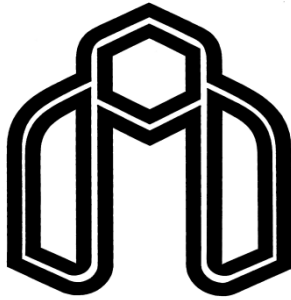


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک  
گروه طراحی کاربردی

تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای  
فولادی با و بدون گشودگی تحت بارگذاری مرکب و محوری  
تناوبی

دانشجو:

کمال کلاسنگیانی

اساتید راهنما:

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمیدرضا ایپکچی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهار ۱۳۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره :  
تاریخ :  
ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای کمال کلاسنگیانی رشته مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای با و بدون گشودگی تحت بارگذاری مرکب تناوبی که در تاریخ ۱۳۹۲/۳/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی) امتیاز: ۲۰  / ۲۰  
 مردود  دفاع مجدد

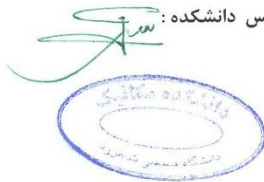
۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

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- استاد راهنما	دکتر حمیدرضا ایپک چی	دانشیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مجید محمدی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	

رئیس دانشکده:



تقدیم به

خانواده ام کہ بہترینند.



## تشکر و قدردانی

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

## تعهد نامه

اینجانب کمال کلاسنگیانی 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 پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با و بدون گشودگی تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی" تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا ایپکچی متعهد می‌شوم:

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

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 نمی‌باشد.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

1- Shariati. M., **Kolasangiani. K.**, “ Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic combined and uniaxial loading“ . *Theoretical and Applied Fracture Mechanics, submitted.*

2-Shariati. M., **Kolasangiani. K.**, Akbarpour. A., Fereidoon. A., “ Study on Buckling of Steel Cylindrical Shells with an Elliptical Cutout under Combined Loading“ . *JCARME, Accepted.*

3-Shariati. M., **Kolasangiani. K.**, Epakchi. H.R., Chavoshan. H., “ Numerical and experimental study on ratcheting behavior of steel cylindrical shells with/without cutout under cyclic combined and axial loading“ . *Journal of Solid Mechanics, Accepted.*

۴-محمود شریعتی، کمال کلاسنگیانی، حمید چاوشان، " تحلیل تجربی رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای فولادی ضدزنگ SS304L تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی"، فنی مهندسی مدرس-مکانیک، پذیرفته شده است.



## چکیده

در این تحقیق، به مطالعه‌ی تجربی و عددی رفتار کمانش و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری مرکب و محوری پرداخته شده است. در تحلیل رچتینگ، پوسته‌های استوانه‌ای به دو صورت عمودی و مایل تحت زاویه  $20^\circ$  قرار گرفته و بار تناوبی با نیروی میانگین غیرصفر در شرایط نیرو-کنترل به انتهای آنها اعمال می‌شود و در نتیجه انباشتگی کرنش پلاستیک یا پدیده‌ی رچتینگ مشاهده شد. آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شد. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل پیشرفته سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک انجام شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این تحقیق اثر طول پوسته استوانه‌ای مایل، زاویه پوسته استوانه‌ای و تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج، گشتاور خمشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انرژی اتلافی و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک دارد. مشاهده شد که در پوسته استوانه‌ای مایل در مقایسه با پوسته استوانه-ای عمودی به دلیل وجود گشتاور خمشی در مقاطع مختلف پوسته استوانه‌ای مایل، تغییرشکل پلاستیک و انباشتگی آن بیشتر است. در بارگذاری تک مرحله‌ای، رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک و نرخ تغییر شکل پلاستیک مشاهده شد. در بررسی تاریخچه‌ی بارگذاری پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب، پیش بارهای اعمالی در بارگذاری چند مرحله‌ای باعث مهار رفتار رچتینگ و توقف انباشتگی تغییرشکل پلاستیک در بارگذاری‌های سیکلی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شوند. همچنین تأثیر گشودگی دایروی بر پوسته‌های استوانه‌ای تحت این نوع بارگذاری‌ها مورد تحلیل قرار گرفته و مشاهده شد که ایجاد گشودگی باعث افزایش تغییرشکل پلاستیک و نرخ آن می‌شود. بررسی کمانش پوسته‌ها به صورت عددی انجام شد و مشاهده شد که برای پوسته‌های استوانه‌ای مایل با گشودگی بیضوی، با افزایش عرض گشودگی بیضوی، بار کمانش کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول پوسته استوانه‌ای مایل، بار کمانش کاهش می‌یابد.

**کلید واژه:** پوسته استوانه‌ای، تحلیل عددی و تجربی، رجتینگ و کمانش، بارگذاری مرکب و محوری، گشودگی.

فهرست علائم و نشانه‌ها.....	ل
<b>فصل ۱. پوسته‌ها و کاربردهای آنها.....</b>	<b>۱</b>
۱-۱- تعریف پوسته‌ها.....	۲
۲-۱- کاربرد پوسته‌ها.....	۲
۳-۱- مکانیک شکست.....	۳
۴-۱- تاریخچه مکانیک شکست.....	۳
۵-۱- مقدمه‌ای بر کمانش.....	۶
۶-۱- مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه کمانش پوسته‌ها.....	۷
<b>فصل ۲. بارگذاری سیکلی.....</b>	<b>۱۱</b>
۱-۲- خستگی و رچتینگ.....	۱۲
۲-۲- تاریخچه.....	۱۵
۳-۲- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه رچتینگ.....	۱۶
۴-۲- جمع بندی.....	۲۴
<b>فصل ۳. تحلیل تجربی.....</b>	<b>۲۵</b>
۱-۳- مقدمه درباره آزمایش‌های انجام شده.....	۲۶
۲-۳- دستگاه آزمایش.....	۲۶
۳-۳- آزمایش کشش استاندارد.....	۲۶
۴-۳- هندسه و خواص مکانیکی پوسته‌ها.....	۲۸
۵-۳- انرژی و رابطه‌ی آن با نرخ تغییرشکل پلاستیک.....	۲۹
۶-۳- بارگذاری مرکب.....	۳۲
۱-۶-۳- شرایط مرزی.....	۳۳
۲-۶-۳- انتخاب نوع جوش.....	۳۵
۳-۶-۳- تأثیر طول پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ پوسته‌ها.....	۳۸
۴-۶-۳- اشباع جابجایی رچتینگ.....	۴۰
۵-۶-۳- تأثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای مایل تحت بارگذاری مرکب.....	۴۱
۶-۶-۳- انرژی پلاستیک و رابطه‌ی آن با نرخ جابجایی رچتینگ.....	۴۴
۷-۶-۳- تأثیر وجود گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آنها تحت بارگذاری مرکب.....	۵۰
۷-۳- بارگذاری محوری و مقایسه بین بارگذاری محوری و مرکب.....	۵۳

۳-۷-۱- تأثیر وجود گشودگی در پوسته های استوانه ای بر رفتار رچتینگ آنها تحت بارگذاری محوری.....	۵۳
۳-۷-۲- تأثیر زاویه ی پوسته استوانه ای بر رفتار رچتینگ آن .....	۵۶
۳-۷-۳- تأثیر زاویه ی پوسته استوانه ای بر انرژی پلاستیک آن و رابطه ی بین انرژی پلاستیک و نرخ جابجایی رچتینگ .....	۵۸
۳-۸- نتیجه گیری .....	۶۲
<b>فصل ۴. تحلیل عددی رفتار کمانش و رچتینگ پوسته های استوانه ای و مقایسه نتایج عددی و تجربی.....</b>	
۴-۱- مقدمه ای در رابطه با تحلیل عددی .....	۶۷
۴-۱-۱- روش های اجزاء محدود.....	۶۷
۴-۱-۲- معرفی نرم افزار Abaqus/CAE.....	۶۹
۴-۲- کمانش در آباکوس .....	۷۰
۴-۲-۱- تحلیل باکل .....	۷۰
۴-۲-۲- تحلیل استاتیک-ریکس .....	۷۱
۴-۲-۳- تحلیل عددی .....	۷۱
۴-۲-۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای .....	۷۵
۴-۲-۵- تأثیر تغییر عرض گشودگی بیضوی بر روی بار کمانش پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری مرکب .....	۷۸
۴-۲-۶- تأثیر موقعیت گشودگی بیضوی بر رفتار کمانش پوسته استوانه ای تحت بارگذاری مرکب..	۸۰
۴-۲-۷- تأثیر تغییر ابعاد گشودگی های بیضوی با مساحت ثابت بر رفتار کمانش پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری مرکب .....	۸۱
۴-۲-۸- تأثیر تغییر زاویه گشودگی بر روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری مرکب.....	۸۲
۴-۲-۹- تأثیر تغییر ابعاد گشودگی های مستطیلی با مساحت ثابت بر رفتار کمانش پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری مرکب .....	۸۳
۴-۲-۱۰- تأثیر طول پوسته استوانه ای مایل بر رفتار کمانش آن تحت بارگذاری مرکب.....	۸۴
۴-۳- خستگی کم چرخه در آباکوس .....	۸۵
۴-۳-۱- تحلیل عددی .....	۸۹
۴-۳-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای SS304L.....	۹۱
۴-۳-۳- تأثیر طول پوسته استوانه ای مایل بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری مرکب در تحلیل عددی.....	۹۴
۴-۳-۴- تأثیر زاویه ی پوسته استوانه ای بر رفتار رچتینگ آن در تحلیل عددی.....	۹۵

۴-۳-۵- تأثیر وجود گشودگی در میانه ی پوسته استوانه ای بر رفتار رجتینگ آن تحت بارگذاری	
مرکب و محوری تناوبی در تحلیل عددی .....	۹۷
۴-۴- نتیجه گیری .....	۱۰۰
<b>فصل ۵. نتیجه گیری و پیشنهاد ها.....</b>	<b>۱۰۲</b>
۵-۱- نتیجه گیری .....	۱۰۴
۵-۲- پیشنهادها .....	۱۰۹
مراجع.....	۱۱۰
واژه نامه فارسی به انگلیسی.....	۱۱۵
واژه نامه انگلیسی به فارسی.....	۱۱۶

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تنش زمينه	$\alpha$
تنش تسليم	$\sigma_y$
تنش تسليم اوليه	$\hat{\sigma}_0$
تنش تسليم جاري	$\sigma^0$
تنش نهايي	$S_u$
ثابت ماده	b
ثابت ماده	C
ثابت ماده	$\gamma$
ثابت ماده	$Q_\infty$
تانسور تنش انحرافي	S
مدول سخت شونده‌گی سینماتیک	C
مدول يانگ	E
نسبت پواسون	$\nu$
نیروی میانگین	$F_m$
ضخامت پوسته استوانه‌ای	t
قطر خارجي پوسته استوانه‌ای	D
طول پوسته استوانه‌ای	L
جابجایی رچتینگ	$\delta_{max}$
کرنش پلاستیک	$\varepsilon^{pl}$
دامنه نیرو	$F_a$
کرنش رچتینگ	$\varepsilon_r$

$\epsilon_{max}$	بیشترین کرنش
$\epsilon_{min}$	کمترین کرنش
$\epsilon_{real}$	کرنش حقیقی
$\sigma_{real}$	تنش حقیقی
$\epsilon_{Eng}$	کرنش مهندسی
$\sigma_{Eng}$	تنش مهندسی
$L_{eff}$	طول مؤثر پوسته استوانه‌ای
$\sigma_m$	تنش میانگین
$\sigma_a$	دامنه تنش
$w_p$	انرژی پلاستیک در هر سیکل
N	تعداد سیکل
$L_0$	فاصله مرکز گشودگی تا انتهای پایینی پوسته استوانه‌ای

## فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

### فصل دوم

- شکل (۱-۲) مسیر بارگذاری در آزمایش رچتینگ [۱۰] ..... ۱۳
- شکل (۲-۲) چهار پدیده ی احتمالی از پلاستیسیته سیکلی [۱۱] ..... ۱۴
- شکل (۳-۲) تعریف پارامترهای مختلف در آزمایش رچتینگ [۱۲] ..... ۱۵
- شکل (۴-۲) پارامترهای هندسی پوسته استوانه ای مایل در بررسی رفتار خستگی توسط ویب و همکاران [۱۸] ..... ۱۷

### فصل سوم

- شکل (۱-۳) دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و استفاده از طول سنج برای تست کشش استاندارد ..... ۲۷
- شکل (۲-۳) نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش کشش استاندارد برای فولاد SS304L ..... ۲۷
- شکل (۳-۳) انرژی هیستریزس: پلاستیک و الاستیک انرژی ..... ۲۹
- شکل (۴-۳) منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش پوسته های استوانه ای مایل با طول موثر ۲۰۰mm تحت زاویه ۲۰ درجه با بارگذاری ساده ..... ۳۳
- شکل (۵-۳) شماتیکی از نحوه اتصال پوسته استوانه ای به فیکسچر با استفاده از پیچ های رزوه شده در بارگذاری مرکب ..... ۳۴
- شکل (۶-۳) الف) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه در بارگذاری مرکب، ب) بارهای ایجاد شده در مقطع پوسته استوانه ای در بارگذاری مرکب (V نیروی برشی، F نیروی محوری و M گشتاور خمشی) ..... ۳۵
- شکل (۷-۳) دستگاه اینسترون و پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۳۶
- شکل (۸-۳) کشیدگی از ابتدای طول مؤثر پوسته و استفاده از مهره برای جلوگیری از چرخش پوسته استوانه ای ..... ۳۷
- شکل (۹-۳) شکست پوسته در جوش های برق و آرگون ..... ۳۷
- شکل (۱۰-۳) رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۳۸
- شکل (۱۱-۳) جابجایی رچتینگ پوسته بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول های مختلف تحت بارگذاری مرکب تناوبی در آزمایش های تجربی ..... ۳۹
- شکل (۱۲-۳) چند نمونه پوسته استوانه ای آزمایش شده تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۰
- شکل (۱۳-۳) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۱



- شکل (۳-۱۴) اثر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۲۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۳
- شکل (۳-۱۵) تصویر TEM نشان دهنده ی چگالی نابجایی ها برای نمونه آلیاژ آلومینیم پس از انجام آزمایش تحت بارگذاری سیکلی با شرایط بارگذاری  $\sigma_m = 10 \text{ MPa}$  (الف)،  $\sigma_a = 130 \text{ MPa}$  (ب)  $\sigma_a = 150 \text{ MPa}$  [۱۰] ..... ۴۴
- شکل (۳-۱۶) انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰m و ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۵
- شکل (۳-۱۷) چگالی انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm و ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۶
- شکل (۳-۱۸) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۷
- شکل (۳-۱۹) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm و ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۷
- شکل (۳-۲۰) اختلاف شیب منحنی انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm و ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۴۸
- شکل (۳-۲۱) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۲۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی چند مرحله ای ..... ۵۰
- شکل (۳-۲۲) گشودگی دایروی در میانه ی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۵۱
- شکل (۳-۲۳) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm با و بدون گشودگی دایروی تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۵۲
- شکل (۳-۲۴) شکست پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm از محل گشودگی تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۵۲
- شکل (۳-۲۵) دستگاه اینسترون و پوسته استوانه ای تحت بارگذاری محوری تناوبی ..... ۵۴
- شکل (۳-۲۶) رفتار پوسته های استوانه ای با گشودگی دایروی در میانه ی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری محوری تناوبی، (الف) قبل از آزمایش، (ب) در حین آزمایش، (پ) پس از آزمایش ..... ۵۵
- شکل (۳-۲۷) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm با و بدون گشودگی دایروی تحت بارگذاری محوری تناوبی ..... ۵۵
- شکل (۳-۲۸) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۲۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۵۶
- شکل (۳-۲۹) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۵۷
- شکل (۳-۳۰) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۵۷

- شکل (۳-۳۱) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۵۸
- شکل (۳-۳۲) انرژي پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۵۹
- شکل (۳-۳۳) انرژي پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۵۹
- شکل (۳-۳۴) انرژي پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۲۰۰mm تحت بارگذاری محوری تناوبی ..... ۶۰
- شکل (۳-۳۵) انرژي پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری محوری تناوبی ..... ۶۱
- شکل (۳-۳۶) انرژي پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری محوری تناوبی ..... ۶۱
- شکل (۳-۳۷) اختلاف شیب منحنی انرژي پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۶۲

#### فصل چهارم

- شکل (۴-۱) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه ..... ۷۳
- شکل (۴-۲) منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک [۵۰] ..... ۷۳
- شکل (۴-۳) بار کمانش بر حسب اندازه المان اطراف گشودگی بیضوی برای نمونه D42-L250-L0175-a18-b26 ..... ۷۴
- شکل (۴-۴) سه مود اول کمانشی برای نمونه D42-L250-L0175-a18-b22 (الف) مود اول (ب) مود دوم (ج) مود سوم ..... ۷۴
- شکل (۴-۵) هندسه پوسته استوانه ای، (الف) با گشودگی مستطیلی، (ب) با گشودگی بیضوی ..... ۷۵
- شکل (۴-۶) فیکسچر استفاده شده در حین بارگذاری مرکب بر روی نمونه در آزمایش کمانش در مرجع [۵۰] ..... ۷۶
- شکل (۴-۷) مقایسه نتایج عددی و تجربی منحنی بار- فشردگی انتهایی برای نمونه D42-L250-L0125-a18-b22 ..... ۷۷
- شکل (۴-۸) مقایسه نتایج عددی و تجربی منحنی بار-فشردگی انتهایی برای نمونه D42-L250-L0125-a18-b26 ..... ۷۷
- شکل (۴-۹) منحنی بار بر حسب جابجایی انتهایی برای نمونه های با D42-L250-a18-b26 با گشودگی بیضوی در موقعیتهای مختلف و بدون گشودگی (ب) تنش وان میزز در سه لحظه برای نمونه D42-L250-L0125-a18-b26 ..... ۷۹
- شکل (۴-۱۰) منحنی بار کمانش بر حسب نسبت عرض گشودگی بیضوی با ارتفاع ثابت در موقعیت های مختلف ..... ۸۰

- شکل (۴-۱۱) منحنی بار کمانش بر حسب موقعیت گشودگی بیضوی با اندازه های مختلف برای پوسته های استوانه ای ..... ۸۱
- شکل (۴-۱۲) منحنی بار کمانش بر حسب نسبت ابعاد گشودگی بیضوی در موقعیت های مختلف ... ۸۲
- شکل (۴-۱۳) منحنی بار کمانش بر حسب موقعیت گشودگی بیضوی برای پوسته های استوانه ای با زاویه گشودگی مختلف ..... ۸۳
- شکل (۴-۱۴) منحنی بار کمانش بر نسبت ابعاد گشودگی مستطیلی برای پوسته های استوانه ای با گشودگی مستطیلی در میانه پوسته ..... ۸۴
- شکل (۴-۱۵) منحنی بار کمانش بر حسب طول پوسته استوانه ای تحت بارگذاری مرکب ..... ۸۵
- شکل (۴-۱۶) نیم سیکل نخست تست کشش یک بعدی [۵۰] ..... ۸۸
- شکل (۴-۱۷) پوسته های استوانه ای مدل شده در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی ..... ۹۰
- شکل (۴-۱۸) پوسته استوانه ای المان بندی شده ..... ۹۱
- شکل (۴-۱۹) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۹۲
- شکل (۴-۲۰) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۹۲
- شکل (۴-۲۱) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۲۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۹۳
- شکل (۴-۲۲) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری محوری تناوبی ..... ۹۳
- شکل (۴-۲۳) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی ..... ۹۴
- شکل (۴-۲۴) جابجایی رچتینگ پوسته بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول های مختلف تحت بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی ..... ۹۵
- شکل (۴-۲۵) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۲۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی ..... ۹۶
- شکل (۴-۲۶) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی ..... ۹۶
- شکل (۴-۲۷) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی ..... ۹۷
- شکل (۴-۲۸) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با و بدون گشودگی دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری محوری تناوبی در نتایج عددی ..... ۹۸

- شکل (۴-۲۹) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با و بدون  
گشودگی دایروی با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی ..... ۹۹
- شکل (۴-۳۰) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با و بدون  
گشودگی دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی ..... ۹۹
- شکل (۴-۳۱) کانتور تنش وان میزز برای پوسته استوانه ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر  
۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی در سیکل ۵..... ۱۰۰

## فهرست جداول

جدول (۱-۳) مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS304L ..... ۲۸

جدول (۱-۴) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی بار کمانش برای پوسته های استوانه ای  
با گشودگی بیضوی..... ۷۶

## فصل ۱

# پوسته ها و کاربرد آنها

### ۱-۱- تعریف پوسته‌ها

ورق‌ها و پوسته‌ها سازه‌هایی هستند که شکل اولیه آنها به ترتیب تخت و خمیده می‌باشد و ضخامت آنها نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچک‌تر است. معیاری که برای تعریف یک ورق یا پوسته نازک به کار برده می‌شود، این است که باید نسبت ضخامت به طول ضلع کوچک‌تر ورق کمتر از  $0/05$  باشد. این نسبت در مواردی به کمتر از  $0/01$  نیز می‌رسد [۱].

### ۱-۲- کاربرد پوسته‌ها

امروزه پوسته‌ها و ورق‌ها بخش اعظمی از سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده‌اند. پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد، کاربرد گسترده‌ای در صنایع دارند. این خواص ناشی از طبیعت هندسی و مادی پوسته است. سازه‌های پوسته‌ای از نظر تحمل بارهای فشاری و ضربه‌ای از بهترین سازه‌ها به شمار می‌روند و به همین دلیل در طبیعت نیز پوشش اندام گیاهان و جانوران ماهیت پوسته‌ای دارد. با درک ویژگی‌های سازه‌های پوسته‌ای از جمله قدرت تحمل بار، استحکام بالا و راحتی ساخت، مهندسان، همواره از سازه‌های پوسته‌ای در طراحی و ساخت سازه‌های مختلف استفاده می‌کنند. از کاربردهای پوسته‌ها می‌توان در سازه‌های هوایی برای بدنه هواپیماها، روکش بال و دم هواپیما، بدنه‌ی موشک و ... اشاره کرد. استفاده از ورق‌ها و پوسته‌ها در صنایع دیگر نظیر خودروسازی، شناورسازی، مخازن نفت و گاز در صنایع پتروشیمی، خطوط لوله، مخازن نگهداری مایعات و سیلوهای انبار دانه‌های نباتات و غلات، مخازن تحت فشار، سرپوش‌ها یا کله‌گی‌ها، و غیره رایج است.

در این پژوهش حالت خاصی از پوسته‌های متقارن محوری یعنی پوسته‌های استوانه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد. همان گونه که بیان شد این نوع پوسته‌ها در سازه‌هایی مانند بدنه موشک‌ها، بالگردها، هواپیماها، پایه‌ی سکوها، دریایی، کندانسور و دودکش نیروگاه‌ها و تجهیزات ورزشی استفاده فراوان دارند.

این سازه‌ها در طول عمر خود ممکن است تحت بارهای محوری و مرکب تناوبی قرار بگیرند. همچنین، این اجزا بیشتر در برخی قسمت‌ها ناپیوستگی‌هایی مانند گشودگی‌ها دارند که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در پایداری سازه‌ها تاثیرگذار باشند. برای طراحی یک پوسته استوانه‌ای تحت بار فشاری لازم است باری که پوسته تحت آن بار کمانش می‌کند، محاسبه شود. کمانش به مفهوم تغییر شکل ناگهانی سازه در برابر بار وارده به آن است. این بار بیشتر به صورت فشاری به سازه اعمال می‌گردد. اگر چه برای محاسبه بار کمانش پوسته استوانه‌ای پژوهش‌های گوناگونی انجام شده است، اما تاکنون رابطه دقیقی برای محاسبه بار بحرانی کمانش ارائه نشده است و روابط موجود با کمک فرضیات ساده کننده، حاصل شده‌اند. همچنین به علت پیچیدگی معادلات و شرایط مرزی حاکم بر پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، تاکنون رابطه‌ی دقیقی برای بار کمانش این پوسته‌ها ارائه نشده است و پژوهش‌های انجام شده در این زمینه محدود به روش‌های عددی و تجربی هستند. در ادامه مروری بر کارهای صورت گرفته در این زمینه، ارائه خواهد شد.

### ۱-۳- مکانیک شکست

مکانیک شکست یکی از علوم مهندسی است که به بررسی شکست در مواد مختلف می‌پردازد و روش‌های طراحی برای عملکرد مطمئن سازه و یا قطعات ماشین را ارائه می‌نماید. این علم دارای کاربرد-های فراوان و گسترده‌ای در طراحی قطعات سازه‌ها و ماشین‌آلات مربوط به صنایع مختلف می‌باشد. از جمله این صنایع می‌توان به صنایع نیروگاهی، خودروسازی، کشتی‌سازی، هوافضا و غیره اشاره نمود. امروزه قریب به اتفاق طراحی‌ها در زمینه‌های مختلف مهندسی بر اساس دانش مکانیک شکست انجام می‌گیرد و سازه‌های طراحی شده به روش‌های دیگر، به منظور اطمینان از ایمنی و کارایی لازم، با روش‌های مکانیک شکست مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرند.

### ۱-۴- تاریخچه مکانیک شکست



اگر چه امروزه تعداد مواردی که سازه‌ها بر اثر شکست ترد به طور ناگهانی گسیخته می‌گردند، اندک است؛ ولیکن هنوز شکست ترد و ناگهانی سازه‌ها گاهی اتفاق می‌افتد. لذا این امر هنوز به عنوان یک تهدید جدی برای سازه‌ها خصوصا سازه‌های حساس و مهم مانند سازه‌ی هواپیما، پل‌ها، سازه‌های نیروگاهی و ... مطرح است. تاریخچه شکست سازه‌ها در حین کار به سال‌های گذشته و خیلی دور بر می‌گردد. شنک<sup>۱</sup> و پارکر<sup>۲</sup> مروری بر تاریخچه شکست ترد را از اوایل سال ۱۸۰۰ میلادی ارائه داده و موارد متعددی از بروز شکست‌های ترد و ناگهانی در سازه‌ها را تشریح نموده‌اند.

در سال ۱۸۸۶ میلادی یک لوله عمودی به طول ۲۵۰ فوت در حین آزمایش هیدرواستاتیک در کشور انگلستان گسیخته شد. در همان سال‌ها موارد دیگری از شکست ناگهانی در برخی از مخازن آب، روغن و گاز که در آنها از پرچ استفاده شده بود، گزارش گردید. در بسیاری از موارد گزارش شده، ماده مورد استفاده دارای استحکام کششی کافی (بر اساس آزمایشات کشش نمونه) بوده است. یکی از موارد شکست ناگهانی، مربوط به تانکر عظیم شیره قند بود. این مخزن حاوی ۲۳۰۰۰۰۰ گالن شیره قند بوده است که به طور ناگهانی گسیخته شده و طی آن ۱۲ نفر کشته و ۴۰ نفر مجروح شدند و همچنین آسیب‌های اقتصادی زیادی به خانه‌ها، ریل راه آهن و دیگر تاسیسات مجاور وارد گردید. در این مورد تیم بررسی سانحه متشکل از مهندسان و طراحان مجرب پس از مدت‌ها بررسی دقیق و انجام آزمایشاتی، علت شکست را ایجاد تنش بیشتر در مخزن نسبت به مقادیر محاسبه شده از فرمول‌های ساده مقاومت مصالح تشخیص دادند.

قبل از جنگ جهانی دوم، گزارش‌های متعددی از شکست پل‌ها در بارهای نسبتا کم، وجود دارد که در اغلب آنها شکست در درجه حرارت پایین به صورت ترد و ناگهانی اتفاق افتاده است. بررسی‌های کارشناسی نشان داد که در بیشتر موارد شکست از محل‌های جوشکاری شده شروع شده است. همچنین آزمایش‌های شکست نمونه از نوع شارپی نیز نشان داد که فولادهای مورد استفاده در درجه

<sup>1</sup> Shank

<sup>2</sup> Parker

حرارت محیط، هنگام شکست دارای رفتاری ترد گونه بوده‌اند.

علاوه بر شکست‌های اتفاق افتاده در مخازن و پل‌ها، می‌توان گفت که در گذشته بیشترین شکست‌های ترد و ترک خوردگی‌ها در کشتی‌های فلزی رخ داده است. از حدود ۵۰۰۰ کشتی تجاری که در زمان جنگ دوم جهانی ساخته شد، سازه‌ی بیش از ۱۰۰۰ کشتی قبل از سال ۱۹۴۶ شکسته یا دارای ترک با اندازه قابل توجه بوده است. بین سال‌های ۱۹۴۲ تا ۱۹۵۲ بیش از ۲۰۰ فروند کشتی در اثر شکست سازه از خدمت بر کنار و یا تحت تعمیرات کلی قرار گرفتند. از این بین، ۲۰ کشتی در اثر شکست به دو نیم شده‌اند. در اغلب موارد نیز مشاهده گردید که ترک از نقاط گوشه و محل‌هایی که تنش در آن‌ها متمرکز بوده، شروع شده است. در طی این سال‌ها، تعدادی کشتی‌های بزرگ تانکر نیز بر اساس شکست سازه از بین رفته‌اند.

در آن زمان با گرد نمودن گوشه‌های تیز و از میان برداشتن گوشه‌های بریده‌ی چهار گوش و همچنین افزودن قطعاتی به عنوان متوقف کننده‌ی ترک توسط پرچ به مناطق نزدیک به محل‌های تمرکز تنش تا حدودی مشکل شکست ناگهانی سازه کشتی‌ها حل شد. در برخی از موارد نیز ترک از محل‌های جوشکاری شده شروع به رشد می‌نمود. از بررسی‌های صورت گرفته مشخص گردید که در جوشکاری‌های انجام شده، که اغلب توسط افراد غیر متخصص انجام می‌گرفت، شکاف‌ها و ترک‌های متعدد ایجاد می‌گردید. با افزایش کیفیت جوشکاری و طراحی صحیح جوش، تعداد ناپیوستگی‌ها در جوش به میزان قابل توجهی کاهش یافت و منجر به تقلیل قابل توجه شکست‌ها گردید. در تمامی این موارد، نقص طراحی به عنوان یک عامل مهم در شکست مطرح بود و مشاهده شد که با انجام صحیح طراحی، افزودن متوقف کننده ترک در محل‌های بحرانی از نظر شکست، بالا بردن کیفیت ساخت و تولید و انتخاب درست ماده از نظر ترکیب شیمیایی می‌توان تعداد شکست‌های ترد ناگهانی را کاهش داد. با در نظر گرفتن این نکات، تعداد شکست‌های ترد در کشتی‌ها در بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۶۵ میلادی به ۱۰ مورد کاهش یافت.

موارد بیان شده فقط درصد کوچکی از حوادث شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها و ماشین آلات بوده است؛ ولیکن از این موارد می‌توان مشاهده نمود که مواردی از جمله ترد بودن و عدم کیفیت تولید مواد، نقص طراحی، عدم توزیع مناسب تنش، نقص جوشکاری، رفتار ترد گونه برخی فولادها در درجه حرارت پایین، خوردگی و عدم کیفیت مناسب تولید عوامل اصلی و عمده در بروز شکست ناگهانی می‌باشند. امروزه با استفاده از علم مکانیک شکست، اثبات گردیده است که عواملی همچون خواص ماده، طراحی، تولید، درجه حرارت و شرایط محیطی و بارگذاری در سازه‌ها و قطعات مکانیکی به هم وابسته بوده و نمی‌توان فقط با انتخاب ماده‌ای با استحکام شکست مناسب از بروز شکست ترد جلوگیری کرد.

### ۱-۵- مقدمه ای بر کمانش

وقتی که سازه‌ای بلند و باریک تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد، برای بارهای کوچک تغییر قابل توجهی در میزان باربری و کل هندسه سازه ایجاد می‌شود. در مقدار بار بحرانی، سازه ناگهان تغییر شکل قابل توجهی را تجربه می‌کند و توانایی تحمل بار را از دست می‌دهد. در این مرحله می‌توان گفت که سازه کمانش کرده است. کمانش در بحث ناپایداری سازه‌ها به دو گروه تقسیم می‌شود: ۱- کمانش جانبی، ۲- حد بار کمانش. در کمانش جانبی، شکست تحت بار فشاری مسیر آن عوض می‌شود. در واقع از کوتاه شدن محوری به تغییر شکل جانبی تغییر حالت می‌دهد. میزان باری که در اثر آن تغییر شکل محوری به جانبی تبدیل می‌شود، بار بحرانی نامیده می‌شود. مسیر شکست قبل از تغییر حالت به تغییر شکل جانبی مسیر اولیه نامیده می‌شود. مسیر بعد از تغییر حالت به تغییر شکل جانبی به عنوان مسیر ثانویه یا پس‌کمانش شناخته می‌شود. وابسته به نوع سازه و بارگذاری، مسیر ثانویه می‌تواند متقارن یا نامتقارن باشد. بار مورد نیاز می‌تواند از بار بحرانی بیشتر یا کمتر شود.

در مقدار حدی بار کمانش، مقدار حدی سازه تغییر شکل جانبی، با یک شکل مد بدست می‌آید. طراحی سازه اغلب بر اساس سفتی و تغییر شکل است و سفتی به عنوان توانایی سازه برای مقاومت در برابر بار است. در هر حال سازه ممکن است ناپایدار شود. کمانش خطی الاستیک بحثی مهم در بررسی کمانش سازه‌های پیچیده است و در نظر گرفتن مباحثی مثل رفتار غیر الاستیک در نقص‌های اولیه می‌باشد. باری که در ناحیه الاستیک اتفاق می‌افتد دارای اهمیت زیادی است، زیرا پایه طراحی است.

### ۱-۶- مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه کمانش پوسته‌ها

مساله کمانش پوسته‌های استوانه‌ای، بیش از یک قرن است که مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است. آلمورث و بروگن در سال ۱۹۷۰ تاثیر گشودگی‌های مستطیلی تقویت شده روی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای را بررسی نموده و همچنین نتایج تجربی پوسته‌های دارای گشودگی، با و بدون تقویت کننده را با نتایج حاصل از برنامه رایانه‌ای استگز<sup>۱</sup> مورد مقایسه قرار دادند [۲].

هولمز و آلمورث در سال ۱۹۷۲ یازده پوسته استوانه‌ای جدار نازک از جنس آلومینیوم با گشودگی‌های مستطیلی و تقویت کننده‌های مختلف که روی هفت نمونه آزمایش نصب شده بود را مورد آزمایش قرار دادند. بار کمانش پوسته‌های تقویت شده با بار کمانش پوسته‌های بدون تقویت کننده مقایسه شد. همچنین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با نتایج حاصل از برنامه رایانه‌ای استگز مقایسه شد. مشاهده شد که برای پوسته‌های استوانه‌ای نازک با گشودگی‌های کوچک و متوسط، تقویت کننده سودمند نیست مگر این که طول پوسته زیاد باشد. همچنین در این مطالعه شکل مناسب تقویت کننده‌ها برای پوسته‌های استوانه‌ای متفاوت و گشودگی‌های با ابعاد مختلف مورد بحث قرار گرفته و پیشنهاداتی برای طراحی این گونه سازه‌ها ارائه شده است [۳].

<sup>1</sup> Stags

تودا در سال ۱۹۷۵ تاثیر گشودگی‌های بیضوی و مستطیلی شکل روی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک تحت بار فشاری محوری را به طور تجربی مطالعه کرد. آزمایش‌ها روی پوسته‌هایی با شعاع ۴ اینچ، ضخامت ۰/۰۱ اینچ و طول ۵ و ۱۰ اینچ از جنس پلی‌استر انجام داد. گشودگی‌های بیضوی دوطرفه با مساحت‌های متغیر در میانه پوسته‌ها ایجاد شده بودند و نسبت طول محور اصلی به محور فرعی بیضی‌ها ۱، ۱/۵ و ۲ در نظر گرفته شده بود. نتایج آزمایش‌ها با نتایج تجربی استارنز و تحلیل‌های عددی آلمورث مقایسه شد. همچنین مشاهده شد که شکل گشودگی‌ها با مساحت یکسان تاثیر اندکی روی بار کمانش پوسته استوانه‌ای دارد و رفتار کمانش پوسته تحت تاثیر پارامتر  $A=(A/\pi Rt)^{0/5}$  قرار دارد. در حالی که R و t به ترتیب شعاع و ضخامت پوسته و A مساحت گشودگی است [۴].

یه و همکارانش در سال ۱۹۹۹، تحقیقی آزمایشگاهی و تحلیلی روی کمانش خمشی پوسته‌های استوانه‌ای الاستوپلاستیک دارای گشودگی تحت خمش خالص انجام دادند. برای روش تحلیلی یک کد اجزای محدود بر پایه فرمول‌بندی لاگرانژی بنا نهاده شد تا مساله کمانش خمشی با در نظر گرفتن هندسه و خواص غیر خطی تحلیل شود. نسبت قطر به ضخامت برای نمونه‌های آلومینیومی ۵۰ و نسبت طول به قطر ۷/۹ بود. شکل گشودگی، دایره‌ای و مستطیلی در نظر گرفته شد. در این مطالعه تاثیر اندازه و موقعیت گشودگی روی گشتاور کمانش مورد بحث قرار گرفت. مشاهده شد که جابجایی‌های پیرامون گشودگی پس از کمانش خمشی پوسته نامتقارن هستند. نتایج نشان داد که برای پوسته استوانه‌ای گشتاور کمانش هنگامی که گشودگی در طرف کششی قرار دارد بیشتر از زمانی است که گشودگی در طرف فشاری قرار گرفته است. همچنین گشتاور کمانش با افزایش ابعاد گشودگی کاهش می‌یابد و هنگامی که موقعیت گشودگی به سمت یک لبه پوسته جابجا می‌شود، افزایش می‌یابد [۵].

تفرشی نیز در سال ۲۰۰۲ مطالعات عددی را روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی هشت لایه  $s_{\pm 45,0,90}$  با گشودگی مستطیلی، تحت بارهای فشاری محوری و

فشار داخلی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> انجام داد. او تاثیر اندازه و جهت گشودگی‌ها را مطالعه کرد و دریافت که افزایش فشار داخلی موجب افزایش ظرفیت تحمل در برابر کمانش می‌شود. همچنین بار کمانش با افزایش ابعاد گشودگی کاهش می‌یابد و برای گشودگی‌های با سطح مقطع یکسان، گشودگی با عرض بزرگ‌تر (در جهت مقطع استوانه) بار کمانش کمتری را نتیجه می‌دهد [۶].

رحیمی و پورسعیدی در سال ۱۳۸۳ استحکام پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌های مدور و مستطیلی، تحت بارهای محوری فشاری، خمشی و ترکیبی از آنها را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از روش المان محدود و به کارگیری نرم‌افزارهای پاتران<sup>۲</sup> و آباکوس استفاده شد [۷]. آنها پارامترهای مختلفی از قبیل شکل، تعداد و اندازه گشودگی و همچنین تاثیر فاصله گشودگی از انتهای پوسته و تاثیر تقویت‌کننده پیرامون گشودگی را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که وجود گشودگی باعث کاهش استحکام خمشی و بار بحرانی پوسته استوانه‌ای می‌شود. افزایش طول گشودگی مستطیلی در جهت طول استوانه تاثیر خیلی کمی در کاهش استحکام سازه دارد؛ اما با افزایش شعاع گشودگی مدور و عرض گشودگی مستطیلی در جهت محیطی، کاهش استحکام استوانه قابل توجه می‌باشد و تاثیر گشودگی مستطیلی کمی بیشتر از گشودگی مدور است. همچنین، ممان خمشی حدی پوسته استوانه‌ای با یک گشودگی در حالتی که گشودگی در سمت فشار یا کشش قرار دارد، دارای مینیمم مقدار است و با تغییر موقعیت گشودگی به سمت محور خنثی، به مقدار ماکزیمم می‌رسد.

همچنین مشاهده شد پوسته‌های جدار نازک در مقایسه با پوسته‌های جدار ضخیم، استحکام آنها با انجام تقویت بیشتر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد گشودگی‌ها، استحکام تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد.

شریعتی و مهدی زاده در سال ۲۰۰۸ به طور عددی و تجربی تاثیر موقعیت گشودگی بیضوی با

<sup>1</sup> Abaqus

<sup>2</sup> Patran

ابعاد یکسان را روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با طول و قطرهای مختلف تحت فشار محوری بررسی کردند و روابط پارامتری بین موقعیت گشودگی و ابعاد پوسته‌ها با استفاده از چندجمله‌ای‌های لاگرانژ ارائه دادند [۸].

شریعتی و مهدی زاده در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ی عددی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی بیضوی با طول و قطرهای مختلف را تحت ممان خمشی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام دادند و رابطه‌هایی برای محاسبه ممان کمانشی این پوسته‌ها ارائه دادند [۹].

## فصل ۲

# بارگذاری سیکلی



۲-۱- خستگی و رچتینگ<sup>۱</sup>

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

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

در تاسیسات شیمیایی و نیروگاه‌ها، لوله‌های تحت فشار بسیار زیادی وجود دارند که بار سیکلی به آنها اعمال می‌شود. اگرچه مقدار کرنش پلاستیک در یک سیکل بارگذاری کم می‌باشد، اما انباشتگی آنها در یک جهت در طول بارگذاری، قابل ملاحظه است. این پدیده به عنوان پلاستیسیته‌ی سیکلی و یا رچتینگ شناخته شده است. کرنش‌های رچتینگ با حضور ترک تشدید یافته و شکست سریع‌تر رخ می‌دهد.

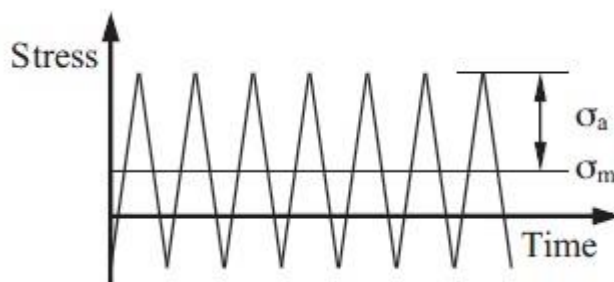
از طرفی دیگر، در چند دهه‌ی اخیر، طراحی در مهندسی تنها به استفاده از مواد در ناحیه‌ی الاستیک محدود می‌شد؛ اما به تدریج با توجه به نیازهای روز افزون برای طراحی قطعاتی با ظرفیت تحمل بار بسیار بالا و در عین حال سبک، ایده‌ی استفاده از ظرفیت ماده در محدوده‌ی پلاستیک در ذهن مهندسين طراح شکل گرفت. به این ترتیب بسیاری از قطعات به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در اثر بارگذاری در قطعه منتفی نیست. پس از گذشت مدت

---

<sup>1</sup> Ratcheting

زمانی اندک از طراحی چنین قطعاتی، دیده شد که برخی از این قطعات در اثر چند سیکل بارگذاری و باربرداری در محدوده‌ی پلاستیک، دچار گسیختگی می‌شوند؛ در حالی که گروهی از این قطعات قابلیت تحمل تعداد بسیار زیادی بارگذاری و باربرداری پیوسته را دارند. در این جا نیز بحث شاخه‌ی کرنش پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ به میان می‌آید.

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



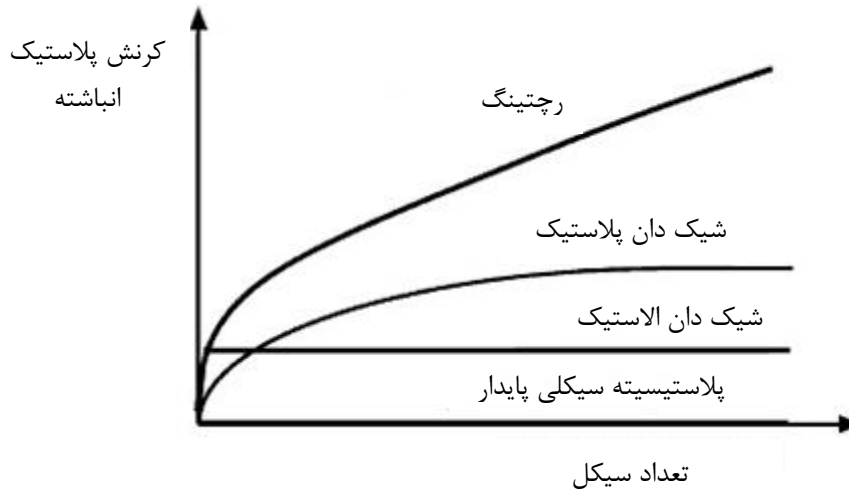
شکل (۱-۲) مسیر بارگذاری در آزمایش رچتینگ [۱۰]

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

<sup>۱</sup> Stabilized cyclic plasticity

<sup>۲</sup> Elastic shakedown

<sup>۳</sup> Plastic shakedown



شکل (۲-۲) چهار پدیده ی احتمالی از پلاستیسیته سیکلی [۱۱]

رچتینگ، انباشتگی کرنش پلاستیک تحت بار سیکلی با تنش میانگین غیر صفر می باشد که در اثر خزش سیکلی<sup>۱</sup> و انتقال حلقه ی هیستریزس تنش-کرنش ایجاد می شود. در این انتقال، به طور کلی کرنش رچتینگ از رابطه ی (۱-۲) تعیین می شود.

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

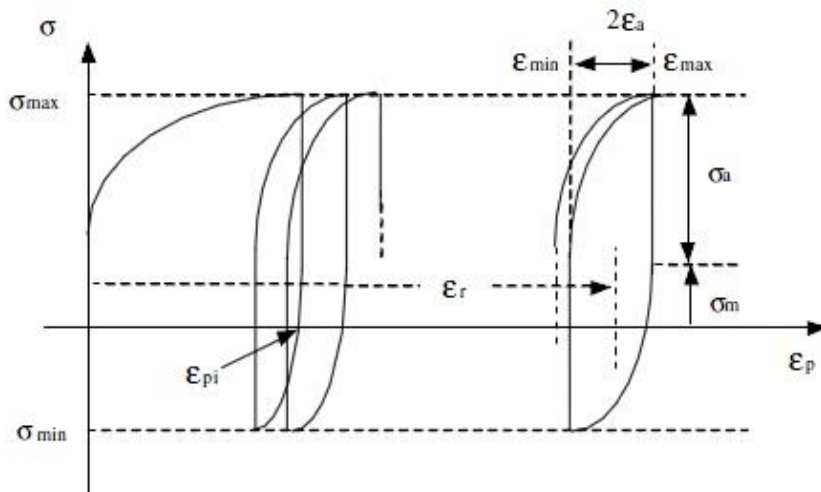
و در نتیجه کرنش رچتینگ حقیقی از رابطه ی (۲-۲) تعیین می شود.

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

در روابط بالا،  $\varepsilon_{max}$  و  $\varepsilon_{min}$ ، بیشترین و کمترین کرنش پلاستیک از حلقه ی هیستریزس در هر

سیکل می باشند (شکل (۲-۳)).

<sup>۱</sup> Cyclic creep



شکل (۳-۲) تعریف پارامترهای مختلف در آزمایش رجتینگ [۱۲]

## ۲-۲- تاریخچه

شناسایی پدیده خستگی در قرن ۱۸ با مشاهده و اظهار نظر چندین محقق در اروپا، مبنی بر ترک خوردن قطعات پل و راه آهن هنگامی که در معرض بارهای تکرار شونده قرار می‌گیرند، بوقوع پیوست. در طول این قرن و استفاده وسیع‌تر از فلزات در نتیجه افزایش استفاده از ماشین‌ها، تخریب‌های بیشتری از قطعات در معرض بارهای تکرار شونده، گزارش گردید. در اواسط این قرن ولر<sup>۱</sup> روشی را پیشنهاد کرد که بر مبنای آن، تخریب قطعات در معرض بارهای تکرار شونده می‌توانست کاهش یابد و در برخی از موارد حذف شود. این روش از طریق نمودار متقابل تنش (سیکلی)-عمر و مدل تست قطعات برای طراحی خستگی، در نظر گرفته شده بود [۱۳].

بدون شک، تخریب‌های قدیمی‌تر (اولیه) در اثر بارهای تکرار شونده، از تخریب قطعاتی چون سازه‌های سیمانی و سازه‌های چوبی ناشی شده است. لیکن نیاز بیشتر به ماشین‌های ساخته شده از قطعات فلزی در اواخر قرن ۱۸، عامل تحریک نیاز به توسعه روش‌های طراحی جلوگیری کننده از تخریب قطعات در اثر بارهای تکرار شونده در تمام انواع تجهیزات بود. این فعالیت‌ها که تا به امروز نیز

<sup>۱</sup> Wohler

ادامه دارد، شامل تاثیر متقابل چندین زمینه از دانش، یعنی مهندسی مواد، مهندسی ساخت، آنالیز سازه‌ای (شامل بارها، تنش، کرنش و آنالیز مکانیک شکست)، بازمینی و ارزیابی‌های غیرمخرب، تکنولوژی تست کردن، تعمیر و نگهداری و روش‌های طراحی می‌باشد. تمام موارد ذکر شده باید در یک فعالیت طراحی منطقی و سازگار که ممکن است به عنوان سیاستی در طراحی خستگی بیان شود، قرار گیرند. واضح است که اگر دیگر مودهای تخریب مرتبط با زمان نیز همراه با بارهای تکرار شونده رخ دهند، وظیفه انجام روش‌های طراحی جلوگیری کننده از تخریب بعدی، دشوارتر خواهد شد. تا سال‌های ابتدایی قرن ۱۹، بخش زیادی از پایه فیزیکی پدیده خستگی ناشناخته بود؛ لیکن پیدایش درک و فهمی عمیق‌تر در مواد که در اوایل این قرن سرعت بیشتری یافت، دانش و آگاهی در ارتباط با اثرات بارهای تکرار شونده بر روی مواد مهندسی را توسعه داد [۱۳].

تلاش‌های بسیاری برای تعیین طبیعت مسئله مرتبط با تخریب خستگی و پیدا کردن روش‌هایی نسبتاً ساده برای روبرو شدن با آن در طراحی، صورت گرفته است. با اینکه تاکنون پیشرفت‌های وسیعی در این زمینه حاصل شده است؛ ولی توسعه روش‌های طراحی به منظور جلوگیری از تخریب ناشی از بکارگیری بارهای تکرار شونده، هنوز در جریان است.

### ۲-۳- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه رچتینگ

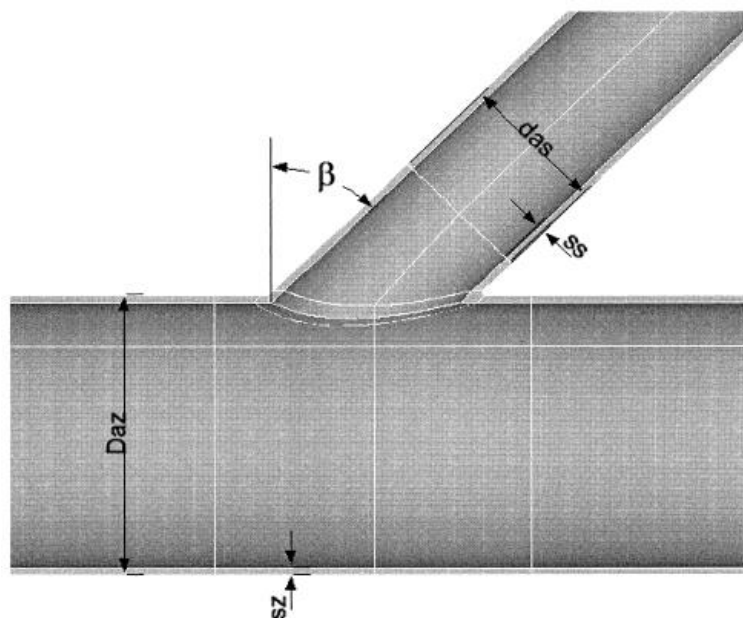
از آنجایی که رچتینگ یک انباشتگی تغییر شکل غیر الاستیک سیکل به سیکل می‌باشد، شبیه سازی و تعیین رفتار آن به طور دقیق امکان‌پذیر نخواهد بود و علاوه بر آن، مدل‌های ساختاری سیکلی رچتینگ بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی نیز قادر به تعیین دقیق رچتینگ نبودند. بنابراین در دو دهه گذشته، رچتینگ به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است. پیشرفت در پدیده‌ی رچتینگ و مدل‌های ساختاری آن در سال ۱۹۹۷ توسط آقای اوونو مشاهده شد. بعد از سال ۱۹۹۷، مدل‌های جدیدی شامل مدل حسن-باری، مدل ویادجیس، مدل دورینگ و ... برای توضیح نتایج آزمایشگاهی ارائه شد

[۱۴]. همچنین مطالعات بسیاری بر روی رفتار رچتینگ مواد با خصوصیت سخت شوندگی مثل

SS304، 316FR و U71Mn انجام شده است [۱۵، ۱۶].

میرباقری در پایان‌نامه‌ی خود به بررسی رچتینگ و شیک‌دان پرداخته است. او از تئوری‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک و همچنین ترکیب این دو تئوری به منظور بررسی رفتار سیکلی سازه‌های تیر و مخازن استوانه‌ای، تحت بارهای سیکلی مکانیکی و حرارتی به کار گرفته است [۱۷].

ویب و همکاران در سال ۱۹۹۸، رفتار خستگی پوسته‌های استوانه‌ای مایل را تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی بررسی کردند (شکل (۲-۴)). آنها از تقریب تنش شیار موضعی و کدهای اجزاء محدود به عنوان روش‌های پیش‌بینی رفتار خستگی درزهای اطراف جوش در محل اتصال استفاده کردند و نشان دادند که روش اجزاء محدود حتی برای پوسته‌های استوانه‌ای پیچیده مایل نیز روش مناسبی است [۱۸].



شکل (۲-۴) پارامترهای هندسی پوسته استوانه‌ای مایل در بررسی رفتار خستگی توسط ویب و همکاران [۱۸]

یانگ در سال ۲۰۰۵ به بررسی رفتار خستگی کم تکرار و رچتینگ فولاد CK45 تحت بارگذاری تک محوره پرداخت. در این مقاله آزمایش‌های کرنش-کنترل با و بدون کرنش میانگین به منظور بررسی اثر کرنش میانگین بر عمر خستگی انجام شده است. همچنین او براساس نتایج آزمایش‌های کرنش-کنترل، معادلاتی برای پیش بینی عمر خستگی به دست آورد و از آنها برای پیش بینی آسیب خستگی در شکست رچتینگ استفاده کرد [۱۹].

چنا و همکارانش در سال ۲۰۰۵ نوعی لحیم قلع-سرب یوتکتیک را تحت بارگذاری چند محوره و تک محوره قرار داده و به مطالعه رفتار رچتینگ آن پرداختند. این ماده تحت بارگذاری‌های تک محوره، پیچش خالص و محوری-پیچشی از خود رفتار نرم شوندگی نشان داد. همچنین در این مطالعه اثرات نرخ کرنش اعمالی در حالت‌های مختلف بر کرنش رچتینگ مورد بررسی قرار گرفت [۲۰].

چن و همکاران در سال ۲۰۰۵ عملکرد چهار مدل ساختاری را در پاسخ رچتینگ فولاد S45C برای بارگذاری محوری/پیچشی بررسی کردند. مشاهده شد که مدل اهنو-وانگ در بارگذاری چند محوره، رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. در حالیکه مدل جیانگ-سهیتوگلو پیش‌بینی خوبی برای بارگذاری چند محوره محوری/پیچشی با انتخاب ترم بازگشتی دینامیکی ارائه داد [۲۱].

کانگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ رفتار رچتینگ فولاد 25CDV4.11 و فولاد ضدزنگ SS304 را بررسی کردند. فولاد 25CDV4.11 دارای خصوصیت نرم‌شوندگی بود و با افزایش تعداد سیکل، نرخ کرنش رچتینگ افزایش یافته و هیچگونه شیک دانی رخ نداد و در نهایت منجر به شکست نمونه شد. در فولاد با خصوصیت سخت شوندگی (SS304)، نرخ کرنش رچتینگ با افزایش تعداد سیکل کاهش یافت [۲۲].

کانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی تأثیرات رچتینگ و خستگی فولاد ضدزنگ SS304 در بارگذاری تک محوره تحت شرایط نیرو-کنترل و در دمای اتاق پرداختند. اثرات تنش میانگین،

دامنه‌ی تنش و نسبت تنش حداکثر به حداقل بر کرنش رچتینگ و عمر نمونه‌ها در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. آنها مشاهده کردند که کرنش رچتینگ و عمر خستگی این ماده وابستگی زیادی به تنش میانگین، دامنه‌ی تنش و نسبت تنش دارد [۲۳].

گائو و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از فیکسچر خمش شبه سه نقطه‌ای به مطالعه تجربی رفتار رچتینگ فولادهای کربنی پرداختند و مشاهده کردند که در آزمایش خمش چند مرحله‌ای، نرخ کرنش رچتینگ با افزایش مقدار بار، افزایش می‌یابد؛ اما با اعمال مقدار بار کم پس از بارگذاری با بار زیاد، نرخ رچتینگ کاهش و یا حتی از بین می‌رود. در تحلیل شبیه‌سازی اجزاء محدود<sup>۱</sup> رچتینگ با نرم‌افزار انسیس<sup>۲</sup> مشاهده گردید که مدل جیانگ سه‌تنگلو با کم‌ترین تغییرات نتایج قابل قبولی را نتیجه می‌دهد [۲۴].

چن در سال ۲۰۰۶، رفتار رچتینگ تک محوره‌ی 63Sn37Pb solder را به طور تجربی بررسی کرد. او در مقاله‌ی خود، تأثیر تنش دامنه، تنش میانگین و پیش تنش را بر روی رفتار رچتینگ این آلیاژ، تحلیل نمود و در آزمایشات خود، حتی در تنش‌های میانگین و دامنه‌ی بسیار کم، شاهد پدیده‌ی Shakedown نبود. او مشاهده کرد که نرخ کرنش رچتینگ به جز در سیکل‌های اولیه، همواره مقداری ثابت است و با افزایش تنش دامنه یا تنش میانگین، کرنش رچتینگ ( $\epsilon_r$ ) و نرخ کرنش رچتینگ ( $\frac{d\epsilon_r}{dN}$ ) افزایش می‌یابد و نرخ کرنش رچتینگ به نرخ تنش به شدت وابسته است و با کاهش نرخ تنش، نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد [۲۵].

سید و همکاران در سال ۲۰۰۸، به طور تجربی رفتار کرنش رچتینگ شعاعی و محیطی یک لوله فولادی مستقیم را تحت بارگذاری خمشی و فشار داخلی ثابت، بررسی کردند و با رسم نمودار ممان-جابجایی مشاهده کردند که شبیه‌سازی کرنش رچتینگ با استفاده از مدل‌های چند خطی ساختاری، بهتر است [۲۶].

<sup>1</sup> Finite Element

<sup>2</sup> ANSYS



گاوو و چن در سال ۲۰۰۹ طی آزمایش‌هایی به مطالعه‌ی اثر کرنش رچتینگ محوری بر عمر خستگی پیچشی نوعی لحیم بدون سرب پرداختند. آنها با استفاده از بارگذاری‌های تنش-کنترل چندمحوره در دمای اتاق دریافتند که با افزایش کرنش رچتینگ محوری عمر خستگی کاهش می‌یابد. همچنین معادلاتی را برای بیان عمر خستگی تحت بارگذاری‌های چند محوره بیان نمودند [۲۷].

لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ در تحلیل اجزای محدود از مدل‌های سخت شوندگی سیکلی برای بررسی رفتار تنش-کرنش آلیاژ آلومینیم AC4C-T6 استفاده کردند. آزمایش‌های تجربی کشش ساده و کشش سیکلی در دمای اتاق و دمای ۱۶۵- درجه سانتیگراد انجام شد. پارامترهای هر مدل سخت شوندگی از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمد. آنها نتایج حاصل از تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند و مشاهده کردند که مدل سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک<sup>۱</sup> نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی بهتری ارائه داد [۲۸].

رضایی پژند و سینایی در سال ۲۰۰۹ یک روش ریاضی برای محاسبه‌ی پارامترهای مدل چابوچه ارائه دادند و برای مقایسه از نتایج آزمایشگاهی رچتینگ تک محوره‌ی حسن و کریاکیدس بر روی فولاد CS1026 استفاده کردند [۲۹].

لیم و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی رفتار رچتینگ و خستگی نوعی آلیاژ مس تحت بارگذاری تک محوره همراه با تنش میانگین پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش‌های تنش-کنترل در دمای اتاق با و بدون تنش میانگین، کرنش رچتینگ را تا زمان شکست اندازه‌گیری کردند و با ترسیم منحنی‌های کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل نشان دادند که برای این آلیاژ، منحنی مربوطه شامل سه قسمت اولیه، پایدار و بحرانی می‌باشد [۳۰].

سانگ و شانگ در سال ۲۰۱۰ روی پوسته‌های استوانه‌ای آلیاژی تحت بارگذاری‌های دو محوره مطالعه کرده و با روش‌های عددی و استفاده از مدل‌های سخت شوندگی، منحنی‌های هیستریزس را

<sup>1</sup> Nonlinear isotropic/kinematic hardening

شبه سازی کرده‌اند. بارگذاری‌ها به صورت کرنش-کنترل و تحت جابجایی کشش-پیچش روی نمونه‌ها اعمال شده است [۳۱].

نیپ و همکارانش طی پژوهشی به بررسی خستگی کم تکرار و منحنی تنش-کرنش سازه‌هایی از جنس فولاد کربنی و ضدزنگ پرداختند و با استفاده از آزمایش‌های کرنش-کنترل تک محوره عمر خستگی سه نوع فولاد را مورد مطالعه قرار دادند [۳۲].

یوشیدا و همکاران در سال ۲۰۱۰ ثابت کردند که حتی در دمای اتاق تعدادی از مواد از قبیل فولاد SS304L، خاصیت ویسکوزیته دارند و تغییر در نرخ تنش بر رچتینگ تاثیر می‌گذارد. یوشیدا تعدادی تست یک محوره و چند محوره بر روی تداخل رچتینگ و خزش در دمای اتاق و دمای ۶۵ سانتیگراد انجام داد و بر روی تاثیر نرخ تنش، زمان نگهداری قله تنش<sup>۱</sup> و نسبت تنش بر رچتینگ بحث کرد [۳۳].

بیشتر آزمایش‌های تجربی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای، در شرایط بارگذاری خمشی تناوبی انجام شده است [۳۴-۳۸]. کولکارینا و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از دستگاه تست خمش چهار نقطه‌ای به مطالعه‌ی رفتار رچتینگ لوله‌های مستقیم پرداختند و با نتایج عددی در نرم‌افزار انسیس مقایسه کردند [۳۹].

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

<sup>1</sup> Peak Stress Hold Time

میانگین به ضخامت یکسان در لوله‌ها، نسبت ممان به ممان تسلیم در پدیده رچتینگ در نمونه‌های فولادی ضد زنگ کمتر از نمونه‌های فولادی کربنی است [۴۰].

آلبین موسا و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار سیکلی نمونه‌های لوله‌ای شکل از جنس آلیاژ منیزیم AZ31B را تحت بارگذاری محوری و پیچشی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند برخلاف حلقه‌های هیستریزیس نامتقارن تحت بارگذاری محوری کرنش-کنترل، نمونه‌های AZ31B تحت بارگذاری پیچشی کرنش-کنترل، به صورت متقارن رفتار می‌کنند. آنها همچنین نشان دادند که چگالی انرژی کلی، مجموع چگالی انرژی مثبت و پلاستیک در نیمه عمر، با داده‌های خستگی در هر دو بارگذاری محوری و پیچشی مربوط می‌شود [۴۱].

شریعتی و همکاران در سال ۲۰۱۱ روی نمونه‌های استاندارد پلی استال، بارگذاری‌های محوری تناوبی انجام داده و تاثیر دامنه نیرو و نیروی متوسط را روی رفتار رچتینگ نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. افزایش کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ با افزایش پارامترهای دامنه نیرو و نیروی متوسط از نتایج بدست آمده طی این مطالعه می‌باشد [۴۲].

شریعتی و همکارانش در سال ۱۳۹۰ به طور تجربی و عددی به بررسی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری تنش-کنترلی محوری تناوبی پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که نرخ انباشت کرنش پلاستیک در چند سیکل ابتدایی زیاد می‌باشد و در سیکل‌های بعدی کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی 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 [۴۳].

ژو و همکاران در سال ۲۰۱۲ بطور تجربی خواص کششی و کرنش رچتینگ را تحت بار خمشی بر روی میله فولادی Z2CND18.12 بررسی کردند و به مطالعه رابطه بین مدول یانگ و دما پرداختند. انباشتگی کرنش غیر الاستیک در دما و بارگذاری‌های مختلف بطور آزمایشگاهی مشاهده

شد. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییرات مدول یانگ بصورت خطی با دما تغییر می‌کند و به تدریج با افزایش دما کاهش می‌یابد و کرنش رچتینگ به شدت به دما وابسته است [۴۴].

شریعتی و حاتمی در سال ۲۰۱۲ به طور تجربی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه-ای فولاددزدنگ SS304 را تحت بارگذاری محوری سیکلی در شرایط نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل مطالعه کردند. در بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر، شاهد پدیده رچتینگ بودند و انباشتگی کرنش پلاستیک تا شکست پوسته ادامه یافت. آنها مشاهده کردند که نرخ کرنش رچتینگ با افزایش نیروی دامنه، افزایش می‌یابد. در بارگذاری جابجایی-کنترل پوسته رفتار نرم شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کمانش در بارگذاری فشاری، نرم شوندگی شدت یافت [۴۵].

دوتا و ری در سال ۲۰۱۲، رفتار رچتینگ و خواص کششی نمونه‌ی پس از رچتینگ را بر روی آلیاژ آلومینیم بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که کرنش رچتینگ در تنش میانگین ثابت با افزایش دامنه‌ی تنش برای نمونه‌ی ساده و نمونه‌ی کار سرد شده به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. آنها همچنین خواص کششی نمونه‌ها را بعد از ۱۰۰ سیکل بارگذاری و ایجاد کرنش رچتینگ در آنها، بررسی کردند [۱۰].

شریعتی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به طور تجربی و عددی به بررسی رفتار رچتینگ و نرم شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری سیکلی تنش-کنترل و کرنش-کنترل پرداختند و مشاهده کردند که نرخ انباشتگی کرنش پلاستیک در سیکل‌های اولیه زیاد و در سیکل‌های انتهایی کاهش می‌یابد. تحلیل عددی بوسیله نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل‌های سخت شوندگی انجام شد. آنها مشاهده کردند که مدل سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک، رفتار رچتینگ پوسته‌ها را به خوبی شبیه سازی می‌کند [۴۶].

## ۲-۴- جمع بندی

با مطالعه مقاله‌های مختلف در رابطه با بارگذاری‌های سیکلی روی پوسته‌های استوانه‌ای، انواع بارگذاری‌های سیکلی محوری، خمشی و پیچشی با تغییر پارامترهای مختلف مانند طول، شعاع و جنس ماده روی رفتار آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

همچنین با مروری بر مقالات، بررسی پوسته‌های استوانه‌ای مایل که تحت بارگذاری مرکب خمشی و محوری قرار دارند، انجام نشده است و تأثیر گشتاور خمشی بر رفتار رچتینگ پوسته‌ها تحلیل نشده است.

در این تحقیق سعی شده است که رفتار پوسته‌های استوانه‌ای مایل با وجود گشتاور خمشی با تغییر طول و تغییر زاویه‌ی پوسته استوانه‌ای بررسی شود و با نمونه‌های دارای گشودگی مقایسه گردد.

## فصل ۳

# تحليل تجربي

### ۳-۱- مقدمه درباره آزمایش های انجام شده

در این فصل نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش های پوسته های استوانه ای مایل تحت بارگذاری مرکب سیکلی و پوسته استوانه ای عمودی تحت بار محوری سیکلی مورد بررسی قرار می گیرند و تأثیر طول و زاویه ی پوسته استوانه ای بر رفتار رچتینگ و میزان انرژی پلاستیک پوسته ها بحث می شود. همچنین پوسته های استوانه ای با گشودگی دایروی در میانه ی پوسته به صورت مایل و عمودی مورد آزمایش قرار گرفته و با پوسته های استوانه ای بدون گشودگی مقایسه شده اند.

### ۳-۲- دستگاه آزمایش

آزمایش های انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است (شکل (۳-۱)) که توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن را دارد. برای بدست آوردن جابجایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج<sup>۱</sup> نیز استفاده شده است.

### ۳-۳- آزمایش کشش استاندارد

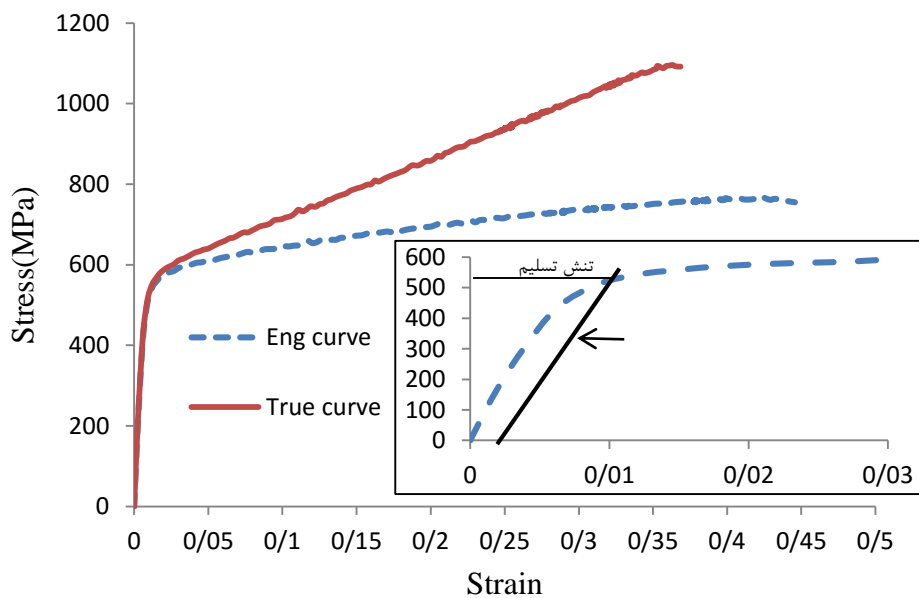
نمونه های مورد آزمایش، پوسته های استوانه ای از جنس فولاد ضدزنگ SS304L می باشند. جهت بدست آوردن خواص مکانیکی پوسته فولادی، از آزمایش کشش استاندارد بر طبق استاندارد ASTM-E8 [۴۷] استفاده شده است (شکل (۳-۱)).

منحنی تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد در شکل (۳-۲) برای فولاد SS304L با نرخ  $0.2 \text{ mm/s}$  نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Extensometer



شکل (۱-۳) دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و استفاده از طول سنج برای تست کشش استاندارد



شکل (۲-۳) نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش کشش استاندارد برای فولاد SS304L

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



استاندارد، از روابط (۱-۳) و (۲-۳) استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_{rel} = \ln(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (1-3)$$

$$\sigma_{rel} = \sigma_{Eng}(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (2-3)$$

که در روابط بالا، پارامتر  $\varepsilon_{rel}$ ،  $\sigma_{rel}$ ،  $\varepsilon_{Eng}$ ،  $\sigma_{Eng}$  به ترتیب کرنش حقیقی، تنش حقیقی، کرنش مهندسی و تنش مهندسی می‌باشند.

### ۳-۴- هندسه و خواص مکانیکی پوسته‌ها

در این تحقیق از پوسته‌های استوانه‌ای SS304L با ضخامت ۱/۴mm، طول‌های ۲۴۰، ۳۴۰، ۴۴۰ و قطر خارجی ۲۵/۲mm برای آزمایشات تنش-کنترل نامتقارن استفاده شده است.

همانطور که قبلاً گفته شد، خواص مکانیکی پوسته فولادی از آزمایش کشش استاندارد و بر طبق استاندارد ASTM-E8 بدست آمده است. مقدار تنش تسلیم بدست آمده برای فولاد SS304L از ترسیم خط ۰.۲٪ تعیین شده است. هندسه و خواص مکانیکی پوسته مورد آزمایش در جدول (۱-۳) نشان داده شده اند. ضریب پواسون نیز برابر ۰.۳۳ در نظر گرفته شده است.

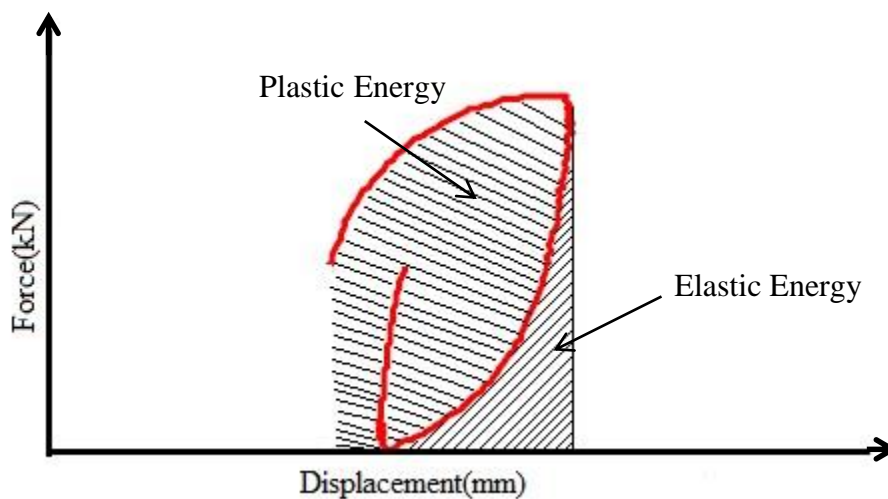
جدول (۱-۳) مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS304L

مقدار	مشخصات
D=۲۵/۲mm	قطر خارجی
t=۱/۴mm	ضخامت
L=۲۴۰، ۳۴۰، ۴۴۰ mm	طول
L <sub>eff</sub> = ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰mm	طول موثر
E=۲۰۲/۴۹۵ GPa	مدول الاستیسیته
$\sigma_y = 513/01$ MPa	تنش تسلیم
$S_u = 768/41$ MPa	تنش نهایی

ضریب پواسون	$\nu = 0.33$
-------------	--------------

### ۳-۵- انرژی و رابطه ی آن با نرخ تغییر شکل پلاستیک

انرژی به عنوان یک تابع با مقدار اسکالر و مستقل از جهت، قابل مقایسه برای بارگذاری مختلف مرکب سیکلی و بارگذاری عمودی سیکلی برای طول‌های مختلف می‌باشد. انرژی پلاستیک و انرژی کل (مجموع انرژی کرنشی پلاستیک و انرژی کرنشی الاستیک) با افزایش تعداد سیکل به مقدار پایداری می‌رسند و از این جهت به عنوان پارامترهای مناسب برای بررسی رفتار رچتینگ می‌باشند. در این قسمت در شکل (۳-۳)، انرژی پلاستیک و انرژی الاستیک در حلقه‌ی هیستریزس نشان داده شده است.



شکل (۳-۳) انرژی هیستریزس: پلاستیک و الاستیک انرژی

اکثر مواد در اثر بارگذاری سیکلی تا یک تعداد مشخص از سیکل دچار سخت‌شوندگی و یا نرم‌شوندگی می‌شوند؛ سپس به حالت پایدار<sup>۱</sup> می‌رسند و یا تغییر اندازه‌ی سطح تسلیم متوقف می‌شود. با این حال رچتینگ همچنان بعد از پایداری سیکلی مواد ادامه می‌یابد. از این رو می‌توان سخت

<sup>1</sup> Stabilize

شوندگی سینماتیک را به عنوان اصلی ترین دلیل وقوع رچتینگ دانست. به عبارت دیگر دخالت دادن سخت شوندگی ایزوتروپیک ضروری به نظر نمی‌رسد [۴۸].

همه‌ی مدل‌های سخت شوندگی دارای یک مشخصه مشترک می‌باشند و آن اینست که بر اساس معیار تسلیم ون مایرز و مدل سخت شوندگی سینماتیک بنا نهاده شده‌اند. معیار تسلیم ون مایرز به صورت رابطه‌ی (۳-۳) تعریف می‌شود [۲۹].

$$f(\sigma - \alpha) = \sqrt{(s - \alpha) \cdot (s - \alpha)} - k = 0 \quad (3-3)$$

در این رابطه  $s$  تانسور تنش انحرافی،  $\alpha$  تانسور پیش تنش انحرافی (نشان دهنده‌ی مرکز سطح

تسلیم) و  $k = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_0$ ، اندازه سطح تسلیم است که در مدل سخت‌شوندگی ثابت است.

مدل سخت شوندگی آرمسترانگ-فریدریش<sup>۱</sup>، به عنوان یکی از مدل‌های اولیه با اضافه کردن یک

ترم، مورد استفاده محققین بسیاری قرار گرفته است و به صورت رابطه‌ی (۴-۳) می‌باشد [۲۹].

$$d\alpha = \frac{2}{3} \beta d\varepsilon^P - \gamma \alpha \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon^P d\varepsilon^P \quad (4-3)$$

مدل سخت شوندگی AF برای بارگذاری تک محوره به فرم رابطه‌ی (۵-۳) می‌باشد [۲۹].

$$d\alpha_x = \frac{2}{3} \beta d\varepsilon_x^P - \gamma \alpha |d\varepsilon_x^P| \quad (5-3)$$

با حل رابطه‌ی (۵-۳) برای شرایط بارگذاری و باربرداری خواهیم داشت [۲۹].

$$\left[ \begin{array}{ll} \alpha_x = \frac{2\beta}{3\gamma} + \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)], & d\varepsilon_x^P \geq 0 \\ \alpha_x = -\frac{2\beta}{3\gamma} + \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)], & d\varepsilon_x^P < 0 \end{array} \right. \quad (6-3)$$

همچنین خواهیم داشت [۲۹]:

<sup>1</sup> Armstrong-Frederick

$$\alpha_y = \alpha_z = -\frac{1}{2}\alpha_x \quad (7-3)$$

با توجه به روابط (3-3) و (7-3) [29]:

$$\left| \sigma_x - \frac{3}{2}\alpha_x \right| = \sigma_0 \quad (8-3)$$

پس [29]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_0 + \left[ \frac{\beta}{\gamma} + \frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)] \right], & d\varepsilon_x^P \geq 0 \\ \sigma_x &= -\sigma_0 + \left[ \frac{\beta}{\gamma} - \frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)] \right], & d\varepsilon_x^P < 0 \end{aligned} \quad (9-3)$$

تنش‌های ابتدایی و انتهایی در حالت بارگذاری به ترتیب برابر  $\sigma_m - \sigma_a$  (اختلاف تنش میانگین و دامنه) و  $\sigma_m + \sigma_a$  (مجموع تنش میانگین و دامنه) است و در حالت باربرداری، تنش‌های ابتدایی و انتهایی به ترتیب  $\sigma_m + \sigma_a$  و  $\sigma_m - \sigma_a$  می‌باشند و در این شرایط و با استفاده از رابطه‌ی (3-3)، کرنش‌های ابتدایی در حالت بارگذاری ( $\varepsilon_1$ ) و باربرداری ( $\varepsilon_3$ ) و کرنش‌های انتهایی در حالت بارگذاری ( $\varepsilon_2$ ) و باربرداری ( $\varepsilon_4$ ) طبق روابط (3-10) و (3-11) می‌باشند. بیشترین کرنش در حالت بارگذاری و با تنش  $\sigma_m + \sigma_a$  رخ می‌دهد. در لحظه‌ی بارگذاری خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_{x0}^P - \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_{x0}^P - \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \end{aligned} \quad (10-3)$$

و در لحظه‌ی باربرداری خواهیم داشت:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{x0}^P + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \quad (11-3)$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_{x0}^P + \frac{1}{\gamma} \text{Ln} \left( \frac{\sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right)$$

انرژی کرنشی پلاستیک در هر سیکل طبق رابطه‌ی (۱۲-۳) محاسبه می‌شود:

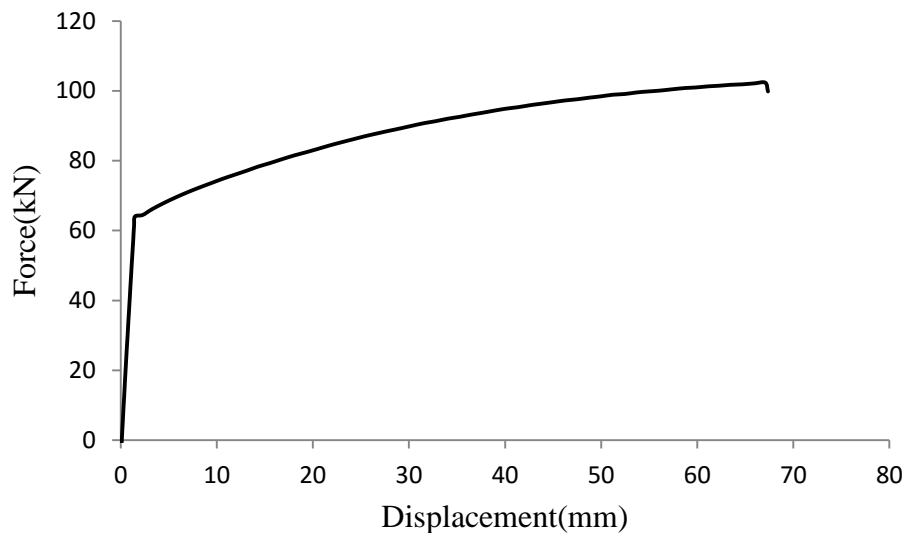
$$\begin{aligned} W_P &= \oint_{\text{cycle}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^P = \int_{\sigma_m - \sigma_a}^{\sigma_m + \sigma_a} (\sigma_x)_{\text{Loading}} d\varepsilon_x^P + \int_{\sigma_m + \sigma_a}^{\sigma_m - \sigma_a} (\sigma_x)_{\text{Unloading}} d\varepsilon_x^P \\ &= -\frac{1}{\gamma} \left[ 2\sigma_a + \left( \sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) \left[ \text{Ln} \left( \sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) - \text{Ln} \left( \sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) \right] \right] \\ &\quad + \frac{1}{\gamma} \left[ -2\sigma_a + \left( -\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) \left[ \text{Ln} \left( \sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) - \text{Ln} \left( \sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) \right] \right] \quad (12-3) \\ &= -\frac{4\sigma_a}{\gamma} + \left( \sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_2 - \varepsilon_{x0}^P) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_{x0}^P)] \\ &\quad + \left( -\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_4 - \varepsilon_{x0}^P) - (\varepsilon_3 - \varepsilon_{x0}^P)] \end{aligned}$$

با مقایسه‌ی روابط (۱۰-۳) و (۱۲-۳)، نتیجه می‌شود که انرژی کرنشی پلاستیک با نمو بیشترین کرنش در هر سیکل، رابطه‌ی خطی دارد. یا به عبارت دیگر انرژی پلاستیک با تغییر طول نمونه در هر سیکل به صورت خطی تغییر می‌کند.

### ۳-۶- بارگذاری مرکب

در این قسمت، رفتار پوسته‌های استوانه‌ای فولادی زاویه‌دار تحت بارگذاری مرکب بررسی می‌شود. پوسته‌های استوانه‌ای به صورت مایل و تحت زاویه ۲۰ درجه نسبت به خط عمود قرار می‌گیرند. بارگذاری‌ها به صورت سیکلی و تحت شرایط نیرو-کنترل به نمونه‌ها اعمال می‌شود. ابتدا برای تعیین مقدار جابجایی و مقدار نیروی اعمالی جهت ایجاد کرنش پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ، بارگذاری‌هایی به صورت ساده بر روی پوسته‌های استوانه‌ای تحت زاویه ۲۰ درجه انجام شد. در شکل (۳-۴)، منحنی بار-جابجایی پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۴۰ میلی‌متر تحت زاویه‌ی ۲۰ درجه نشان داده

شده است. در این تحقیق، بیشترین جابجایی عمودی نقطه اعمال بار در هر سیکل به عنوان جابجایی رچتینگ تعریف می‌شود [۴۴] و به منظور بی‌بعد کردن، پارامتر  $X_r$  به عنوان نسبت جابجایی رچتینگ به طول مؤثر آن تعیین می‌شود.

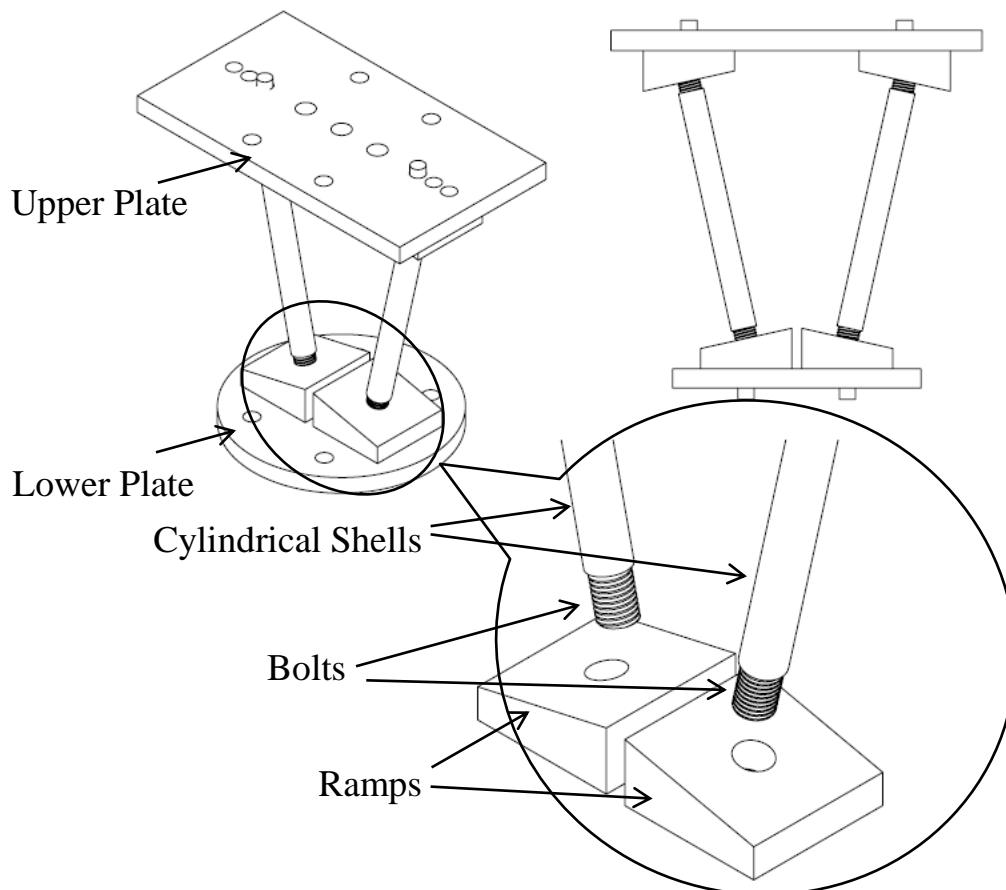


شکل (۳-۴) منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش پوسته های استوانه ای مایل با طول مؤثر ۲۰۰ mm تحت زاویه ۲۰ درجه با بارگذاری ساده

### ۳-۶-۱- شرایط مرزی

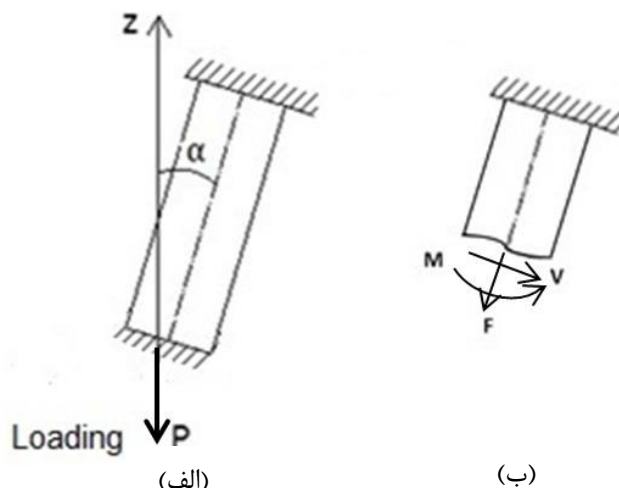
برای اعمال بارگذاری مرکب و قرارگیری پوسته به صورت زاویه دار نسبت به خط عمود، از فیکسچر-های گوه‌ای شکل استفاده شده است. پیچ‌های رزوه شده با طول مشخص نیز به مقدار ۲۰ mm درون دو انتهای پوسته قرار گرفته و از اطراف لبه‌ها به پوسته جوش شده‌اند و بنابراین طول مؤثر پوسته با کاهش ۲۰ mm از هر طرف پوسته، بدست می‌آید. پیچ‌ها نیز از هر دو انتهای پوسته از طریق سوراخ-های رزوه شده بر روی سطح بالایی گوه، به آن متصل می‌شوند. از آنجایی که اعمال بارگذاری مرکب باعث ایجاد نیروهای افقی ناخواسته‌ای می‌شود، از دو نمونه پوسته استوانه‌ای با شرایط بارگذاری و هندسه‌ی متقارن به منظور عدم آسیب دیدن دستگاه و فک آن، استفاده شده است. فیکسچرهای گوه‌ای پایین به صفحه‌ی فک پایین متصل می‌شوند و فیکسچرهای گوه‌ای بالا از طریق صفحه و

سوراخ‌های ایجاد شده در صفحه به فک بالا متصل می‌شوند (شکل (۳-۵)). قرار دادن فیکسچرهای گوه‌ای متقارن جهت ثابت نمودن پوسته‌های استوانه‌ای به صورت مایل توسط لی و همکاران نیز انجام شده است [۴۹]. بار تناوبی از طریق فک پایین مطابق شکل (۳-۶)-الف به ابتدای پوسته اعمال می‌شود. با برش پوسته در طول‌های متفاوت، نیروی محوری، برشی و گشتاور خمشی به صورت تناوبی مطابق شکل (۳-۶)-ب در مقطع ایجاد می‌شود که به دلیل ضخامت کم پوسته‌ها از اثر نیروی برشی صرف‌نظر می‌شود. در شکل (۳-۷)، پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۴۴۰mm نشان داده شده است که به صورت متقارن با استفاده از فیکسچرهای طراحی شده به دستگاه اینسترون متصل می‌شوند.



شکل (۳-۵) شماتیکی از نحوه‌ی اتصال پوسته استوانه‌ای به فیکسچر با استفاده از پیچ‌های رزوه شده در

بارگذاری مرکب



شکل (۳-۶) الف) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه در بارگذاری مرکب، ب) بارهای ایجاد شده در مقطع

پوسته استوانه‌ای در بارگذاری مرکب (V نیروی برشی، F نیروی محوری و M گشتاور خمشی)

برای جلوگیری از چرخش پیچ‌های انتهایی پوسته درون فیکسچر گوه‌ای در حین اعمال بار، از مهره استفاده شده است که در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳-۸) مشاهده می‌شود که تغییر قطر و کشش در پوسته‌ها در اثر اعمال بارگذاری از ابتدای طول مؤثر آن می‌باشد و این مشاهده‌های آزمایشگاهی دلیلی برای تعیین طول مؤثر و تحلیل پوسته با طول مؤثر می‌باشد.

### ۳-۶-۲- انتخاب نوع جوش

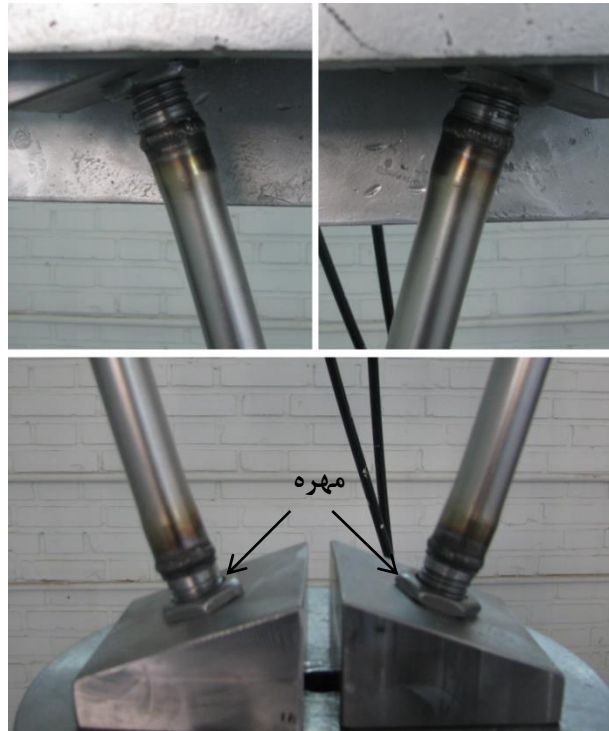
از آنجایی که در بارگذاری مرکب، گشتاور خمشی در انتهای نمونه دارای بیشترین مقدار است، بنابراین نقطه‌ی بحرانی در این نقاط می‌باشد. در نمونه‌های آزمایش همانطور که قبلاً گفته شد، پیچ-های انتهایی به مقدار ۲۰ mm درون پوسته قرار گرفته و سپس از اطراف جوش شده‌اند. مزیت این نوع اتصال اینست که طبق تحلیل گفته شده در بالا، شکست و تسلیم از انتهای طول مؤثر پوسته و نه از انتهای جوش است. در صورت عدم استفاده از این نوع اتصال، تشخیص عامل شکست در انتهای نمونه (جوش یا تسلیم) غیرممکن خواهد بود.



در انجام این تحقیق، ابتدا از جوش‌های برق (الکتروود) جهت اتصال پیچ‌های انتهایی به پوسته‌های استوانه‌ای استفاده شد. مشاهده گردید که در طی انجام تست کشش، شکست از خط جوش بوده است که این نتایج نامعتبر بدست می‌دهد. بنابراین از جوش‌های آرگون استفاده شده است که از استحکام بالاتری برخوردار هستند. مشاهده شد که در نمونه‌های آزمایش، جوش آرگون بسیار مقاوم بوده و شکست از انتهای طول موثر پوسته و نه از محل انتهای جوش رخ داده است.



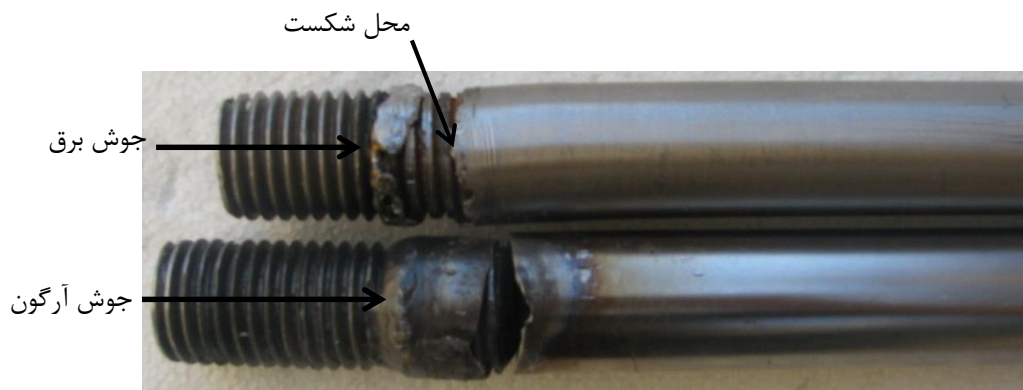
شکل (۷-۳) دستگاه اینسترون و پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی



شکل (۸-۳) کشیدگی از ابتدای طول مؤثر پوسته و استفاده از مهره برای جلوگیری از چرخش پوسته

استوانه ای

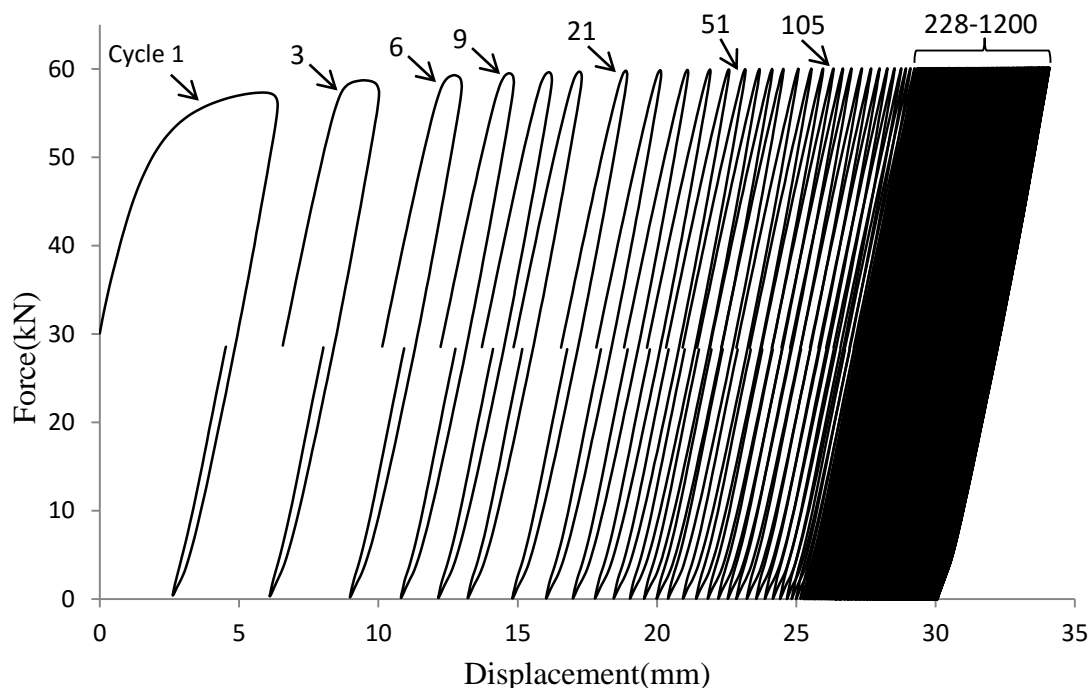
در شکل (۹-۳)، دو نمونه‌ی آزمایش نشان داده شده است که با جوش برق و آرگون به پیچ‌های انتهایی متصل شده و شکست آنها به ترتیب در محل خط جوش و انتهای طول مؤثر پوسته رخ داده است. در این تحقیق نیز در ادامه‌ی آزمایش‌ها، از جوش آرگون جهت اتصال پوسته‌ها به پیچ‌های انتهایی استفاده شده است.



شکل (۹-۳) شکست پوسته در جوش های برق و آرگون

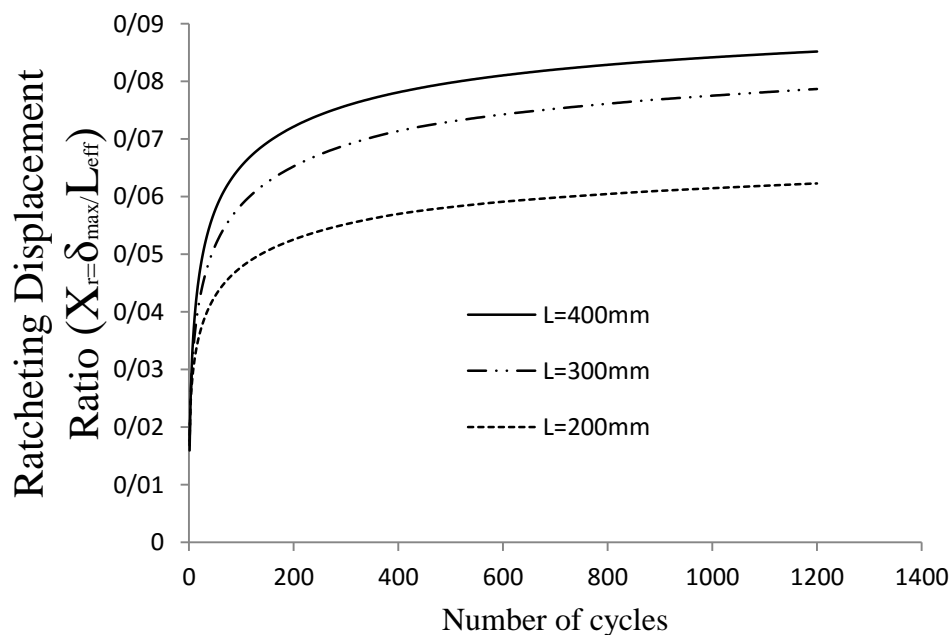
### ۳-۶-۳- تأثیر طول پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ پوسته‌ها

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با سه طول ۲۴۰ mm، ۳۴۰ و ۴۴۰ با زاویه‌ی ۲۰ درجه نسبت به خط عمود، تحت بارگذاری مرکب تناوبی با شرایط نیرو-کنترل قرار می‌گیرند. بارگذاری به صورت سینوسی با نیروی میانگین و دامنه نیروی ۶۰ kN انجام شده است که سهم هریک از نمونه‌ها، نیروی میانگین و دامنه‌ی نیرو ۳۰ kN از بار اعمالی می‌باشد و در این شرایط با تنش میانگین غیرصفر، انباشتگی تغییر شکل پلاستیک یا پدیده‌ی رچتینگ مشاهده شد. تغییر شکل سیکلی، باعث بدست آمدن یک حلقه‌ی هیستریزس برای هر سیکل بارگذاری می‌گردد و در آزمایشاتی که پدیده‌ی رچتینگ رخ می‌دهد، حلقه هیستریزس بسته نمی‌شود. در شکل (۳-۱۰)، نمودار حلقه‌های هیستریزس نیرو-جابجایی ابتدای پوسته نشان داده شده است.



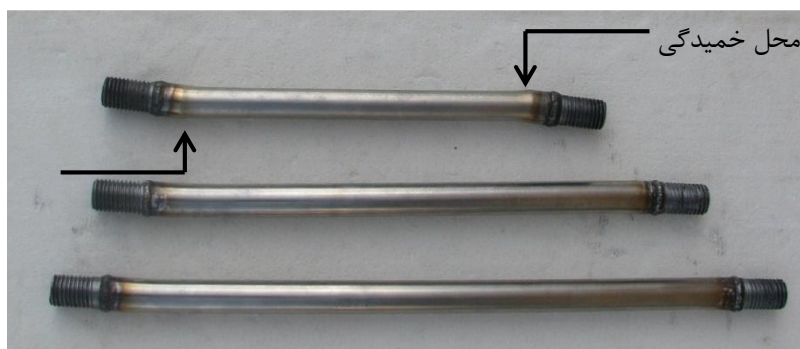
شکل (۳-۱۰) رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با طول مؤثر ۴۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی

آزمایش‌های نیرو-کنترل در ۱۲۰۰ سیکل انجام شد و در شکل (۳-۱۱)، نسبت جابجایی رچتینگ به طول موثر پوسته بر حسب تعداد سیکل برای سه طول نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای یک طول معین پوسته استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد که این رفتار در حرکت حلقه‌های هیستریزس در شکل (۳-۱۰) نیز مشاهده شد. همچنین با افزایش طول پوسته‌های استوانه‌ای، جابجایی رچتینگ نیز افزایش می‌یابد که این تغییر به دلیل افزایش گشتاور خمشی و افزایش تنش‌های عمودی در مقاطع مختلف پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر است. گشتاور خمشی در نقاط انتهایی پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای بیشترین مقدار است و در آزمایش‌های تجربی مشاهده شد که پوسته‌های استوانه‌ای در این نواحی دچار خمش می‌شوند و کشیدگی در این نواحی بیشتر است (شکل (۳-۱۲)).



شکل (۳-۱۱) جابجایی رچتینگ پوسته بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول‌های

مختلف تحت بارگذاری مرکب تناوبی در آزمایش‌های تجربی



شکل (۳-۱۲) چند نمونه پوسته استوانه ای آزمایش شده تحت بارگذاری مرکب تناوبی

### ۳-۶-۴- اشباع جابجایی رچتینگ

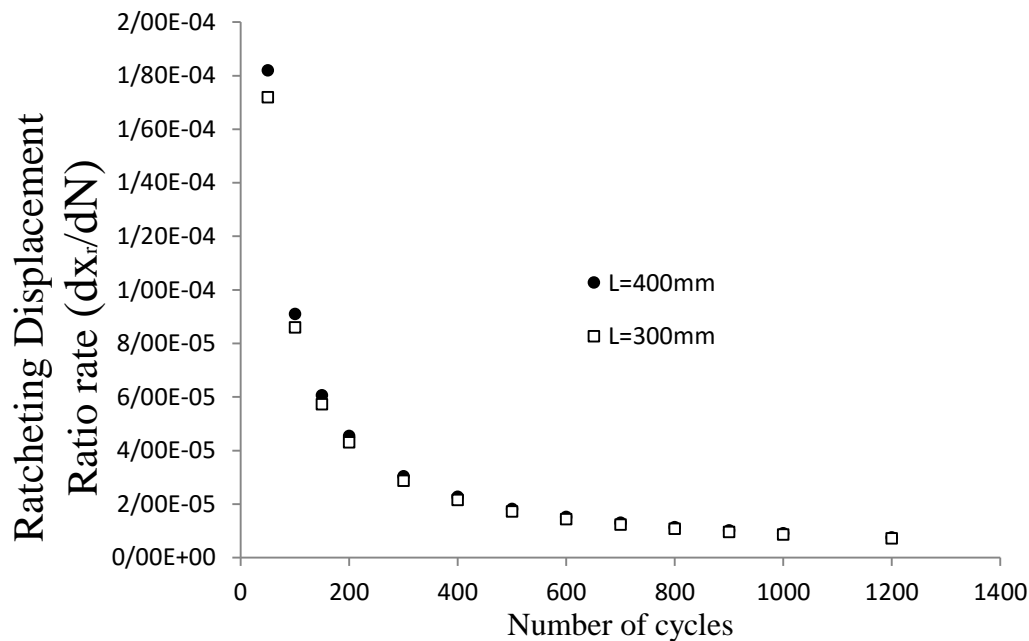
در شکل (۳-۱۳)، تغییرات نرخ جابجایی رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۳۴۰mm و ۴۴۰mm نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نرخ جابجایی رچتینگ برای هر دو طول با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد؛ اما در هر سیکل، نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۳۴۰mm و ۴۴۰mm، اختلاف بسیار کمی نسبت به هم دارند و پوسته استوانه‌ای با طول ۴۴۰mm دارای نرخ جابجایی بالاتری است. در ۵۰۰ سیکل ابتدایی، کاهش نرخ جابجایی رچتینگ بسیار زیاد است؛ اما در ادامه این کاهش قابل چشم‌پوشی هست. مقدار نرخ جابجایی رچتینگ در سیکل‌های انتهایی تقریباً ثابت و به صفر میل می‌کند.

کاهش نرخ جابجایی رچتینگ و میل کردن آن به صفر یا به عبارت دیگر توقف انباشتگی تغییرشکل پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ، به دلیل شکل‌گیری و گسترده‌ی نابجایی<sup>۱</sup>ها با تغییرشکل-های سیکلی است. وقتی که ماده‌ای تحت تغییرشکل‌های سیکلی است، نابجایی‌هایی در نتیجه‌ی سخت‌شوندگی کرنشی<sup>۲</sup> تولید می‌شوند. این نابجایی‌ها، ابتدا به حالت آشفته قرار گرفته‌اند و سپس با

<sup>۱</sup> Dislocation

<sup>۲</sup> Strain hardening

افزایش تعداد سیکل، به شکل المان‌های نابجایی منظم در می‌آیند [۱۲]. پس از تعداد سیکل معین (بستگی به کرنش‌های سیکلی اعمالی دارد)، نابجایی‌های تولید شده‌ی جدید، شکل‌بندی پایدار و منظمی به خود می‌گیرند و این تغییر موجب کاهش و صفر شدن نرخ جابجایی رچتینگ می‌شود.



شکل (۳-۱۳) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری

مرکب تناوبی

### ۳-۶-۵- تأثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای مایل تحت

#### بارگذاری مرکب

در این قسمت هر یک از پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول ۲۴۰ mm تحت بارگذاری متوالی با نیروی میانگین ثابت ۳۰ kN و دامنه‌ی نیروی افزایشی از ۲۰ kN تا ۴۰ kN قرار گرفته‌اند. به دلیل بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن (نیروی میانگین غیرصفر) رفتار رچتینگ در پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد شده است. با توجه به شکل (۳-۱۴)، با افزایش دامنه‌ی نیرو، جابجایی رچتینگ و نرخ جابجایی

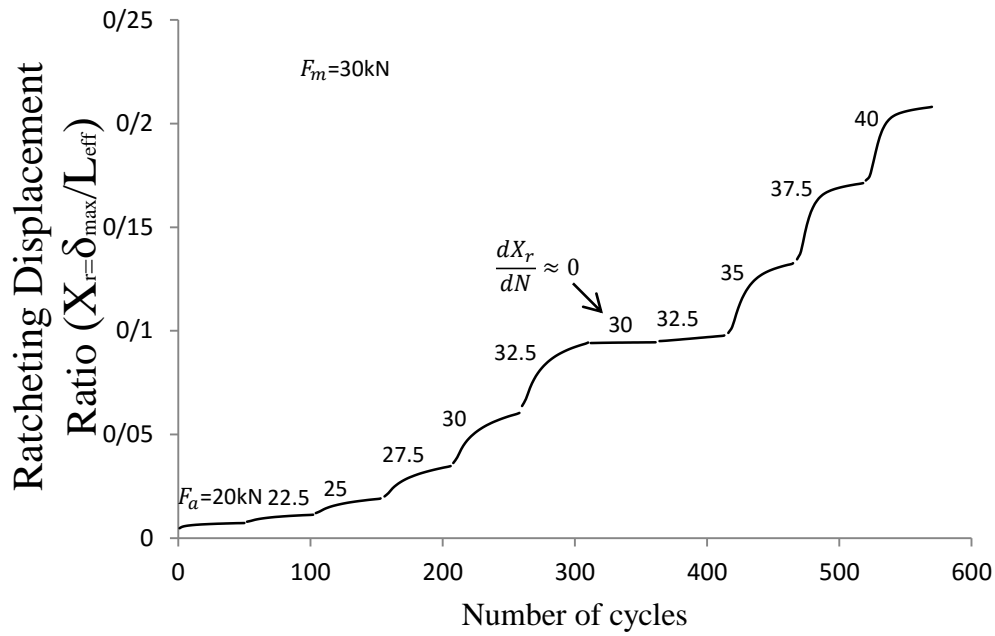
رچتینگ ( $\frac{dX_r}{dN}$ ) افزایش می‌یابد. در شرایط بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین ثابت و دامنه‌ی نیروی متغیر، افزایش دامنه‌ی نیرو موجب افزایش نیروی ماکزیمم می‌شود و باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگتر می‌شود و در نتیجه انباشتگی کرنش نیز افزایش می‌یابد. این پدیده به نابجایی زیر ساختارهای ماده در طول بارگذاری سیکلی مربوط می‌باشد. به دلیل بارگذاری سیکلی نامتقارن با تنش میانگین غیرصفر، تعداد نابجایی‌های ایجاد شده در بارگذاری سیکلی بیشتر از باربرداری سیکلی است [۱۰]. به هر حال، یک قسمت از نابجایی‌های تولید شده، در بارگذاری معکوس (باربرداری) خنثی می‌شوند. در نتیجه مقداری از نابجایی‌های تولید شده به عنوان پسماند در زیر ساختارهای ماده باقی می‌مانند و مشخص است که افزایش چگالی نابجایی باقی‌مانده، موجب افزایش انباشتگی کرنش پلاستیک می‌شود و بالعکس. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دامنه‌ی نیرو با نیروی میانگین مشخص که باعث افزایش انباشتگی کرنش پلاستیک کل می‌شود، به دلیل افزایش چگالی نابجایی‌ها است. این رفتار نیز توسط کریشنا و ری [۱۰] با استفاده از ابزار میکروسکوپی ارسال الکترون (TEM)<sup>۱</sup> بر روی آلیاژ آلومینیم بررسی شد و تصاویر مربوط به چگالی نابجایی‌ها در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش دامنه‌ی تنش و تنش میانگین ثابت، چگالی نابجایی‌ها نیز افزایش می‌یابد.

با کاهش دامنه‌ی نیرو از ۳۲/۵ kN به ۳۰ kN، نرخ نابجایی رچتینگ تقریباً صفر فرض می‌شود و انباشتگی تغییرشکل پلاستیک متوقف می‌شود. این پدیده نتیجه‌ی افزایش مقاومت تغییرشکل ماده<sup>۲</sup> است که به دلیل پیش بارهای سیکلی با دامنه‌ی نیروی بالاتر ایجاد شده است. این سخت شوندگی سبب کند شدن انباشتگی کرنش پلاستیک در بارگذاری‌های سیکلی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شود.

<sup>1</sup> Transmission electron microscopy

<sup>2</sup> Material deforming resistance

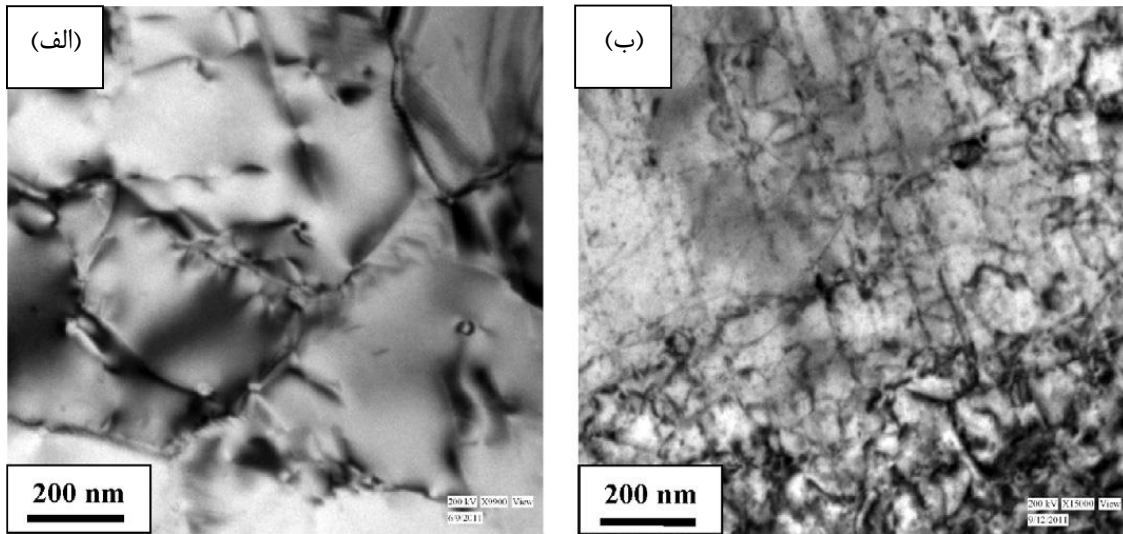
نتایج این آزمایش نشان می‌دهند که پیش بارهای اعمالی باعث مهار رفتار رچتینگ در بارگذاری‌های سیکلی متوالی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شوند.



شکل (۳-۱۴) اثر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با طول مؤثر  $200 \text{ mm}$  تحت

بارگذاری مرکب تناوبی





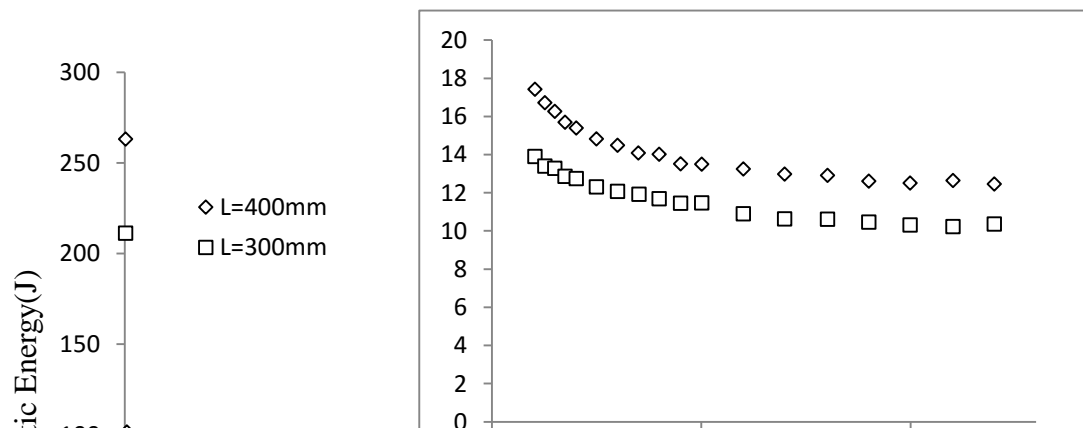
شکل (۳-۱۵) تصویر TEM نشان دهنده ی چگالی نابجایی ها برای نمونه ی آلیاژ آلومینیوم پس از انجام

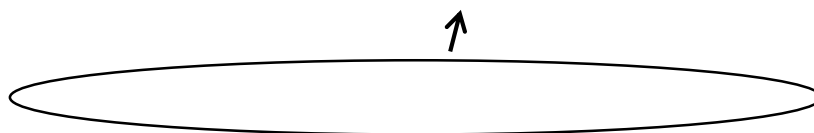
آزمایش تحت بارگذاری سیکلی با شرایط بارگذاری  $(\sigma_m = 10 \text{ MPa})$  (الف)  $(\sigma_a = 130 \text{ MPa})$  (ب)

$$[\sigma_a = 150 \text{ MPa}]$$

### ۳-۶-۶- انرژی پلاستیک و رابطه ی آن با نرخ جابجایی رچتینگ

در شکل (۳-۱۶)، انرژی پلاستیک برای پوسته‌های استوانه‌ای با دو طول مؤثر ۳۰۰ mm و ۴۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب سیکلی با نیروی میانگین و دامنه‌ی نیرو ۳۰ kN رسم شده است. مشاهده می‌شود که در سیکل‌های اولیه با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک به شدت کاهش می‌یابد و در ادامه به مقدار ثابتی می‌رسد. در هر سیکل، پوسته با طول ۴۰۰ mm دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به انرژی پلاستیک پوسته با طول ۳۰۰ mm است و این به دلیل ایجاد گشتاورهای خمشی بزرگتر در انتهای پوسته با طول بزرگتر با اعمال بارگذاری یکسان برای هر دو پوسته است؛ اما با افزایش تعداد سیکل، این اختلاف کاهش می‌یابد.

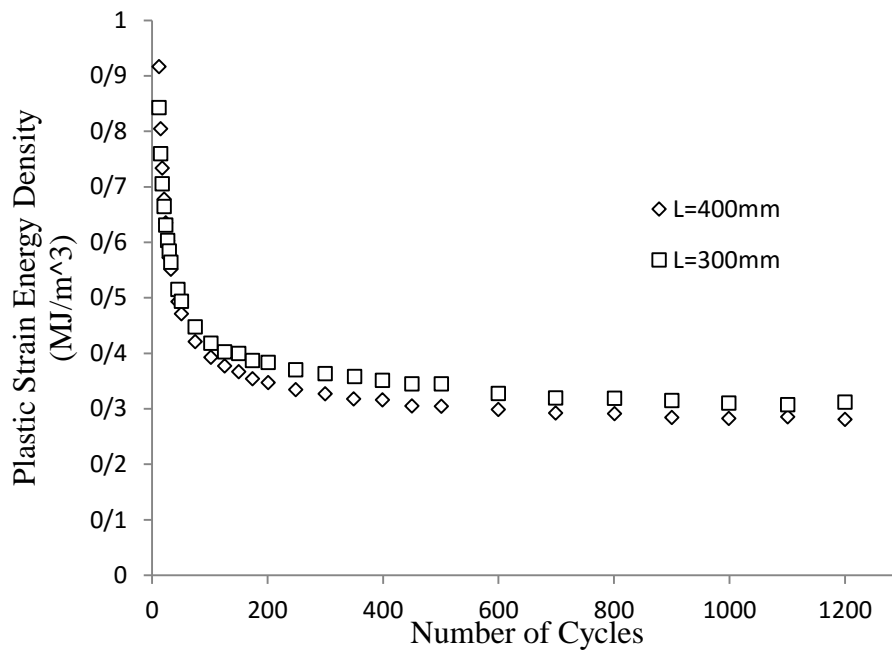




شکل (۳-۱۶) انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر

۳۰۰mm و ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی

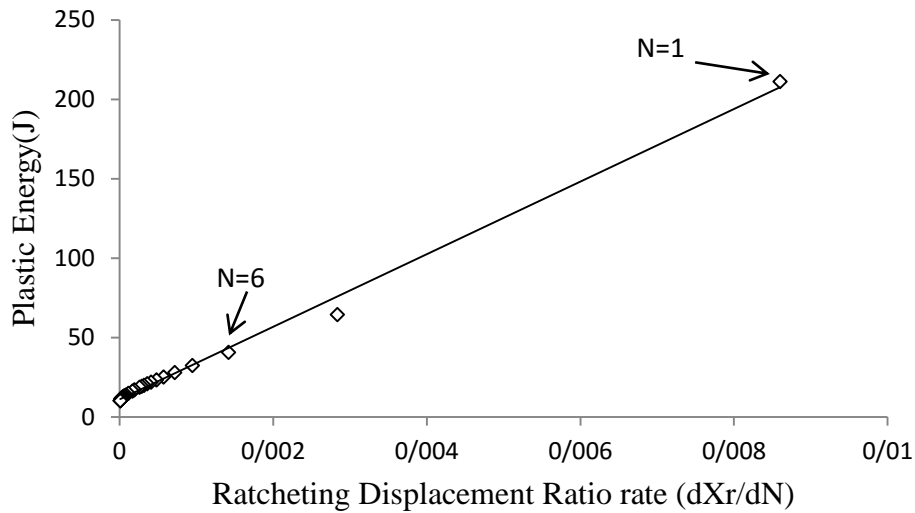
در شکل (۳-۱۷)، چگالی انرژی کرنشی پلاستیک برای دو طول ۳۰۰mm و ۴۰۰mm رسم شده است. در این شکل، با افزایش تعداد سیکل، مشابه انرژی کرنشی پلاستیک، چگالی انرژی کرنشی پلاستیک کاهش می‌یابد تا اینکه به مقدار ثابتی برسد؛ اما برای دو طول ۳۰۰mm و ۴۰۰mm، لوله با طول بزرگتر دارای چگالی انرژی کرنشی پلاستیک کمتر است و این نشانه‌ی آنست که در بررسی چگالی انرژی کرنشی پلاستیک، طول بر میزان ممان خمشی در انتهای لوله غالب بوده و با وجود گشتاورهای خمشی بزرگ در انتهای لوله با طول بزرگتر، چگالی انرژی کرنشی پلاستیک کمتری وجود دارد.



شکل (۱۷-۳) چگالی انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر

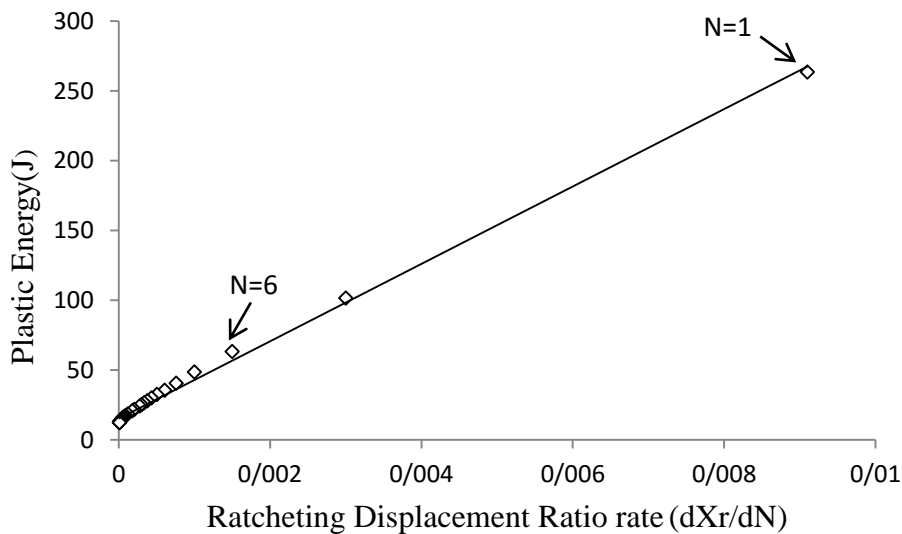
۴۰۰ mm و ۳۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی

در شکل های (۱۸-۳) و (۱۹-۳)، رابطه ی خطی بین انرژی پلاستیک در هر سیکل با نرخ جابجایی رچتینگ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با کاهش انرژی پلاستیک نرخ جابجایی رچتینگ به صورت خطی کاهش می یابد.



شکل (۳-۱۸) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر

۳۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی



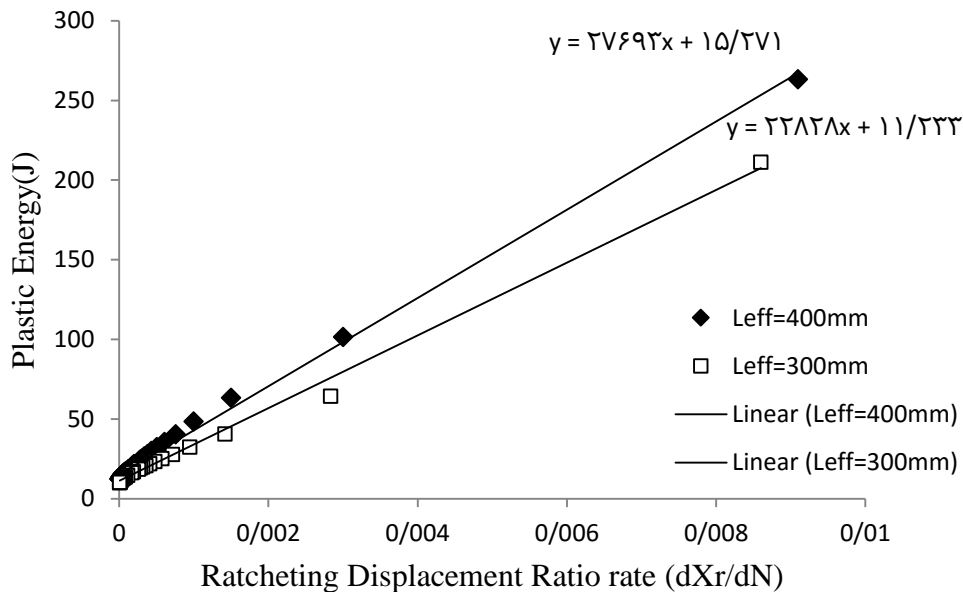
شکل (۳-۱۹) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر

۴۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی

در شکل (۳-۲۰)، اختلاف شیب منحنی انرژی کرنشی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ

برای دو طول ۴۰۰ mm و ۳۰۰ mm، به وضوح مشاهده می شود و پوسته های استوانه ای با طول بلندتر

دارای شیب بیشتری هستند و این به معنی آنست که به دلیل کاهش بیشتر گشتاور خمشی در پوسته‌های با طول بلندتر، به ازای افت نرخ معین جابجایی رچتینگ، کاهش در انرژی کرنشی پلاستیک آن بیشتر است.



شکل (۳-۲۰) اختلاف شیب منحنی انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته‌های

استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۰۰mm و ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی

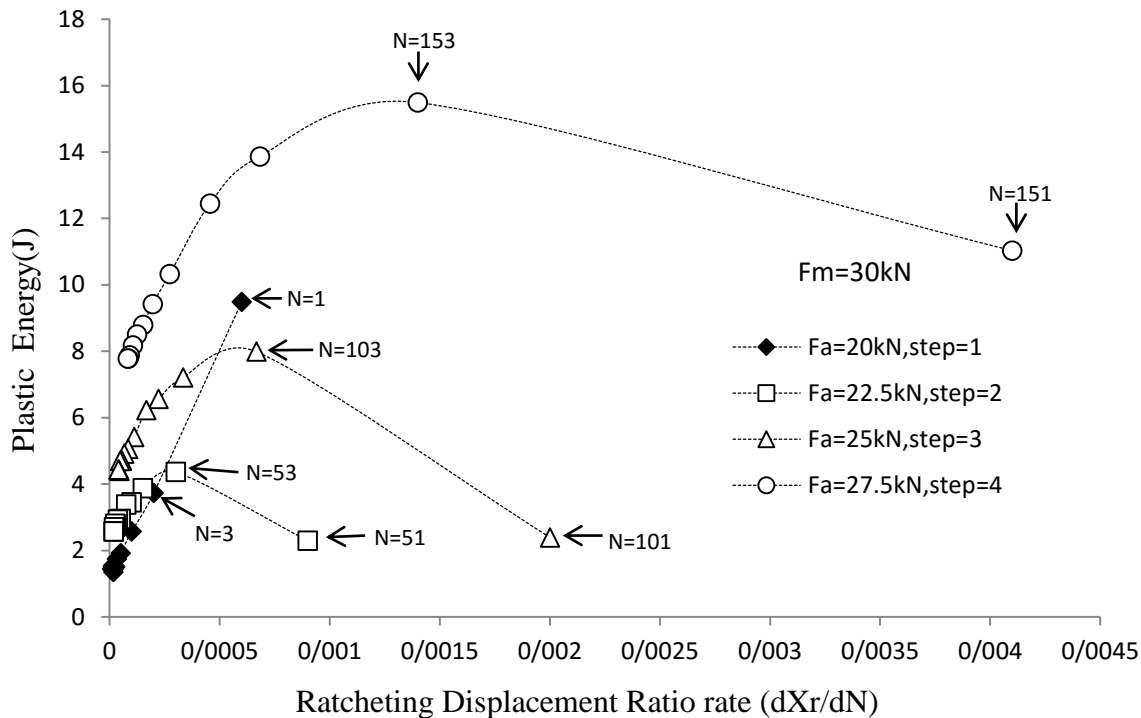
با توجه به مطالب گفته شده در بالا، نرخ جابجایی رچتینگ یا به عبارت دیگر افزایش جابجایی رچتینگ در هر سیکل مانند سیکل  $K$ ام با انرژی پلاستیک همان سیکل، رابطه‌ای خطی مشابه رابطه-ی (۳-۱۳) دارد. در این رابطه  $A$  و  $B$  ثابت هستند.

$$(W_P)_k = A(\Delta X_r^P)_k + B \quad (۳-۱۳)$$

در رابطه‌ی (۳-۱۳)،  $\Delta X_r^P$  تغییر جابجایی رچتینگ در هر سیکل و  $W_P$  انرژی پلاستیک در هر سیکل مشخص می‌باشد. رابطه‌ی خطی (۳-۱۳) با رابطه‌ی (۳-۱۲) در بخش‌های قبل مطابقت دارد و

می‌توان نتیجه گرفت که فیکسچرهای مورد استفاده در این آزمایش، تا حد قابل قبولی صلب می‌باشند و تغییر شکل‌های قابل ملاحظه‌ای که باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود، وجود ندارد.

برای بررسی و تعیین تأثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رابطه‌ی بین انرژی پلاستیک و نرخ جابجایی رچتینگ، در شکل (۳-۲۱)، انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ در گام‌های متوالی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در گام ۱، همانطور که در بخش قبل گفته شد، انرژی پلاستیک با نرخ جابجایی رچتینگ رابطه‌ی خطی دارد؛ اما در گام‌های ۲، ۳ و ۴، با افزایش دامنه‌ی نیرو، نرخ جابجایی رچتینگ در سیکل اول هر گام، افزایش ناگهانی داشته است که با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد؛ اما انرژی پلاستیک در گام‌های ۲، ۳ و ۴ با افزایش تعداد سیکل، ابتدا افزایش ناگهانی در سیکل‌های اولیه خواهد داشت که این به دلیل سخت شوندگی در اثر اعمال بارگذاری در گام‌های قبلی می‌باشد و در ادامه انرژی پلاستیک به صورت خطی نسبت به نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در این گام‌ها، نمودار دارای قله‌ای در سیکل‌های اولیه است که انرژی پلاستیک بیشترین مقدار را دارد. با توجه به رفتار پوسته در بارگذاری چند مرحله‌ای، مدل AF، رفتار دقیق و قابل پیش‌بینی را برای این نوع بارگذاری (بارگذاری چند مرحله‌ای) ارائه نمی‌دهد.



شکل (۳-۲۱) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه‌ای با طول مؤثر

۲۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی چند مرحله‌ای

### ۳-۶-۷- تأثیر وجود گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آنها

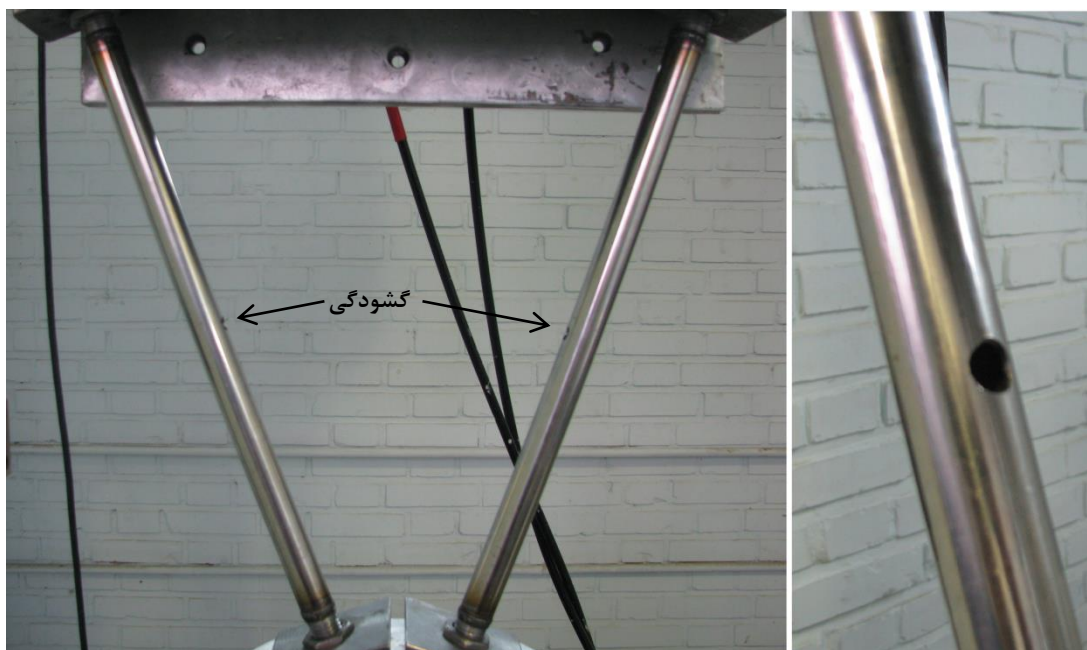
#### تحت بارگذاری مرکب

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۴۴۰ mm تحت بارگذاری مرکب قرار گرفته‌اند. یک گشودگی دایروی با قطر ۱۰ mm در میانه‌ی پوسته استوانه‌ای ایجاد شده است و بار میانگین و بار دامنه‌ی ۶۰ kN به مجموعه‌ی دو نمونه اعمال شد. با توجه به شکل (۳-۲۲)، طریقه‌ی قرارگیری پوسته‌ها به صورتی است که نیروی عمودی اعمالی و گشتاور خمشی ایجاد شده در جهت باز شدن گشودگی است.

در شکل (۳-۲۳) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی آن، افزایش می‌یابد و جابجایی رچتینگ و نرخ آن برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی دایروی بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی است. گشتاور

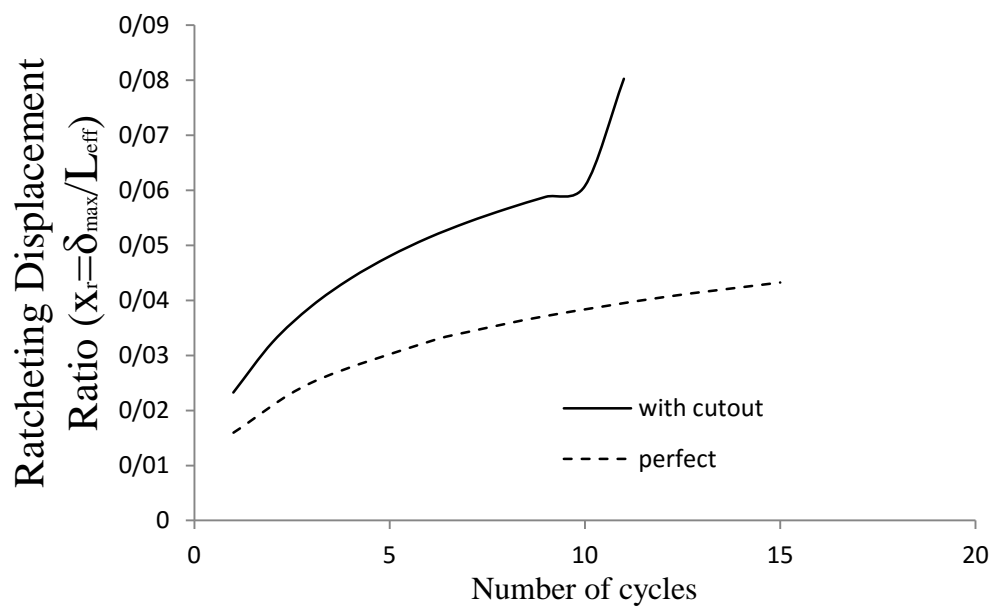
خمشی و نیروی اعمالی در مقاطع شامل گشودگی در جهت باز شدن آن عمل می‌کند و گشودگی دایروی با افزایش تعداد سیکل، تبدیل به شکل بیضوی می‌شود. از آنجایی که ایجاد گشودگی باعث افزایش تنش‌های نرمال در اطراف گشودگی می‌شود، در نتیجه شاهد کرنش‌های پلاستیک بزرگتری در اطراف گشودگی هستیم و اطراف گشودگی به عنوان محل بحرانی در این پوسته‌ها می‌باشد و این امر باعث افزایش جابجایی رچتینگ و شکست در سیکل ۱۱ از محل گشودگی می‌شود (شکل ۳-۳-۳).

((۲۴



شکل (۳-۳-۲۲) گشودگی دایروی در میانه ی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی





شکل (۳-۲۳) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm و بدون گشودگی دایروی تحت بارگذاری مرکب تناوبی



شکل (۳-۲۴) شکست پوسته های استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰mm از محل گشودگی تحت بارگذاری مرکب تناوبی

### ۳-۷- بارگذاری محوری و مقایسه بین بارگذاری محوری و مرکب

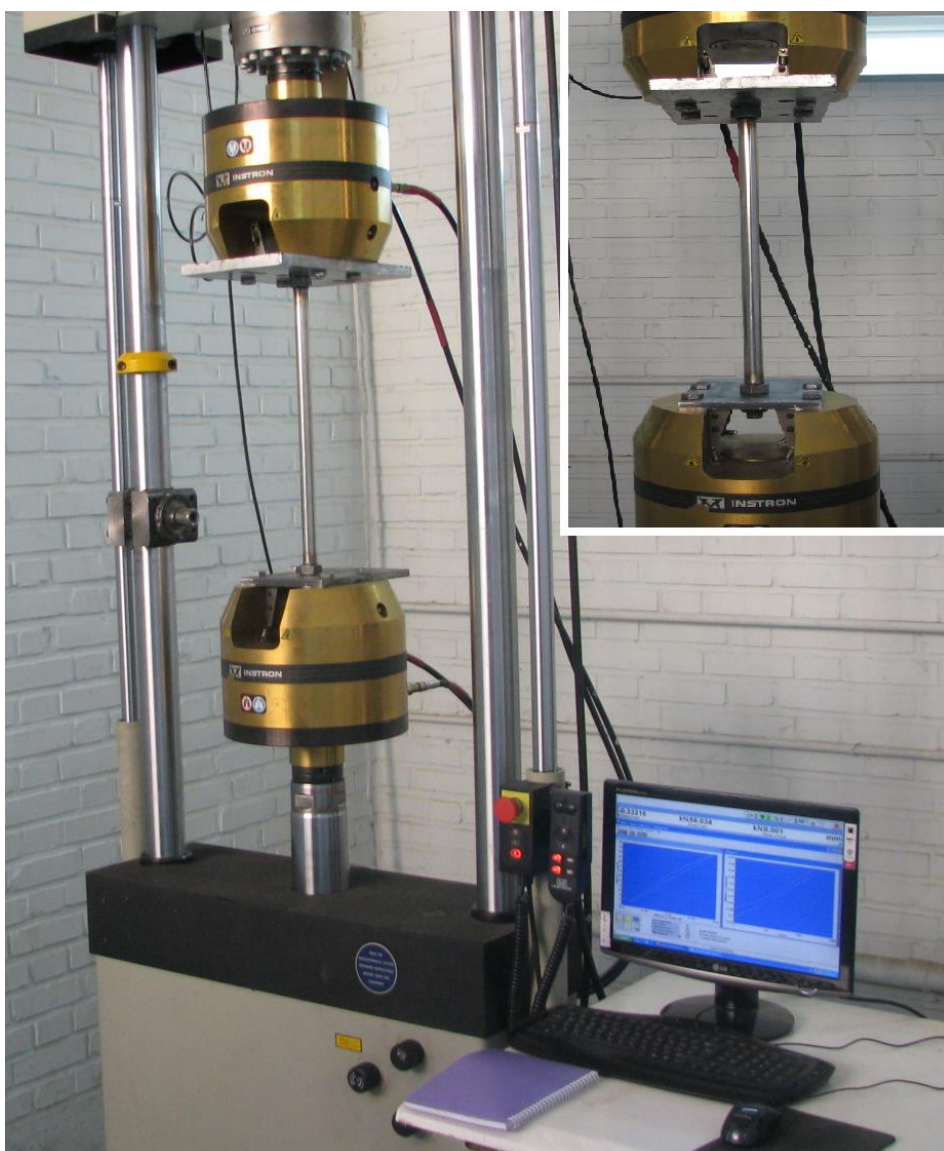
در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با سه طول ۲۴۰mm، ۳۴۰ و ۴۴۰ به طور عمودی تحت بار تناوبی با شرایط نیرو-کنترل قرار می‌گیرند (شکل (۳-۲۵)). همچنین پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۴۴۰mm و با گشودگی دایروی نیز تحت بار عمودی قرار گرفته و با نمونه بدون گشودگی و با همان طول مقایسه شده است. در این حالت نیز مشابه بارگذاری مرکب، نیرو به صورت سینوسی با نیروی میانگین و دامنه‌ی نیرو ۳۰ کیلونیوتن اعمال شده است و در نتیجه‌ی آن، حرکت حلقه‌های هیستریزس و انباشتگی تغییر شکل پلاستیک یا پدیده‌ی رچتینگ مشاهده می‌شود. پیچ‌های رزوه شده با طول مشخص نیز به مقدار ۲۰ mm درون دو انتهای پوسته قرار گرفته و از اطراف لبه‌ها به پوسته جوش شده‌اند و بنابراین طول مؤثر پوسته با کاهش ۲۰mm از هر طرف پوسته، بدست می‌آید.

### ۳-۷-۱- تأثیر وجود گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آنها

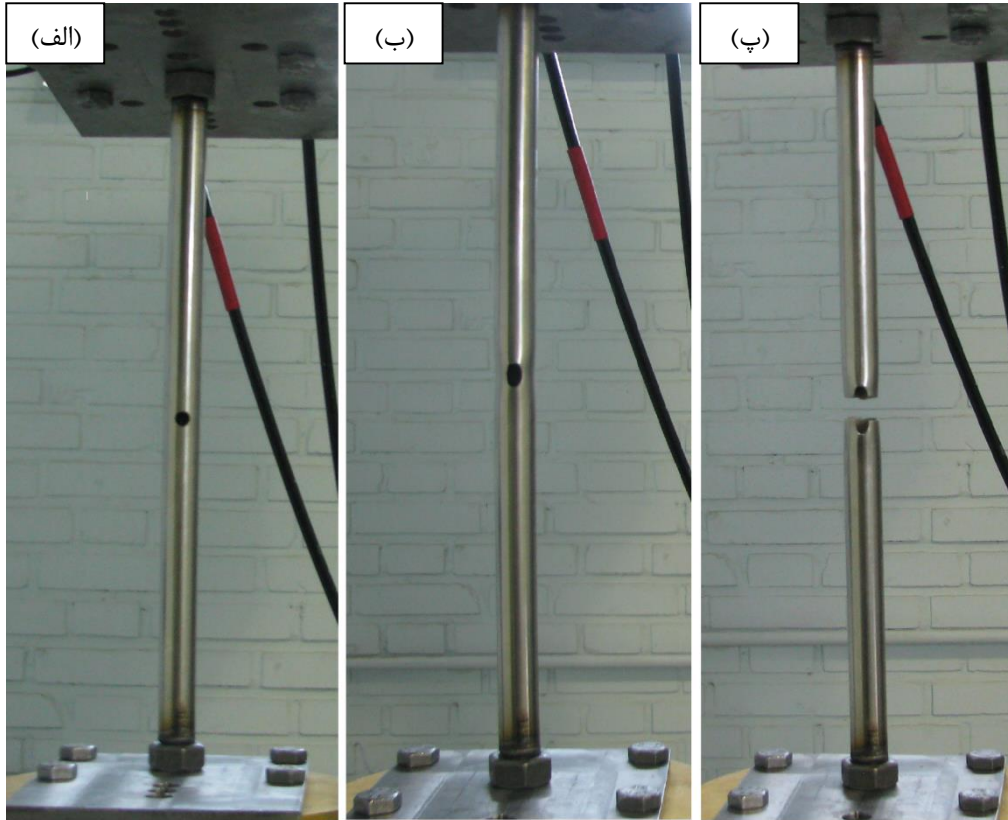
#### تحت بارگذاری محوری

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۴۴۰mm تحت بارگذاری محوری قرار گرفته است. یک گشودگی دایروی با قطر ۱۰mm در میانه‌ی پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد شده است و بار میانگین و بار دامنه‌ی ۳۰kN به نمونه اعمال شد (شکل (۳-۲۶)). در این حالت نیز با توجه به شکل (۳-۲۷)، با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ برای پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی آن افزایش می‌یابد و جابجایی رچتینگ و نرخ آن برای پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی دایروی بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی است؛ اما این اختلاف در مقایسه با پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب در شکل (۳-۲۳)، بسیار کمتر است و این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های مایل است که در اطراف گشودگی، تنش‌های نرمال بزرگتری را ایجاد می‌کند و موجب افزایش اختلاف جابجایی رچتینگ پوسته‌های مایل با گشودگی در مقایسه با پوسته‌های مایل بدون گشودگی

می‌شود. در حالت بارگذاری محوری نیز شاهد تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگتری در اطراف گشودگی به دلیل وجود تنش‌های عمودی ماکزیمم هستیم و گشودگی دایروی در حین بارگذاری تبدیل به گشودگی بیضوی می‌شود و این نقاط به عنوان نقاط بحرانی می‌باشند و پوسته استوانه‌ای نیز در سیکل ۵۷۸ و از همین نقاط دچار شکست می‌شود (شکل (۳-۲۶)).

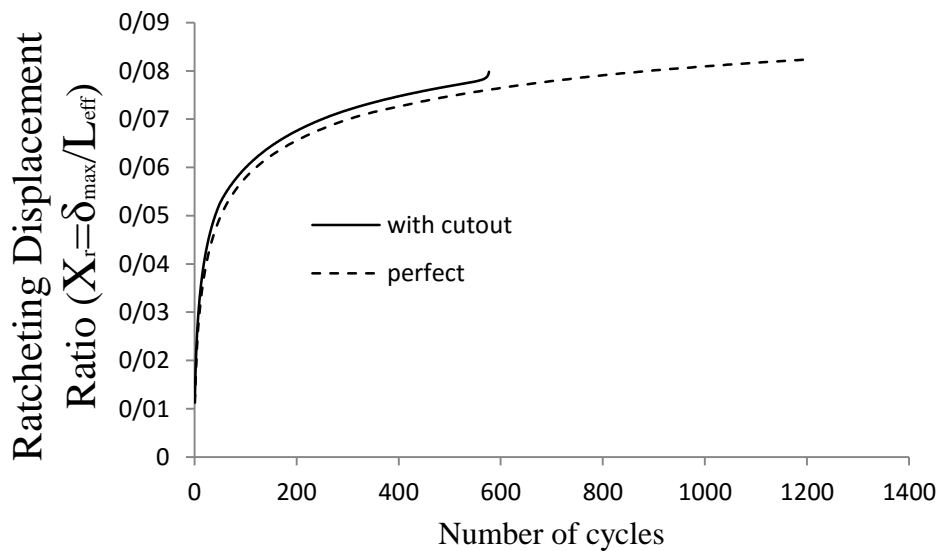


شکل (۳-۲۵) دستگاه اینسترون و پوسته ی استوانه ای تحت بارگذاری محوری تناوبی



شکل (۳-۲۶) رفتار پوسته های استوانه ای با گشودگی دایروی در میانه ی پوسته استوانه ای تحت

بارگذاری محوری تناوبی، الف) قبل از آزمایش، ب) در حین آزمایش، پ) پس از آزمایش

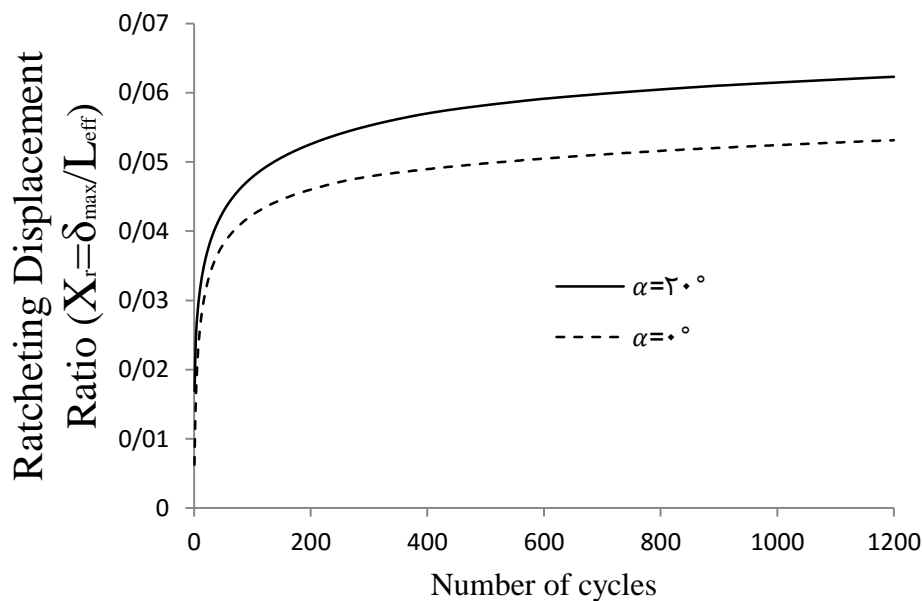


شکل (۳-۲۷) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر

۴۰۰mm با و بدون گشودگی دایروی تحت بارگذاری محوری تناوبی

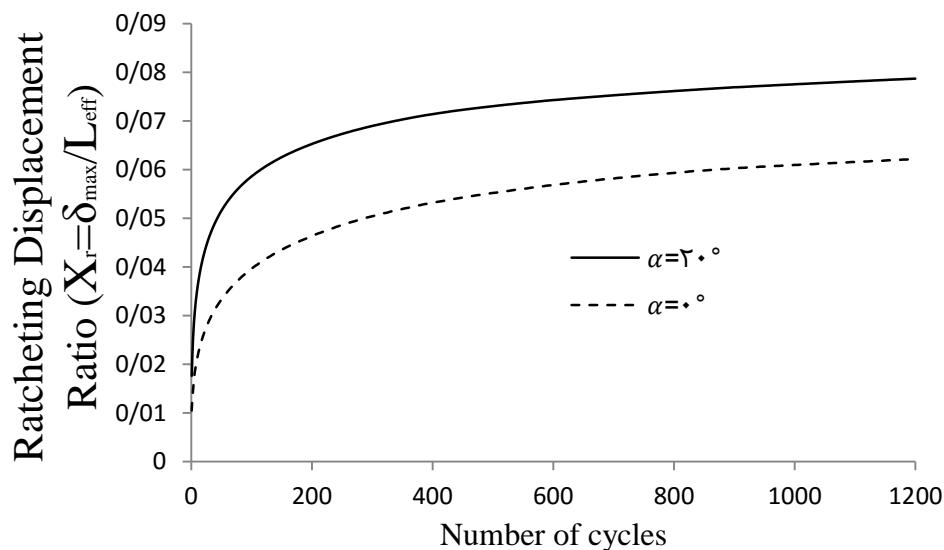
### ۳-۷-۲- تأثیر زاویه ی پوسته استوانه ای بر رفتار رچتینگ آن

در بررسی تأثیر زاویه ی پوسته های استوانه ای بدون گشودگی، آزمایش های نیرو-کنترل در ۱۲۰۰ سیکل انجام شد. در شکل های (۲۸-۳)، (۲۹-۳) و (۳۰-۳)، نسبت جابجایی رچتینگ ابتدای پوسته به طول مؤثر پوسته بر حسب تعداد سیکل برای سه طول نشان داده شده است. مشاهده می شود که در حالت بارگذاری عمودی مشابه بارگذاری مرکب، با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می یابد. اما برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پوسته استوانه ای مایل دارای جابجایی رچتینگ بیشتری نسبت به پوسته استوانه ای عمودی است که این به دلیل ایجاد گشتاور خمشی علاوه بر نیروی عمودی در مقاطع مختلف پوسته استوانه ای مایل است که با خمش پوسته استوانه ای مایل همراه است در حالیکه در پوسته استوانه ای عمودی، تنها نیروی عمودی اعمال شده است.



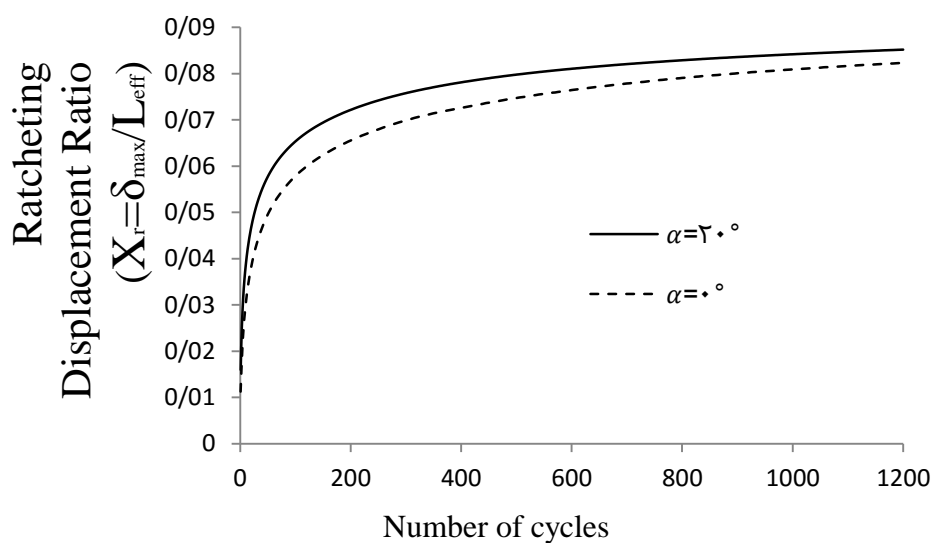
شکل (۲۸-۳) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته های استوانه ای با طول مؤثر

۲۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی



شکل (۳-۲۹) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۰۰ mm

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

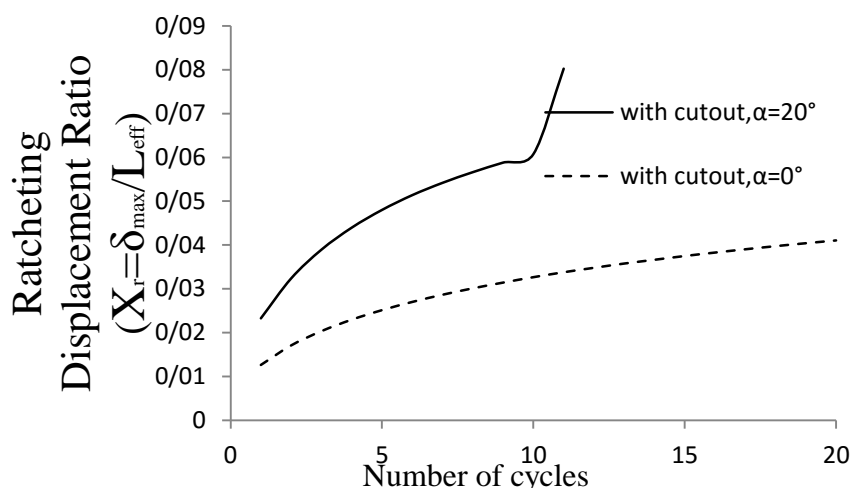


شکل (۳-۳۰) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر

۴۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

در بررسی پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی تحت بارگذاری مرکب و محوری در شکل (۳-۳۱) مشاهده می‌شود که برای یک سیکل معین، جابجایی رچتینگ و نرخ آن در بارگذاری مرکب بیشتر از

بارگذاری عمودی است و نمونه در تعداد سیکل کمتری می‌شکند و این به دلیل تنش‌های نرمال بزرگتری است که در اطراف گشودگی و در بارگذاری مرکب وجود دارد.



شکل (۳-۳۱) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی

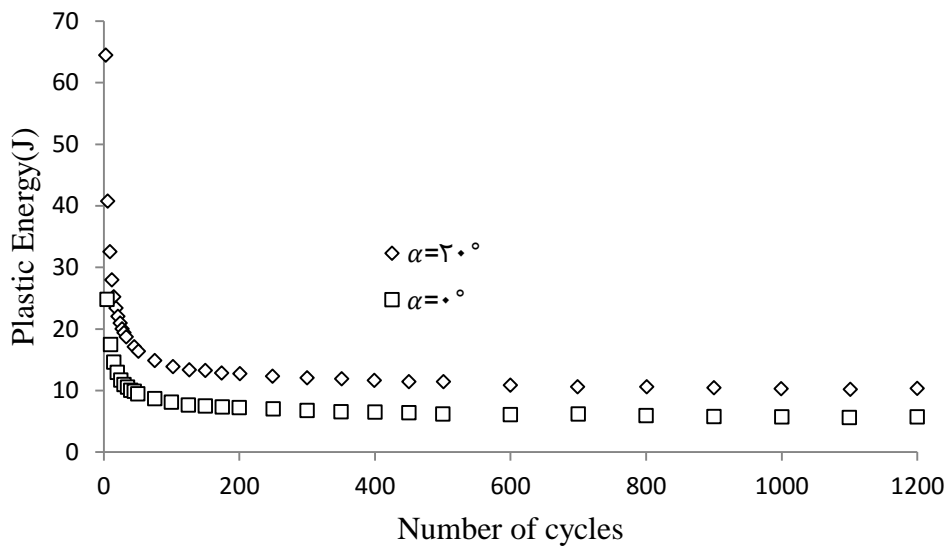
دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

### ۳-۷-۳- تأثیر زاویه‌ی پوسته‌استوانه‌ای بر انرژی پلاستیک آن و رابطه‌ی بین

#### انرژی پلاستیک و نرخ جابجایی رچتینگ

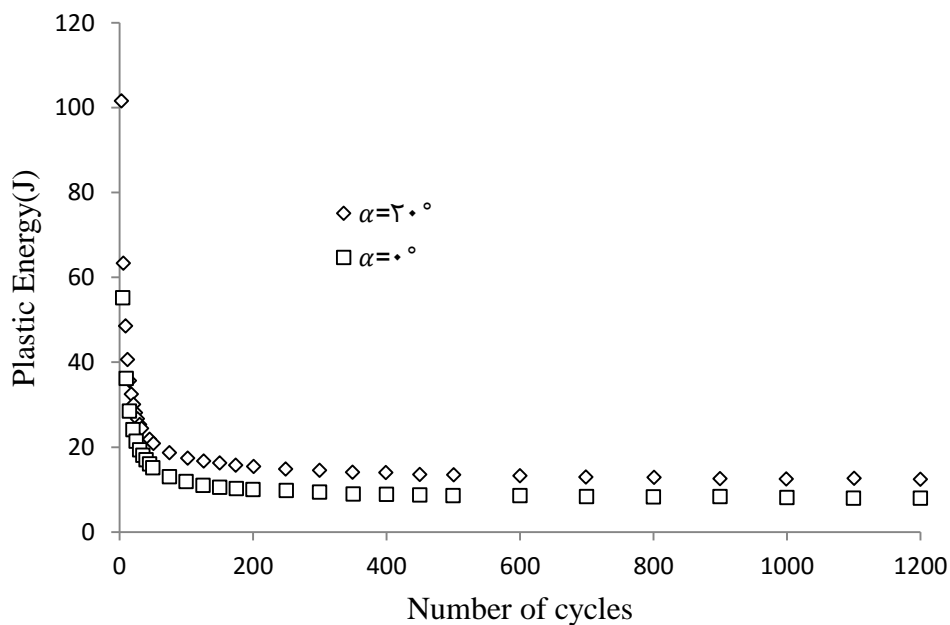
همانطور که در بخش‌های قبل گفته شد، انرژی به دلیل مستقل بودن از جهت، قابل مقایسه برای بارگذاری‌های مختلف می‌باشد. در این قسمت انرژی پلاستیک به عنوان انرژی اتلافی در دو حالت پوسته‌های استوانه‌ای با زاویه صفر درجه و ۲۰ درجه نسبت به عمود، با هم مقایسه شده است. با توجه به شکل‌های (۳-۳۲) و (۳-۳۳)، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل، انرژی اتلاف شده و به عبارت دیگر تغییر شکل پلاستیک در هر سیکل کاهش می‌یابد تا اینکه پایدار و ثابت شود. همچنین در پوسته‌های استوانه‌ای مایل نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای عمودی، در هر سیکل اتلاف انرژی پلاستیک بیشتر است و این نیز بر وجود و تأثیر گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل صحنه

می‌گذارد. بنابراین گشتاور خمشی در پوسته باعث افزایش انرژی اتلافی و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک می‌شود.



شکل (۳-۳۲) انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۰۰ mm

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

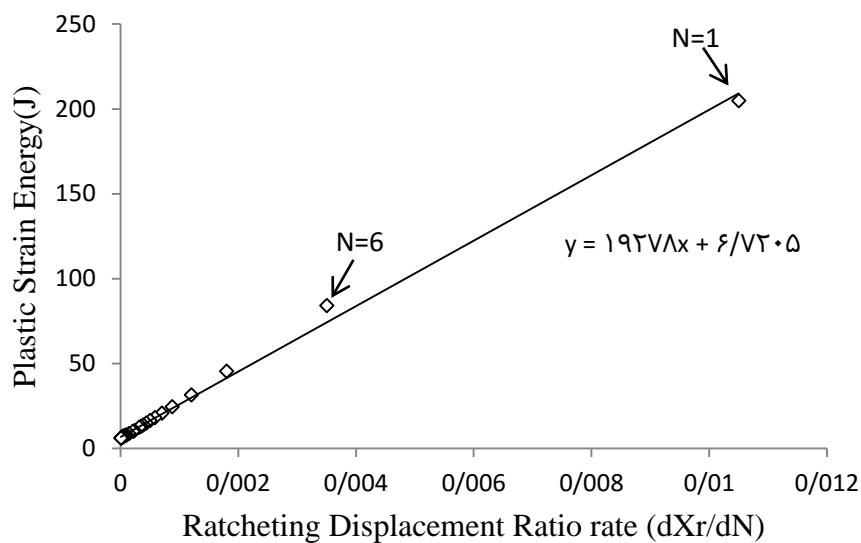


شکل (۳-۳۳) انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۴۰۰ mm

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

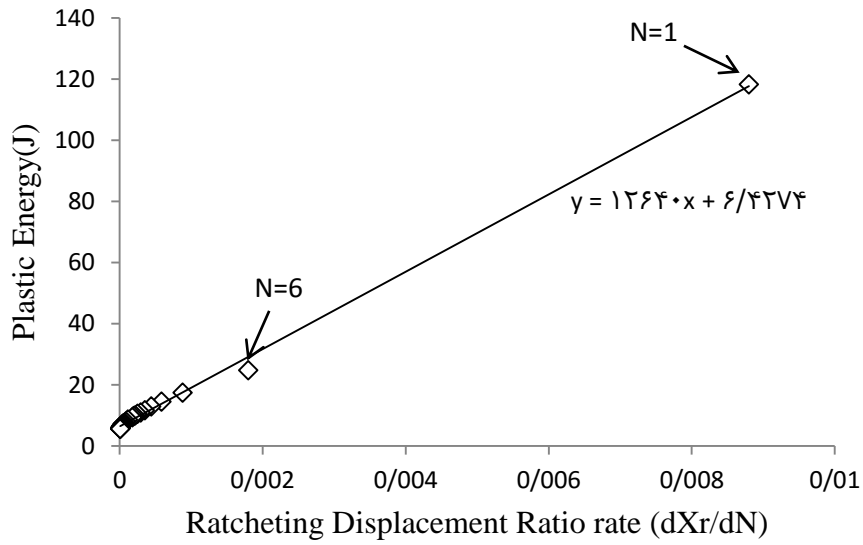


در شکل‌های (۳۴-۳)، (۳۵-۳) و (۳۶-۳)، مشابه بارگذاری مرکب، بین انرژی پلاستیک و نرخ جابجایی رچتینگ رابطه‌ی تقریباً خطی وجود دارد که در بخش ۳-۵- و از رابطه‌ی (۳-۱۲) با استفاده از مدل AF نیز چنین نتیجه‌ای بدست آمد که با افزایش تعداد سیکل، نرخ افزایش جابجایی رچتینگ در هر سیکل به صورت خطی کاهش می‌یابد و این نشانه‌ی صلبیت فیکسچرهای مورد استفاده در بارگذاری محوری می‌باشد.

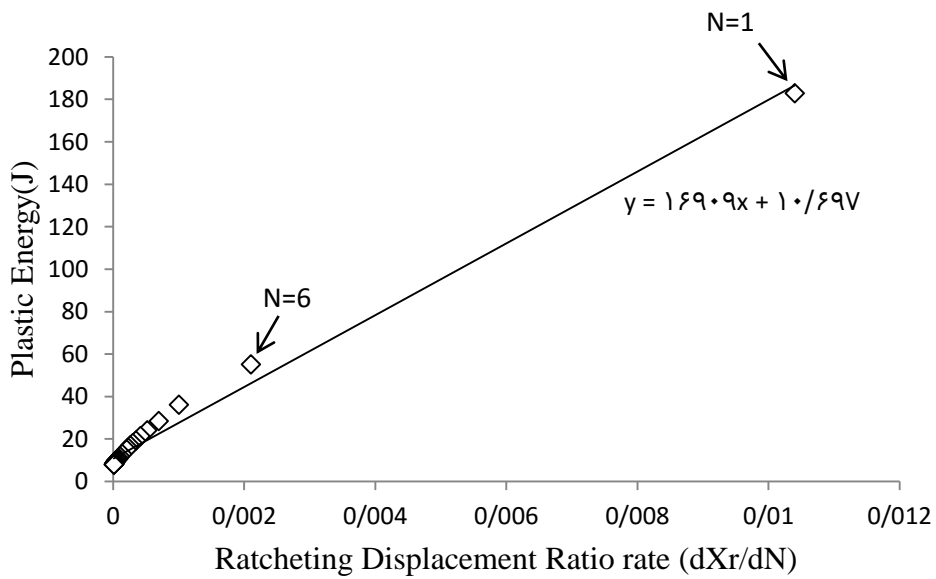


شکل (۳۴-۳) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه‌ای با طول مؤثر

۲۰۰ mm تحت بارگذاری محوری تناوبی

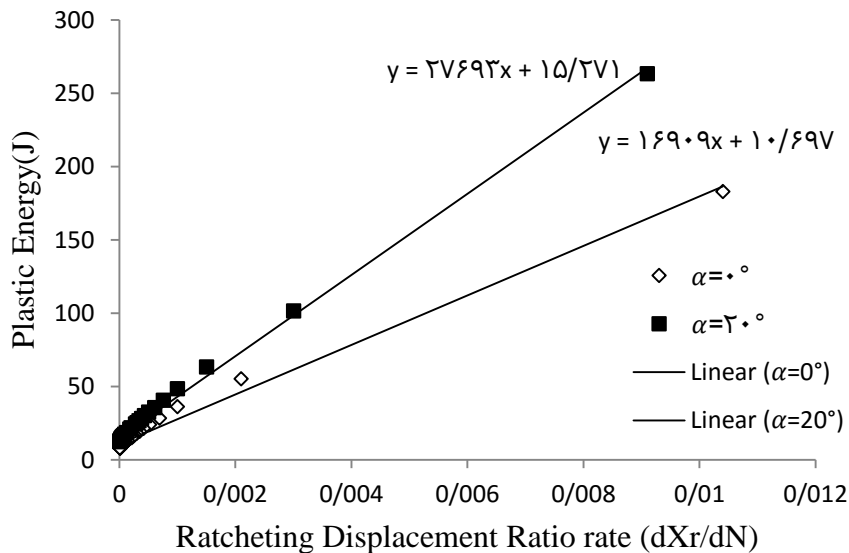


شکل (۳-۳۵) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۳۰۰ mm تحت بارگذاری محوری تناوبی



شکل (۳-۳۶) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه ای با طول مؤثر ۴۰۰ mm تحت بارگذاری محوری تناوبی

در شکل (۳-۳۷)، رابطه‌ی بین انرژی پلاستیک و نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته استوانه‌ای مایل و عمودی با طول مؤثر ۴۰۰mm نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای افت معین نرخ جابجایی رچتینگ، کاهش انرژی پلاستیک در پوسته‌های استوانه‌ای مایل بیشتر است. اگرچه در هر سیکل، پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای عمودی است؛ ولی در پوسته استوانه‌ای مایل با کاهش معین نرخ جابجایی رچتینگ به کاهش در مقدار ممان خمشی در هر سیکل منجر می‌شود و در نتیجه به دلیل اثر چشمگیر ممان خمشی، با کاهش قابل ملاحظه در مقدار انرژی پلاستیک همراه است.



شکل (۳-۳۷) اختلاف شیب منحنی انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته‌های

استوانه‌ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

### ۳-۸- نتیجه گیری

در این فصل رفتار تجربی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ SS304L تحت بارگذاری‌های مرکب و محوری مورد تحلیل قرار گرفت. بارگذاری‌ها به صورت سیکلی و در شرایط نیرو-کنترل روی نمونه‌ها اعمال گردید و تاثیر طول پوسته استوانه‌ای و تاریخچه بارگذاری در بارگذاری مرکب و تاثیر

زاویه پوسته استوانه‌ای و وجود گشودگی در بارگذاری مرکب و محوری بر رفتار رچتینگ و میزان انرژی پلاستیک هر سیکل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی در زیر گزارش شده است.

۱. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته استوانه‌ای برای یک سیکل معین، جابجایی رچتینگ به دلیل افزایش گشتاور خمشی، افزایش می‌یابد.
۲. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل برای یک طول معین پوسته استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.
۳. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل، پوسته استوانه‌ای از نقاط انتهایی به دلیل وجود گشتاور خمشی بیشتر در این نواحی، دچار خمش می‌شود و کشیدگی در این نواحی بیشتر است.
۴. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته استوانه‌ای جابجایی رچتینگ دارای نرخ و مقدار بالاتری است.
۵. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای با افزایش دامنه‌ی نیرو، جابجایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد.
۶. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای با کاهش دامنه‌ی نیرو، نرخ جابجایی رچتینگ صفر و انباشتگی تغییر شکل پلاستیک متوقف می‌شود. بنابراین پیش-بارهای اعمالی باعث مهار رفتار رچتینگ در بارگذاری‌های سیکلی متوالی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شوند.
۷. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، پوسته با طول بلندتر دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به پوسته با طول کوتاهتر است که با

- افزایش سیکل این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین برای یک طول معین، با افزایش تعداد سیکل انرژی پلاستیک در هر سیکل کاهش می‌یابد تا اینکه به مقدار ثابتی برسد.
۸. در بارگذاری سیکلی از نوع مرکب و محوری تحت شرایط نیرو-کنترل برای طول‌های مختلف پوسته استوانه‌ای، رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک هر سیکل با نرخ جابجایی رچتینگ در آن سیکل مشاهده شد و با کاهش انرژی پلاستیک، نرخ جابجایی رچتینگ نیز به صورت خطی کاهش می‌یابد که این نشانه‌ی صلیبیت فیکسچرهای مورد استفاده است.
۹. با افت معین نرخ جابجایی رچتینگ در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، به دلیل کاهش بیشتر گشتاور خمشی در پوسته‌های با طول بلندتر، کاهش در انرژی پلاستیک آن بیشتر است.
۱۰. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای، در مرحله‌ی اول، انرژی پلاستیک با نرخ جابجایی رچتینگ رابطه‌ی خطی دارد؛ اما در گام‌های بعدی، نمودار انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ، داری قله‌ای است که انرژی پلاستیک بیشترین مقدار را دارد.
۱۱. در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پوسته استوانه‌ای مایل دارای جابجایی رچتینگ بیشتری نسبت به پوسته استوانه‌ای عمودی است که این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل است.
۱۲. در پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای گشودگی، جابجایی رچتینگ و نرخ آن بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان است و این به دلیل افزایش تنش‌های نرمال در اطراف گشودگی و

افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگتر می‌باشد که منجر به شکست نمونه از این نقاط می‌شود.

۱۳. در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی تحت بارگذاری محوری، جابجایی رچتینگ و نرخ آن بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان است؛ اما این اختلاف کمتر از پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب می‌باشد و این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل است که اختلاف تغییرشکل‌های پلاستیک را بین نمونه‌های با گشودگی و بدون گشودگی تحت بارگذاری مرکب افزایش می‌دهد.

۱۴. به دلیل وجود تنش‌های نرمال بزرگتری که در اطراف گشودگی ناشی از گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل وجود دارد، در این نمونه‌ها نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای عمودی تحت بارگذاری محوری دارای گشودگی، شکست سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

۱۵. در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، در پوسته‌های استوانه‌ای مایل نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای عمودی در هر سیکل، اتلاف انرژی بیشتر است که این نیز به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل است. بنابراین گشتاور خمشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انرژی اتلافی و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک دارد.

۱۶. در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افت معین نرخ جابجایی رچتینگ، به دلیل کاهش در مقدار گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل، کاهش در انرژی پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای عمودی با همان طول است.

## فصل ۴

تحلیل عددی رفتار کمانش و رچتینگ

پوسته های استوانه ای و مقایسه نتایج

عددی و تجربی

#### ۴-۱- مقدمه ای در رابطه با تحلیل عددی

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

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

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

#### ۴-۱-۱- روش‌های اجزاء محدود

روش اجزای محدود روشی است که برای حل بسیاری از مسائل شاخه‌ی مهندسی به کار می‌رود و دارای دو تقسیم بندی اولیه است. در یکی از این تقسیم‌بندی‌ها برای به دست آوردن تغییر مکان در نقاط اتصال اجزا و محاسبه‌ی نیروی اعضای سازه‌ها از اجزای مجزا استفاده می‌شود. این روش که تحلیل ماتریسی سازه‌ها نام دارد، دارای نتایجی مطابق با تحلیل کلاسیک سازه‌هاست. در تقسیم بندی نوع دوم از اجزای محیط پیوسته برای تعیین حل‌های تقریبی در مباحث انتقال گرما، مکانیک سیالات و مکانیک جامدات استفاده می‌شود. در این روش حل تقریبی پارامترهای مطلوب در نقاطی که گره<sup>۱</sup>

<sup>1</sup> Node



نامیده می‌شوند به دست می‌آیند. اگر چه مفهوم اجزای محدود در واقع برای شاخه‌ی دوم تقسیم‌بندی فوق مصداق پیدا می‌کند؛ ولی این روش هر دو تقسیم بندی را در بر می‌گیرد به طوری که برنامه‌های جامع رایانه‌ای که بر اساس این روش نوشته می‌شوند، قابلیت حل هر دو گروه از مسائل را دارند. توسط روش اجزای محدود، مفاهیم متعددی از ریاضیات با هم پیوند خورده تا دسته‌ای از معادلات خطی و یا غیرخطی ایجاد شوند. این معادلات که تعداد آن‌ها گاه از ۲۰۰۰۰ معادله نیز فراتر می‌رود، به قدرت محاسباتی بالا توسط رایانه نیاز دارند. بنابراین در صورت عدم دسترسی به رایانه، این روش ارزش کاربردی چندانی نخواهد داشت.

در اوایل دهه ۱۹۶۰ مهندسان از این روش برای حل تقریبی مسائل تحلیل تنش، جریان سیال، انتقال گرما و ... استفاده کردند. انتشار کتابی در سال ۱۹۵۵ توسط آرجیریس<sup>۱</sup> درباره تئوری‌های انرژی و روش‌های ماتریسی، پایه گسترش بیشتر در بررسی اجزای محدود را بنا نهاد. اولین کتاب در زمینه روش اجزای محدود در سال ۱۹۶۷ به وسیله چونگ<sup>۲</sup> و زنکوویچ<sup>۳</sup> منتشر شد. در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ تحلیل اجزای محدود برای مسائل غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ بکار برده شد. کتاب ادن<sup>۴</sup> درباره محیط‌های پیوسته غیرخطی در سال ۱۹۷۲ به چاپ رسیده و پایه‌های ریاضیاتی این روش در دهه ۱۹۷۰ بنیان نهاده شد.

امروزه با پیشرفت و توسعه کامپیوترهای بزرگ، نسخه‌های تجاری نرم افزارهایی که بر اساس این روش به تحلیل مسائل پیچیده مهندسی می‌پردازند، به بازار آمده و سهم بسزایی را در طراحی و تحلیل قطعات جدید برعهده گرفته است. از مهم‌ترین این نرم افزارها می‌توان به انسیس و آباکوس اشاره نمود.

<sup>1</sup> Argyris

<sup>2</sup> Chung

<sup>3</sup> Zienkiewicz

<sup>4</sup> Oden

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

#### ۴-۱-۲- معرفی نرم افزار Abaqus/CAE

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

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

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

با آن مدل کرد. به عنوان مثال مسایل شامل بیش از یک جز را می‌توان با ایجاد مدل هندسی هر جز و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جز و سپس مونتاژ اجزای مختلف، مدل کرد. در بیشتر مدل‌سازی‌ها، حتی مدل‌های با درجه غیر خطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری آن مساله را تعیین کند. در یک تحلیل غیر خطی، آباکوس به طور خودکار میزان نمو بار و تفرانس‌های همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک پاسخ صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند. در این پژوهش از نسخه Abaqus/CAE/6.10.1 برای تحلیل‌های عددی استفاده شده است.

#### ۲-۴- کمانش در آباکوس

برای تحلیل مساله کمانش در نرم‌افزار آباکوس باید دو نوع تحلیل انجام شود. تحلیل اول باکل<sup>۱</sup> و تحلیل دوم استاتیک-ریکس<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

#### ۲-۴-۱- تحلیل باکل

این فرآیند حل، یک تحلیل خطی مقدار ویژه است و برای به دست آوردن مقادیر ویژه کمانش برای سازه‌های الاستیک و سخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر بار بحرانی، تغییر شکل‌های بحرانی و نیز شکل مدهای کمانش را به دست می‌دهد. یک مثال ساده از سازه‌های سخت، ستون اویلر است.

<sup>1</sup> Buckle

<sup>2</sup> Static riks

در این تحقیق سه مد کمانش اول که بار کمانش مشابهی داشتند برای ادامه تحلیل در نظر گرفته شد. جابجایی‌های مربوط به این شکل مدها در فایلی ذخیره شدند و در تحلیل بعدی (استاتیک ریکس) به عنوان نقص اولیه مورد استفاده قرار گرفتند تا تاثیر شکل مدها در تحلیل کمانش اعمال شود. در غیر این صورت نرم‌افزار به طور اختیاری مد کمانش را انتخاب می‌کند که این معمولاً به نتایج غیر واقعی منجر می‌شود.

#### ۴-۲-۲ - تحلیل استاتیک-ریکس

این روش حل یک فرآیند تحلیل بار - جابجایی غیر خطی است و برای تعیین بارهای فروپاشی به ویژه برای سازه‌های حساس به عیب و نقص مناسب است. در این تحلیل می‌توان غیر خطی بودن ماده، شرایط مرزی و هندسه را در نظر گرفت.

تحلیل غیرخطی مورد استفاده در این مقاله، تحلیل استاتیک-ریکس می‌باشد. در این روش، منحنی بار-جابجایی بدست می‌آید. مقدار ماکزیمم این منحنی، بار کمانش است. در تحلیل خطی، پاسخ جسم به بارگذاری در لحظه‌ای که کمانش رخ داده، پیوسته نیست. این مساله آنالیز جسم را پس از کمانش، غیر ممکن می‌سازد. در تحلیل استاتیک-ریکس برای حل این مشکل یک تغییر شکل جزئی (درصدی از تغییر شکلی که قرار است پس از کمانش به صورت ناگهانی ایجاد شود) به عنوان یک نقص هندسی در جسم ایجاد کرده و باعث می‌شود که پاسخ به بار از حالت ناپیوسته (در لحظه‌ای کمانش) به صورت پیوسته تبدیل شود و در نهایت استاتیک-ریکس با روش طول-کمان<sup>۱</sup> قادر به تحلیل پس کمانش خواهد بود.

#### ۴-۲-۳ - تحلیل عددی

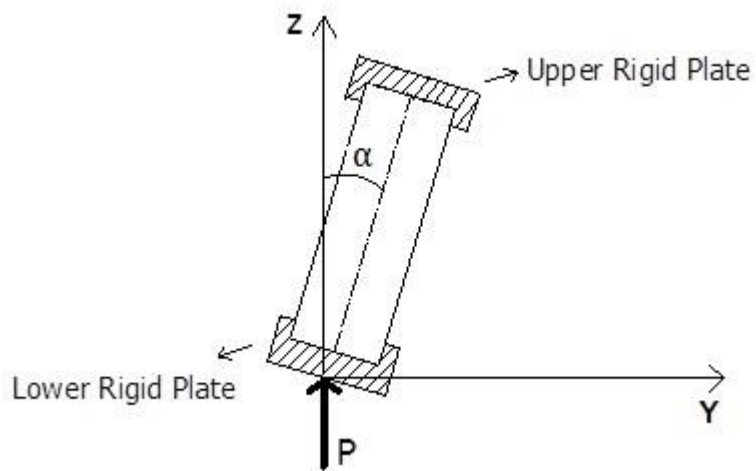
<sup>۱</sup> Arc-length

در این قسمت رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مایل فولادی تحت بارگذاری مرکب بررسی می‌شود. در دو طرف پوسته‌های استوانه‌ای مایل از دو تکیه‌گاه صلب به شکل لیوان استفاده شد و دو انتهای استوانه داخل این لیوان‌ها قرار می‌گیرد (شکل (۴-۱)). هر دو نمونه‌ی صلب دارای نقطه مرجع می‌باشند. یک جابجایی به میزان  $20\text{mm}$  به انتهای نمونه اعمال شده و بار کمانش آن محاسبه می‌شود. با توجه به شکل (۴-۱)، همه‌ی درجات آزادی نقطه مرجع بالایی به جز چرخش حول محور X (عمود بر صفحه) مقید می‌شود. همچنین تمام درجات آزادی نقطه مرجع پایینی به جز حرکت در راستای Z مقید شده است. در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل عددی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مایل تحت بارگذاری مرکب با  $\alpha=15^\circ$  ارائه شده است.

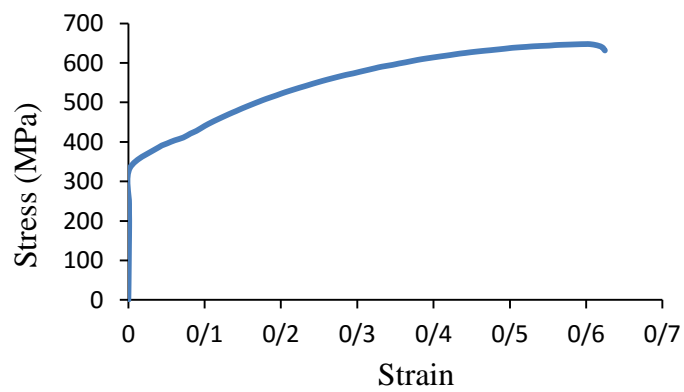
نمودار تنش-کرنش پلاستیک فولاد مورد تحلیل کمانش در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. از المان S8R5 که یک المان پوسته‌ای با ۸ گره می‌باشد، استفاده شده است. در این المان هر گره دارای ۵ درجه آزادی می‌باشد. در این بخش نامگذاری نمونه‌ها به این صورت است که اعداد بعد از D،  $L_0$  و  $L$  به ترتیب بیانگر قطر، طول و فاصله‌ی مرکز گشودگی تا انتهای آن می‌باشد. همچنین اعداد بعد از a و b قطر گشودگی بیضوی به ترتیب در جهات محوری و محیطی را نشان می‌دهند.

در شکل (۴-۳)، بار کمانش بر حسب اندازه‌ی المان در نرم افزار آباکوس برای پوسته استوانه‌ای فولادی با گشودگی بیضوی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با ریزتر شدن المان‌ها بار کمانش به عدد خاصی در حال همگرا شدن است. بنابراین انتخاب اندازه‌ی المان طوری است که با خطای حداقل در مدت زمان مناسب، تحلیل کمانش انجام شود. در شکل (۴-۴)، سه مدل اول کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای گشودگی بیضوی با زاویه  $\alpha=15^\circ$  نشان داده شده است.

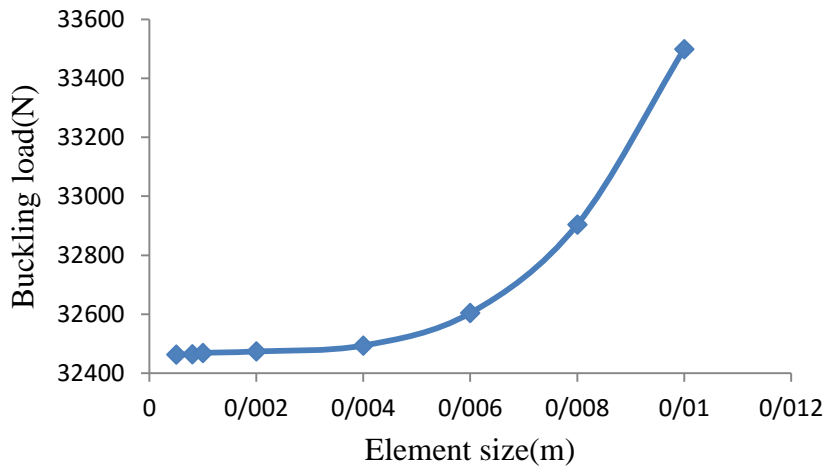
با توجه به شکل (۴-۵)، پارامترهای مربوط به پوسته استوانه‌ای با گشودگی‌های بیضوی و مستطیلی نشان داده شده است. در تحلیل کمانش  $\alpha=15^\circ$  و  $\theta=0^\circ$  است جز در مواردی که مقدار  $\theta$  ذکر شود.



شکل (۱-۴) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه

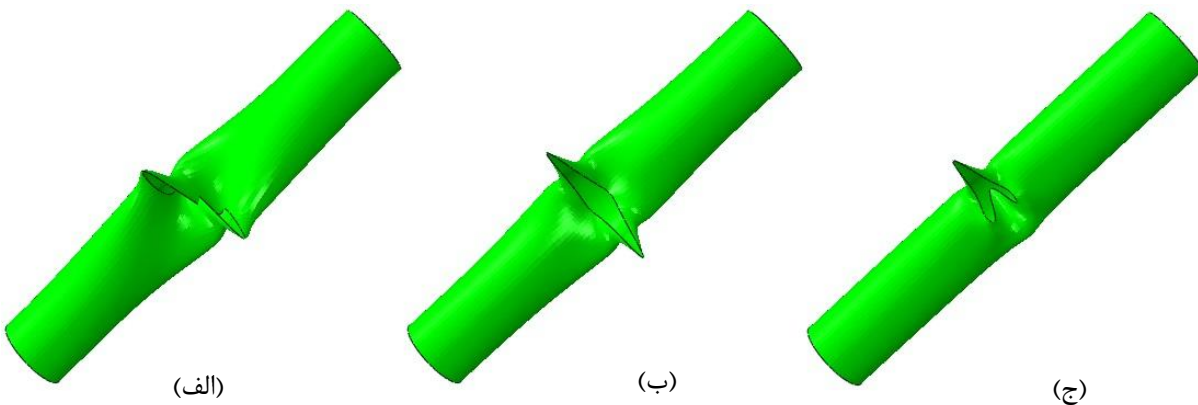


شکل (۲-۴) منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک [۵۰]



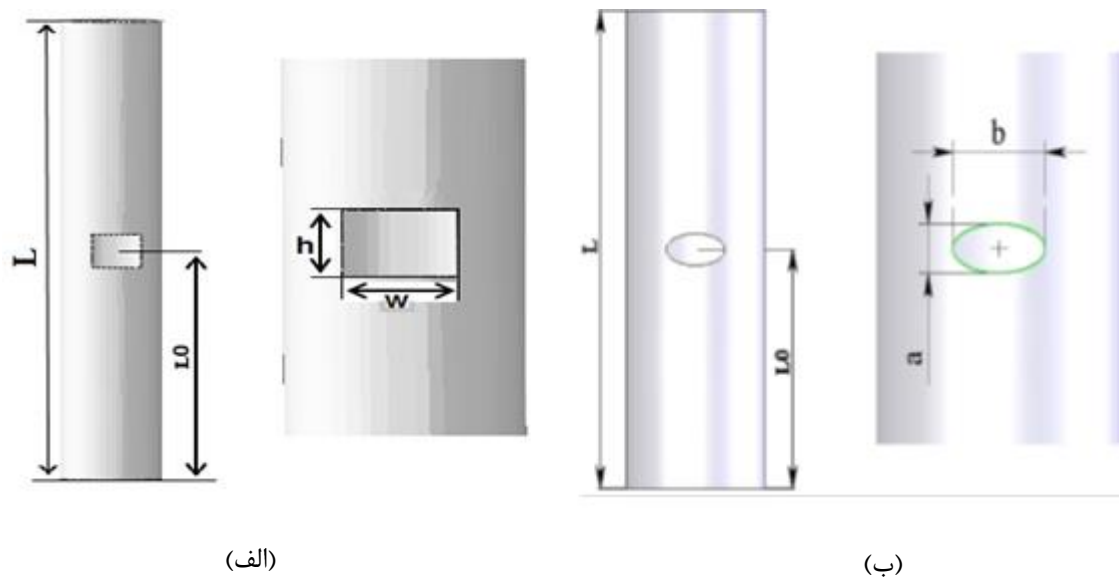
شکل (۳-۴) بار کمانش بر حسب اندازه المان اطراف گشودگی بیضوی برای نمونه D۴۲-L۲۵۰-L0۱۷۵-a۱۸-b۲۶

a۱۸-b۲۶



شکل (۴-۴) سه مود اول کمانشی برای نمونه D۴۲-L۲۵۰-L0۱۷۵-a۱۸-b۲۶ (الف) مود اول (ب) مود دوم (ج) مود سوم

(ج) مود سوم



شکل (۴-۵) هندسه پوسته استوانه ای، الف) با گشودگی مستطیلی، ب) با گشودگی بیضوی

#### ۴-۲-۴ - مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای

در این قسمت از نتایج تجربی در مرجع [۵۰] به منظور اعتبار بخشیدن به تحلیل کمانش غیرخطی استفاده شده است که فیکسچر مورد استفاده در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. در جدول (۴-۱)، نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است.





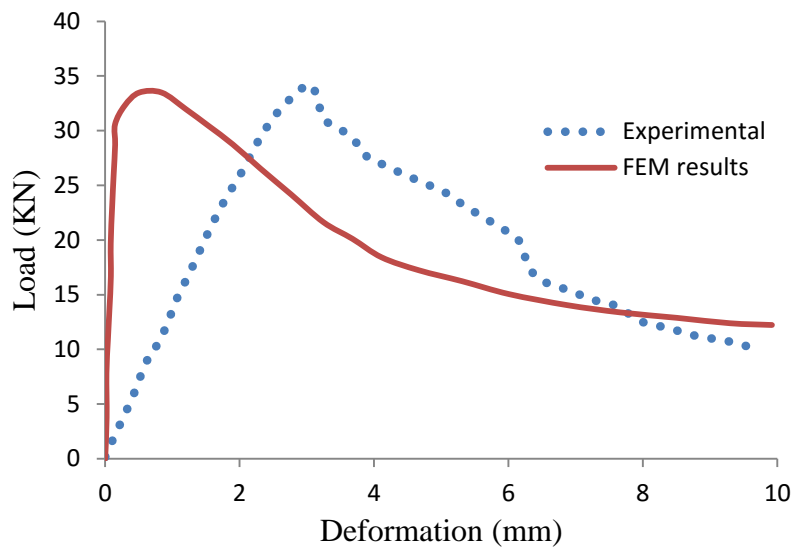
شکل (۴-۶) فیکسچر استفاده شده در حین بارگذاری مرکب بر روی نمونه در آزمایش کمانش در مرجع

[۵۰]

جدول (۴-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی بار کمانش برای پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی بیضوی

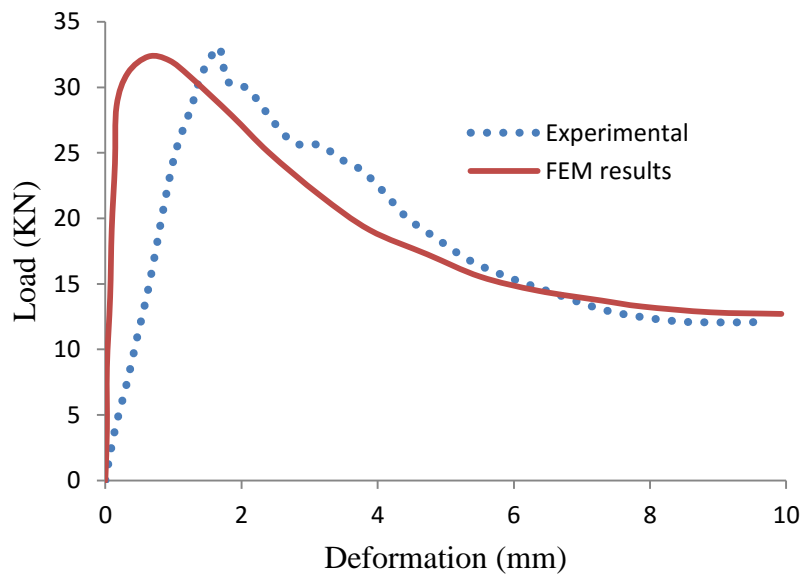
بار کمانش		موقعیت	ابعاد گشودگی	زاویه‌ی پوسته نسبت	عنوان نمونه
تجربی	عددی	$\frac{I_0}{L}$ گشودگی	$a \times b$	به خط عمود $\alpha$	
۳۴۳۳۲/۸۳	۳۳۸۳۶/۰۲	۰/۵	۱۸ × ۲۲	۱۵	D۴۲-L۲۵۰-L <sub>۰</sub> ۱۲۵-a۱۸-b۲۲
۳۲۷۷۴/۵۴	۳۲۵۳۱/۴۹	۰/۵	۱۸ × ۲۶	۱۵	D۴۲-L۲۵۰-L <sub>۰</sub> ۱۲۵-a۱۸-b۲۶
۳۵۱۲۷/۹۰	۳۳۱۶۴/۸۷	۰/۸۳	۱۸ × ۲۶	۱۵	D۴۲-L۱۵۰-L <sub>۰</sub> ۱۲۵-a۱۸-b۲۶

در شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸)، نمودار نیرو-جابجایی ابتدای پوسته برای دو نمونه در دو حالت تجربی و عددی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین بار که همان بار کمانشی است، بسیار به هم نزدیک می‌باشد؛ اما شیب قسمت خطی منحنی در نتایج عددی بیشتر از نتایج تجربی است و این به دلیل وجود عیب‌های داخلی در ماده است که باعث کاهش سفتی در نمونه‌های واقعی می‌شود؛ در حالیکه در تحلیل عددی نمونه‌ها ایده‌ال است.



شکل (۷-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی منحنی بار-فشرده‌گی انتهایی برای نمونه L<sub>0</sub> ۱۲۵-a۱۸-b۲۲-

D۴۲-L۲۵۰



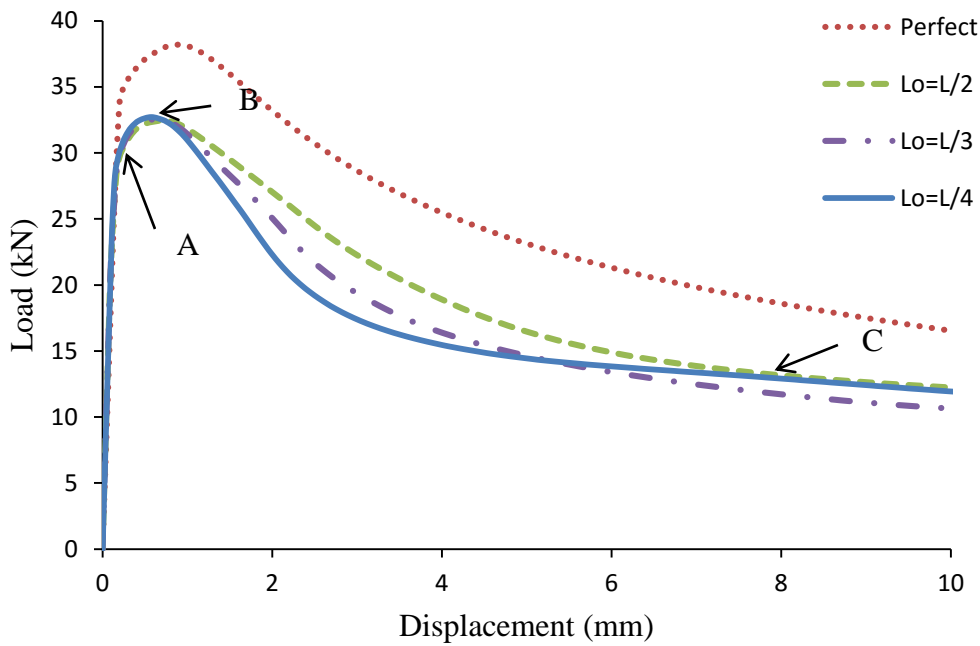
شکل (۸-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی منحنی بار-فشرده‌گی انتهایی برای نمونه L<sub>0</sub> ۱۲۵-a۱۸-b۲۶-

D۴۲-L۲۵۰

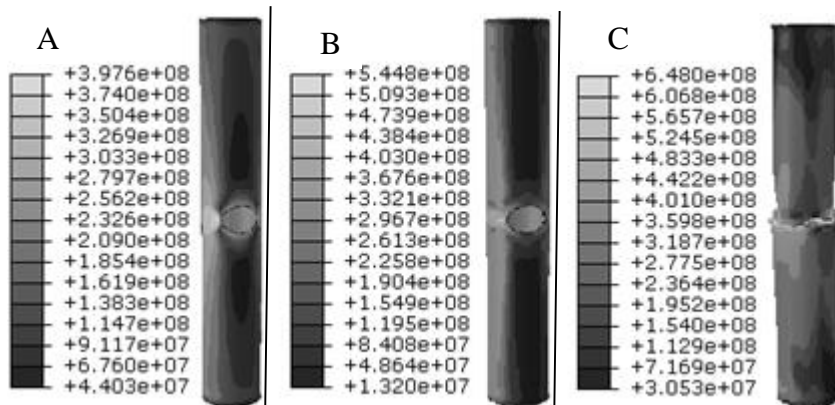
## ۴-۲-۵- تأثیر تغییر عرض گشودگی بیضوی بر روی بار کمانش پوسته‌های استوانه

## ای تحت بارگذاری مرکب

در این بخش، با تغییر عرض گشودگی (b)، رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با شرایط  $\theta=0^\circ$  بررسی می‌شود. در شکل (۴-۹) نمودار نیرو-جابجایی نقطه اعمال بار و کانتور تنش وان میزز متناظر با نقاط مشخص شده بر نمودار برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی بیضوی در میانه پوسته نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تنش‌ها نسبت به گشودگی در میانه پوسته متقارن هستند و تنش‌های ناحیه‌ی جلوی پوسته دارای گشودگی جز در اطراف گشودگی، تنش‌های ضعیف‌تری را نسبت به ناحیه‌ی دیگر تحمل می‌کنند. همچنین نواحی اطراف گشودگی قبل از ایجاد کمانش تسلیم می‌شوند. در این لحظه خمش موضعی در اطراف گشودگی ایجاد شده است و در نهایت منجر به خمش کلی می‌شود. نمودار نیروی کمانش بر حسب نسبت ابعاد گشودگی بیضوی در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در ارتفاع ثابت (a)، افزایش عرض گشودگی بیضوی (b) با کاهش شدید بار کمانش همراه است.



(الف)

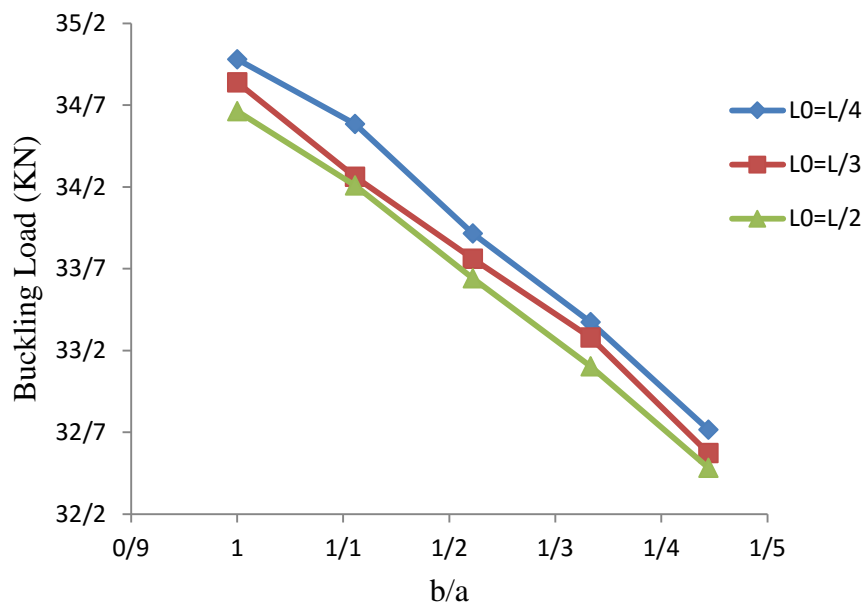


(ب)

شکل (۹-۴) الف) منحنی بار برحسب جابجایی انتهایی برای نمونه های با D۴۲-L۲۵۰-a۱۸-b۲۶

گشودگی بیضوی در موقعیت های مختلف و بدون گشودگی ب) تنش وان میز در سه لحظه برای

نمونه D۴۲-L۲۵۰-L۰۱۲۵-a۱۸-b۲۶



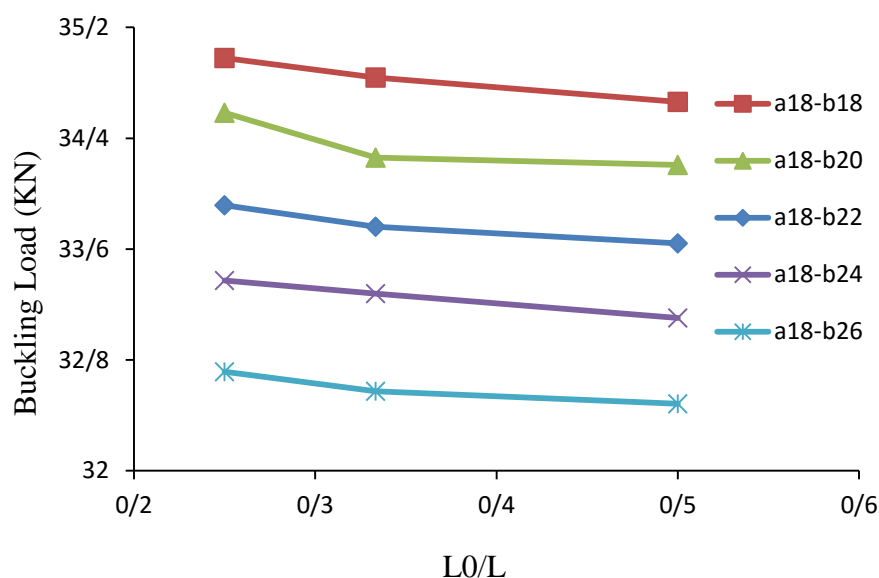
شکل (۴-۱۰) منحنی بار کمانش بر حسب نسبت عرض گشودگی بیضوی با ارتفاع ثابت در موقعیت های

مختلف

#### ۴-۲-۶- تأثیر موقعیت گشودگی بیضوی بر رفتار کمانش پوسته استوانه ای تحت

##### بارگذاری مرکب

در شکل (۴-۱۱)، منحنی بار کمانش بر حسب موقعیت گشودگی با اندازه‌های مختلف ابعاد گشودگی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-۱۱)، با تغییر موقعیت گشودگی از لبه‌های پوسته به میانه‌ی آن، بار کمانش کاهش می‌یابد.



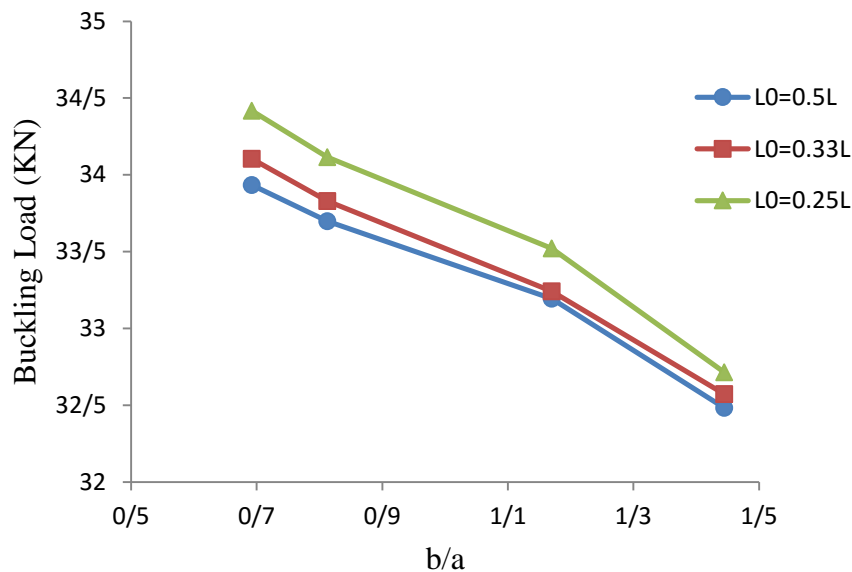
شکل (۴-۱۱) منحنی بار کمانش بر حسب موقعیت گشودگی بیضوی با اندازه‌های مختلف برای پوسته -

های استوانه‌ای

#### ۴-۲-۷- تأثیر تغییر ابعاد گشودگی‌های بیضوی با مساحت ثابت بر رفتار کمانش

##### پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب

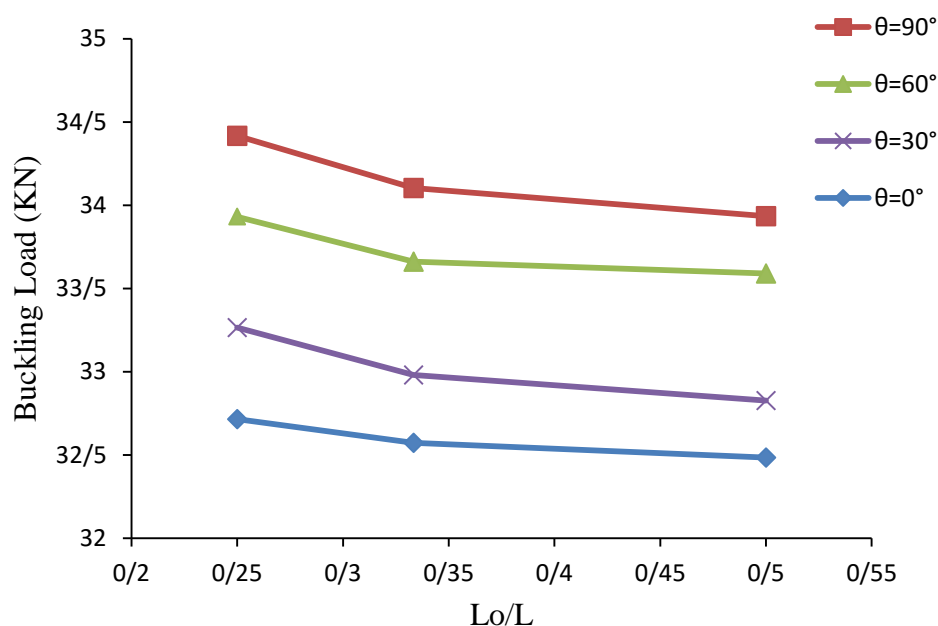
در این قسمت عرض و ارتفاع گشودگی بیضوی به صورت همزمان تغییر می‌کند به نحوی که حاصل ضرب عرض و ارتفاع که بیانگر نسبتی از مساحت گشودگی است، ثابت می‌ماند. با توجه به منحنی بار کمانش بر حسب نسبت ابعاد گشودگی در شکل (۴-۱۲)، با افزایش  $b/a$  بار کمانش کاهش می‌یابد. بیشترین بار بحرانی کمانش مربوط به زمانی است که قطر بزرگ بیضی هم جهت با محور استوانه باشد و کمترین بار بحرانی کمانش در حالتی است که قطر بزرگ بیضی در جهت عمود بر محور استوانه باشد.



شکل (۴-۱۲) منحنی بار کمانش بر حسب نسبت ابعاد گشودگی بیضوی در موقعیت‌های مختلف

#### ۴-۲-۸- تأثیر تغییر زاویه گشودگی بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب

در این قسمت به منظور بررسی تغییر زاویه گشودگی ( $\theta$ ) بر رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مایل، چند نمونه پوسته استوانه‌ای مایل با زاویه گشودگی از صفر تا ۹۰ درجه تحلیل شده است. در شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه گشودگی در موقعیت‌های مختلف، مقاومت پوسته در مقابل کمانش افزایش می‌یابد و باعث افزایش در مقدار بار کمانش می‌شود.



شکل (۴-۱۳) منحنی بار کمانش بر حسب موقعیت گشودگی بیضوی برای پوسته‌های استوانه‌ای با زاویه

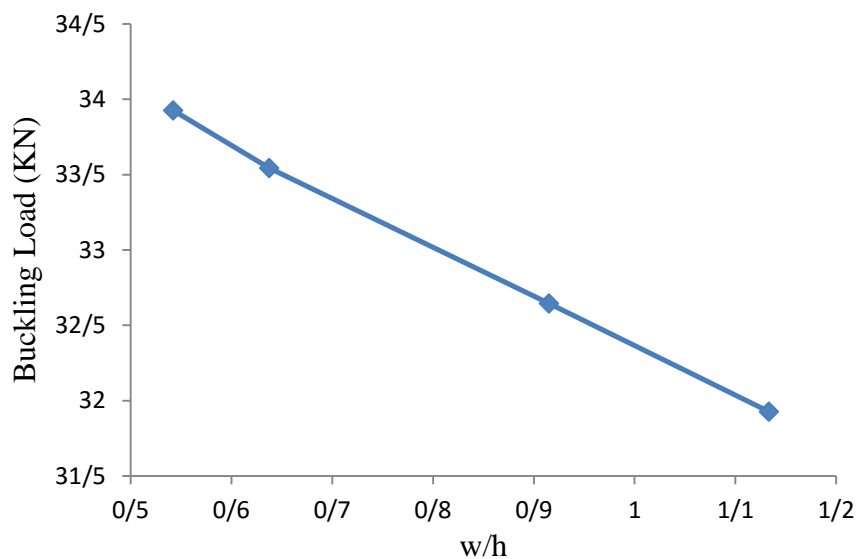
گشودگی مختلف

#### ۴-۲-۹- تأثیر تغییر ابعاد گشودگی‌های مستطیلی با مساحت ثابت بر رفتار کمانش

##### پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب

در بررسی پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی مستطیلی، حاصل ضرب عرض و ارتفاع گشودگی مستطیلی ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به منحنی بار کمانش بر حسب نسبت ابعاد گشودگی‌ها ( $w/h$ ) برای گشودگی مستطیلی در میانه‌ی پوسته در شکل (۴-۱۴)، با افزایش  $w/h$  بار کمانش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و مشابه پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی بیضوی، بیشترین و کمترین بار بحرانی کمانش در حالت‌هایی است که بعد بزرگ گشودگی مستطیلی به ترتیب هم جهت و عمود بر محور استوانه باشد.





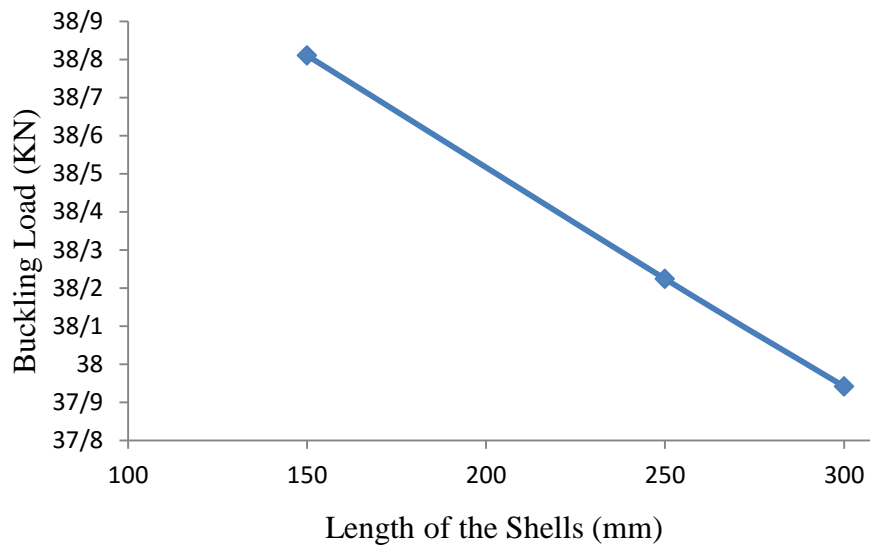
شکل (۴-۱۴) منحنی بار کمانش بر نسبت ابعاد گشودگی مستطیلی برای پوسته‌های استوانه‌ای با

گشودگی مستطیلی در میانه پوسته

#### ۴-۲-۱۰- تأثیر طول پوسته استوانه‌ای مایل بر رفتار کمانش آن تحت بارگذاری

##### مرکب

در شکل (۴-۱۵)، بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مایل با سه طول متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول پوسته استوانه‌ای مایل، بار کمانش کاهش می‌یابد. در پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر، گشتاور خمشی بزرگتری وجود دارد و این عامل باعث کمانش سریع‌تر پوسته و به عبارت دیگر کاهش بار کمانشی می‌شود.



شکل (۴-۱۵) منحنی بار کمانش بر حسب طول پوسته استوانه ای تحت بارگذاری مرکب

### ۳-۴ - خستگی کم چرخه<sup>۱</sup> در آباکوس

نرم افزار آباکوس، در کنار بسیاری از توانایی های خود قادر به آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه‌ای نیز می باشد.

برای بررسی این دسته از مسایل باید از مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی استفاده کرد که دارای دو قسمت است، مدل سخت شونده‌گی سینماتیک خطی<sup>۲</sup> و دیگری سخت شونده‌گی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک.

مدل نخست می‌تواند با سطح تسلیم میزز<sup>۳</sup> یا هیل<sup>۴</sup> به کار برده شود؛ در حالی که مدل دوم را تنها با سطح تسلیم میزز می‌توان به کار برد. در واقع تفاوت این دو سطح تسلیم در آن است که با استفاده از سطح تسلیم میزز، در هر لحظه تنش تسلیم برای ماده در تمام جهات یکسان است؛ اما با استفاده از

<sup>1</sup> Low cycle fatigue

<sup>2</sup> Linear kinematic hardening

<sup>3</sup> Mises

<sup>4</sup> Hill

سطح تسلیم هیل می‌توان تنش تسلیم را در جهات مختلف، متفاوت با یکدیگر تعریف کرد. هر چند مدل سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/ سینماتیک دارای محدودیت‌های بیشتری نسبت به مدل نخست است که از آن جمله همانگونه که گفته شد، امکان استفاده از سطح تسلیم هیل را به کاربر نمی‌دهد یا اینکه آنالیز مسائل کوپله تنش حرارتی به کمک این مدل امکان پذیر نمی‌باشد؛ اما با این وجود برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای کامل ترین و دقیق ترین مدل است. در مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی، فرض می‌شود که سطح تسلیم متناسب با مقدار  $\alpha$  به عنوان تنش زمینه در فضای تسلیم حرکت می‌کند، اما تغییر شکل نمی‌دهد. نرم افزار آباکوس از مدل خطی زیگلر<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی عددی مسائل استفاده می‌کند که معادله آن به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۵۱].

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{c} \dot{C} \alpha \quad (1-4)$$

که در آن  $C$  مدول سخت شوندگی سینماتیک و  $\dot{C}$  نرخ تغییرات  $C$  بر حسب دما است. در این مدل، اندازه سطح تسلیم ثابت می‌ماند. به بیان دیگر  $\sigma_0$  در رابطه‌ی (۱-۴) همواره مساوی  $\hat{\sigma}_0$  که تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است، باقی می‌ماند. برای معرفی این مدل به نرم افزار، در متن فایل ورودی<sup>۲</sup> و در نبود تاثیر حرارت از دستور Plastic به صورت زیر استفاده می‌شود:

\*plastic

\*Plastic, Hardening=Kinematic

$\hat{\sigma}_0, 0$

$\sigma_1^0, \varepsilon_1^{pl}$

$\sigma_2^0, \varepsilon_2^{pl}$

مقدار  $C$  با استفاده از رابطه زیر و بوسیله ی نرم افزار محاسبه خواهد شد [۵۱]:

<sup>1</sup> Ziegler

<sup>2</sup> Input file

$$C = \frac{\sigma_1^0 - \hat{\sigma}_0}{\varepsilon_{pl}} \quad (2-4)$$

مدل سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک که بر اساس روابط ارائه شده توسط چابوچه<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۰ تهیه شده است، در برگرفته حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار  $\alpha$  در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار کرنش پلاستیک است. برای معرفی چنین مدلی، یک ترم غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به رابطه‌ی (۱-۴) اضافه می‌شود. مدل ارائه شده در آباکوس به صورت رابطه زیر است [۵۱].

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma \alpha_{ij} \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{c} \alpha_{ij} \dot{C} \quad (3-4)$$

که در آن  $C$  و  $\gamma$  ثابت‌های ماده بوده و  $\dot{C}$  نرخ تغییرات  $C$  بر حسب دما است. البته باید به این نکته اشاره کرد که نرم افزار توانایی در نظر گرفتن نرخ تغییرات  $\gamma$  نسبت به دما را ( $\dot{\gamma}$ ) ندارد. این مدل هنگامی که  $C$  و  $\gamma$  مساوی صفر فرض شوند به مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک و هنگامی که  $\gamma$  به تنهایی مساوی صفر فرض شود به مدل خطی زیگلر تبدیل خواهد شد.

به منظور معرفی این مدل برای نرم افزار لازم است بخش ایزوتروپیک ( رشد سطح تسلیم در فضای تنش) و بخش سینماتیک ( حرکت سطح تسلیم در فضای تنش)، به صورت جداگانه برای نرم افزار تعریف شوند.

برای تعیین رشد سطح تسلیم در نرم افزار آباکوس از رابطه (۴-۴) با معرفی اندازه  $\sigma^0$  به صورت تابعی نمایی استفاده می‌شود [۵۱].

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_\infty (1 - e^{-b \bar{\varepsilon}^{pl}}) \quad (4-4)$$

که در آن  $\hat{\sigma}_0$  نشان دهنده تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است. مقادیر  $b$  و  $Q_\infty$  نیز ثابت‌های ماده هستند. اگر مقادیر این ثابت‌ها مشخص باشند، می‌توان آنها را به شکل زیر برای نرم افزار در متن فایل ورودی تعریف کرد:

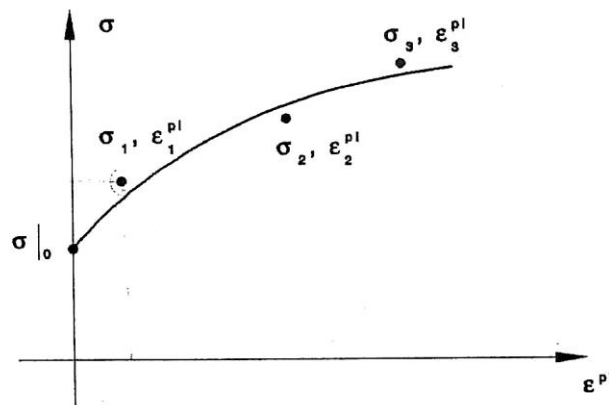
<sup>1</sup> Chaboche

## Parameters \*Cyclic Hardening

$$\hat{\sigma}_0, Q_\infty, b$$

برای تعیین حرکت سطح تسلیم در فضای تنش برای نرم افزار آباکوس از یک نیم سیکل مربوط به تست کشش یک بعدی استفاده می‌شود.

اگر نیم سیکل نخست از آزمون یک بعدی کشش یا فشار در اختیار باشد، نرم افزار با استفاده از اطلاعات به دست آمده از این نیم سیکل، می‌تواند پارامترهای  $\gamma$  و  $C$  را محاسبه کند. البته به کارگیری این روش تنها برای هنگامی که تعداد سیکل های بارگذاری کم باشد، سفارش شده است. نتایج حاصل از یک آزمون کشش، مانند شکل (۴-۱۶) را در نظر بگیرید.



شکل (۴-۱۶) نیم سیکل نخست تست کشش یک بعدی [۵۱].

برای هر نقطه روی این نمودار مانند  $(\sigma_i, \varepsilon_i^{pl})$ ، مقدار  $\alpha_i$  به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma_i^0 \quad (۵-۴)$$

که در آن  $\sigma_i^0$  مشخص کننده اندازه سطح تسلیم به ازای  $\varepsilon_i^{pl}$  است و همان گونه که بیان شد این رابطه با کمک دستور \*Cyclic Hardening برای نرم افزار تعریف شده است. با انتگرال گیری از رابطه (۴-۳) برای  $\alpha$  روی یک نیم سیکل نتیجه به صورت زیر خواهد بود.

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \varepsilon^{pl}}) \quad (۴-۶)$$

با استفاده از روابط (۴-۵) و (۴-۶) و مقادیر مختلف  $(\sigma_i, \varepsilon_i^{pl})$  که توسط کاربر داده می‌شوند، نرم افزار توانایی محاسبه ضرایب  $\gamma$  و  $C$  خواهد داشت. به منظور استفاده از این روش در متن فایل ورودی از دستور زیر استفاده می‌شود.

\*Plastic, Hardening = Combined, Data Type = Half Cycle

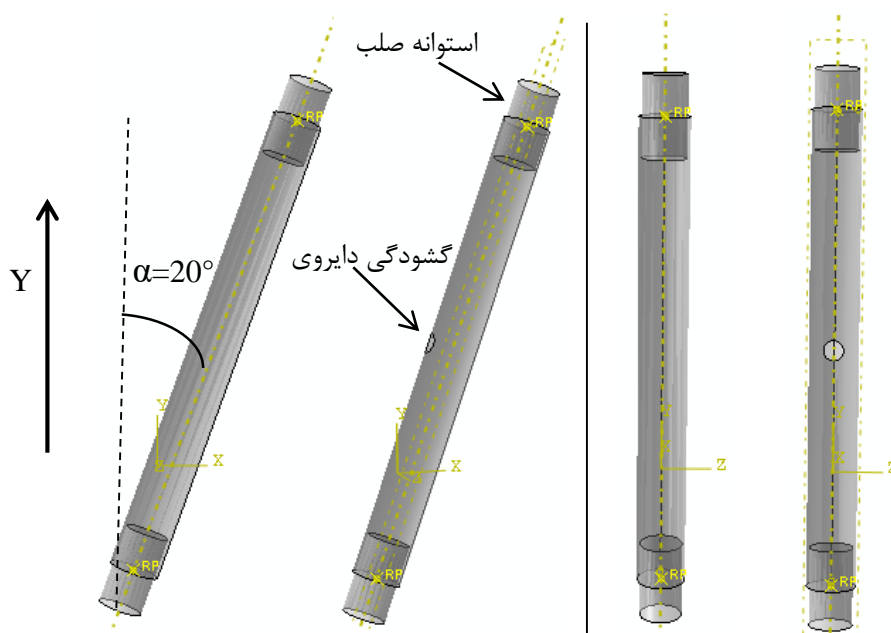
$$\sigma_1, \varepsilon_1^{pl}$$

$$\sigma_2, \varepsilon_2^{pl}$$

#### ۴-۳-۱- تحلیل عددی

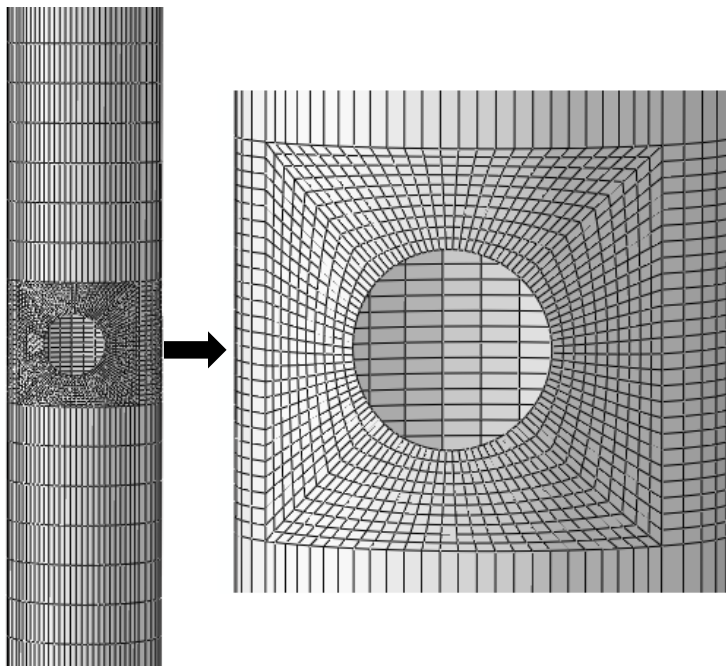
در این بخش مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی روی پوسته استوانه‌ای SS304L تحت بارگذاری سیکلی گزارش شده است. پوسته‌های استوانه‌ای مشابه آزمایش‌های تجربی به صورت عمودی و مایل با زاویه ۲۰ درجه نسبت به عمود تحت بارگذاری نیرو- کنترل شبیه سازی شده‌اند و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی روی پوسته استوانه‌ای با هم مقایسه شده است. دو طرف پوسته از دو استوانه‌ای صلب با ارتفاع ۴۰ mm استفاده شده است که مشابه شرایط مرزی آزمایش‌های تجربی، این استوانه‌های صلب به میزان ۲۰ mm درون پوسته استوانه‌ای قرار گرفته‌اند و سطوح خارجی استوانه‌های صلب به سطوح داخلی پوسته استوانه‌ای به طور کامل متصل می‌شوند (شکل (۴-۱۷)). نیرو و شرایط مرزی نیز به نقطه‌ی مرجع استوانه‌های صلب اعمال می‌شود. استوانه‌ی صلب بالا با شرایط مرزی از نوع جابجایی/چرخشی در تمامی جهات مقید گردیده است ( $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$ ). استوانه صلب پایین نیز در تمامی جهات به غیر از جهت بارگذاری عمودی (راستای محور  $y$ ) مقید شده است ( $U1=U3=UR1=UR2=UR3=0$ ). در این بخش مشابه تحلیل کمانش از المان S8R5 در شبیه سازی عددی استفاده شده است که یک المان پوسته ای ۸ گره‌ای می‌باشد که نوع

آن غیر خطی و درجه آزادی آن در هر گره ۵ می باشد. در نمونه‌های دارای گشودگی، اطراف گشودگی به علت تمرکز تنش دارای مش‌بندی ریزتری نسبت به سایر نقاط می‌باشند. در شکل (۴-۱۸)، یک نمونه پوسته استوانه‌ای مش‌بندی شده دارای گشودگی نشان داده شده است. برای بارگذاری مشابه بارگذاری تجربی به پارامتر  $CF2$  در جهت محور  $Y$  مقدار  $30000$  نیوتن اختصاص می‌یابد و برای بارگذاری تناوبی از پارامتر دامنه و با موج سینوسی استفاده شده است. در این تحلیل از مدل سخت شونده غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک استفاده شده است که در این مدل اندازه سطح تسلیم در فضای تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می‌کند و مرکز آن نیز انتقال می‌یابد.



شکل (۴-۱۷) پوسته‌های استوانه‌ای مدل شده در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری مرکب و محوری

تناوبی



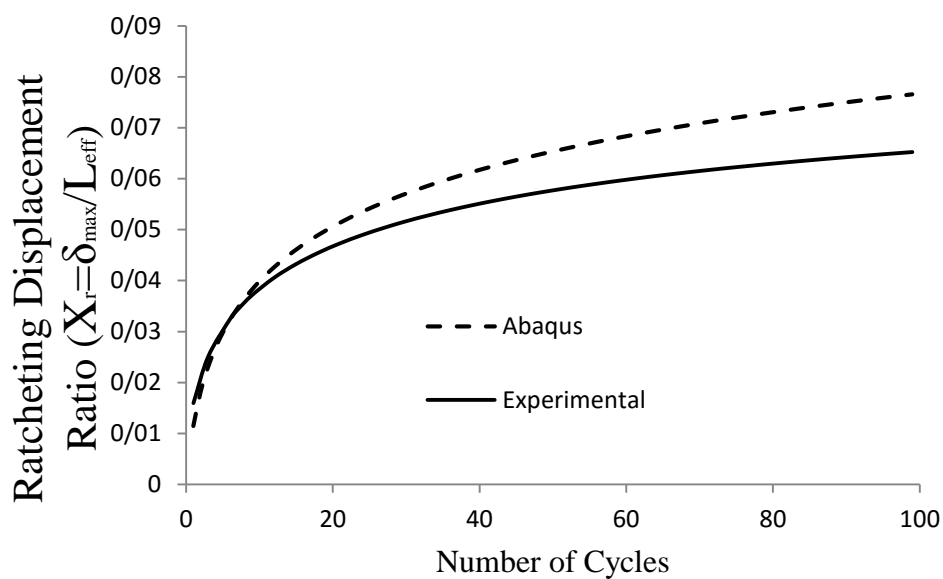
شکل (۴-۱۸) پوسته استوانه‌ای المان بندی شده

#### ۴-۳-۲ - مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه‌ای SS304L

در شکل‌های (۴-۱۹)، (۴-۲۰)، (۴-۲۱)، (۴-۲۲) و (۴-۲۳)، نتایج حاصل از تحلیل عددی برای چند نمونه با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در منحنی‌های عددی مشابه منحنی‌های تجربی، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد. در سیکل‌های ابتدایی، منحنی‌های عددی و تجربی مطابقت خوبی دارند؛ اما در ادامه نرم افزار آباکوس جز در یک مورد، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.

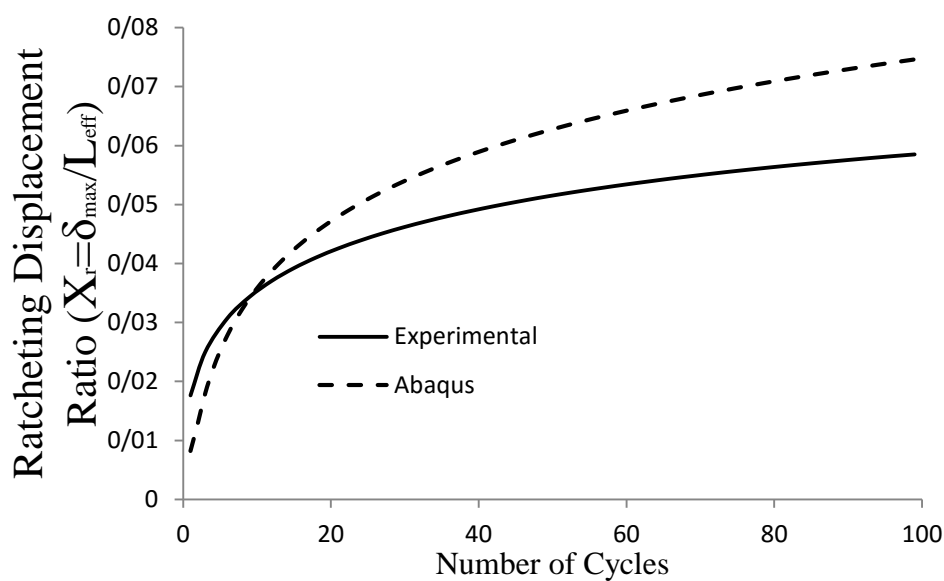
در پوسته استوانه‌ای مایل دارای گشودگی در شکل (۴-۲۳)، میزان جابجایی رچتینگ در نمونه‌ی واقعی بیشتر از نتایج عددی است و به سرعت نمونه دچار شکست می‌شود. علت این امر وجود عیوب و ترک‌های ریز در اطراف گشودگی در نمونه‌ی واقعی می‌باشد که سرعت افزایش جابجایی رچتینگ و شکست نمونه را افزایش می‌دهد، حال آنکه در نمونه‌ی ایده‌ال عددی، این عیوب لحاظ نشده‌اند.





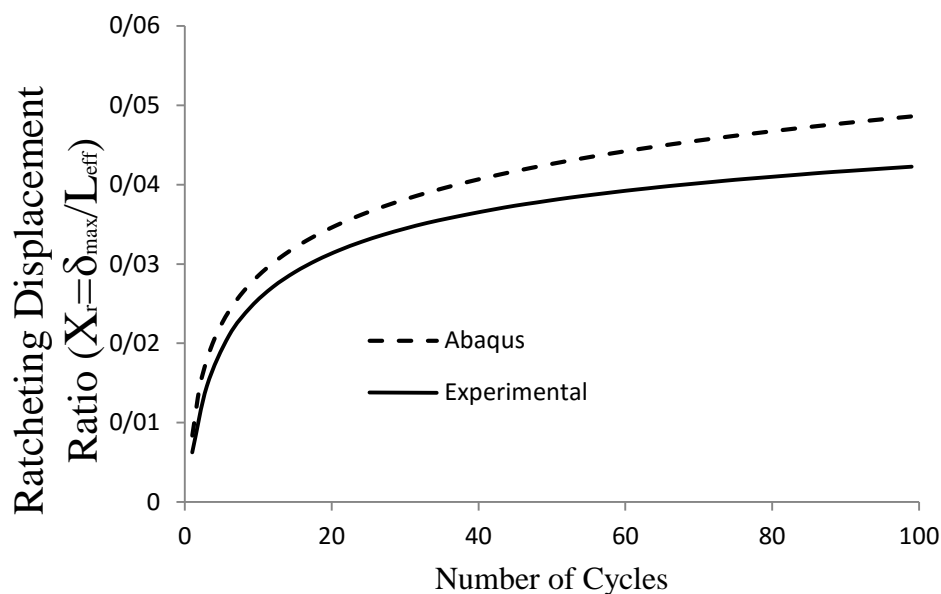
شکل (۴-۱۹) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر

۴۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی



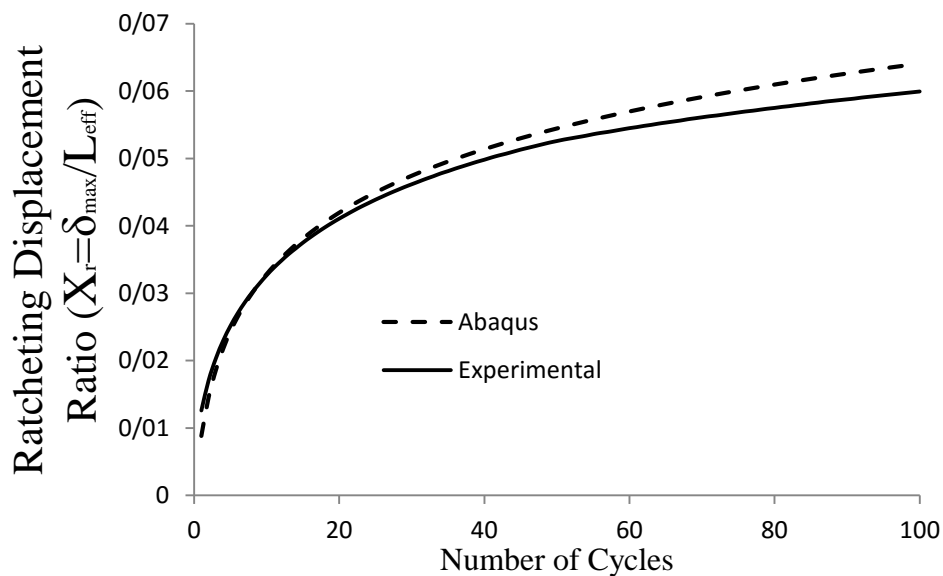
شکل (۴-۲۰) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر

۳۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی



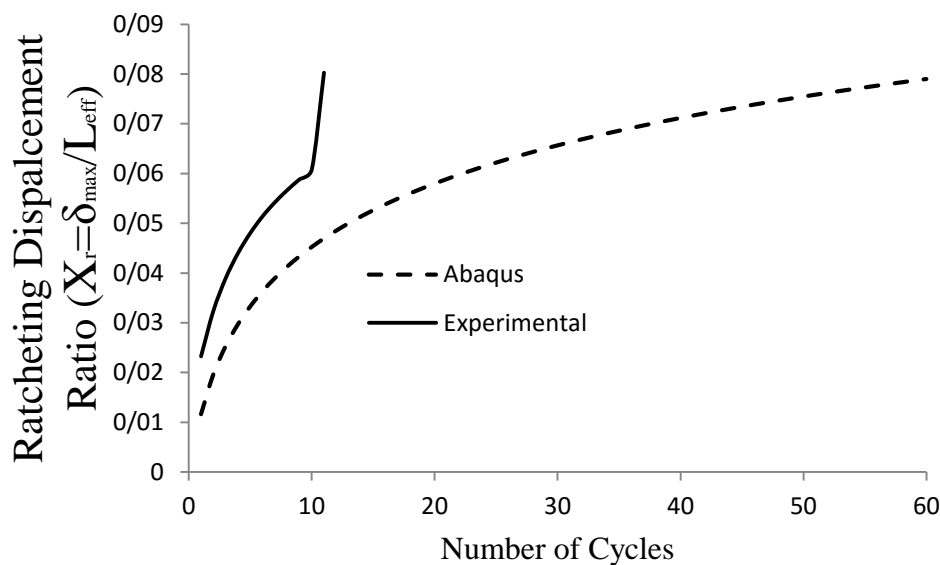
شکل (۴-۲۱) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر

۲۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی



شکل (۴-۲۲) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه‌ای دارای گشودگی

دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری محوری تناوبی



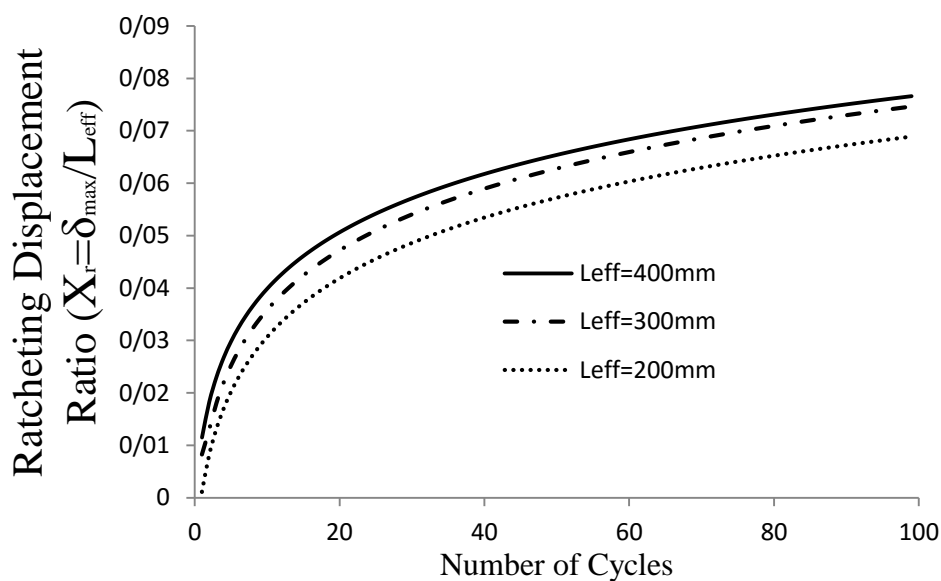
شکل (۴-۲۳) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پوسته استوانه‌ای دارای گشودگی

دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی

### ۳-۳-۴- تأثیر طول پوسته استوانه‌ای مایل بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری

#### مرکب در تحلیل عددی

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول‌های مؤثر ۲۰۰mm، ۳۰۰mm و ۴۰۰mm به صورت مایل تحت بار مرکب تناوبی نیرو-کنترل و با مقدار بار و موج سینوسی یکسان قرار گرفته‌اند و توسط نرم افزار آباکوس و به صورت عددی تحلیل شده‌اند. مشاهده می‌شود که با توجه به شکل (۴-۲۴) با افزایش طول پوسته استوانه‌ای، جابجایی رچتینگ نیز برای تعداد سیکل معین افزایش می‌یابد که این به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگتر در مقاطع مختلف پوسته‌های استوانه‌ای با طول بلندتر است. این نتایج با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مطابقت دارد.

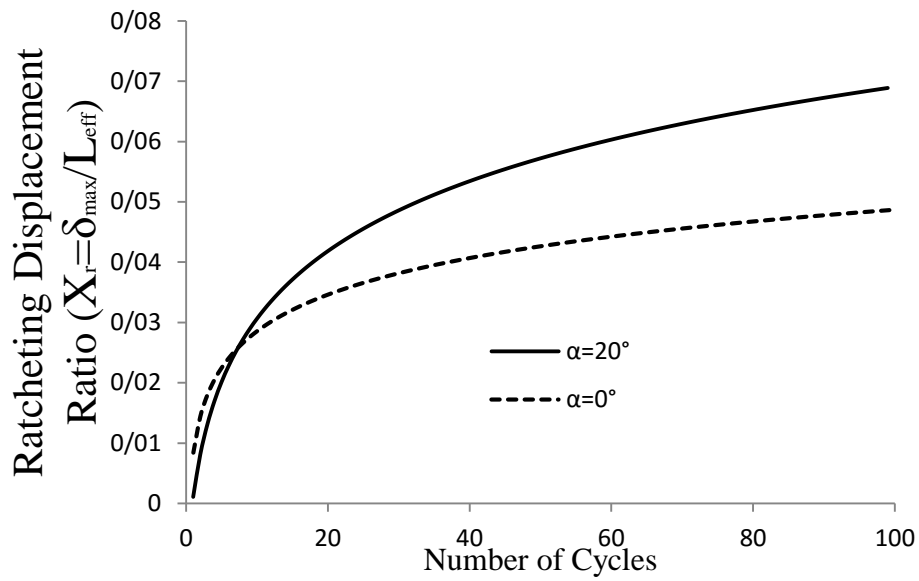


شکل (۴-۲۴) جابجایی رچتینگ پوسته بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول‌های

مختلف تحت بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی

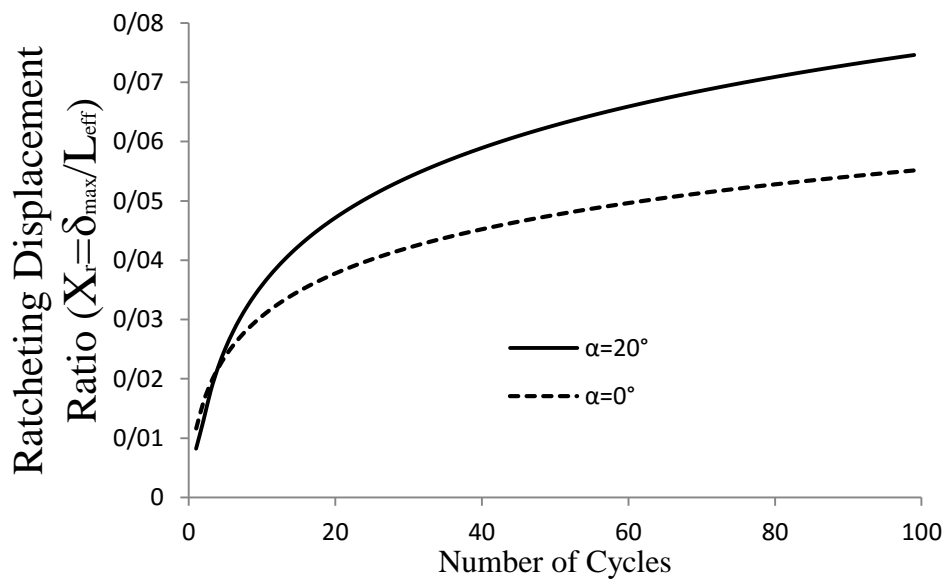
#### ۴-۳-۴- تأثیر زاویه‌ی پوسته استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن در تحلیل عددی

در بررسی زاویه‌ی پوسته استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن، با توجه به شکل‌های (۴-۲۵)، (۴-۲۶) و (۴-۲۷)، مشاهده می‌شود که در تحلیل عددی مشابه تحلیل تجربی، جابجایی رچتینگ در پوسته استوانه‌ای مایل بیشتر از پوسته استوانه‌ای عمودی است. همانطور که قبلاً گفته شد، گشتاور خمشی نقش بسیار مهمی در ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ ایفا می‌کند که در تحلیل‌های عددی نیز می‌توان وجود گشتاور خمشی را در افزایش جابجایی رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای مایل در مقایسه با پوسته‌های استوانه‌ای عمودی مشاهده کرد.



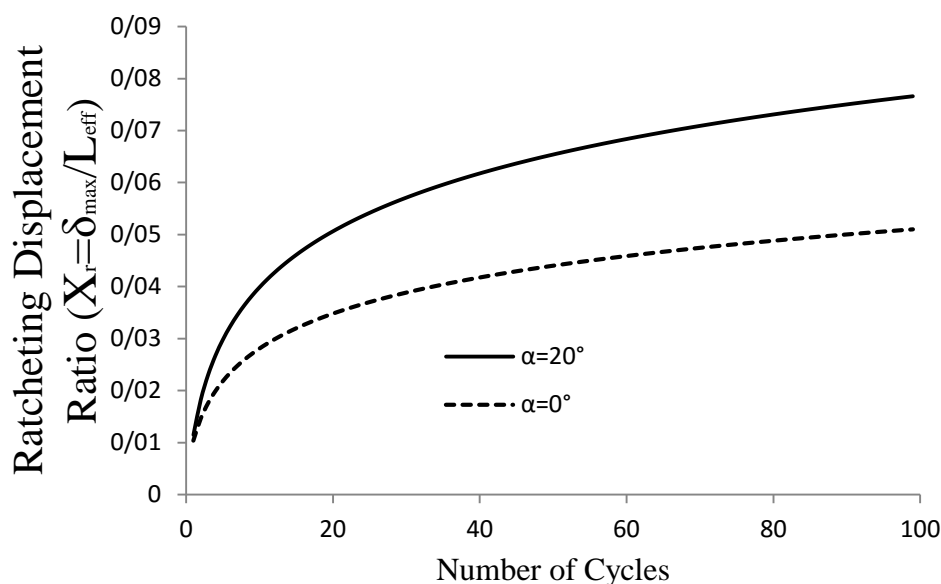
شکل (۴-۲۵) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر

۲۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی



شکل (۴-۲۶) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۰۰ mm

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی



شکل (۴-۲۷) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر

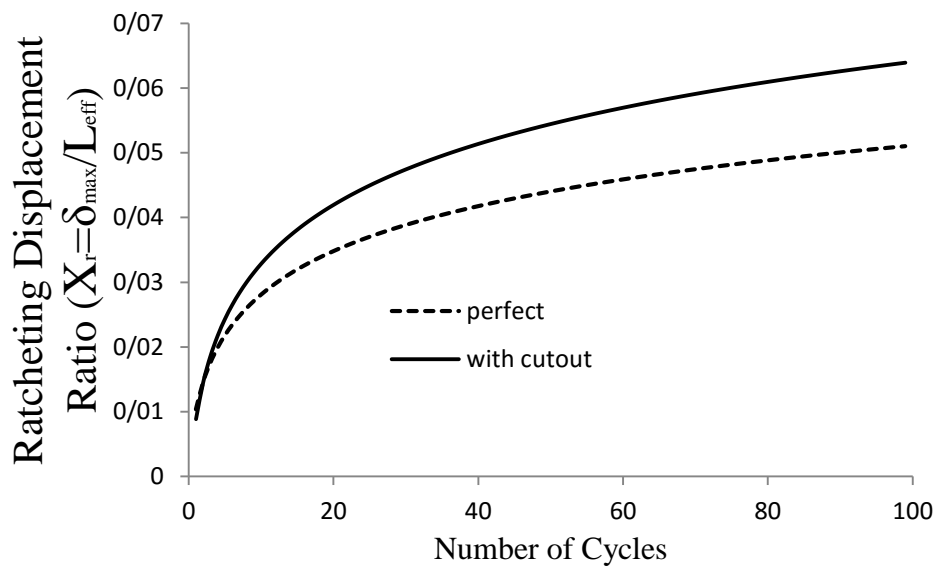
۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی

#### ۴-۳-۵- تأثیر وجود گشودگی در میانه‌ی پوسته استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن

##### تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در تحلیل عددی

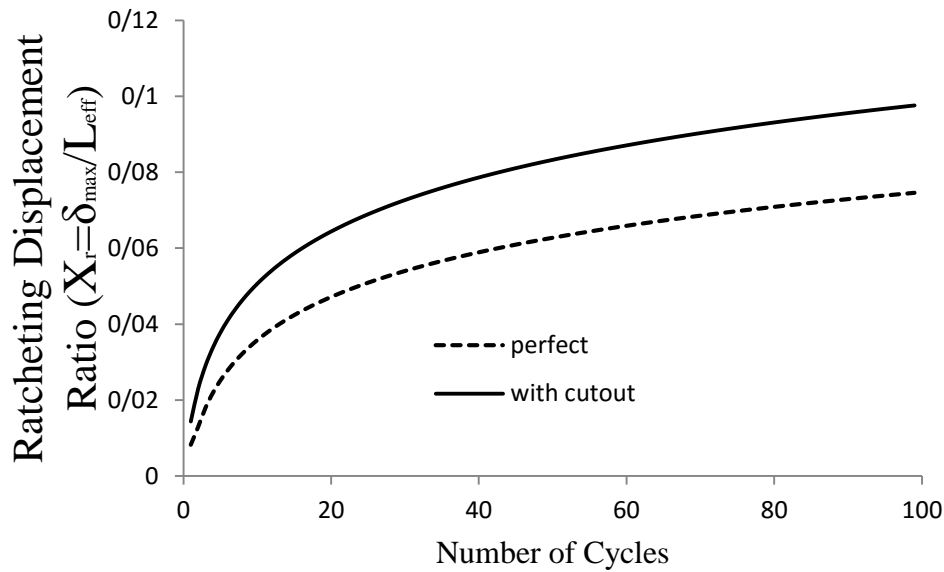
در شکل‌های (۴-۲۸)، (۴-۲۹) و (۴-۳۰)، تأثیر وجود گشودگی در میانه‌ی پوسته استوانه‌ای نشان داده شده است. بارگذاری مشابه آزمایش‌های تجربی در جهت بازشدن گشودگی می‌باشد و مشاهده می‌شود که در بارگذاری‌های مرکب و محوری، ایجاد گشودگی با افزایش جابجایی رچتینگ همراه است و در صورت شکست، نمونه در تعداد سیکل کمتری می‌شکند. دلیل این امر نیز تمرکز تنش در اطراف گشودگی است. در شکل (۴-۳۱) با رسم کانتور تنش وان میز در سیکل ۵ برای پوسته استوانه‌ای مایل با طول مؤثر ۴۰۰mm مشاهده می‌شود که اطراف گشودگی بیشترین تنش را تحمل می‌کنند و در واقع تمرکز تنش و شکست از این نقاط خواهد بود که شاهد چنین رفتاری در آزمایش‌های تجربی نیز بودیم. همچنین با توجه به شکل (۴-۳۱)، تنش‌های وان میز نسبت به گشودگی متقارن می‌باشند و نواحی سمت چپ پوسته استوانه‌ای شامل گشودگی جز در اطراف گشودگی، تنش-

های ضعیف‌تری را نسبت به نواحی سمت راست پوسته استوانه‌ای تحمل می‌کنند. خمش ایجاد شده در میانه‌ی پوسته استوانه‌ای، وجود گشتاور خمشی را در بارگذاری مرکب و تأثیر آن در ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک به روشنی نشان می‌دهد.



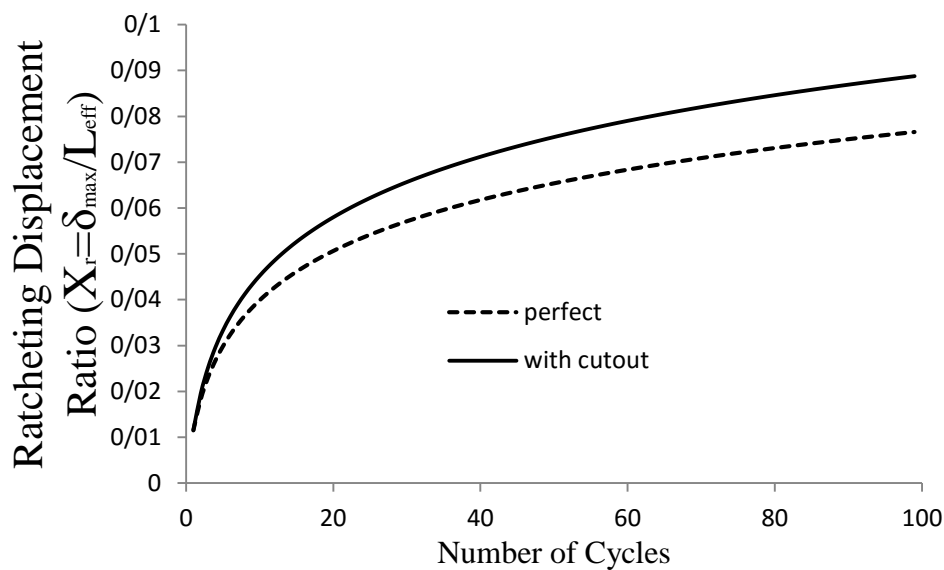
شکل (۴-۲۸) جایابی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با و بدون گشودگی

دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری محوری تناوبی در نتایج عددی



شکل (۴-۲۹) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با و بدون گشودگی

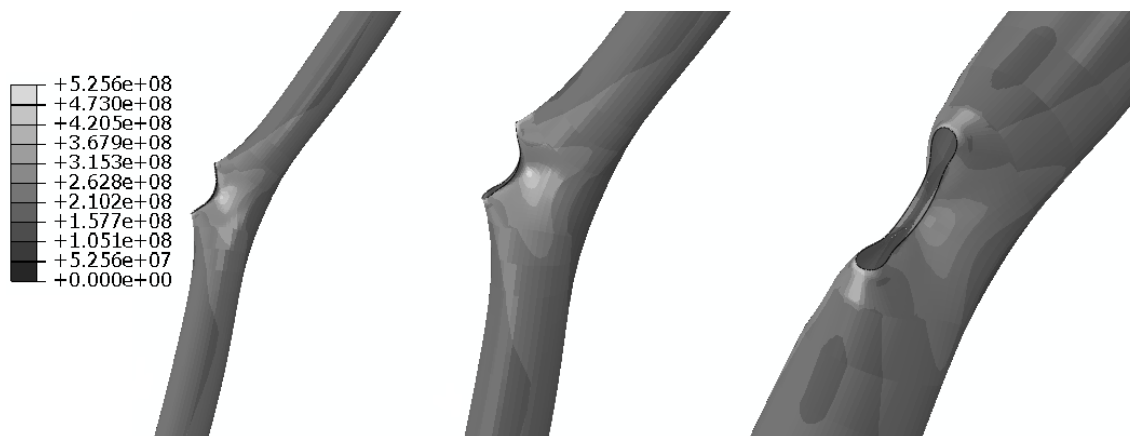
دایروی با طول مؤثر ۳۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی



شکل (۴-۳۰) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با و بدون گشودگی

دایروی با طول مؤثر ۴۰۰ mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی





شکل (۴-۳۱) کانتور تنش وان میزز برای پوسته استوانه ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۴۰۰mm

تحت بارگذاری مرکب تناوبی در سیکل ۵

#### ۴-۴- نتیجه گیری

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس و مقایسه با نتایج تجربی می‌توان نتایج زیر را برای رفتار کمانش و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری محوری و مرکب بدست آورد:

۱. در پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای گشودگی تحت بارگذاری مرکب، نواحی اطراف گشودگی قبل از کمانش تسلیم می‌شوند و خمش موضعی در این نواحی ایجاد می‌شود و در لحظه‌ی کمانش منجر به خمش کلی می‌شود.
۲. در منحنی بار کمانش بر حسب جابجایی ابتدای پوسته، شیب قسمت خطی منحنی در نتایج عددی بیشتر از نتایج تجربی است و این به دلیل وجود عیب‌های داخلی در ماده است که باعث کاهش سفتی در نمونه‌های واقعی می‌شود؛ در حالیکه در تحلیل عددی نمونه‌ها ایده‌ال است.
۳. در پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی بیضوی تحت بارگذاری مرکب، در ارتفاع ثابت گشودگی بیضوی (a)، با افزایش عرض گشودگی بیضوی (b)، بار کمانش کاهش می‌یابد.

۴. در پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی تحت بارگذاری مرکب، با تغییر موقعیت گشودگی از لبه‌های پوسته به میانه‌ی آن، بار کمانش کاهش می‌یابد.
۵. با افزایش نسبت عرض به ارتفاع گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی بیضوی و مستطیلی تحت بارگذاری مرکب، بار کمانش کاهش می‌یابد و کمترین بار بحرانی کمانش در حالتی است که قطر بزرگ بیضی در جهت عمود بر محور استوانه باشد.
۶. با افزایش زاویه‌ی گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب، مقاومت پوسته در مقابل کمانش افزایش می‌یابد و باعث افزایش در مقدار بار کمانش می‌شود.
۷. در پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر، بار کمانش کمتر است و این به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگتر در پوسته‌های استوانه‌ای با طول بلندتر است که باعث تسریع در تسلیم و ایجاد کمانش تحت بارگذاری مرکب فشاری می‌شود.
۸. در منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری و مرکب، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.
۹. در پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی، منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل در سیکل‌های ابتدایی مطابقت خوبی با منحنی‌های تجربی دارند؛ اما در ادامه، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند.
۱۰. در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، به دلیل وجود تمرکز تنش و عیوب‌های ریز در اطراف گشودگی در نمونه‌ی واقعی، جابجایی رچتینگ بیشتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی در پوسته‌های استوانه‌ای ایده‌ال است.
۱۱. در نتایج عددی، به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگتر در پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر، جابجایی رچتینگ برای تعداد سیکل معین بیشتر است.

۱۲. در تحلیل‌های عددی، جابجایی رچتینگ در پوسته‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای عمودی است که بر وجود تأثیر گشتاور خمشی در نمونه‌های تحت بارگذاری مرکب صحنه می‌گذارد.

۱۳. ایجاد گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس، با افزایش جابجایی رچتینگ هم در بارگذاری مرکب و هم در بارگذاری محوری همراه است. با ایجاد گشودگی، تمرکز تنش ناشی از بارگذاری محوری در پوسته‌های استوانه‌ای عمودی و بارگذاری مرکب در پوسته‌های استوانه‌ای مایل ایجاد می‌شود که باعث تشدید افزایش جابجایی رچتینگ می‌شود.

۱۴. تنش وان‌میزز در نتایج عددی، در اطراف گشودگی دارای بیشترین مقدار است. تنش‌های وان‌میزز در طول بارگذاری سیکلی نسبت به گشودگی در میانه‌ی پوسته، متقارن می‌باشند و نیمه‌ی محیطی از پوسته استوانه‌ای که دارای گشودگی می‌باشد، جز در اطراف گشودگی تنش‌های ضعیف‌تری را نسبت به نیمه‌ی محیطی دیگر تحمل می‌کند.

## فصل ۵

# نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۵-۱- نتیجه‌گیری

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری‌های مرکب و محوری و همچنین مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی بدست آمده توسط نرم‌افزار آباکوس می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

۱. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته استوانه‌ای برای یک سیکل معین، جابجایی رچتینگ به دلیل افزایش گشتاور خمشی، افزایش می‌یابد.
۲. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل برای یک طول معین پوسته استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.
۳. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل، پوسته استوانه‌ای از نقاط انتهایی به دلیل وجود گشتاور خمشی بیشتر در این نواحی، دچار خمش می‌شود و کشیدگی در این نواحی بیشتر است.
۴. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته استوانه‌ای جابجایی رچتینگ دارای نرخ و مقدار بالاتری است.
۵. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای با افزایش دامنه‌ی نیرو، جابجایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد.
۶. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای با کاهش دامنه‌ی نیرو، نرخ جابجایی رچتینگ صفر و انباشتگی تغییر شکل پلاستیک متوقف می‌شود. بنابراین پیش-بارهای اعمالی باعث مهار رفتار رچتینگ در بارگذاری‌های سیکلی متوالی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شوند.

۷. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، پوسته با طول بلندتر دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به پوسته با طول کوتاه‌تر است که با افزایش سیکل این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین برای یک طول معین، با افزایش تعداد سیکل انرژی پلاستیک در هر سیکل کاهش می‌یابد تا اینکه به مقدار ثابتی برسد.
۸. در بارگذاری سیکلی از نوع مرکب و محوری تحت شرایط نیرو-کنترل برای طول‌های مختلف پوسته استوانه‌ای، رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک هر سیکل با نرخ جابجایی رچتینگ در آن سیکل مشاهده شد و با کاهش انرژی پلاستیک، نرخ جابجایی رچتینگ نیز به صورت خطی کاهش می‌یابد که این نشانه‌ی صلیبیت فیکسچرهای مورد استفاده است.
۹. با افت معین نرخ جابجایی رچتینگ در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، به دلیل کاهش بیشتر گشتاور خمشی در پوسته‌های با طول بلندتر، کاهش در انرژی پلاستیک آن بیشتر است.
۱۰. در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای، در مرحله‌ی اول، انرژی پلاستیک با نرخ جابجایی رچتینگ رابطه‌ی خطی دارد؛ اما در گام‌های بعدی، نمودار انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ، داری قله‌ای است که انرژی پلاستیک بیشترین مقدار را دارد.
۱۱. در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پوسته استوانه‌ای مایل دارای جابجایی رچتینگ بیشتری نسبت به پوسته استوانه‌ای عمودی است که این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل است.
۱۲. در پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای گشودگی، جابجایی رچتینگ و نرخ آن بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار

میانگین و دامنه‌ی یکسان است و این به دلیل افزایش تنش‌های نرمال در اطراف گشودگی و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگتر می‌باشد که منجر به شکست نمونه از این نقاط می‌شود.

۱۳. در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی تحت بارگذاری محوری، جابجایی رجتینگ و نرخ آن بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان است؛ اما این اختلاف کمتر از پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب می‌باشد و این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل است که اختلاف تغییرشکل‌های پلاستیک را بین نمونه‌های با گشودگی و بدون گشودگی تحت بارگذاری مرکب افزایش می‌دهد.

۱۴. به دلیل وجود تنش‌های نرمال بزرگتری که در اطراف گشودگی ناشی از گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل وجود دارد، در این نمونه‌ها نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای عمودی تحت بارگذاری محوری دارای گشودگی، شکست سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

۱۵. در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، در پوسته‌های استوانه‌ای مایل نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای عمودی در هر سیکل، اتلاف انرژی بیشتر است که این نیز به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل است. بنابراین گشتاور خمشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انرژی اتلافی و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک دارد.

۱۶. در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افت معین نرخ جابجایی رجتینگ، به دلیل کاهش در مقدار گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل، کاهش در انرژی پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای عمودی با همان طول است.

۱۷. در پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای گشودگی تحت بارگذاری مرکب، نواحی اطراف گشودگی قبل از کمانش تسلیم می‌شوند و خمش موضعی در این نواحی ایجاد می‌شود و در لحظه‌ی کمانش منجر به خمش کلی می‌شود.
۱۸. در منحنی بار کمانش بر حسب جابجایی ابتدای پوسته، شیب قسمت خطی منحنی در نتایج عددی بیشتر از نتایج تجربی است و این به دلیل وجود عیب‌های داخلی در ماده است که باعث کاهش سفتی در نمونه‌های واقعی می‌شود؛ در حالیکه در تحلیل عددی نمونه‌ها ایده‌ال است.
۱۹. در پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی بیضوی تحت بارگذاری مرکب، در ارتفاع ثابت گشودگی بیضوی (a)، با افزایش عرض گشودگی بیضوی (b)، بار کمانش کاهش می‌یابد.
۲۰. در پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی تحت بارگذاری مرکب، با تغییر موقعیت گشودگی از لبه‌های پوسته به میانه‌ی آن، بار کمانش کاهش می‌یابد.
۲۱. با افزایش نسبت عرض به ارتفاع گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی بیضوی و مستطیلی تحت بارگذاری مرکب، بار کمانش کاهش می‌یابد و کمترین بار بحرانی کمانش در حالتی است که قطر بزرگ بیضی در جهت عمود بر محور استوانه باشد.
۲۲. با افزایش زاویه‌ی گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب، مقاومت پوسته در مقابل کمانش افزایش می‌یابد و باعث افزایش در مقدار بار کمانش می‌شود.
۲۳. در پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر، بار کمانش کمتر است و این به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگتر در پوسته‌های استوانه‌ای با طول بلندتر است که باعث تسریع در تسلیم و ایجاد کمانش تحت بارگذاری مرکب فشاری می‌شود.
۲۴. در منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری و مرکب، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.



۲۵. در پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی، منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل در سیکل‌های ابتدایی مطابقت خوبی با منحنی‌های تجربی دارند؛ اما در ادامه، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند.
۲۶. در پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، به دلیل وجود تمرکز تنش و عیوب‌های ریز در اطراف گشودگی در نمونه‌ی واقعی، جابجایی رچتینگ بیشتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی در پوسته‌های استوانه‌ای ایده‌ال است.
۲۷. در نتایج عددی، به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگتر در پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر، جابجایی رچتینگ برای تعداد سیکل معین بیشتر است.
۲۸. در تحلیل‌های عددی، جابجایی رچتینگ در پوسته‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای عمودی است که بر وجود تأثیر گشتاور خمشی در نمونه‌های تحت بارگذاری مرکب صحنه می‌گذارد.
۲۹. ایجاد گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس، با افزایش جابجایی رچتینگ هم در بارگذاری مرکب و هم در بارگذاری محوری همراه است. با ایجاد گشودگی، تمرکز تنش ناشی از بارگذاری محوری در پوسته‌های استوانه‌ای عمودی و بارگذاری مرکب در پوسته‌های استوانه‌ای مایل ایجاد می‌شود که باعث تشدید افزایش جابجایی رچتینگ می‌شود.
۳۰. تنش وان‌میز در نتایج عددی، در اطراف گشودگی دارای بیشترین مقدار است. تنش‌های وان‌میز در طول بارگذاری سیکلی نسبت به گشودگی در میانه‌ی پوسته، متقارن می‌باشند و نیمه‌ی محیطی از پوسته استوانه‌ای که دارای گشودگی می‌باشد، جز در اطراف گشودگی تنش‌های ضعیف‌تری را نسبت به نیمه‌ی محیطی دیگر تحمل می‌کند.

## ۵-۲- پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌هایی که روی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری‌های مرکب و محوری انجام گردیده و همچنین مقایسه نتایج تجربی بدست آمده با نتایج عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم-افزار آباکوس، می‌توان برای ادامه این تحقیق پیشنهادهایی به شرح زیر ارائه نمود:

۱. رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای ترک و همچنین گشودگی در موقعیت‌های مختلف پوسته استوانه‌ای، انجام نشده است. بنابراین می‌توان تأثیر این عیوب را بر روی پوسته‌های استوانه‌ای مایل بررسی کرد. می‌توان از جنس‌های پرکاربرد صنعتی مانند *CK20*، *CK45* و یا پوسته‌ی آلومینیمی استفاده کرد.

۲. در این مقاله، پوسته‌های استوانه‌ای مایل تحت بارگذاری نیرو-کنترل قرار گرفته‌اند. پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب می‌توانند در شرایط جابجایی-کنترل قرار بگیرند و تأثیر گشتاور خمشی بر رفتار نرم شوندگی آنها بررسی شود. همچنین می‌توان بارگذاری را به صورت ترکیبی از گشتاور خمشی و پیچشی اعمال نمود.

۳. روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار رچتینگ، بیشتر روی نمونه‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی تحلیلی می‌توان از مدل‌های سخت شوندگی غیرخطی برای پیش‌بینی و مقایسه‌ی نتایج تحلیلی با نتایج تجربی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای مایل و با وجود گشتاور خمشی استفاده کرد.

۴. انرژی به عنوان یک مقدار اسکالر، در نمونه‌های تحت بارگذاری سیکلی به پایداری می‌رسد و به عنوان یکی از پارامترهای آسیب‌های خستگی استفاده می‌شود. می‌توان از انرژی برای بررسی و پیش‌بینی رفتار رچتینگ پوسته‌ها استفاده کرد.

۵. می‌توان تأثیر نرخ بارگذاری و اثر دما را روی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری‌های مرکب بررسی کرد.

۶. با تغییر زاویه‌ی پوسته استوانه‌ای مایل، می‌توان تأثیر افزایش یا کاهش گشتاور خمشی بر رفتار رچتینگ و کمانش نمونه‌ها را در زوایای بیشتر بررسی کرد.
۷. در این مقاله، در بررسی رفتار رچتینگ، گشتاور خمشی در جهت بازشدن گشودگی اعمال شده است. می‌توان گشتاور خمشی را در جهت بسته شدن و یا پیچش گشودگی اعمال نمود و با نتایج حاصل از وجود گشتاور خمشی در جهت بازشدن گشودگی مقایسه کرد.
۸. می‌توان با قرار دادن فوم در پوسته‌های استوانه‌ای مایل و عمود، رفتار کمانش و رچتینگ آنها را تحت بارگذاری سیکلی بررسی کرد.

## مراجع

- [1] Farshad, M., (1992), "Design and analysis of shell structures", Dordrecht: Kluwer.
- [2] Brogan, F.A., and Almorh, B.O., (1970), "Buckling of Cylindrical Shells with Cut out", *AIAA J.*, Vol. 8. No. 2, pp. 236-240.
- [3] Almorh, B.O., and Holmes, A.M.C., (1972), "Buckling of Shells with Cutouts, Experiment and Analysis", *Int. J. Solids and Structures*, No.8, pp. 1057-1071.
- [4] Toda, S., (1975), "The Effects of Elliptic and Rectangular Cutouts on The Buckling of Cylindrical Shells Loaded By Axial Compression", California Institute of Technology.
- [5] Yeh, M.K., Lin, M.C. and Wu, W.T., (1999), "Bending buckling of an elastoplastic cylindrical shell with a cutout", *Eng. Struct.*, Vol. 21, pp. 996-1005.
- [6] Tafreshi A., (2002), "Buckling and postbuckling analysis of composite cylindrical shells with cutout subjected to internal pressure and axial compression load", *Int. J Pressure Vessel Piping*, Vol. 79, pp. 351-9.
- [7] رحیمی، غلامحسین و پور سعیدی، اسماعیل، (۱۳۸۳)، "مطالعه پارامتری استحکام پلاستیک پوسته‌های استوانه-ای با گشودگی تحت بار محوری و ممان خمشی"، *مجله مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیکی ایران*، شماره ۱، سال ۶.
- [8] Shariati, M., Mahdizadeh Rokhi M., (2008), "Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with elliptical cutout subject to axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 46, pp. 1251-1261.
- [9] Shariati, M., Mahdizadeh Rokhi, M., (2009), "Investigation of buckling of steel cylindrical shells with elliptical cutout under bending moment", *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 7-15.
- [10] Dutta, K. and Ray, K.K., (2012), "Ratcheting phenomenon and post-ratcheting tensile behaviour of an aluminum alloy", *Material Science & Engineering A*, vol.540, pp. 30-37.
- [11] Weib, E., Postberg, B., Nicak, T. and Rudolph, J., (2004), "Simulation of ratcheting and low cycle fatigue", *Pressure Vessels and Piping*, vol. 81, pp. 235-242.
- [12] Gaudin, C. and Feaugas, X., (2004), "Cyclic creep process in AISI 316L stainless steel in terms of dislocation patterns and internal stresses", *Acta Material*, vol.52, pp. 3097-3110.

- [13] ASM Metals Handbook, (1979), Fatigue and fracture mechanics, Vol. 19, 10<sup>th</sup> Ed.
- [14] Bari, S., Hassan, T. (2002), "An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation", *Int plasticity*, vol. 18, pp. 873-894.
- [15] McDowell, D.L., (1998), "Stress rate dependence of cyclic ratcheting behavior of two rail steels", *International Journal of Plasticity*, vol. 14, pp. 355-390.
- [16] Kang, G. and Gao, Q., (2002), "Uniaxial and non-proportionally multiaxial ratcheting of U71Mn rail steel: experiments and simulations", *Mechanics of Materials*, vol. 34, pp. 809–820.
- [۱۷] میرباقری آ؛ (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی و تفکیک و اماندگی‌های ناشی از رچتینگ و شیک دان در مخازن تحت فشار"، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت.
- [18] Weib, E., Rauth, M., and Rudolph, J., (1998), "Fatigue behavior of oblique nozzles on cylindrical shells submitted to internal pressure and axial forces", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, pp. 473-481.
- [19] Yang, X., (2005), "Low cycle fatigue and cyclic stress ratcheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading", *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, pp. 1124-132.
- [20] Chena, X. et al, (2005), "Experimental study on ratcheting behavior of eutectic tin-lead solder under multi axial loading", *Material Science and Engineering A*, vol. 406, pp. 86-94.
- [21] Chen, X., Jia, R. and Soo Kim, K., (2005), "On the Ohno–Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel" , *International Journal of Plasticity*, vol .21, pp. 161–184.
- [22] Kang, G., Li, Y.G., Zhang, J., Sun, Y.F. and Gao, Q., (2005), "Uniaxial ratcheting and failure behaviors of two steels", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol.43, pp. 199-209.
- [23] Kang G. et al, (2006), "Experimental study on ratcheting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing", *Materials science & engineering*, Vol. 435-436, pp. 396-404.
- [24] Gao, B., Chen, X., Chen, G., (2006), "Ratcheting and ratcheting boundary study of pressurized straight low carbon steel pipe under reversed bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, pp. 96-106.

- [25] Chen, G., Chen, X. and Chang-Dong, N., (2006), "Uniaxial ratcheting behavior of 63Sn37Pb solder with loading histories and stress rates", *Materials science & engineering*, vol. 421, pp. 238-244.
- [26] Syed, M.R., Tasnim, H., Edmundo, C., (2008), "Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure", *International Journal of Plasticity*, vol. 24, pp. 1756–1791.
- [27] Gao, H., and Chen, X., (2009), "Effect of axial ratcheting deformation on torsional low cycle fatigue life of lead-free solder Sn-3.5Ag", *International Journal of Fatigue*, vol. 31, pp.276-283.
- [28] Lee, J.H., Kim, K.S., Lee, J.B., Yang, Y.S. and Yoo, M.J., (2009), "A numerical simulation model of cyclic hardening behavior of AC4C-T6 for LNG cargo pump using finite element analysis", *Journal of loss prevention in the process Industries*, vol. 22, pp. 889-896.
- [29] Rezaiee-pajand, M. and Sinaie, S., (2009), "On the calibration of the chaboche hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 3009-3017.
- [30] Lim, C.B., Kim, K.S. and Seong, J.B., (2009), "Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress", *International Journal of Fatigue*, vol. 31, pp. 501-507.
- [31] Sun, G.Q. and Shang, D.G., (2010), "Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis", *Material & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 126-133.
- [32] Nip, K.H., Gardner L., Davies C.M., and Elghazouli A.Y., (2010), "Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, pp. 96-110.
- [33] Yoshida, F., Kondo, J., Kikuchi, Y., (2010), "Viscoplastic behaviour of SUS 304 stainless steel under cyclic loading at room temperature" , *JSME International Journal*, vol. 32, pp. 136-141.
- [34] Elchalakani, M., Zhao, X.L., and Grzebieta, R., (2006), "Variable amplitude cyclic pure bending tests to determine fully ductile section slenderness limits for cold-formed CHS", *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 1223–1235.

- [35] Elchalakani, M., (2007), "Plastic mechanism analyses of circular tubular members under cyclic loading", *Thin-Walled Structures*, vol. 45, pp. 1044–1057.
- [36] Chang, K.H., Pan, W.F., and Lee, K.L., (2008), "Mean moment effect of thin-walled tubes under cyclic bending", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 28, no. 5, pp. 495–514.
- [37] Rahman, S.M., Hassan, T., and Corona, E., (2008), "Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure", *International Journal of Plasticity*, vol. 24, pp. 1756–1791.
- [38] Chang, K.H. and Pan, W.F., (2009), "Buckling life estimation of circular tubes under cyclic bending", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, no. 2, pp. 254–270.
- [39] Kulkarnia, S.C., Desai, Y.M., Kanta, T., Reddy, G.R., Prasad, P., Vaze, K.K., et al., (2004), "Uniaxial and biaxial ratcheting in piping materials—experiments and analysis", *Int J Pressure Vessel Piping*, vol. 81, pp. 609–17.
- [40] Zakavia, S.J., Zehsaza, M., and Eslamib, M.R., (2010), "The ratcheting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 726–737.
- [41] Albinmoussa, J., Jahed, H. and Lambert, S., (2011), "Cyclic axial and cyclic torsional behavior of extruded AZ31B magnesium alloy", *International Journal of Fatigue*, vol. 33, pp. 1403-1416.
- [42] Shariati, M., Hatami, H., Yarahmadi, H., Epakchi, H.R., (2011), "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading", *Materials & Design*, vol. 34, pp. 302-312.

[۴۳] شریعتی، م و حاتمی، ح؛ اردیبهشت ۱۳۹۰، "بررسی تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری تناوبی"، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، جلد ۲، صفحه ۶۵، دانشگاه بیرجند.

- [44] Zhu, J., Chen, X., Xue, F. and Yu, W., (2012), "Bending ratcheting tests of Z2CND18.12 stainless steel", *International Journal of Fatigue*, vol. 35, pp. 16-22.
- [45] Shariati, M., Hatami, H., (2012), "Experimental study of SS304L cylindrical shell with/ without cutout under cyclic axial loading", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 58, pp. 35-43.

- [46] Shariati, M., Hatami, H., Torabi, H. and Epakchi, H.R., (2012), "Experimental and numerical investigations on the ratcheting characteristics of cylindrical shell under cyclic axial loading", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 44, no. 6, pp. 753-762.
- [47] ASTM A370-05, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.
- [48] Bari, S., and Hassan, T., (2000), "Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation", *International Journal of Plasticity*, vol. 16, pp. 381-409.
- [49] Li, Z., Yu, J., and Guo, L., (2012), "Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading", *International Journal of Mechanical Science*, vol. 54, pp. 48-56.
- [۵۰] اکبرپور!؛ (۱۳۸۹)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی عددی و تجربی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته‌های جدار نازک دارای گشودگی تحت بارگذاری مرکب"، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان.
- [51] ABAQUS Analysis User's manual, (2010), v6.10.1, section 20.2.2: models for metals subjected to cyclic loading.



## واژه نامه فارسی به انگلیسی

Hardening	سخت‌شوندگی	Finite Element	اجزای محدود
Ratcheting	رچتینگ	Elastic shakedown	الاستیک پایدار
Peak Stress Hold Time	زمان نگه داری قله تنش	Stabilized Cyclic Plasticity	پلاستیسیته سیکلی پایدار
Extensometer	طول سنج	Accumulation of Plastic Strain	انباشتگی کرنش پلاستیک
Input file	فایل ورودی	Combined loading	بارگذاری مرکب
Low Cycle Fatigue	خستگی کم چرخه	Plastic shakedown	پلاستیک پایدار
Dislocation	ناجایی	Shell	پوسته
Buckle	کمانش	Cutout	گشودگی
Node	گره	cyclic creep	خزش سیکلی

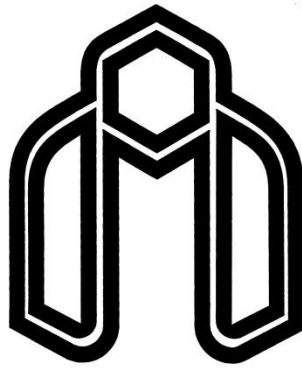
## واژه نامه انگلیسی به فارسی

Accumulation of Plastic Strain	انباشتگی کرنش پلاستیک	Input file	فایل ورودی
Node	گره	Peak Stress Hold Time	زمان نگه داری پیک تنش
cyclic creep	خزش سیکلی	Plastic shakedown	پلاستیک پایدار
Combined Loading	بارگذاری مرکب	Dislocation	ناجایی
Elastic shakedown	الاستیک پایدار	Stabilized Cyclic Plasticity	پلاستیسیته سیکلی پایدار
Extensometer	طول سنج	Ratcheting	رچتینگ
Buckle	کمانش	Shell	پوسته
Finite Element	اجزای محدود	Cutout	گشودگی
Low Cycle Fatigue	خستگی کم چرخه	Hardening	سخت شوندگی

## Abstract

In this research, buckling and ratcheting behavior of stainless steel cylindrical shells under cyclic combined and axial loadings were studied numerically and experimentally. In ratcheting analysis, the shells were fixed normal and oblique at angle of  $20^\circ$  with respect to the longitudinal direction of the shells and subjected to force-controlled cycling with non-zero mean force at the end of them which causes the accumulation of plastic strain or ratcheting phenomena. Experimental tests were performed by a servo-hydraulic INSTRON 8802 machine. The numerical analysis was carried out by Abaqus using the advanced nonlinear isotropic/kinematic hardening model and results of numerical analysis were compared to experimental results. In this research, the effect of length, angle of cylindrical shell and loading history on ratcheting behavior were investigated. Based on the results, it was found that bending moment plays a crucial role in waste of energy and increase in plastic deformations. Seen that due to the existence of bending moment in different cross section of oblique cylindrical shell there are more plastic deformation in comparison to normal cylindrical shell. Linear relation was observed between plastic energy and rate of plastic deformation in one step loading. Analyzing the loading history of cylindrical shell under combined loading, by the prior load with higher force amplitude retards the ratcheting behavior and plastic deformation with smaller force amplitude. Also, circular cutout effect on cylindrical shells under these kinds of loading has been studied and observed that creating of cutout increases the plastic deformation and its rate. Shells buckling investigation has been done with numerical method and observed that for oblique cylindrical shell with elliptical cutout, the buckling load reduces when width of cutout increases. Also, increasing length of the shell decreases the buckling load.

**Keywords:** Cylindrical Shell, Numerical and Experimental Analysis, Ratcheting and Buckling, Cyclic combined and axial loading, Cutout.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mechanical Engineering**

**Numerical and experimental analysis of  
ratcheting behavior of steel cylindrical shells  
with and without cutout under cyclic  
combined and axial loading**

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science (M.Sc)

**Kamal Kolasangiani**

Supervisors

**Dr. M. Shariati**

**Dr. H. R. Epakchi**

**Date: May 2013**