‌ای در اطراف گشودگی تغییر شکل متقارنی

دیده می‌شود که البته این تقارن در تحلیل‌های عددی بیشتر قابل مشاهده است. در حالت تجربی در اطراف گشودگی به علت عملیات مته کاری تمرکز تنش بیشتری و آسیب‌های ناشی از این فرایند بیشتر می‌باشد که دقیقاً از همین ناحیه ترک شروع به جوانه زنی و رشد و در انتها منجر به گسیختگی می‌شود که به همین علت تقارن در تغییر شکل در حالت تجربی به نسبت تحلیل‌های عددی کمتر است و انتشار ترک در حالت عددی مشاهده نمی‌شود.



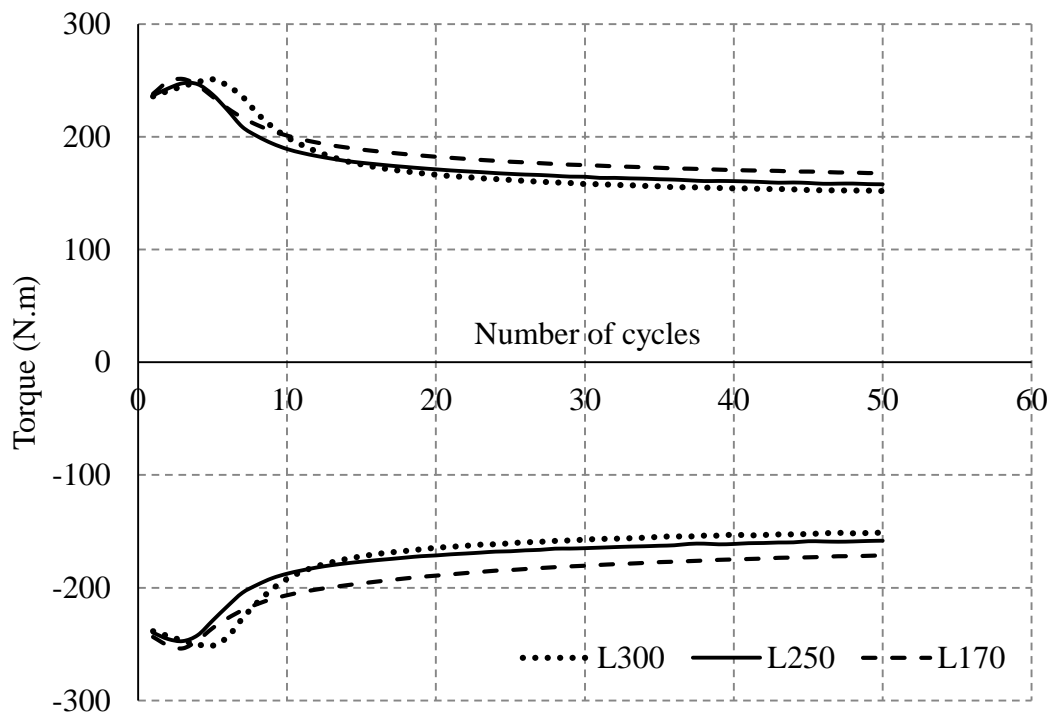
شکل ۳-۸: تغییر شکل‌های ایجاد شده در پوسته‌های استوانه‌ای در حالت زاویه پیچش کنترل در هر دو تحلیل عددی و تجربی

۳-۷- تأثیر طول بر روی رفتار نرم شونده‌گی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه

پیچش-کنترل

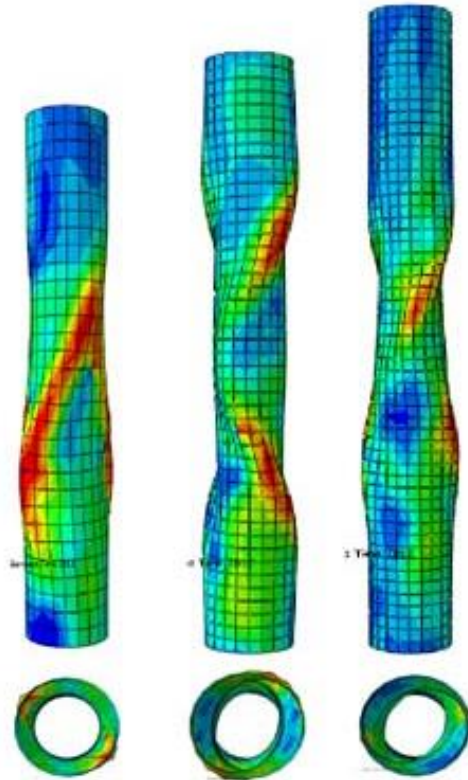
در این قسمت به تحلیل تأثیر پارامتر طول بر روی رفتار نرم شونده‌گی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل سیکلی پرداخته می‌شود. در این بررسی سه پوسته استوانه‌ای با طول‌های متفاوت ۱۷۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلیمتر مورد تحلیل عددی قرار گرفته است.

شکل ۳-۱۳ بیان کننده تأثیر طول بر رفتار نرم شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای است. همان طور که در آزمایشات تجربی مشاهده شد، پوسته‌ها در ابتدا کمی از خود رفتار سخت شوندگی نشان می‌دهند که این رفتار در تحلیل عددی نیز قابل مشاهده است. برای هر سه نمونه گشتاور مورد نیاز جهت دوران پوسته استوانه‌ای به اندازه زاویه چرخش تعیین شده، تقریباً برابر است هر چند که نمونه‌ای که دارای طول بیشتری است، رفتار سخت شوندگی را در تعداد سیکل‌های بیشتری از خود نشان می‌دهد. ولی همین نمونه پس از طی کردن ۵۰ سیکل بارگذاری دارای تغییر شکل بیشتری و رفتار نرم شوندگی بیشتری است. می‌توان اینگونه بیان کرد که هر چه طول اولیه نمونه بیشتر باشد. رفتار سخت شوندگی آن تا تعداد سیکل‌های بیشتری نسبت به نمونه‌های با طول کمتر ادامه می‌یابد، ولی از طرفی هم زودتر دچار گسیختگی می‌شود و رفتار نرم شوندگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. از طرفی در یک تعداد سیکل ثابت، در مقایسه با نمونه‌های با طول کمتر، به گشتاور کمتری جهت دوران تا زاویه تعیین شده نیاز دارد.



شکل ۳-۹: بررسی تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری برای سه پوسته استوانه‌ای با طول‌های ۱۷۰، ۲۵۰، ۳۰۰ میلیمتر تحت بارگذاری زاویه پیش-کنترل

در شکل ۳-۱۴ تغییر شکل هر سه نمونه پس از ۵۰ سیکل بارگذاری را مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۰: تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای در تحلیل عددی با طول‌های ۱۷۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلیمتر تحت بارگذاری زاویه پیچش- کنترل

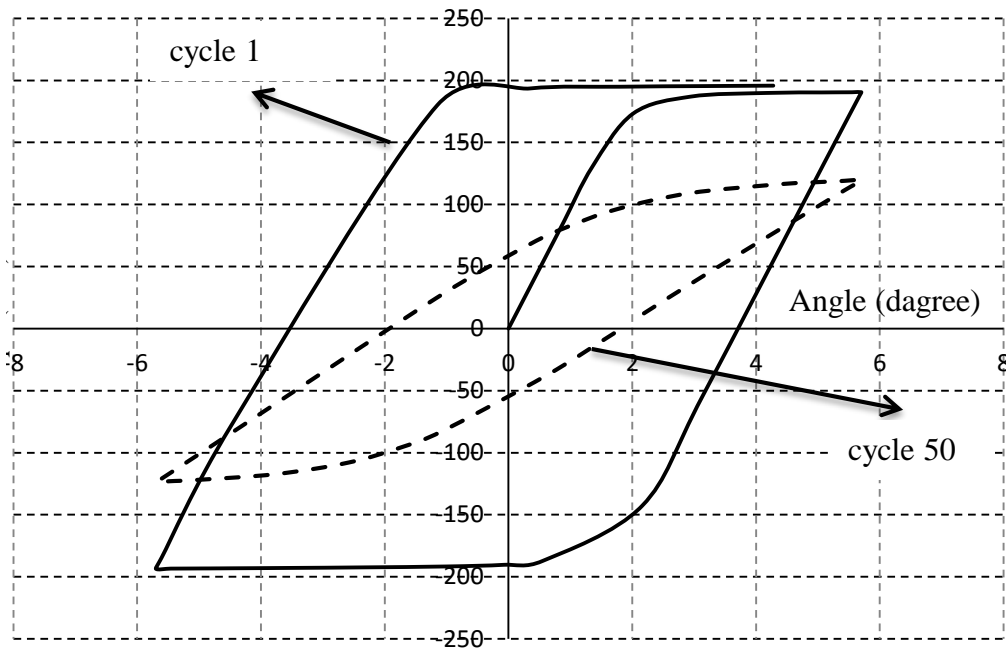
با توجه به تغییر شکل‌های بوجود آمده در پوسته‌های استوانه‌ای مشاهده می‌شود که با افزایش طول نمونه‌ها، نمونه‌ها از دو ناحیه شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کنند.

۳-۸- بررسی رفتار نرم شونده‌های پوسته‌های منشوری با سطح مقطع‌های دایروی،

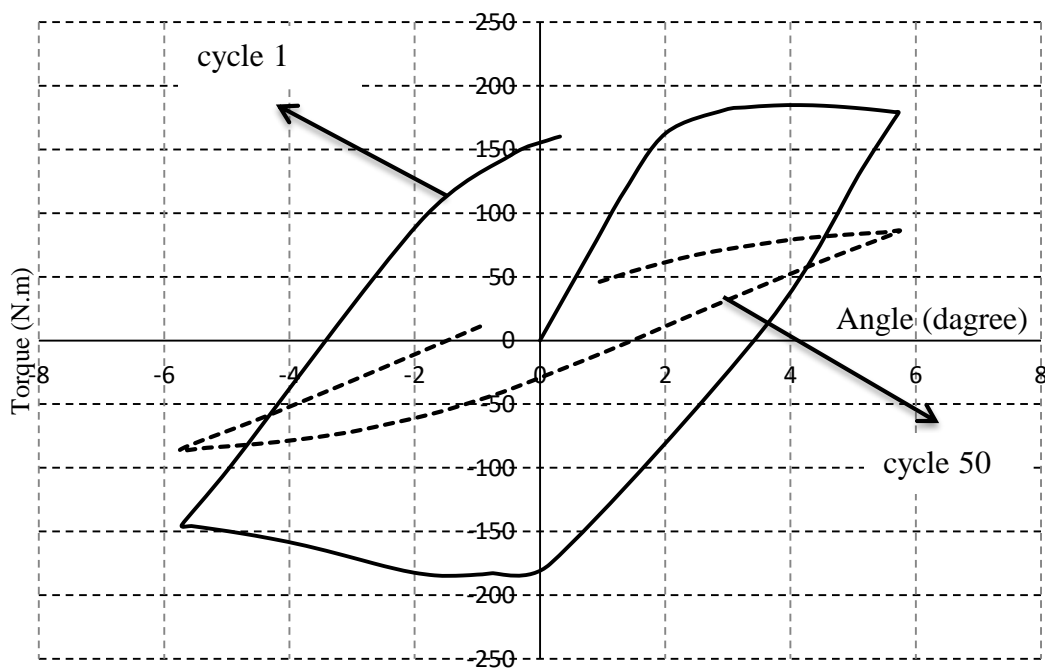
مکعبی و مثلثی

در ادامه به تحلیل اثر تغییر شکل سطح مقطع پوسته‌های منشوری و اثر آن بر رفتار نرم شونده‌گی پوسته‌ها پرداخته می‌شود. به همین منظور پوسته‌هایی با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی که هر سه دارای سطح مقطع برابر ($907/46 \text{ mm}^2$) هستند، در نظر گرفته و به صورت عددی تحت بارگذاری زاویه پیچش- کنترل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۳-۱۵ سیکل ابتدایی و انتهایی (۱ و ۵۰) را برای

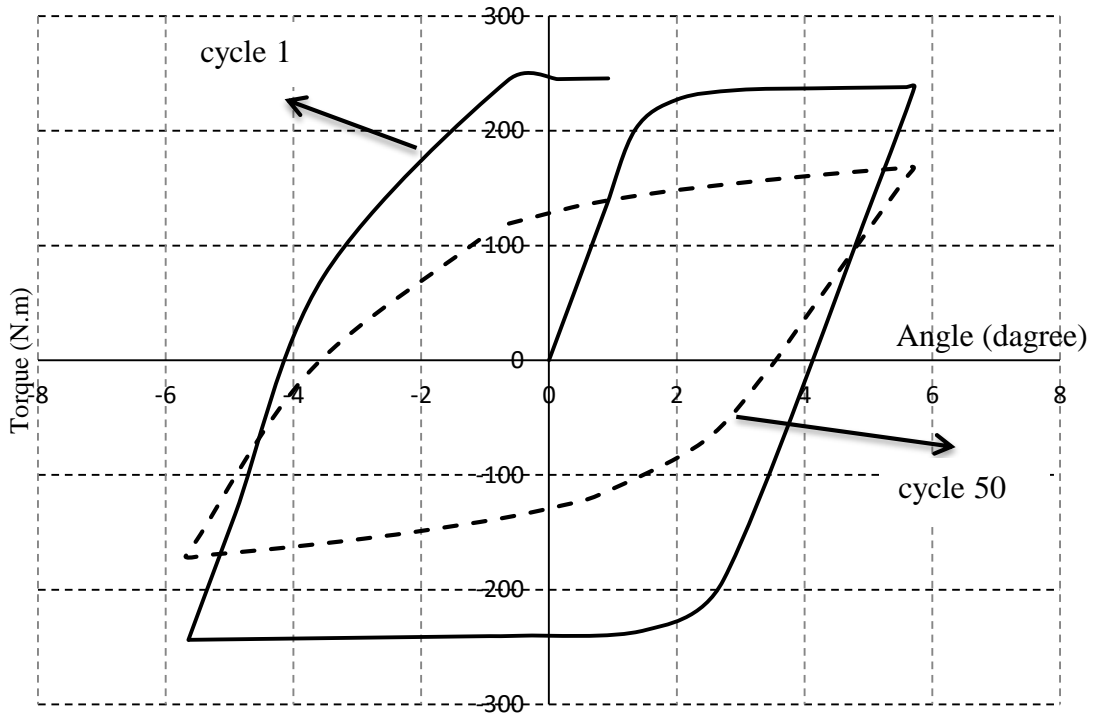
هر یک از این سه پوسته نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل های ۳-۱۵، ۳-۱۶، ۳-۱۷ و شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است، تغییر شکل سطح مقطع با وجود ثابت بودن اندازه آنها، باعث تغییر بسیار زیادی در رفتار نرم شوندگی آنها می‌شود.



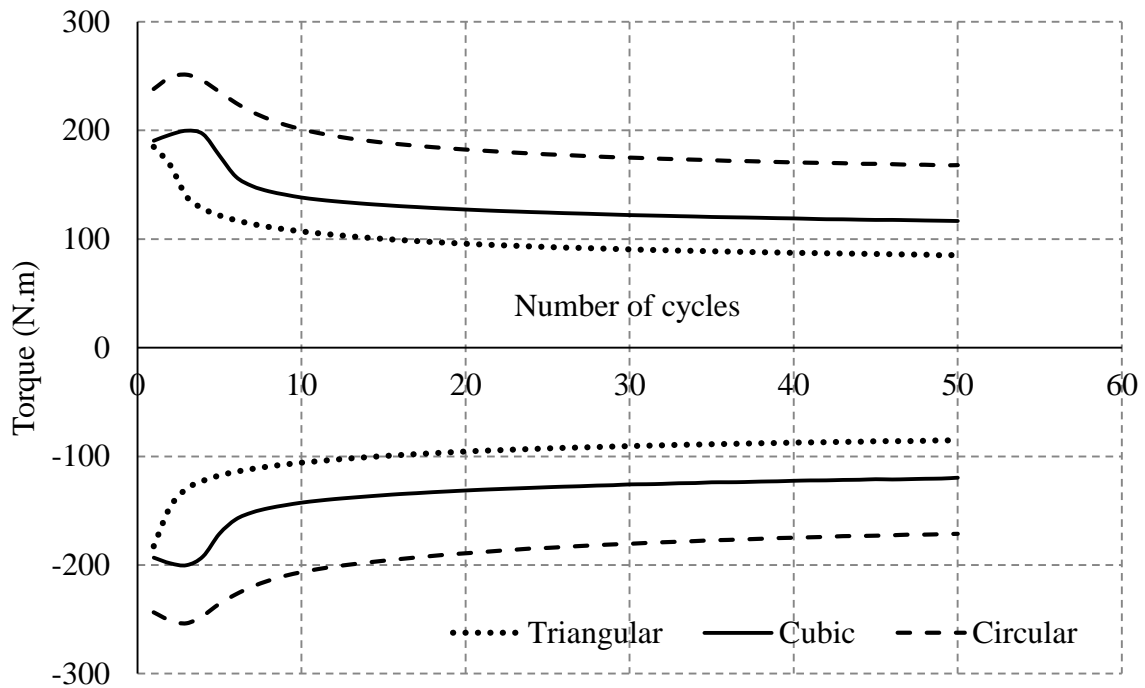
شکل ۳-۱۱: اولین و پنجاهمین سیکل بارگذاری پوسته مکعبی در بارگذاری زاویه پیش-کنترل



شکل ۳-۱۲: اولین و پنجاهمین سیکل بارگذاری پوسته مثلثی در بارگذاری زاویه پیش-کنترل

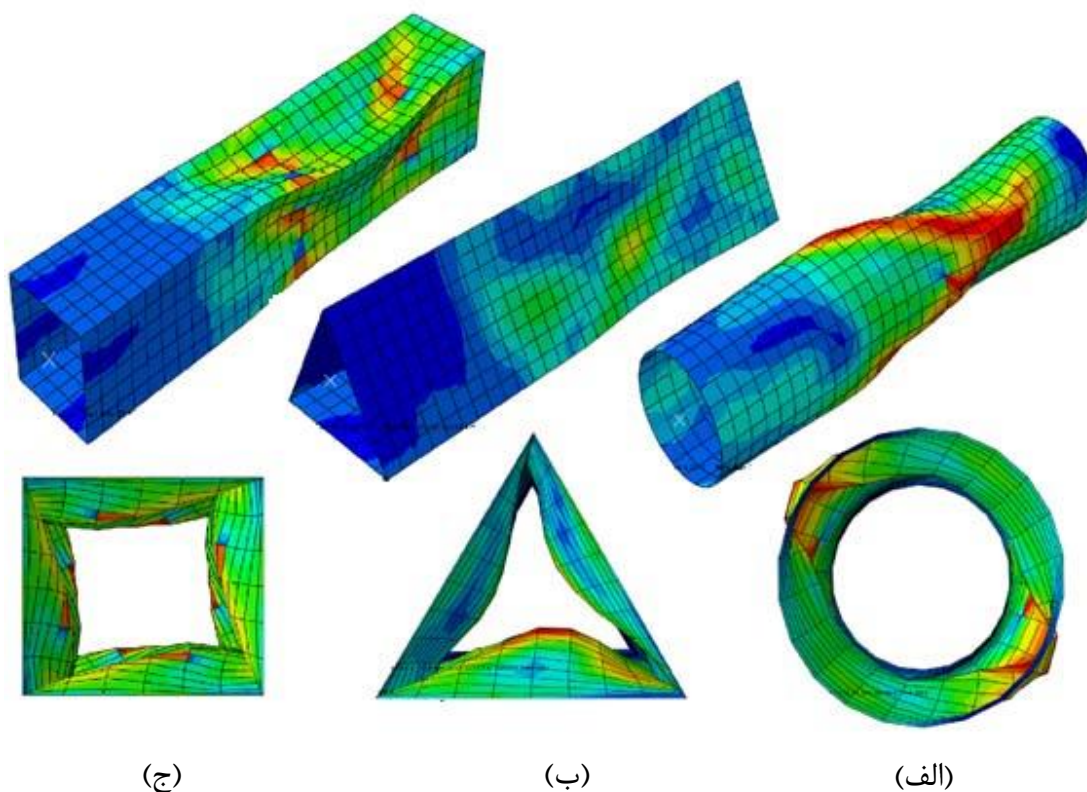


شکل ۳-۱۳: اولین و پنجاهمین سیکل بارگذاری پوسته استوانه‌ای در بارگذاری زاویه پیش-کنترل



شکل ۳-۱۸: بررسی تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل بارگذاری بر روی پوسته‌هایی با شکل هندسی متفاوت با سطح مقطع یکسان تحت بارگذاری زاویه پیش-کنترل

پوسته با سطح مقطع دایروی و مثلثی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار گشتاور اولیه جهت دوران تا زاویه پیچش تعیین شده را دارند. پس از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری پوسته با سطح مقطع مثلثی تقریباً به نیمی از مقدار گشتاور اولیه خود جهت دوران نیاز دارد. شکل ۳-۱۹ تغییر شکل در هر یک از این سه نمونه را پس از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری به صورت زاویه پیچش-کنترل نشان می‌دهد.

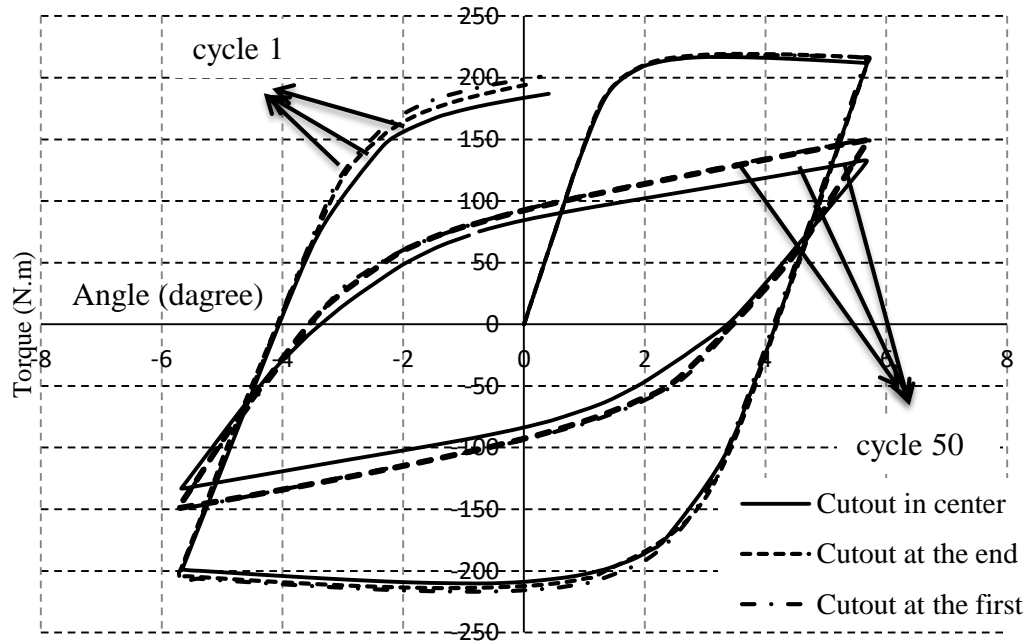


شکل ۳-۱۴: تغییر شکل‌های ایجاد شده در پوسته‌های منشوری پس از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل، الف) مقطع دایروی، ب) مقطع مثلثی، ج) مقطع مربعی

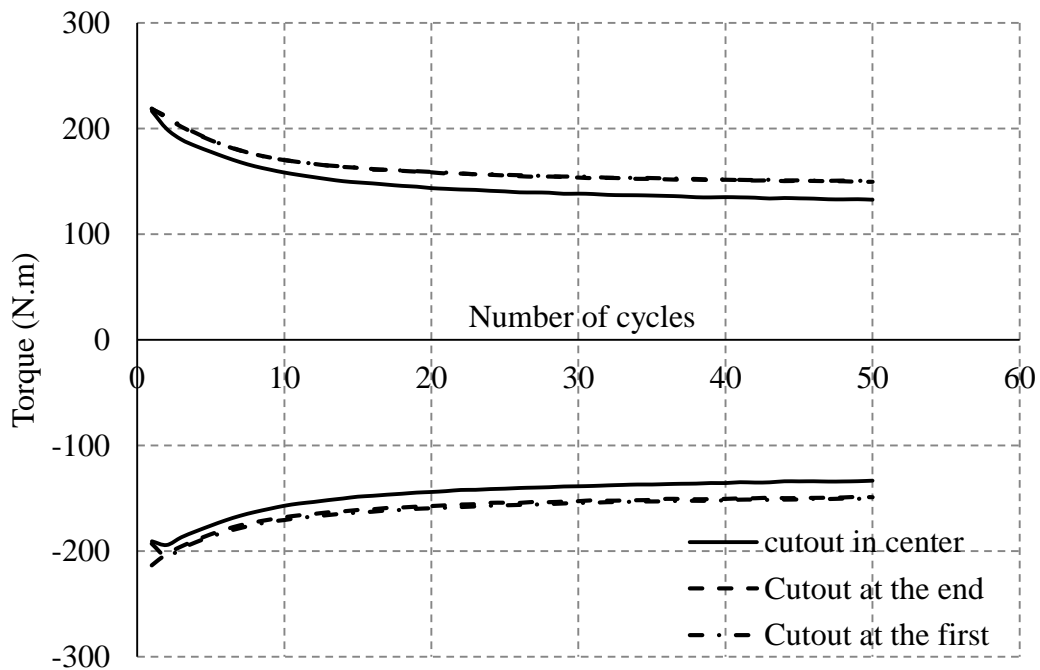
۳-۹- بررسی مکان گشودگی بر رفتار نرم‌شوندگی پوسته استوانه‌ای

همان‌گونه که در شکل ۳-۲۰ و شکل ۳-۲۱ مشاهده می‌کنید گشودگی در مرکز پوسته استوانه‌ای باعث نرم‌تر شدن رفتار پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری سیکلی پیچشی در بارگذاری زاویه پیچش-کنترل می‌شود؛ اما تأثیر گشودگی در ابتدا و یا انتهای پوسته استوانه‌ای، تأثیر زیادی را در رفتار نرم‌شوندگی پوسته استوانه‌ای نشان نمی‌دهد. در شکل ۳-۲۰ حلقه‌های هیستریزیس رسم شده برای سیکل ابتدایی و انتهایی (۱ و ۵۰) ترسیم شده است. در شکل ۳-۲۱ تغییرات دامنه گشتاور نسبت به

تعداد سیکل بارگذاری برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی در ابتدا و انتها و میانه نمونه ترسیم شده، ملاحظه می‌کنید در تحلیل‌های عددی مکان قرار گیری گشودگی تغییر زیادی در رفتار نرم‌شوندگی پوسته‌ها را نشان نمی‌دهد.



شکل ۳-۱۵: حلقه‌های هیستریزیس ایجاد شده برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی در ابتدا، انتها و میانه نمونه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری زاویه پیچش-کنترل در دو سیکل ابتدایی و انتهایی



شکل ۳-۲۱: تغییرات دامنه گشتاور نسبت به تعداد سیکل برای پوسته استوانه‌ای به طول ۱۷۰ میلی‌متر با گشودگی در ابتدا، انتها و میانه نمونه

آزمایش‌های تجربی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای که دارای گشودگی در ابتدا و انتها (از محل اعمال بار پیچشی)، به فاصله ۵۰ میلی‌متر از طرفین پوسته استوانه‌ای هستند؛ نشان دادند که وجود گشودگی در ابتدای پوسته استوانه‌ای باعث گسیختگی در سیکل‌های پایین‌تری نسبت به نمونه با گشودگی در انتهای پوسته می‌شود. البته این تفاوت در تعداد سیکل گسیختگی اختلاف زیادی نمی‌باشد و می‌توان عنوان کرد که نتایج عددی رفتار درستی را از عملکرد پوسته‌ها پیش‌بینی می‌کنند. می‌توان اینگونه بیان کرد مکان گشودگی از نظر قرارگیری در مرکز یا طرفین پوسته استوانه حائز اهمیت است؛ ولی رفتار نرم‌شوندگی پوسته از نظر قرارگیری گشودگی در ابتدا یا انتهای آن نسبت به محل اعمال بار تفاوتی چندانی نخواهد داشت. همان‌گونه که از شکل ۳-۲۰ نیز پیداست، گشودگی در پوسته استوانه‌ای از همان سیکل‌های ابتدایی رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان می‌دهد و رفتار سخت‌شوندگی در آنها مشاهده نمی‌شود.

۳-۱۰- نتیجه‌گیری

با توجه به شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس با مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک غیرخطی با نتایج تجربی می‌توان نتایج زیر را بدست آورد.

۱- مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک رفتار نرم‌شوندگی و رچتینگ پوسته-

های استوانه‌ای را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. زیرا در این مدل اندازه سطح تسلیم در فضای تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می‌کند و همچنین مرکز آن نیز انتقال می‌یابد.

۲- پارامترهای C و γ واکنشی خلاف یکدیگر بر روی رفتار مواد از خود نشان می‌دهند؛ یعنی

اینکه افزایش C باعث افزایش سخت‌شوندگی ماده می‌شود؛ ولی افزایش γ سبب کاهش

سخت‌شوندگی ماده و تمایل بیشتر آن به رفتار نرم‌شوندگی دارد. افزایش و کاهش

پارامترهای b و Q نیز سبب افزایش زاویه پیچش تا رسیدن به زوال می‌شود. همچنین

ملاحظه شد که تغییر در b و Q تغییر زیادی در تعداد سیکل‌های زوال ماده ایجاد نمی‌کند و

این تغییر در تعداد سیکل بارگذاری بین ۱۰ تا ۱۴ درصد می‌شود.

۳- سرعت گسیختگی و ثابت شدن تغییرات کرنش در نتایج عددی بیشتر از نتایج تجربی است.

پوسته با دامنه مساوی زاویه پیچش در نتایج عددی و تجربی، در تحلیل عددی در سیکل-

هایی به مراتب پایین‌تر دچار زوال می‌شود.

۴- نتایج عددی بدست آمده برای پوسته‌های استوانه‌ای همراه با گشودگی نشان داد که وجود

گشودگی باعث افزایش سرعت نرم‌شوندگی نمی‌شود. در تحلیل‌های عددی در ابتدای

بارگذاری بر خلاف نتایج تجربی رفتار سخت‌شوندگی ملاحظه نمی‌شود. گشودگی تأثیری در

رفتار منحنی‌های هیستریزیس پوسته‌های استوانه‌ای شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل سخت

شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک ندارد. به عبارتی حتی در هنگام زوال اثری از ترک

در اطراف گشودگی نمایان نمی‌شود؛ حال آنکه در نتایج تجربی، دلیل اصلی زوال، رشد ترک

می‌باشد.

۵- آنالیزهای عددی نشان داد که تغییر طول‌های جزئی و اندک تأثیر زیادی در رفتار نرم-

شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای ندارد.

۶- تغییر در شکل مقطع هندسی پوسته‌های استوانه‌ای تأثیر زیادی در رفتار نرم‌شوندگی پوسته-

ها دارد. این اختلاف به بیش از ۵۰ درصد در مورد دو پوسته با مقاطع استوانه‌ای و مثلثی

می‌رسد.

فصل چہارم

نتیجہ گیری و پیشہ داری

۴-۱- نتیجه گیری

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی روی پوسته‌های منشوری همچنین مقایسه با نتایج عددی بدست آمده توسط نرم‌افزار آباکوس می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

۱- در بارگذاری گشتاور-کنترل متقارن محوری، با گشتاور متوسط صفر، رفتار نرم شوندگی در نمونه مشاهده شد. با افزایش تعداد سیکل‌های اعمالی، تحمل گشتاور اعمال شده، کمتر، زاویه پیچش بیشتر و باعث ایجاد رفتار نرم‌شوندگی می‌گردد.

۲- در بارگذاری گشتاور-کنترل نامتقارن محوری، رفتار رچتینگ در نمونه‌ها ایجاد می‌گردد. در تمامی نمونه‌ها با ادامه بارگذاری سیکلی در دامنه نیروی یکسان، نرخ کرنش رچتینگ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دامنه نیرو، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد و نمونه در تعداد سیکل کمتری دچار گسیختگی می‌شود.

۳- تحت بارگذاری زاویه گشتاور-کنترل متقارن محوری، پس از هر سیکل تحمل بار بر روی پوسته استوانه‌ای کاهش می‌یابد. یعنی در پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری زاویه پیچش کنترلی، رفتار نرم‌شوندگی در پوسته مشاهده می‌شود.

۴- افزایش دامنه زاویه پیچش سبب افزایش سرعت نرم‌شوندگی در پوسته استوانه‌ای می‌شود. همانطور که ملاحظه شد، رفتار نرم‌شوندگی در قسمت ساعتگرد و پاد ساعتگرد متقارن نیست و آنگونه که مشاهده شد، گشتاور اعمالی در قسمت ساعتگرد کمتر است.

۵- به علت نامتقارن بودن بارگذاری گشتاور-کنترلی، در پوسته استوانه‌ای رفتار رچتینگ ایجاد می‌گردد و با افزایش گشتاور متوسط سرعت رچتینگ در پوسته افزایش می‌یابد. تاریخچه بارگذاری در این آزمایش سبب ایجاد افزایش ناگهانی شیب کرنش رچتینگ می‌شود.

۶- در بارگذاری زاویه پیچش-کنترلی که نمونه دارای گشودگی می‌باشد، نمونه تا قبل از گسیختگی از قسمت‌های میانی دچار تغییر شکل نمی‌شود و گسیختگی بوجود آمده در نمونه

به علت جوانه‌زنی، ایجاد ترک، رشد ترک و در نهایت زوال و تغییر شکل پلاستیک زیاد به علت افزایش سرعت رشد ترک می‌باشد.

۷- ترک‌ها در پوسته‌های استوانه‌ای در حالت گشودگی از قسمت‌های زیرین سطح شروع به جوانه‌زنی و رشد می‌کنند و دارای زاویه‌ای بیش از ۴۰ درجه می‌باشند. زمان سپری شده برای ظاهر شدن ترک به مراتب بیشتر از زمان انتشار آن است و پس از ایجاد ترک، سرعت رشد ترک در بازه زمانی کمتری سبب ایجاد زوال و تغییر شکل پلاستیک زیاد در پوسته استوانه‌ای می‌شود.

۸- ایجاد گشودگی باعث می‌شود تا نمونه‌ها در حالتی که گشودگی در آنها ایجاد شده است نیاز به کرنش رچتینگ بالایی نیاز نداشته باشد و در کرنش‌های رچتینگ پایین نیز به دلیل وجود گشودگی سبب زوال در نمونه‌ها در اطراف گشودگی به خاطر انتشار و رشد ترک می‌شود.

۹- هرچه قطر گشودگی بزرگتر باشد رفتار نرم‌شوندگی بیشتری از خود نشان می‌دهند و نرخ کرنش رچتینگ آنها بیشتر می‌باشد، همچنین مشاهده شد که وجود گشودگی در میانه پوسته‌های استوانه‌ای باعث می‌شود که نمونه‌ها در تعداد سیکل پایین تری دچار زوال شوند. هرچند گشودگی در ابتدا و یا انتهای پوسته تغییر زیادی در تعداد سیکل‌های بارگذاری تا زوال پوسته ندارد و تفاوت زیادی مشاهده نشد.

۱۰- در پوسته‌های استوانه‌ای، نمونه‌ای که دارای گشودگی در میانه پوسته می‌باشد دارای نرخ کرنش رچتینگ بالاتری است؛ در حالیکه در پوسته‌های مکعبی، گشودگی که به محل اعمال بار نزدیک‌تر می‌باشد دارای نرخ کرنش رچتینگ بیشتری است و زودتر به زوال می‌رسد.

۱۱- میزان کرنش رچتینگ در سیکل‌های ابتدایی در گشودگی دایروی بیشتر از هندسه‌های مثلثی و مربعی می‌باشد؛ ولی وجود گوشه‌های نوک تیز در این نوع هندسه‌ها باعث افزایش نرخ کرنش رچتینگ در سیکل‌های بعدی می‌باشد. گشودگی با هندسه مثلثی در تعداد سیکل بارگذاری کمتری به زوال می‌رسد. تغییر شکل باعث ایجاد زوال در نمونه‌ها نمی‌شود و جوانه-

زنی و رشد ترک از گوشه‌های تیز گشودگی می‌باشد که موجبات زوال و پاره‌گی را در پوسته فراهم می‌کنند.

۱۲- در پوسته‌های استوانه‌ای در همان سیکل‌های اولیه تغییر شکل کوچکی دیده می‌شد و در سیکل‌های اولیه نیز رفتار نرم‌شوندگی مشاهده می‌شد؛ ولی در پوسته‌های مکعبی سیکل‌های اولیه هیچ رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان نمی‌دهند.

۱۳- پارامترهای C و γ واکنشی متفاوت بر روی رفتار مواد از خود نشان می‌دهند؛ یعنی اینکه افزایش C باعث افزایش سخت‌شوندگی ماده می‌شود. ولی افزایش γ سبب کاهش سخت‌شوندگی ماده و تمایل بیشتر آن به رفتار نرم‌شوندگی دارد. افزایش و کاهش پارامترهای b و Q نیز سبب افزایش زاویه پیچش تا ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک می‌شود. همچنین ملاحظه شد که تغییر در b و Q تغییر زیادی در تعداد سیکل‌های زوال ماده ایجاد نمی‌کند و این تغییر در تعداد سیکل بین ۱۰ تا ۱۴ درصد می‌شود.

۱۴- سرعت ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک و ثابت شدن کرنش‌های پلاستیک در نتایج عددی بیشتر از نتایج تجربی است، پوسته با دامنه مساوی زاویه پیچش در تحلیل عددی در سیکل-هایی به مراتب پایین‌تر دچار زوال می‌شود.

۱۵- نتایج عددی بدست آمده برای پوسته‌های استوانه‌ای همراه با گشودگی نشان داد که وجود گشودگی باعث افزایش سرعت نرم‌شوندگی نمی‌شود. در تحلیل‌های عددی در ابتدای بارگذاری بر خلاف نتایج تجربی رفتار سخت‌شوندگی ملاحظه نمی‌شود. گشودگی تأثیری در رفتار منحنی‌های هیستریزس پوسته‌های استوانه‌ای شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک ندارد. به عبارتی حتی در هنگام گسیختگی اثری از ترک در اطراف گشودگی نمایان نمی‌شود؛ حال آنکه در نتایج تجربی، دلیل اصلی زوال، رشد ترک می‌باشد.

۱۶- تحلیل‌های عددی نشان داد که تغییر طول‌های جزئی و اندک تأثیر زیادی در رفتار نرم-شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای ندارد.

۱۷- تغییر در شکل هندسی پوسته‌های استوانه‌ای تأثیر بسیار زیادی در رفتار نرم‌شوندگی پوسته-ها دارد. این مقدار تغییر به بیش از ۵۰ درصد در مورد دو پوسته استوانه‌ای و پوسته با سطح مقطع مثلثی می‌رسد.

۴-۲- پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌های متعددی که روی پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌های مختلف از نظر مکان هندسی و ... تحت بارگذاری‌های متفاوت انجام گردیده و همچنین مقایسه نتایج تجربی بدست آمده با نتایج عددی شبیه سازی شده توسط نرم‌افزار آباکوس، می‌توان برای ادامه این تحقیق پیشنهادهایی به شرح ذیل را ارائه نمود.

۱- اعمال بارگذاری پیچشی بر روی پوسته‌هایی با سطح مقطع‌های مربعی (پروفیل) به علت نیازمند بودن به فیکسچرهای مخصوص کمتر صورت گرفته است؛ لذا می‌توان رفتار پروفیل‌ها تحت انواع بارگذاری‌ها مورد مقایسه قرار داد.

۲- حل‌های تحلیلی روی پوسته‌های مختلف به علت پیچیدگی‌هایی که به این نوع سازه‌ها در بارگذاری‌های سیکلی از خود نشان می‌دهند، وجود ندارد. روش‌های تحلیلی بیشتر بر روی نمونه‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین معادلات بدست آمده روی همان نمونه‌های استاندارد نیز در مقایسه با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی ندارند. لذا می‌توان در تحقیقات آتی، در مورد معادلات بدست آمده برای مدل‌های سخت‌شوندگی مطالعه کامل‌تری نمود و با تصحیح این روابط، دقت آنها را بالا برد.

۳- برای بدست آوردن پارامترهای ایزوتروپیک و پارامترهای سخت‌شوندگی روش‌های تجربی مختلفی را ارائه کرده‌اند، می‌توان در ادامه برای مقایسه نتایج حاصل از هر یک از این روش‌ها در تحلیل‌های عددی مورد مقایسه قرار داد و بهترین روش را انتخاب و معرفی نمود.

۴- برای اینکه نتایج تجربی بدست آمده روی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری‌های پیچشی کمتر تحت تأثیر لقی‌های ایجاد شده در بین دنده‌های شانه دنده و چرخنده قرار بگیرد، لازم است که از فیکسچرهای پیشرفته‌تری که عامل چرخ دنده را حذف می‌کنند؛ ولی تحت پیچش خالص قرار بگیرد و بار پیچشی خالص را اعمال کند، مانند دستگاه‌های اعمال بار پیچشی INSTRON که نیازمند به توسعه بیشتری جهت ایجاد بار پیچشی برای نمونه‌های

بزرگتر هستند، استفاده کرد یا از استپ موتورهایی جهت ایجاد دوران کمک گرفت که همراه با آن نیاز به یک برنامه دیگر جهت ایجاد بار سیکلی نیز می‌باشد. هرچند که این دستگاه‌ها نیازمند سنسورهایی جهت سنجش بار و ارتباط دهنده این متعلقات به دستگاه اصلی جهت محاسبه و نمایش لحظه‌ای بار و جابجایی هستند.

۵- می‌توان تأثیر نرخ بارگذاری و اثر دما را روی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری‌های تناوبی مورد بررسی قرار داد.

۶- مدل سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک پیشرفته‌ترین مدل پلاستیسیته‌ای می‌باشد که در نرم‌افزار آباکوس، رفتار منحنی‌های هیستریزیس را تحت بارگذاری‌های تناوبی شبیه سازی می‌کند. با این وجود نتایج عددی با استفاده از این مدل باز هم بر نتایج تجربی منطبق نمی‌باشد. می‌توان با استفاده از یک کدنویسی به زبان فرترن و وارد کردن فایل کدنویسی به نرم‌افزار آباکوس، ثابت‌های استفاده شده در معادلات موجود در نرم‌افزار را به تعداد سیکل گذارنده وابسته نمود تا حلقه‌های هیستریزیس شبیه‌سازی شده به نتایج عددی نزدیک‌تر گردند.

۷- می‌توان در نمونه‌ها از ابزارهای اندازه‌گیری جهت اندازه‌گیری مقادیر تنش و کرنش استفاده کرد تا بتوان مقایسه‌ای بین مقادیر تنش و کرنش در وسط نمونه (نقاطی که دچار تغییر شکل می‌شوند) و نقاط غیر مرکزی (که سالم و بدون تغییر شکل باقی می‌مانند) انجام داد. همچنین با استفاده از چند سنسور که بر روی محیط سطح مقطع قرار داد، می‌توان تغییرات سطح مقطع از حالت دایروی را در زمان آزمایش بدست آورد.

۸- می‌توان بررسی‌هایی بر روی پوسته استوانه‌ای ترک‌دار با زاویه‌های مختلف ترک در حالت بارگذاری پیچشی و پیچشی-خمشی انجام داد و نتایج آن که کمتر مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است را بدست آورد و از نتایج آن برای تحقیقات آتی استفاده کرد.

فہرست مراجع

- [1] Sadeler R., Totik Y., Gavghah M., and Kaymaz I, (2004), “Improvements of fatigue behaviour in 2014 Al alloy by Solution heat treating and age-hardening”, *Journal of Materials and Design*, 25, pp. 439-445.
- [2] Hung J., Wu J., and Chiu J.Y., (2004), “Impact failure analysis of re-circulating mechanism in ball screw”, *Journal of Engineering Failure Analysis*, 11, pp. 561-573.
- [3] Nagumo M., Shimura H., Chaya T., Hayashi H., and Ochiai I, (2003), “Fatigue damage and its interaction with hydrogen in martensitic steels”, *Journal of Materials of Science and Engineering*, 348, pp. 192-200.
- [4] Y.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* 24, pp. 1756–1791
- [5] Zhian Xia, D. Kujawski and F. Ellyin, (1996), Effect of mean stress and ratcheting strain on fatigue life of steel, *International Journal of Fatigue* Vol.18 No. 5, pp. 335-341
- [6] Shakedown Image, (2005), *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 82, Issue 6, pp. 427-458.
- [7] Guozheng K., Qing G., Lixun C., Xianjie Y., and Yafang S., (2001), “Experimental Study on Uniaxial and Multiaxial Strain Cycle Characteristics and Ratcheting of 316L Stainless Steel”, *Journal of Materials of Science Technology*, Vol.17, No.2.
- [8] McDowell, D.L., (2000), Modeling and experiments in plasticity. *Journal of Solids and Structures* 37, pp. 293–309.
- [9] Abdel Karim, M., Ohno, N., (2000), Kinematic hardening model suitable for ratcheting with steady-state. *International Journal of Plasticity* 16, pp. 225–240.
- [10] Bari.S, Hassan.T, (2002), An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity* 18, pp. 873–894
- [11] Xia Z., Kujawski D., and Ellyin F., (1995), “Effect of mean stress and ratcheting strain on fatigue life of steel”, *International Journal Fatigue* Vol.18, No 5, pp. 335-341.
- [12] Shariati M., Hatami H., Yarahmadi H., Eipakchi H.R., (2011), “An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading”, *Materials and Design* 34, pp. 302–312.
- [13] Jiao, R., Kyriakides, S., (2009), "Ratcheting, wrinkling and collapse of tubes under axial cycling", *International Journal of Solids and Structures*, Volume 46, Issues 14-15, pp. 2856-2870.
- [14] Hatami H., Shariati M., Damghani Noori M., (2012), “ Experimental investigations on the softening and ratcheting behavior of steel cylindrical shell under cyclic axial loading”, 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2012.
- [15] Gang CH., Shi-Chao SH., Xu CH., Huang Y., (2009), “Ratcheting and fatigue properties of the high-nitrogen steel X13CrMnMoN18-14-3 under cyclic loading”, *Computational Materials Science*.
- [16] Shariati M., Hatami H., (2012), “Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic axial loading”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 58, pp. 35–43
- [17] Gang T., Zihui X., (2007), “Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life”, *Polymer Testing* 26, pp. 451-460.
- [18] Kwofie S., (2006), “Cyclic creep of copper due to axial cyclic and tensile mean stresses”, *Materials Science and Engineering A* 427, pp. 263–267.

[۱۹] شریعتی محمود، یزدان نژاد جواد، تحلیل تجربی رفتار رچتینگ لوله پلی استال تحت بارگذاری متناوب تک محوره و فشار داخلی، مجله علمی پژوهشی دانشگاه امیرکبیر (تحت داوری).

- [20] Farshad, M, (1992), "Designed and analysis of shell structure", Dordrecht: Kluwer.
- [21] Bernasconi, A. Foletti, S. Papadopoulos, I.V. (2008), "A study on combined torsion and axial load fatigue limit tests with stresses of different frequencies", Journal of Fatigue 30, pp. 1430–1440.
- [22] Xue, H.Q. Bathias, C. (2010), "Crack path in torsion loading in very high cycle fatigue regime", Engineering Fracture Mechanics 77, pp.1866–1873.
- [23] Shamsaei, N. Fatemi, A. (2009), "Deformation and fatigue behaviors of case-hardened steels in torsion:Experiments and predictions", International Journal of Fatigue 31, pp.1386–1396.
- [24] Giavotto, V., Poggi, C., Chryssanthopoulos, M., Dowling, P., (1991), "Buckling behavior of composit shells under combined loading", Elsevier Applied Science, pp. 53-60.
- [25] Meyer-Piening, HR, Farshad, M., Geier, B., Zimmermann, R., (2001), "Buckling loads of CFRP composite cylinders under combined axial and torsion loading", Compos Struct, vol.53, pp. 427-435.
- [26] Abreu, L.M.P., Costa, J.D., Ferreira, J.A.M., (2009), "Fatigue behaviour of AlMgSi tubular specimens subjected to bending–torsion loading", International Journal of Fatigue 31, pp. 1327–1336.
- [27] نوروژی، رضا، (۱۳۹۱)، "تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بار مرکب پیچشی-خمشی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مکانیک.
- [28] Zhang, J., Xinhong Shi, Rui Bao, Binjun Fei., (2011), "Tension–torsion high-cycle fatigue failure analysis of 2A12-T4 aluminum alloy with different stress ratios", International Journal of Fatigue 33, pp. 1066–1074.
- [29] Beck J, Kiyomiya O. (2003), "Fundamental pure torsional properties of concrete filled circular steel tubes", J Mater Conc Struct Pavements, JSCE no. 739/V-60. pp. 85–96.
- [30] Lee G, Xu JS, Gong A, Zhang KC., (1991), "Experimental studies on concrete filled steel tubular short columns under compression and torsion. In:Proceedings of the 3rd international conference on steel-concrete composite structures (I)". Fukuoka, Japan: ASCCS; pp. 143–8.
- [31] Xu JS, Zhou J, Lee G., (1991), "Experimental studies on concrete filled steel tubular medium and long columns under compression and torsion.In: Proceedings of the 3rd international conference on steel-concrete composite structures (I)", Fukuoka, Japan,. pp. 159–64.
- [32] Fumiko K.,Akiyoshi I., Yasuhide A., (1999), "Ratcheting deformation of advanced 316 steel under creep-plasticity condition", Nuclear Engineering and Design, Vol.193, pp. 326-327
- [33] Chen X., Jiao R., Soo kim K., (2005), "on the ohno-wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel", International Journal Plasticity, Vol,21, pp. 161-184.
- [34] Ferry L., Perreux D., Varchan D., Sicotb N.,(1999), "Fatigue behavior of composite bars subjected to bending and torsion", Composite Science and Technology, Vol 59, pp. 575-582
- [35] Instron Model 8802,8803,8804,8805 and 8806, Reference Manual-pre-Installation
- [36] ASTM E8/E8M-11, Standard Test Methods for Tension of metallic Materials.

- [37] Wang J., Jiang G., Yu X., Derg T., Zhang Y., (2008), "Determination and analysis of torsion equivalent stress- equivalentstrain relation of low carbon alloy", International Conference on Experimental Mechanics 2008.
- [38] AK Steel 316/316L Stainless Steel Product Description.
- [39] Shigley J.E., (2006), "Shigley's Mechanical Engineering Design", Eighth Edition, McGraw- Hill, pp. 683-689.
- [40] Kulkarni S.C., Desai Y.M., Kant T., Reddy G.R., Parulekar Y., and Vaze K.K., (2003), "Uniaxial and biaxial ratcheting study of SA333 Gr.6 steel at room temperature", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.80, pp. 179-185.
- [41] Boller C., and Seeger T., (1987), "Materials data for cyclic loading", Amsterdam, Elsevier. [۴۲]
 حاتمی، حسین، (۱۳۹۰)، "تحلیل عددی و تجربی عمر کماتش پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی دایروی تحت بار محوری تناوبی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مکانیک
- [43] Xue H.Q., Bathias C., (2010), "Crack path in torsion loading in very high cycle fatigue regime", Engineering Fracture Mechanics 77, p.p. 1866–1873.
- [44] Shmasaei N., Fatemi A., (2009), "Deformation and fatigue behaviors of case-hardened steels in torsion: Experiments and predictions", International Journal of Fatigue 31, pp.1386–1396.
- [45] Zhang J., Shi X., Bao R., Fei B., (2011), "Tension–torsion high-cycle fatigue failure analysis of 2A12-T4 aluminum alloy with different stress ratios", International Journal of Fatigue 33, pp.1066-1074.
- [46] Owen D.R.J., and Hinton F., (1980), "Finite elements in plasticity-theory and practice", Pieneridge Press Ltd.
- [47] ABAQUS Theory manual, (2009), v6.9.1, section 4.3.5: models for metals subjected to cyclic loading.
- [48] ABAQUS Theory manual, (2009), v6.9.1, section 19.2.2: models for metals subjected to cyclic loading.
- [49] ABAQUS Theory manual, (2009), v6.9.1, section 22.2.2.3: models for metals subjected to cyclic loading.
- [50] Zeinoddini M., Peykanu M., (2011), "Strain ratcheting of steel tubulars with a rectangular defect under axial cycling: A numerical modeling" Journal of Constructional Steel Research 67, pp.1872–1883.
- [51] Lee JH, Kim SK, Lee JB, Yang YS, Yoo MJ. (2007), "A numerical simulation model of cyclic hardening behaviour of AC4C-T6 for LNG cargo pump using finite element analysis". Journal of Loss Prev Process Ind; 22: pp. 889–96.
- [52] Marcio, Costa Araújo, (2002), "Non-linear kinematic hardening model for multiaxial cyclic plasticity" Louisiana State University Brazil, The Department of Civil and Environmental Engineering.

واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی

Linear	خطی	Element	المان
Amplitude	دامنه	Finite Element	المان محدود
Relaxation	رها سازی	Accumulation of Residual Plastic Strain	انباشت کرنش پلاستیک باقی مانده
Approximate Ritz Method	روش تقریبی ریتز	Isotropic	ایزوتروپیک
Angle	زاویه	INSTRON	اینسترون
Hardening	سخت شوندگی	ABAQUS	آباکوس
Kinematic	سینماتیک	Back Stress	پارامتر سختی کششی معادل
Length	طول	Shell	پوسته
Extensometer	طول سنج	Torsional	پیچشی
Numerical	عددی	Experimental	تجربی
Pragger Rule	قانون پراگر	Crack	ترک
Strain	کرنش	Finite Difference	تفاضل محدود
Node	گره	Stress	تنش
Failure	گسیختگی	Cycle	سیکل
Torque	گشتاور	Finite Volume	حجم محدود
Cutout	گشودگی	Fatigue	خستگی
Quadratic	مرتبه دوم	High Cycle Fatigue	خستگی پر تکرار
		Low Cycle Fatigue	خستگی کم تکرار

واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی

ABAQUS	آباکوس	High Cycle Fatigue	خستگی پر چرخه
Accumulation of Residual Plastic Strain	انباشت کرنش پلاستیک باقی مانده	INSTRON	اینسترون
Amplitude	دامنه	Isotropic	ایزوتروپیک
Angle	زاویه	Kinematic	سینماتیک
Approximate Ritz Method	روش تقریبی ریتز	Length	طول
Back Stress	پارامتر سختی کششی معادل	Linear	خطی
Crack	ترک	Low Cycle Fatigue	خستگی کم چرخه
Cutout	گشودگی	Node	گره
Cycle	چرخه	Numerical	عددی
Element	المان	Pragger Rule	قانون پراگر
Experimental	تجربی	Quadratic	مرتبه دوم
Extensometer	طول سنج	Relaxation	رها سازی
Failure	گسیختگی	Shell	پوسته
Fatigue	خستگی	Stress	تنش
Finite Difference	تفاضل محدود	Strain	کرنش
Finite Element	المان محدود	Torque	گشتاور
Finite Volume	حجم محدود	Torsional	پیچشی
Hardening	سخت شونده‌گی		

Abstract

This study analyses softening and ratcheting behaviour of Stainless Steel 316 cylindrical shell and St37 cubic shell under pure torsion loading in the form of torque-control and angle of torsion-control. Experimental tests were performed by a servo-hydraulic INSTRON 8802 machine, with use of special fixture converting linear movement to rotational movement. Numerical analysis has been conducted by the combined Chaboche and kinematic model; and accuracy of results were compared with experimental results. Under torsion-control loading with non-zero mean stress, permanent and plastic deformation in successive cycles were accumulated then ratcheting will be observed. Under angle of torsion-control, softening behaviour observed. Softening behaviour in clockwise rotation due to initial rotation is more. Influence of cutout on behaviour of hysteresis loop of prismatic shells under torsion and angle of torsion-control has been studied. It was observed that cutout increase the rate of ratcheting strain. After several cycle of loading, the crack branch and then started to growth and finally lead to decay shells. Softening behaviour can be simulated by isotropic/kinematic model, but this model could not simulate ratcheting behaviour.

Keywords: cylindrical shell, cubic shell, torsion loading, ratcheting, softening, cutout



Shahrood University of Technology
Department of Mechanical Engineering

**Numerical and experimental analysis of ratcheting behavior of steel
prismatic shells with circular and square cutout under torsional loading**

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in Mechanical Engineering, Applied Design

By :

Hadi Golmakani

Supervisors:

Dr. Mahmoud Shariati

Dr. Hamid Reza Epakchi

Winter 2013