

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی

تحت بارگذاری مرکب پیچشی و خمشی سیکلی

نام دانشجو:

غلامرضا نوروزی

استاد راهنما:

دکتر محمود شریعتی

تابستان ۱۳۹۱

تقدیم

به پدرم که از نگاهش عطفوت، از رفتارش محبت و از صبرش ایستادگی را آموختم.

پس بیگران بر همدلی و همراهی مادر دلوز و مهربانم که سجده ایثارش گل
محبت را در وجودم پروراند و

دامان گهربارش لحظه‌های مهربانی را به من آموخت.

به خواهرانم که وجودشان مایه دلگرمی من است و همواره در طول تحصیل متحمل
زحماتم بوده‌اند.

و به تمام استید بزرگواری که نیک می‌اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز
رضای الهی و

پیشرفت و سعادت این مرز و بوم، هدفی ندارند.

تشکر و قدردانی

از خداوند سپاسگزارم که توفیق کسب علم و دانش را به من داد و اکنون که به اتمام این پروژه رسیدم به خویش لازم می‌دانم تا از عزیزانی که در این مهم مرا یاری نموده‌اند، قدردانی نمایم.

از استاد راهنمای خود، دکتر محمود شریعتی که در انجام آزمایش‌ها، نگارش و ویرایش آن تمام زحمت خویش را کشیدند، کمال تشکر را دارم.

از دکتر سلیمانی و دکتر گردویی که در انجام این پروژه به من کمک نمودند، سپاسگزارم.

و در پایان از تمامی دوستان و همکلاسی‌های خود به خصوص جناب مهندس کمال کلاسنگیانی که در انجام آزمایش‌ها و تدوین آنها، همراه و پشتیبان اینجانب بودند، سپاسگزارم.

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی رفتار رچتینگ و نرم شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی SS316L تحت بارگذاری خمشی و مرکب خمشی و پیچشی به صورت سیکلی پرداخته شده است. بارگذاری‌های خمشی به صورت نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل می‌باشد؛ ولی در بارگذاری‌های مرکب خمشی و پیچشی، اعمال نیرو فقط به صورت جابجایی-کنترل است. تست‌های تجربی توسط دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام گردیده است. تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر کرنش پلاستیک در سیکل‌های متوالی انباشته می‌گردد که پدیده‌ی رچتینگ نام دارد. در بارگذاری جابجایی-کنترل، رفتار نرم شوندگی در پوسته‌ها مشاهده شد و با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندگی افزایش یافت. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس انجام گردید و با مقایسه‌ی مدل سخت-شوندگی ایزوتروپیک و مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک / سینماتیک مشاهده گردید که مدل سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک / سینماتیک، رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی تناوبی را بهتر شبیه سازی می‌کند.

کلید واژه: پوسته استوانه‌ای، بارگذاری خمشی تناوبی، بارگذاری مرکب تناوبی، رچتینگ و نرم شوندگی، مدل سخت شوندگی، تحلیل عددی و تجربی.

فهرست مطالب

| عنوان | صفحه |
|---|-----------|
| فهرست علائم و نشانه‌ها..... | ج |
| فهرست جدول‌ها..... | ه |
| فهرست شکل‌ها..... | و |
| فصل ۱. پوسته و کاربردهای آن..... | ۱ |
| ۱-۱- تعریف پوسته‌ها..... | ۲ |
| ۲-۱- کاربرد پوسته‌ها..... | ۲ |
| ۳-۱- مقدمه‌ای بر مکانیک شکست..... | ۳ |
| ۴-۱- ضرورت توجه به مکانیک شکست..... | ۳ |
| ۵-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه پیچش و خمش پوسته‌ها..... | ۶ |
| فصل ۲. اعمال بارگذاری‌های سیکلی بر روی سازه‌ها..... | ۹ |
| ۱-۲- خستگی و رچتینگ..... | ۱۰ |
| ۲-۲- مروری بر کارهای گذشته در زمینه ی رچتینگ..... | ۱۴ |
| ۳-۲- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه بارگذاری‌های خمشی و پیچشی سیکلی..... | ۱۶ |
| ۴-۲- جمع بندی..... | ۱۸ |
| فصل ۳. تحلیل تجربی..... | ۲۰ |
| ۱-۳- آزمایش‌های انجام شده..... | ۲۱ |
| ۲-۳- دستگاه آزمایش..... | ۲۱ |
| ۳-۳- آزمایش کشش استاندارد..... | ۲۱ |
| ۴-۳- هندسه و خواص مکانیکی پوسته..... | ۲۳ |
| ۵-۳- بارگذاری خمشی..... | ۲۳ |
| ۱-۵-۳- شرایط مرزی..... | ۲۵ |
| ۲-۵-۳- بارگذاری تحت شرایط جابجایی- کنترل..... | ۲۶ |
| ۳-۵-۳- بارگذاری تحت شرایط نیرو- کنترل..... | ۲۹ |
| ۴-۵-۳- تاثیر نیروی میانگین بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی ضدزنگ..... | ۳۰ |
| ۴-۵-۳- تاثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای فولادی ضدزنگ..... | ۳۱ |
| ۶-۳- بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی..... | ۳۴ |
| ۱-۶-۳- شرایط مرزی..... | ۳۴ |
| ۲-۶-۳- بارگذاری تحت شرایط جابجایی- کنترل..... | ۳۵ |
| ۳-۶-۳- تاثیر دامنه جابجایی بر رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای فولادی ضدزنگ..... | ۳۶ |
| ۴-۶-۳- تاثیر جابجایی میانگین بر رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای فولادی ضدزنگ..... | ۴۰ |

۴۲-۵-۶-۳- تاثیر طول بازو بر رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای فولادی ضدزنگ.....

۴۴-۷-۳- نتیجه گیری.....

فصل ۴. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی.....

۴۷-۱-۴- مقدمه ای در رابطه با تحلیل عددی.....

۴۷-۱-۱-۴- روش اجزای محدود.....

۴۹-۲-۱-۴- معرفی نرم افزار آباکوس.....

۵۰-۳-۱-۴- خستگی کم چرخه در آباکوس.....

۵۴-۲-۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه‌ای SS316L تحت بارگذاری خمشی سیکلی.....

۵۵-۱-۲-۴- مقایسه نتایج تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.....

۵۷-۲-۲-۴- مقایسه نتایج تحت بارگذاری نیرو-کنترل.....

۵۸-۳-۴- تاثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل.....

۵۹-۴-۴- نتیجه گیری.....

فصل ۵. نتیجه گیری و پیشنهادها.....

۶۲-۱-۵- نتیجه گیری.....

۶۴-۲-۵- پیشنهادها.....

فهرست مراجع.....

۶۹-واژه نامه فارسی به انگلیسی.....

۷۰-واژه نامه انگلیسی به فارسی.....

فهرست علائم و نشانه‌ها

| عنوان | علامت اختصاری |
|----------------------------|--------------------|
| تنش زمینه | α |
| تنش تسلیم | σ_y |
| تنش تسلیم اولیه | $\hat{\sigma}_0$ |
| تنش تسلیم جاری | σ^0 |
| تنش نهایی | S_u |
| ثابت ماده | b |
| ثابت ماده | C |
| ثابت ماده | γ |
| ثابت ماده | Q_∞ |
| دامنه نیرو | F_a |
| جابجایی میانگین | u_m |
| مدول سخت شونده‌گی سینماتیک | c |
| مدول یانگ | E |
| نسبت پواسون | ν |
| نیروی میانگین | F_m |
| ضخامت پوسته استوانه‌ای | t |
| قطر خارجی پوسته استوانه‌ای | D |
| طول پوسته استوانه‌ای | L |
| تغییر طول پوسته | δ |
| کرنش پلاستیک | ε^{pl} |
| دامنه جابجایی | u_a |
| کرنش رچتینگ | ε_r |

| | |
|----------------------|---------------------------|
| ε_{max} | بیشترین کرنش |
| ε_{min} | کمترین کرنش |
| ε_{real} | کرنش حقیقی |
| σ_{real} | تنش حقیقی |
| ε_{Eng} | کرنش مهندسی |
| σ_{Eng} | تنش مهندسی |
| L' | طول پوسته تغییر شکل یافته |
| u | جابجایی ابتدایی پوسته |
| w | جابجایی فک پایین دستگاه |
| v | جابجایی مطلق |
| θ | زاویه پیچش |
| L_{arm} | طول بازوی افقی |
| T | گشتاور پیچشی |
| F | نیروی فک |

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۳-۱: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS316L ۲۳

فهرست شکل‌ها

| صفحه | عنوان |
|------|---|
| ۱۳ | شکل ۲-۱: حالت‌های مختلف رفتار ماده تحت بارگذاری تناوبی [۱۷]..... |
| ۱۴ | شکل ۲-۲: تعریف پارامترهای مختلف در آزمایش رچتینگ [۱۸]..... |
| ۲۲ | شکل ۳-۱: آزمایش کشش استاندارد با استفاده از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲..... |
| ۲۲ | شکل ۳-۲: منحنی تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد..... |
| ۲۴ | شکل ۳-۳: شماتیک بارگذاری خمشی بر روی نمونه..... |
| ۲۴ | شکل ۳-۴: آزمایش پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی ساده..... |
| ۲۵ | شکل ۳-۵: منحنی نیرو- جابجایی بدست آمده از آزمایش خمش ساده..... |
| ۲۵ | شکل ۳-۶: شماتیکی از نحوه قرارگیری پوسته استوانه‌ای به فیکسچر بارگذاری خمشی..... |
| ۲۶ | شکل ۳-۷: پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۲۷ | شکل ۳-۸: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه ۵mm در بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۲۷ | شکل ۳-۹: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه ۶mm در بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۲۸ | شکل ۳-۱۰: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه ۷mm در بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۲۹ | شکل ۳-۱۱: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه‌های جابجایی ۵، ۶، ۷ و ۱۰ در بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۲۹ | شکل ۳-۱۲: دو نمونه پوسته استوانه‌ای آزمایش شده تحت بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۳۰ | شکل ۳-۱۳: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۸kN و دامنه‌ی نیرو ۰,۸kN در بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۳۱ | شکل ۳-۱۴: تغییرات جابجایی رچتینگ نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری نیرو-کنترل برای پوسته‌ها با طول ۲۳۵mm با دامنه نیرو ۰,۸kN و نیروی میانگین ۰,۵kN، ۰,۶kN، ۰,۷kN، ۰,۸kN در بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۳۲ | شکل ۳-۱۵: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۳۵kN و دامنه نیرو ۰,۸۵kN در مرحله اول تاریخچه بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۳۲ | شکل ۳-۱۶: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۳۵kN و دامنه نیرو ۰,۹۵kN در مرحله دوم تاریخچه بارگذاری خمشی سیکلی..... |
| ۳۳ | شکل ۳-۱۷: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۳۵kN و دامنه نیرو ۱,۰۵kN در مرحله سوم تاریخچه بارگذاری خمشی سیکلی..... |

شکل ۳- ۱۸: تغییرات جابجایی رچتینگ نسبت به تعداد چرخه برای نمونه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۳۵kN و افزایش دامنه نیرو ۰,۸۵kN، ۰,۹۵، ۱,۰۵ در بارگذاری خمشی سیکلی ۳۳

شکل ۳- ۱۹: منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی ساده... ۳۴

شکل ۳- ۲۰: نمایی از فیکسچر استفاده شده در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی و نحوه اتصال پوسته به آن ۳۵

شکل ۳- ۲۱: فیکسچر بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی و استفاده از ساعت‌های اندازه‌گیری دیجیتالی و عقربه‌ای ۳۶

شکل ۳- ۲۲: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه جابجایی ۸mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۳۷

شکل ۳- ۲۳: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه جابجایی ۱۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۳۷

شکل ۳- ۲۴: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه جابجایی ۲۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۳۸

شکل ۳- ۲۵: تغییرات دامنه گشتاور پیچشی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه‌های جابجایی ۸، ۱۰، ۲۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۳۹

شکل ۳- ۲۶: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۲۰mm و جابجایی میانگین ۸mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۴۰

شکل ۳- ۲۷: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۲۰mm و جابجایی میانگین ۱۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۴۰

شکل ۳- ۲۸: تغییرات دامنه گشتاور پیچشی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm با دامنه جابجایی ۲۰mm و جابجایی میانگین ۵، ۸، ۱۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۴۱

شکل ۳- ۲۹: دو نمونه پوسته استوانه‌ای آزمایش شده با ترک محیطی و مایل تحت بارگذاری خمشی و مرکب ۴۲

شکل ۳- ۳۰: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۱۰mm و دامنه جابجایی ۲۰mm با طول بازوی ۲۴۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۴۲

شکل ۳- ۳۱: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۱۰mm و دامنه جابجایی ۲۰mm با طول بازوی ۲۹۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی ۴۳

شکل ۳-۳۲: تغییرات دامنه گشتاور پیچشی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm با جابجایی میانگین ۱۰mm و دامنه جابجایی ۲۰ mm با طول بازوی ۱۸۰mm، ۲۴۰، ۲۹۰ در بارگذاری مرکب سیکلی ۴۳

شکل ۳-۳۳: وضعیت شکست تعدادی پوسته استوانه‌ای بعد از انجام آزمایش بارگذاری خمشی و مرکب سیکلی ۴۴

فصل ۱. پوسته و کاربردهای آن

۱-۱- تعریف پوسته‌ها^۱

ورق‌ها^۲ 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 کمتر از ۰/۰۵ باشد. این نسبت در مواردی به کمتر از ۰/۰۱ نیز می‌رسد [۱].

۱-۲- کاربرد پوسته‌ها

امروزه پوسته‌ها و ورق‌ها بخش اعظمی از سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده‌اند. پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد، کاربرد گسترده‌ای در صنایع دارند. 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.

پوسته‌ها در طول عمر خود ممکن است تحت بارهای مختلف محوری، پیچشی و خمشی قرار گیرند. در بعضی موارد پوسته‌ها تحت بارهای خارج از مرکز قرار گرفته‌اند و دچار خمش و پیچش

^۱ Shells

^۲ Plates

می‌شوند و با توجه به کاربرد آن‌ها، این نوع بارگذاری خارج از مرکز می‌تواند به صورت سیکلی اعمال شود.

۱-۳- مقدمه‌ای بر مکانیک شکست^۱

در چند دهه‌ی گذشته استفاده از اصول طراحی مکانیک شکست برای جلوگیری از شکست ناگهانی و یا تدریجی سازه‌ها و قطعات ماشین به یک نیاز تبدیل شده است. به طوری که امروزه بیش از ۸۰٪ طراحی‌ها یا مستقیماً با استفاده از این علم انجام می‌شوند و یا طراحی‌های انجام شده با روش‌های دیگر، از نظر ایمنی در مقابل شکست، با این فناوری مورد آزمایش قرار می‌گیرند. وجود و یا ایجاد ترک و ناپیوستگی در سازه‌ها و قطعات دلایل مختلفی دارد. بسیاری از روش‌های تولید مواد و سازه (به عنوان نمونه عملیات جوشکاری) به طور طبیعی ایجاد شکاف و یا ناپیوستگی می‌کنند. ترک‌ها می‌توانند از این شکاف‌ها و ناپیوستگی‌ها شروع به رشد نموده و موجب گسیختگی قطعه و نهایتاً از کار افتادگی سازه شوند. بنابراین مهم‌ترین هدف علم مکانیک شکست، محاسبه میزان حساسیت قطعه به ترک و اندازه بحرانی ترک است که می‌تواند سبب شکست ناگهانی در بارهای اعمالی شود.

۱-۴- ضرورت توجه به 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 خصوصاً سازه‌های حساس و مهم مانند سازه‌ی هواپیما، پل‌ها، سازه‌های نیروگاهی و ... مطرح است. تاریخچه شکست سازه‌ها در حین کار به سال‌های گذشته و

^۱ Fracture Mechanics

خیلی دور بر می‌گردد. شنک^۱ و پارکر^۲ 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 این قسمت مروری کوتاه بر تاریخچه‌ی شکست‌های ترد در سازه‌ها ارائه می‌گردد. گرچه این موارد فقط نمونه‌های بسیار کوچکی از شکست ترد سازه‌ها که تاکنون اتفاق افتاده می‌باشند؛ ولیکن به عنوان آشنایی، مفید خواهد بود.

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 تانک 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 نسبتاً 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 شاری نیز نشان داد که فولادهای مورد استفاده در درجه حرارت محیط، هنگام شکست دارای رفتاری ترد گونه بوده‌اند.

^۱ Shank

^۲ Parker

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، تعداد 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- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه پیچش و خمش پوسته‌ها

تحلیل الاستیک - پلاستیک کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت پیچش به دلیل استفاده‌ی وسیع آن‌ها در مهندسی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. از بین مطالعات اولیه بر روی کمانش پیچشی پلاستیک، داده‌های آزمایشگاهی لی در سال ۱۹۵۷ می‌باشد [۲].

گیاوتو در سال ۱۹۹۱، نتایج تجربی از پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت بار محوری و پیچشی ارائه داد [۳]. پس از آن می‌یر و همکاران در سال ۲۰۰۱، بررسی‌های تجربی و عددی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده پلیمری انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که پوسته‌ها به نقص هندسی اولیه در بارگذاری ترکیبی محوری / پیچشی نسبت به بارگذاری محوری حساسیت کمتری دارند [۴].

در گذشته بررسی‌هایی روی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمش در حالت الاستیک صورت گرفته است. شрман در سال ۱۹۷۶، کمانش خمشی لوله‌های مدور با نسبت قطر به ضخامت در دامنه ۱۰۲-۱۸ را مورد آزمایش قرار داد [۵]. گلین در سال ۱۹۸۰ کمانش خمشی پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای با طول نامحدود را مورد بررسی قرار داد [۶]. جو و کریاکیدس در سال ۱۹۹۲، ناپایداری پوسته‌های استوانه‌ای آلومنیومی تحت بارگذاری خمشی با نسبت قطر به ضخامت در دامنه ۱-۳۰، ۱-۱۸ را مورد بررسی قرار دادند [۷].

یه و همکارانش در سال ۱۹۹۹، تحقیقی آزمایشگاهی و تحلیلی روی کمانش خمشی پوسته-های 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 جابجایی‌ها، 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 [۸].

الچالاکانی در سال ۲۰۰۲، لوله‌های مدور با نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت را تحت بارگذاری ممان خمشی قرار داد و جهت تحلیل آن یک مدل سینماتیکی ارائه نمود که در آن اثر بیضوی در طول لوله در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج تئوری و تجربی، توافق خوبی را نشان دادند [۹].

شو بار حدی پلاستیک در سال ۲۰۰۲ را برای لوله‌های جدار نازک با ترک‌های محیطی سطحی و داخلی تحت بار محوری کششی، فشار داخلی و ممان خمشی نامتقارن به دست آورد و همچنین فرمول‌هایی برای ترکیبی از بارهای ذکر شده ارائه نمود [۱۰].

پورسعیدی در سال ۱۳۸۳، پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی‌های مدور و مربع تحت بارگذاری محوری و خمشی را به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار داد [۱۱].

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 استفاده شد. آنها پارامترهای مختلفی از قبیل شکل، تعداد و اندازه گشودگی و همچنین تاثیر فاصله گشودگی از انتهای پوسته و تاثیر تقویت 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 اندکی نیز 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 کم‌ترین مقدار است و با تغییر موقعیت گشودگی به سمت محور خنثی، به مقدار بیشترین می‌رسد. همچنین مشاهده شد پوسته‌های جدار نازک در مقایسه با پوسته‌های جدار ضخیم، استحکام آن‌ها با انجام تقویت، بیشتر افزایش می‌یابد. نیز با افزایش تعداد گشودگی‌ها، استحکام تقریبا به صورت خطی کاهش می‌یابد [۱۲].

الشتی و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با گشودگی دایره‌ای تحت ممان خمشی خالص پرداختند و نتایج حاصل از اجزای محدود با نتایج تجربی مقایسه شد [۱۳].

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 [۱۴].

فصل ۲. اعمال بارگذاری‌های سیکلی بر روی سازه‌ها

۲-۱- خستگی^۱ و رچتینگ^۲

از سال ۱۸۵۰م معلوم شده است که فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش لازم برای شکست، خواهد شکست. شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری نوسانی رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. این نامگذاری احتمالاً مبتنی بر این دلیل است که به طور کلی مشاهده می‌شود شکست‌ها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می‌دهند. هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می‌شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشت می‌شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی در حین کار، خستگی می‌باشد.

در مطالعات تغییرات ساختاری اصلی در فلزی که به آن تنش چرخه‌ای اعمال می‌شود، فرایند خستگی برای سهولت درک به مراحل زیر تقسیم شده است:

۱- شروع ترک : شامل ایجاد اولیه عیب خستگی که با عملیات تابانیدن مناسب برطرف می-

شود.

۲- رشد ترک نوار لغزش : عبارت است از عمیق شدن ترک اولیه روی صفحات با تنش برشی

زیاد، این مرحله غالباً رشد ترک مرحله *I* نامیده می‌شود.

۳- شکست ترک روی صفحاتی با تنش کششی زیاد : عبارت است از رشد یک ترک معین در

جهت عمود بر تنش کششی حداکثر. این مرحله معمولاً رشد ترک مرحله *II* نامیده می-

شود.

^۱ Fatigue

^۲ Ratcheting

۴- شکست نرم نهایی: هنگامی رخ می‌دهد که طول ترک به اندازه کافی برسد، طوری که سطح مقطع باقیمانده نتواند بار وارده را تحمل کند.

سهام نسبی هر مرحله از کل چرخه‌های مسبب شکست به شرایط آزمایش و ماده بستگی دارد؛ اما کاملاً مشخص شده است که یک ترک خستگی می‌تواند قبل از اینکه ۱۰ درصد عمر کل نمونه منقضی شود، تشکیل شود. البته در تصمیم‌گیری در مورد زمانی که یک نوار لغزش عمیق شده می‌تواند ترک نامیده شود، ابهام زیادی وجود دارد. به طور کلی، سهم بیشتری از کل چرخه‌های مسبب شکست به اشاعه ترک‌های مرحله II در خستگی کم چرخه تعلق دارد تا خستگی پرچرخه. در صورتی که رشد ترک در مرحله I برای خستگی پرچرخه و تنش کمتر، بیشتر است. اگر تنش کششی زیاد باشد، مانند خستگی در نمونه‌های با شیار تیز، رشد ترک مرحله I به هیچ وجه قابل مشاهده نیست.

عملاً بسیاری از شکست‌های خستگی از سطح شروع می‌شوند. در بسیاری از انواع متداول بارگذاری مانند خمش و پیچش، تنش حداکثر در سطح رخ می‌دهد؛ طوری که شروع شکست از آن مکان منطقی جلوه می‌کند؛ اما در بارگذاری محوری، شکست خستگی تقریباً همیشه از سطح شروع می‌شود. مدارک فراوانی حاکی از اینکه خواص خستگی به شرایط سطحی بسیار حساسند در دست است. عواملی که در سطح یک نمونه خستگی تاثیر می‌گذارند، عمدتاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- ناهمواری سطح یا تنش سطحی^۱، ۲- تغییر استحکام خستگی فلز، و ۳- تغییرات شرایط تنش باقیمانده در سطح، علاوه بر این سطح فلز در معرض اکسایش و خوردگی نیز قرار دارد [۱۵].

^۱ Stress Surface

رچتینگ یکی از پاسخ‌های خستگی کم‌چرخه، به عنوان انباشتگی کرنش پلاستیک^۱ که با افزایش سیکل‌ها رخ می‌دهد، تعریف شده است. سازه‌های مختلف متعددی وجود دارند که بارگذاری‌های تناوبی اعمال شده بر آن‌ها موجب می‌شود وضعیت تنش از حد الاستیک ماده فراتر رود. از آنجا که رچتینگ می‌تواند منجر به واماندگی‌های فاجعه آمیز در این سازه‌ها شود، برای طراحی و آنالیز اینگونه سازه‌ها پیش بینی دقیق پاسخ رچتینگ بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین حضور رچتینگ ممکن است شروع ترک را سریعتر، در نتیجه عمر خستگی ماده را کاهش دهد.

تا چند دهه‌ی پیش طراحی در مهندسی تنها به استفاده از مواد در ناحیه الاستیک محدود می‌شد؛ اما به تدریج با توجه به نیازهای روز افزون برای طراحی قطعاتی با ظرفیت تحمل بار بیشتر و در عین حال سبک، ایده استفاده از ظرفیت ماده در محدوده پلاستیک در ذهن مهندسين طراح شکل گرفت. پس از گذشت مدت زمانی اندک از طراحی چنین قطعاتی، دیده شد که برخی از این قطعات در اثر چند سیکل بارگذاری و باربرداری در محدوده پلاستیک، دچار گسیختگی می‌شوند؛ در حالی که گروهی از این قطعات نیز قابلیت تحمل تعداد بسیار زیادی بارگذاری و باربرداری پیوسته را دارند. بررسی این پدیده، منجر به ایجاد شاخه‌ای در علم پلاستیسیته به نام خستگی کم تکرار شد (در کنار بررسی مسایل معمول خستگی که گاه تا چند صد هزار سیکل بارگذاری و باربرداری را در بر می‌گیرد) که علیرغم پیشرفت‌های بسیار به دست آمده در این زمینه، هنوز یکی از موضوعات مورد توجه پلاستیسیته به شمار می‌آید [۱۶].

به طور کلی وقتی که جسمی تحت بارگذاری سیکلی قرار گیرد، با توجه به شکل ۱-۲ ممکن

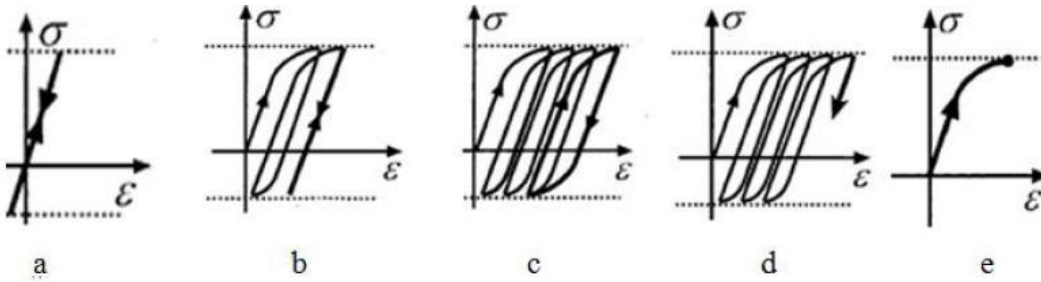
است که هر یک از حالت‌های زیر رخ دهد:

a. الاستیک مطلق^۲

^۱ Accumulation of Plastic Strain

^۲ Pure Elastic

- b. الاستیک شیک‌دان^۱
- c. پلاستیک شیک‌دان^۲
- d. رچتینگ
- e. فروپاشی^۳



شکل ۲-۱: حالت‌های مختلف رفتار ماده تحت بارگذاری تناوبی [۱۷]

در این میان رچتینگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و از واکنش‌های خستگی‌های کم تکرار می‌باشد. تعریف رچتینگ، انباشتگی کرنش پلاستیک تحت بار سیکلی با تنش میانگین غیر صفر است که در اثر خزش سیکلی^۴ و انتقال حلقه‌ی هیستریزس تنش-کرنش، ایجاد می‌شود. در این انتقال، به طور کلی کرنش رچتینگ از رابطه‌ی (۱-۲) تعیین می‌شود.

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

در نتیجه کرنش رچتینگ واقعی از رابطه‌ی (۲-۲) تعیین می‌شود.

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

در روابط بالا، ε_{max} و ε_{min} ، همانطور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، بیشترین و

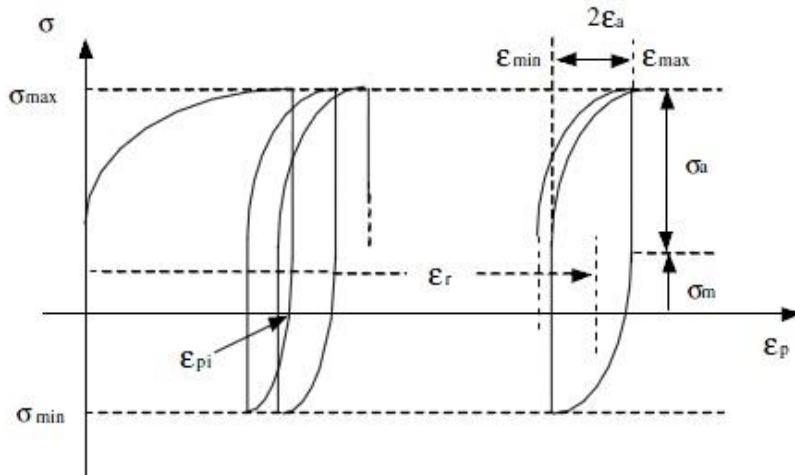
کمترین کرنش مهندسی از حلقه‌ی هیستریزس در هر سیکل می‌باشند.

^۱ Elastic Shakedown

^۲ Plastic Shakedown

^۳ Collapse

^۴ Cyclic Creep



شکل ۲-۲: تعریف پارامترهای مختلف در آزمایش رچتینگ [۱۸]

۲-۲- مروری بر کارهای گذشته در زمینه‌ی رچتینگ

از آنجایی که رچتینگ یک انباشتگی تغییر شکل غیر الاستیک سیکل به سیکل می‌باشد، شبیه-سازی و تعیین رفتار آن به طور دقیق به آسانی نخواهد بود و علاوه بر آن، مدل‌های ساختاری سیکلی رچتینگ بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی نیز قادر به تعیین دقیق رچتینگ نبودند. بنابراین در دو دهه گذشته، رچتینگ به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است. پیشرفت در پدیده‌ی رچتینگ و مدل‌های ساختاری آن در سال ۱۹۹۷ توسط اوهنو مشاهده شد. بعد از اوهنو، مدل‌های جدیدی شامل مدل حسن- باری، مدل ویادجیس، مدل دورینگ و ... برای توضیح نتایج آزمایشگاهی ارائه شد [۱۹].

کنگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ با بررسی کرنش رچتینگ بر روی فولادهای ضدزنگ مشاهده کردند که نرخ کرنش رچتینگ (افزایش کرنش رچتینگ در هر سیکل) با افزایش سیکل، به دلیل خصوصیت سخت شونده‌ی فولادها، کاهش می‌یابد [۲۰].

میرباقری در سال ۱۳۸۲ 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 سبکی سازه‌های تیر و مخازن استوانه‌ای، تحت بارهای سبکی مکانیکی و حرارتی به کار گرفته است [۲۱].

چن و همکاران در سال ۲۰۰۹ آزمایشاتی را در رابطه با مطالعه خواص خستگی و رچتینگ فولادهای نیتروژن‌دار، تحت بارگذاری تک محوره انجام دادند. در این آزمایش‌ها آنها به بررسی اثرات دامنه‌ی تنش، تنش میانگین، تاریخچه بارگذاری و نرخ تنش بر رفتار رچتینگ این نوع فولادها پرداختند. بحث در مورد اثر اندازه‌ی نمونه‌ها بر رفتار خستگی این مواد، از دیگر مباحثی می‌باشد که در این مطالعه به آن پرداخته شده است [۲۲].

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 پیک تنش^۱ و نسبت تنش بر رچتینگ بحث کرد [۲۳].

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 شبیه سازی کرده‌اند. بارگذاری‌ها به صورت کرنش-کنترل و تحت جابجایی کشش و پیچش روی نمونه‌ها اعمال شده است [۲۴].

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 نیرو متوسط از نتایج بدست آمده طی این مطالعه می‌باشد [۲۵].

^۱ Peak Stress Hold Time

شریعتی و همکارانش در سال ۱۳۹۰ به طور تجربی و عددی به بررسی رفتار رچتینگ پوسته‌ای 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 [۲۶].

شریعتی و حاتمی در سال ۲۰۱۲ به طور تجربی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولاد ضدزنگ SS304 را تحت جابجایی-کنترل با بارگذاری سیکلی محوری مطالعه کردند. در بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر، شاهد پدیده رچتینگ بودند و انباشتگی کرنش پلاستیک تا شکست پوسته ادامه یافت. آن‌ها مشاهده کردند که نرخ کرنش رچتینگ با افزایش نیروی دامنه، افزایش می‌یابد. در بارگذاری جابجایی-کنترل پوسته رفتار نرم شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کمانش در بارگذاری فشاری، نرم شوندگی شدت یافت [۲۷].

۲-۳- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه بارگذاری‌های خمشی و پیچشی

سیکلی

آقای فری و همکاران در سال ۱۹۹۹ به بررسی رفتار خستگی میله‌های کامپوزیتی اپوکسی^۱ تحت بارگذاری پیچش و خمش پرداختند. آن‌ها با آزمایش‌های مختلف معیار شکست شبه استاتیکی و رفتار خستگی نمونه را تحت شرایط تنش مختلف توصیف کردند و شکست فایبر، ترک و لایه لایه شدن آن را نیز مورد مطالعه قرار دادند. این تست نشان داد که در میله‌های کامپوزیتی

^۱ Epoxy

زمانی که نسبت خمش به پیچش زیاد باشد شکست فایبر^۱ اتفاق می‌افتد و زمانی که سازه تحت نیروی پیچشی بیشتر نسبت به خمش قرار گیرد ترک و لایه لایه شدن آن ظاهر می‌شود [۲۸].

فیکو و همکاران در سال ۱۹۹۹ تغییر شکل رچتینگ نمونه‌های استوانه‌ای با سوراخ داخلی از جنس فولاد ۳۱۶ را در دمای ۹۲۳ درجه کلوین تحت بارگذاری محوری سیکلی و بار ثابت پیچشی بررسی کردند که در نتیجه انباشتگی کرنش برشی رچتینگ با تغییر بار محوری و بار پیچشی ثابت تغییر می‌کرد و با افزایش آن، افزایش می‌یافت [۲۹].

کولکارینا در سال ۲۰۰۴ به طور آزمایشگاهی رچتینگ لوله‌های مستقیم با فیکسچر خمش سه نقطه‌ای را بررسی کرد و با مدل چابوچه در نرم افزار انسیس مقایسه کرد [۳۰].

چن و همکاران در سال ۲۰۰۵ عملکرد چهار مدل ساختاری را در پیچش نسبی 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 حالی که مدل جیانگ-سهیتوگلو پیش‌بینی خوبی را برای بارگذاری چند محوره محوری/ پیچشی با انتخاب ترم بازگشتی دینامیکی ارائه داد [۳۱].

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 اجزای محدود^۲ رچتینگ با نرم‌افزار انسیس^۳ مشاهده گردید که مدل جیانگ سهیتوگلو با کم‌ترین تغییرات نتایج قابل قبولی را نتیجه می‌دهد [۳۲].

^۱ Fiber

^۲ Finite Element

^۳ ANSYS

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 [۳۳].

آقای 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 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 [۳۴].

ژو و همکاران در سال ۲۰۱۲ به طور تجربی خواص کششی و کرنش رچتینگ را تحت بار خمشی سیکلی بر روی میله فولادی Z2CND18.12 بررسی کردند و به مطالعه‌ی رابطه بین مدول یانگ و دما پرداختند. همچنین در آزمایش‌ها آنها، انباشتگی کرنش غیر الاستیک در دما و بارگذاری‌های مختلف مشاهده شد و آنها به این نتیجه رسیدند که تغییرات مدول یانگ به صورت خطی با دما تغییر می‌کند و به تدریج با افزایش دما کاهش می‌یابد و کرنش رچتینگ به شدت به دما وابسته است [۳۵].

۲-۴- جمع بندی

با مطالعه مقاله‌های مختلف در رابطه با بارگذاری‌های سیکلی روی پوسته‌های استوانه‌ای، انواع بارگذاری‌ها مانند بارگذاری‌های محوری، خمشی سیکلی و پیچشی سیکلی روی رفتار آنها مورد

مطالعه قرار گرفته است و با تغییر پارامترهای مختلف مانند ابعاد هندسی، جنس ماده و دما، عمر خستگی مواد بررسی شد.

همچنین با مروری بر مقالات، رفتار پوسته‌های استوانه‌ای یک سر گیردار تحت نیروی خمشی سیکلی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین در مورد پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی مطالعه‌ای انجام نشده است.

در این تحقیق در نظر است رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی سیکلی و بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی مورد مطالعه قرار گیرد و تاثیر انواع پارامتر-های مختلف تحت این نوع بارگذاری‌ها بررسی شود.

فصل ۳. تحلیل تجربی

۳-۱- آزمایش های انجام شده

در این فصل نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش های خمشی و مرکب، روی پوسته های استوانه ای انجام شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجربی بدست آمده با رسم منحنی های هیستریزیس مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

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 اندازه گیری جابجایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج^۱ نیز استفاده شده است.

۳-۳- آزمایش کشش استاندارد

نمونه های مورد آزمایش، پوسته های استوانه ای از جنس فولاد SS316L می باشند. جهت بدست آوردن خواص مکانیکی پوسته فولادی، از آزمایش کشش استاندارد بر طبق استاندارد ASTM-E8 [۳۶] استفاده شده است (شکل ۳-۱).

منحنی تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد در شکل ۳-۲ برای فولاد SS316L نشان داده شده است.

برای محاسبه ی تنش و کرنش حقیقی با توجه به تنش و کرنش مهندسی حاصل از تست کشش استاندارد، از روابط زیر استفاده می شود:

$$\varepsilon_{rel} = \ln(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (۳-۱)$$

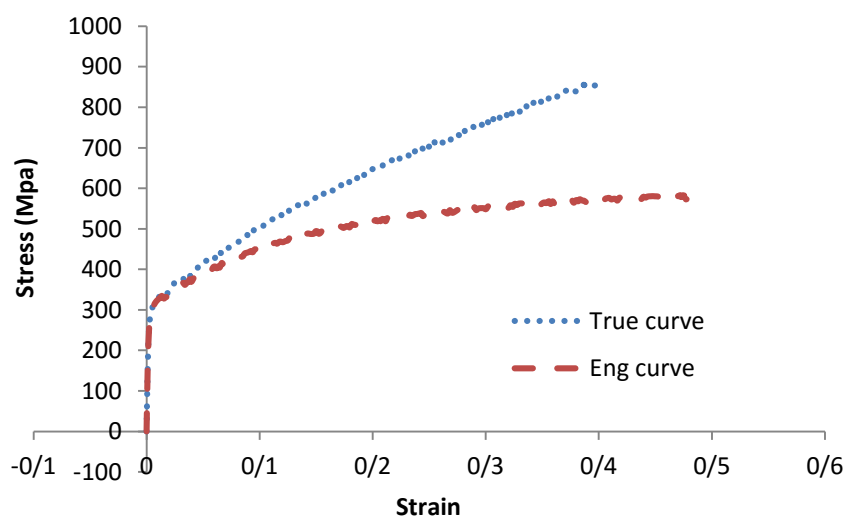
^۱ Extensometer

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

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



شکل ۳-۱: آزمایش کشش استاندارد با استفاده از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲



شکل ۳-۲: منحنی تنش - کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد

۳-۴- هندسه و خواص مکانیکی پوسته

در این تحقیق از پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت ۱mm، طول‌های ۲۳۵mm و ۲۸۰mm و قطر خارجی ۳۴mm برای آزمایش‌های کرنش-کنترل متقارن محوری و تنش-کنترل نامتقارن محوری استفاده شده است.

همانطور که قبلاً ذکر 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 SS316L از ترسیم خط ۰,۲٪ تعیین شده است. هندسه و خواص مکانیکی پوسته مورد آزمایش در جدول ۳-۱ نشان داده شده‌اند. ضریب پواسون نیز برابر ۰,۳۳ در نظر گرفته شده است.

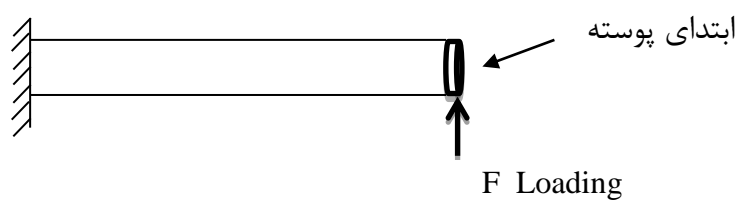
جدول ۳-۱: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS316L

| مشخصات | مقدار |
|-----------------|------------------------|
| قطر خارجی | D=۳۴mm |
| ضخامت | t=۱mm |
| طول | L=۲۳۵،۲۸۰ mm |
| مدول الاستیسیته | E=۱۸۷،۷ (GPa) |
| تنش تسلیم | $\sigma_y = ۲۹۰$ (MPa) |
| تنش نهایی | $S_u = ۸۵۹،۶۱$ (MPa) |
| ضریب پواسون | $\nu = ۰،۳۳$ |

۳-۵- بارگذاری خمشی

در این قسمت، رفتار پوسته‌های استوانه‌ای فولادی یک سر گیردار تحت بارگذاری خمشی بررسی می‌شود (شکل ۳-۳). ابتدا برای تعیین مقدار جابجایی و مقدار نیروی اعمالی جهت ایجاد کرنش

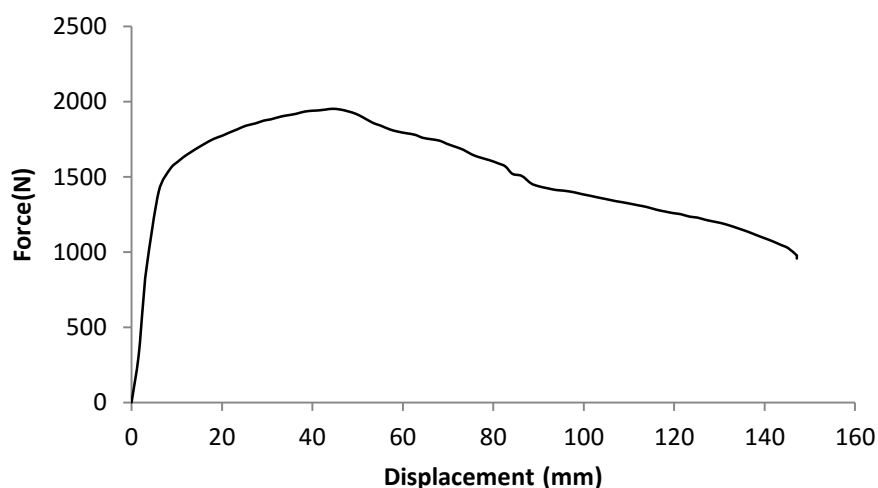
پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ، یک نمونه پوسته، تحت بارگذاری ساده خمشی قرار گرفته است. پس از انجام آزمایش بارگذاری خمش ساده، منحنی بار-جابجایی پوسته مطابق شکل ۳-۵، بدست می‌آید. با توجه به این نمودار، محدوده بار اعمالی در آزمایش جابجایی- کنترل برای انباشتگی کرنش پلاستیک و ایجاد پدیده رچتینگ مشخص می‌شود. منحنی‌های نشان داده شده در قسمت بارگذاری خمشی برای نقطه‌ی ابتدای پوسته می‌باشند.



شکل ۳-۳: شماتیک بارگذاری خمشی بر روی نمونه



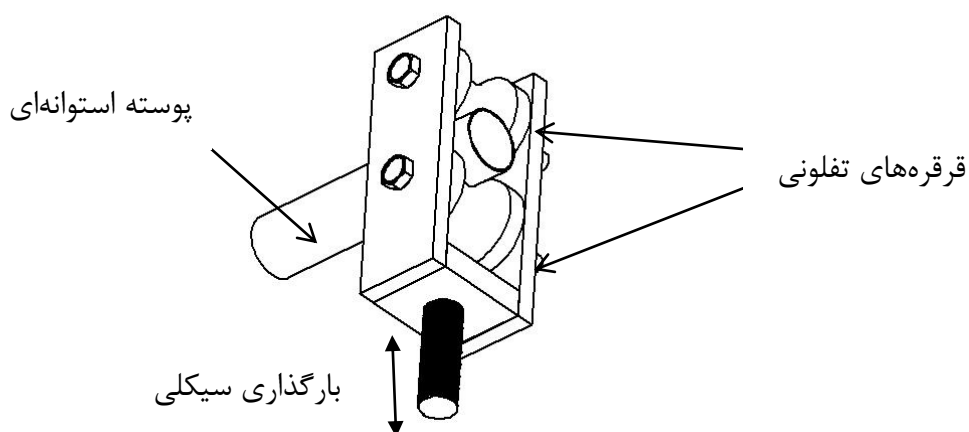
شکل ۳-۴: آزمایش پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی ساده



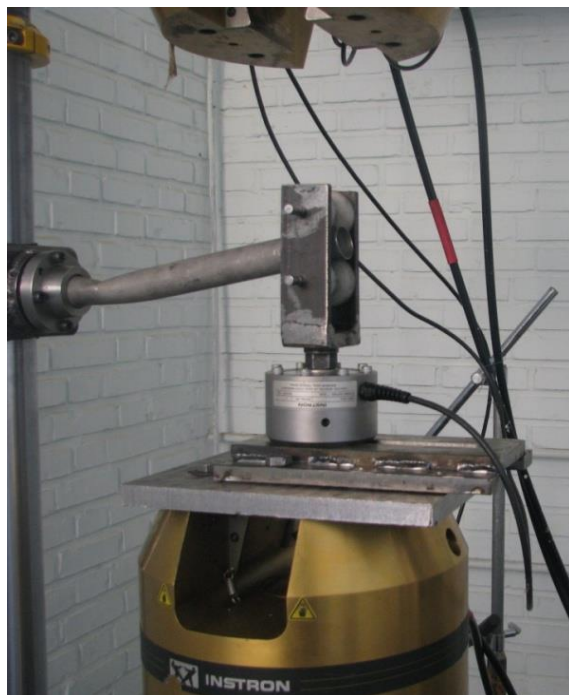
شکل ۳-۵: منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش خمش ساده

۳-۵-۱- شرایط مرزی

برای بارگذاری خمشی تناوبی نیاز به فیکسچری است که بتواند در دو جهت رفت و برگشت نیروی عمودی به ابتدای پوسته اعمال کند. برای انجام این کار از دو قرقره‌ی تفلونی فشرده شده جهت اعمال بارهای عمودی استفاده شده است که پوسته مورد نظر در میان دو قرقره قرار گرفته و به طور کامل به قرقره‌ها چسبیده است (شکل ۳-۶).



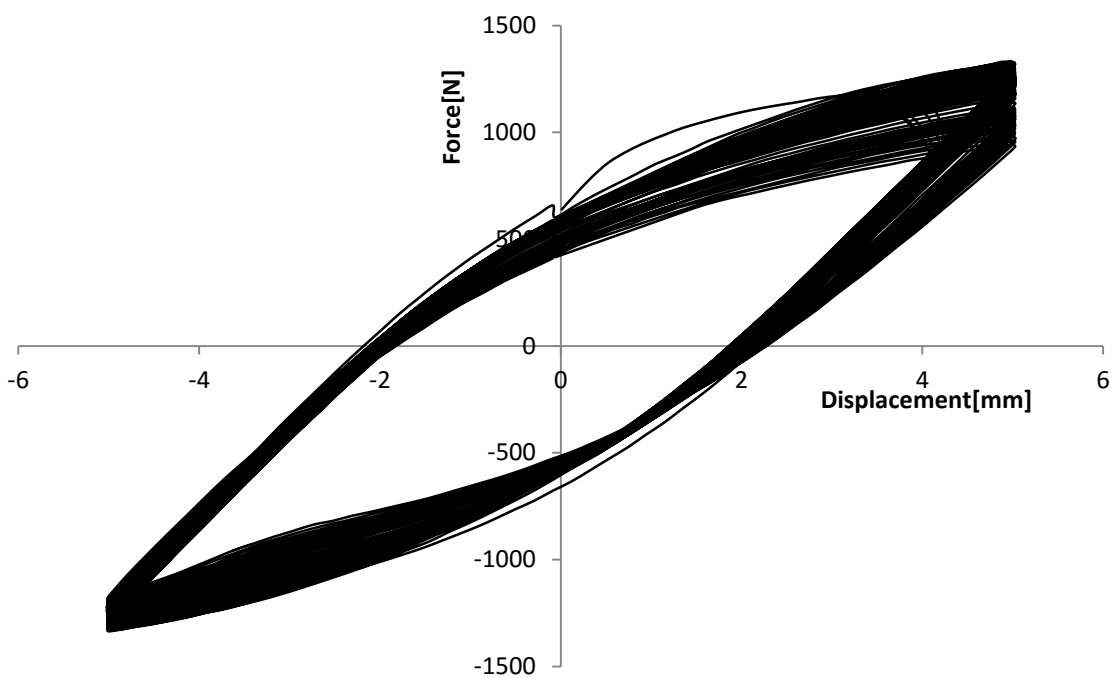
شکل ۳-۶: شماتیکی از نحوه قرارگیری پوسته استوانه‌ای به فیکسچر بارگذاری خمشی



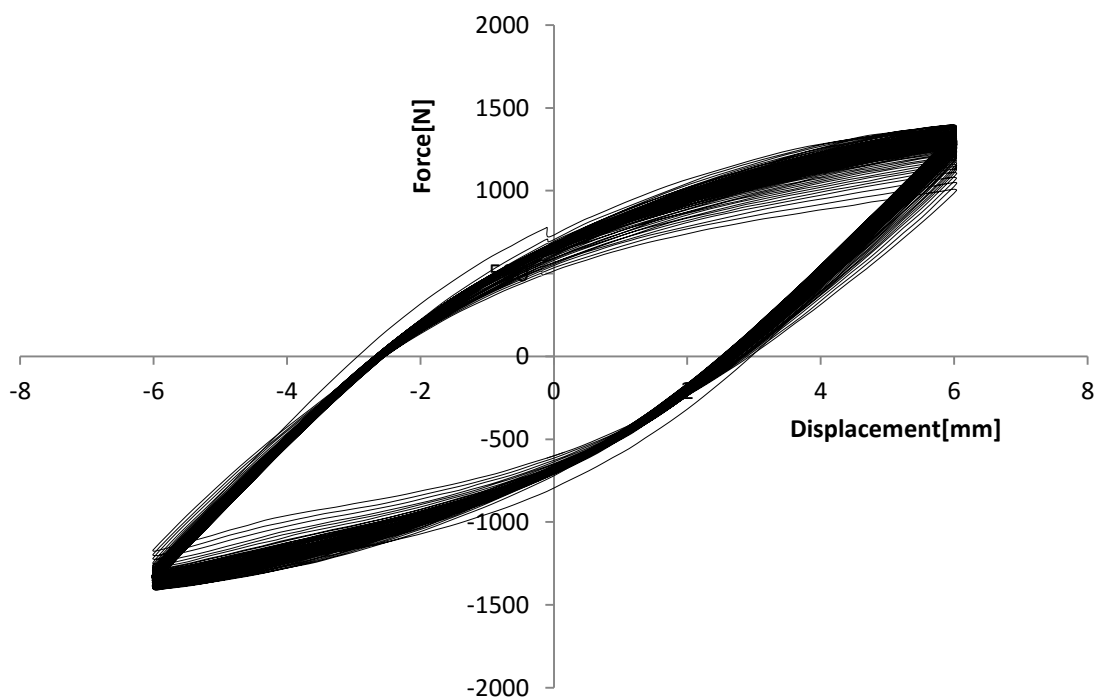
شکل ۳-۷: پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی سیکلی

۳-۵-۲- بارگذاری تحت شرایط جابجایی - کنترل

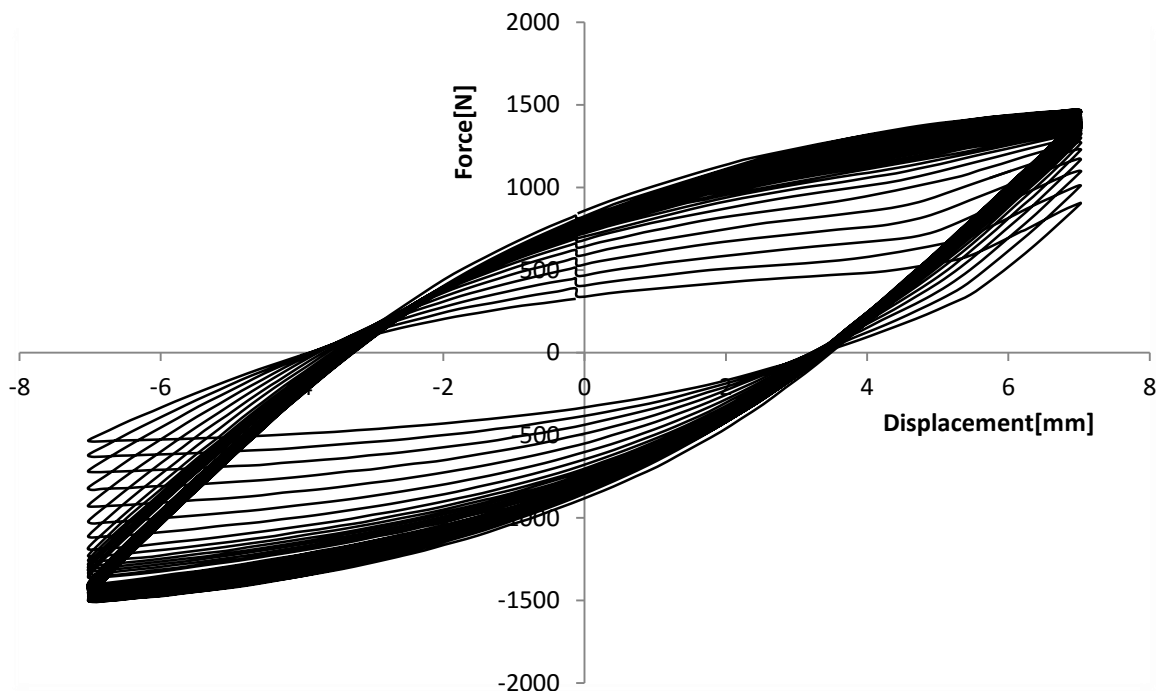
شکل‌های ۳-۸، ۳-۹ و ۳-۱۰، حلقه هیستریزیس برای سه نمودار از پوسته‌های استوانه‌ای SS316L به طول ۲۳۵mm را تحت بارگذاری جابجایی- کنترل متقارن با دامنه‌های ۵، ۶ و $U_a = 7$ به ترتیب با سرعت $10, 12, 14 \text{ mm/sec}$ نشان می‌دهد که تا شکست نمونه‌ها اعمال می‌شود. در این تحقیق، نیروی منفی برای خمش رو به بالا و نیروی مثبت برای خمش رو به پایین در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که جز در سیکل‌های اولیه، پس از هر سیکل، تحمل بار خمشی رو به بالا و بار خمشی رو به پایین در پوسته استوانه‌ای کاهش می‌یابد. یعنی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، رفتار نرم شوندگی از خود نشان می‌دهد. در هر سه نمودار بار-جابجایی، تغییر شکل پلاستیک باقی‌مانده در جابجایی مثبت و منفی تا حد قابل قبولی با هم برابر است و رفتار نمونه در خمش رو به بالا و رو به پایین یکسان می‌باشد.



شکل ۳-۸: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه ۵mm در بارگذاری خمشی سیکلی



شکل ۳-۹: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه ۶mm در بارگذاری خمشی سیکلی



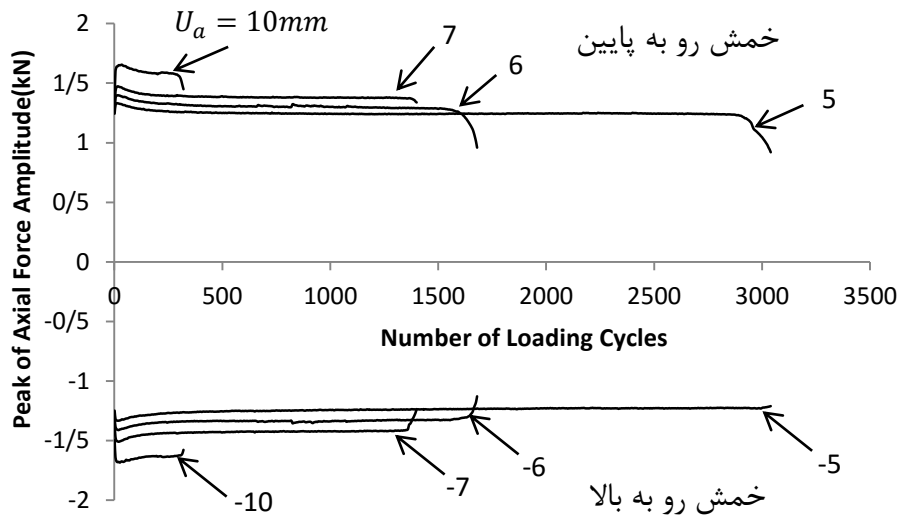
شکل ۳-۱۰: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه ۷mm در بارگذاری خمشی سیکلی

در آزمایش جابجایی - کنترل متقارن با دامنه ۷ mm همان‌طور که در شکل ۳-۱۰ مشاهده می‌شود، سرعت نرم شوندگی در سیکل‌های انتهایی به شدت افزایش می‌یابد که این به دلیل جوانه زنی و رشد ترک بوده که با افزایش نرم شوندگی همراه است.

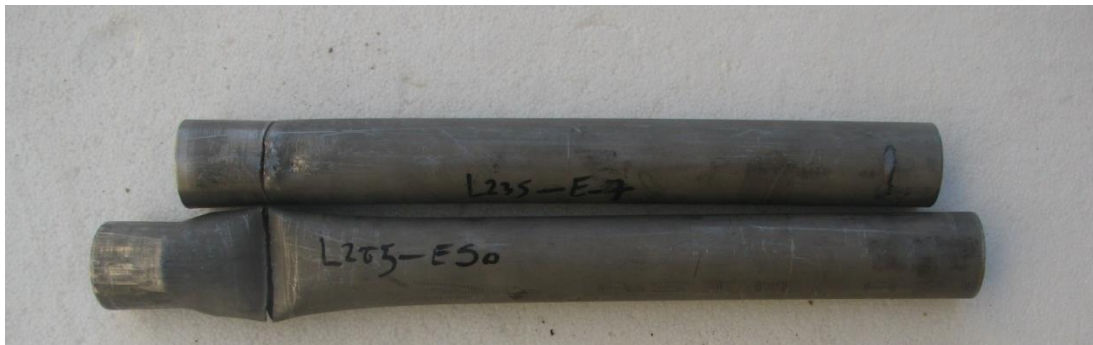
در شکل ۳-۱۱، مقادیر حداکثر نیروهای خمشی رو به بالا و رو به پایین در هر چرخه نسبت به تعداد چرخه‌ها تا شکست نمونه ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه جابجایی، شیب منحنی نرم شوندگی در هر دو ناحیه مثبت و منفی بیشتر می‌شود و نمونه در تعداد چرخه‌ی کمتری می‌شکند. کاهش شدید نیرو در انتها به علت ایجاد و رشد ترک است که منجر به شکست نمونه در سیکل‌های ۳۰۱۵، ۱۶۸۰، ۱۴۰۰ و ۳۱۰ در دامنه‌های جابجایی به ترتیب ۵، ۶، ۷ و ۱۰ می‌شود.

در شکل ۳-۱۲، دو نمونه پوسته استوانه‌ای نشان داده شده است که تحت بارگذاری خمشی سیکلی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش اعمالی در انتهای نمونه یعنی انتهای

متصل به گیره ثابت، حداکثر بوده و یک ترک محیطی در انتها ایجاد شده که منجر به شکست نمونه گردیده است.



شکل ۳-۱۱: منحنی‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه‌های جابجایی ۵، ۶، ۷ و ۱۰ در بارگذاری خمشی سیکلی

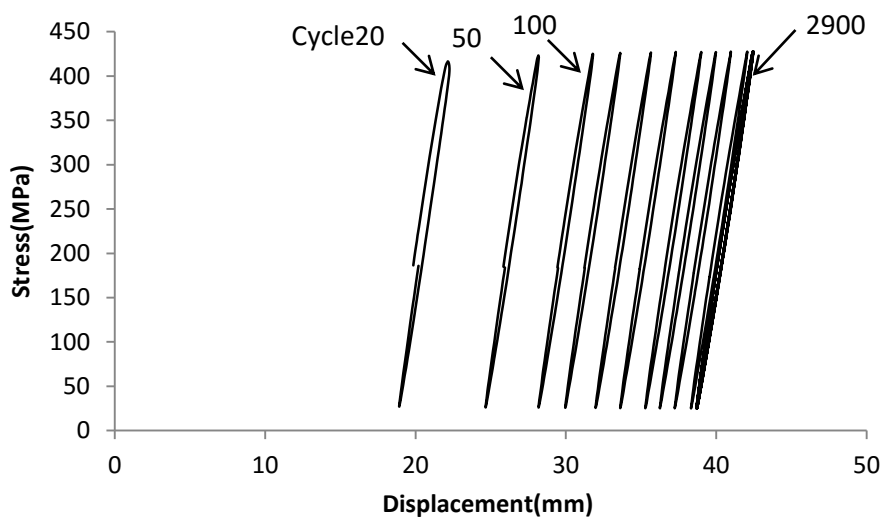


شکل ۳-۱۲: دو نمونه پوسته استوانه‌ای آزمایش شده تحت بارگذاری خمشی سیکلی

۳-۵-۳- بارگذاری تحت شرایط نیرو- کنترل

برای به دست آوردن رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای، بارگذاری به صورت نیرو-کنترل اعمال می‌گردد. در این تحقیق، کمترین جابجایی ابتدای پوسته در هر سیکل به عنوان جابجایی رچتینگ تعریف می‌شود [۲۸].

منحنی تنش محوری انتهای پوسته بر حسب جابجایی ابتدای پوسته تحت بارگذاری نیرو- کنترل با نیروی متوسط $0.8kN$ و دامنه نیرو $0.8kN$ روی نمونه‌ای با طول $235mm$ در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پس از هر سیکل، تغییر شکل پلاستیک در پوسته استوانه‌ای انباشته می‌گردد و حلقه‌های ایجاد شده در سیکل‌های بالاتر به هم نزدیک می‌گردد؛ یعنی تغییر جابجایی رچتینگ در سیکل‌های بالاتر کاهش می‌یابد.



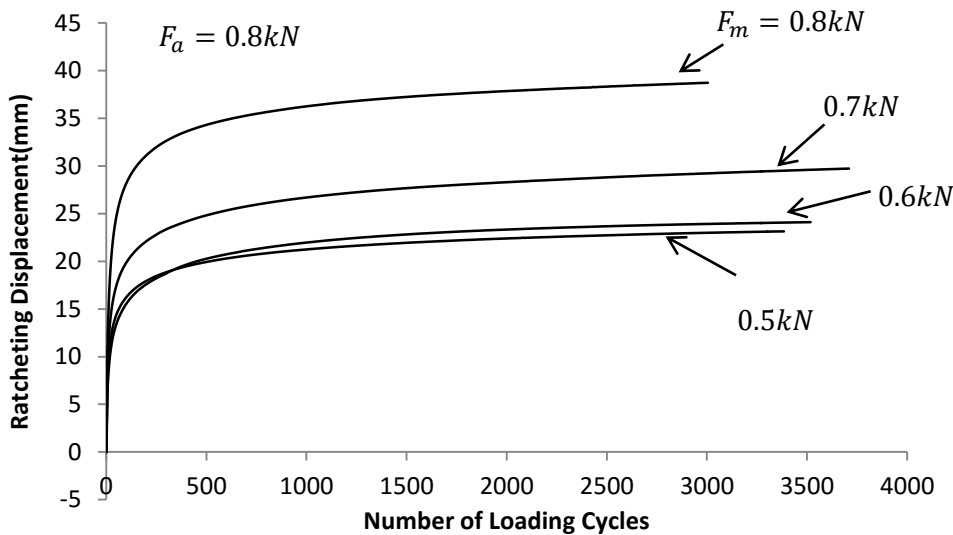
شکل ۳-۱۳: رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط $0.8kN$ و دامنه نیرو $0.8kN$ در بارگذاری خمشی سیکلی

۳-۵-۴- تاثیر نیروی میانگین بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی

ضدزنگ

در شکل ۳-۱۴ جابجایی رچتینگ چهار پوسته استوانه‌ای با طول $235mm$ تحت بارگذاری نیرو- کنترل با دامنه نیرو ثابت $0.8kN$ و نیروی متوسط $0.5kN$ ، 0.6 ، 0.7 ، 0.8 بر حسب تعداد سیکل رسم شده است. با توجه به شکل ۳-۱۴ با افزایش نیروی متوسط، میزان جابجایی رچتینگ و نرخ جابجایی رچتینگ افزایش می‌یابد. همچنین برای یک نمونه آزمایش، با افزایش تعداد سیکل،

جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد تا اینکه مقدار جابجایی رچتینگ ثابت شود.



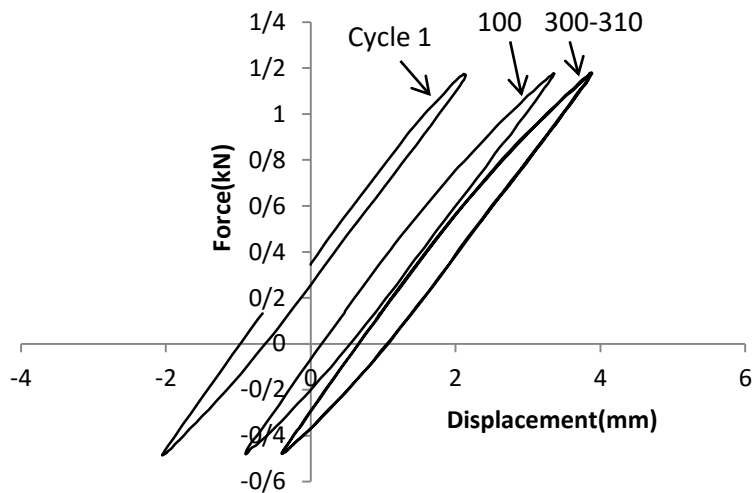
شکل ۳-۱۴: تغییرات جابجایی رچتینگ نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری نیرو-کنترل برای پوسته‌ها با طول ۲۳۵mm با دامنه نیرو ۰,۸kN و نیروی میانگین ۰,۵kN، ۰,۶، ۰,۷، ۰,۸ در بارگذاری خمشی سیکلی

۳-۵-۵- تاثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای فولادی

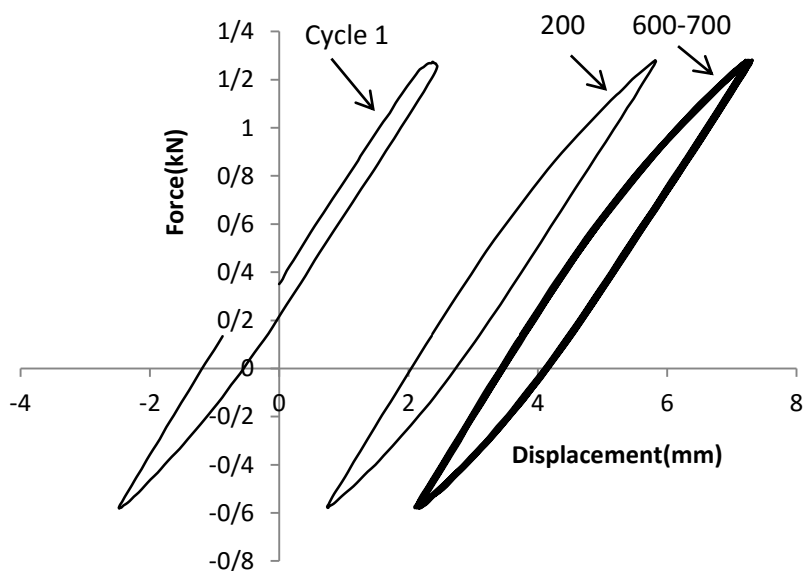
ضدزنگ

بر روی پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵ mm، بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۳۵ kN و دامنه نیروی افزایشی ۰,۸۵kN، ۱,۰۵، ۰,۹۵ که با نرخ‌های بارگذاری به ترتیب ۱,۷، ۱,۹، ۲,۱ انجام شده است. تحت این بارگذاری‌ها همانطور که از شکل‌های ۳-۱۵، ۳-۱۶ و ۳-۱۷ مشاهده می‌شود، به علت نامتقارن بودن بارگذاری نیرو-کنترل، در پوسته رفتار رچتینگ ایجاد می‌گردد و با افزایش دامنه تنش، سطح حلقه‌های هیستریزیس نیز بزرگتر می‌شود که به دلیل تغییر شکل‌های بزرگتر ایجاد شده در پوسته با دامنه تنش‌های بیشتر می‌باشد. مراحل بارگذاری با پایدار شدن حلقه‌های هیستریزیس و ایجاد جابجایی رچتینگ بسیار ناچیز، به اتمام رسیده و

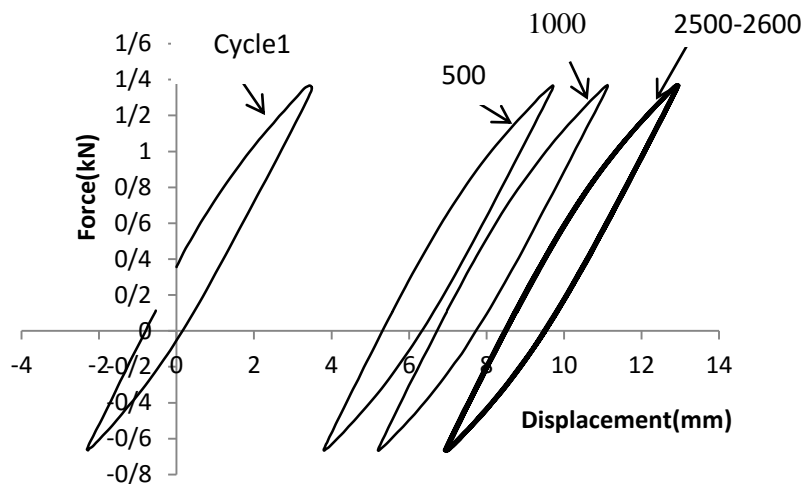
مرحله‌ی بعدی شروع می‌شود که در این تحقیق، حلقه‌های هیستریزیس در دامنه‌های $0,85\text{kN}$ ، $0,95$ ، $1,05$ به ترتیب در سیکل‌های $310-300$ ، 700 ، 2600 پایدار می‌شوند.



شکل ۳-۱۵: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول 235mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط $0,35\text{kN}$ و دامنه نیرو $0,85\text{kN}$ در مرحله اول تاریخچه بارگذاری خمشی سیکلی

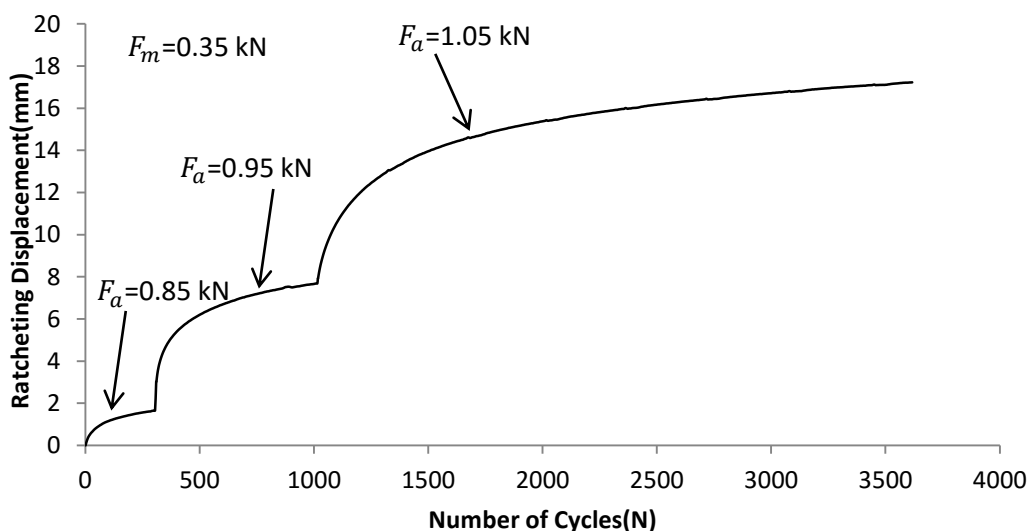


شکل ۳-۱۶: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول 235mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط $0,35\text{kN}$ و دامنه نیرو $0,95\text{kN}$ در مرحله دوم تاریخچه بارگذاری خمشی سیکلی



شکل ۳-۱۷: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۳۵kN و دامنه نیرو ۱,۰۵kN در مرحله سوم تاریخچه بارگذاری خمشی سیکلی

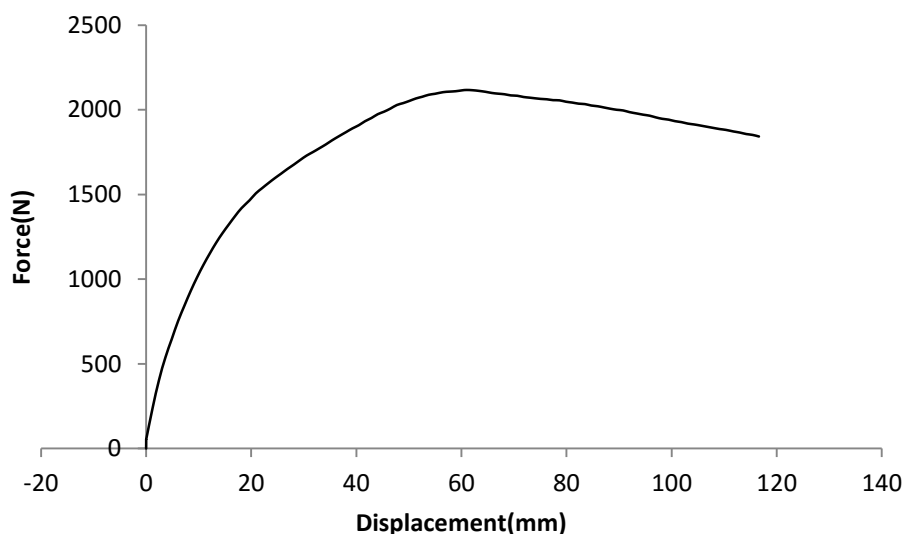
با توجه به شکل ۳-۱۸، جابجایی رچتینگ در هر مرحله در حال افزایش می‌باشد و با افزایش دامنه‌ی نیرو، نرخ جابجایی رچتینگ افزایش می‌یابد و به ازای دامنه نیروهای بزرگ‌تر، شیب جابجایی رچتینگ در سیکل‌های بالاتر به صفر نزدیک می‌شود.



شکل ۳-۱۸: تغییرات جابجایی رچتینگ نسبت به تعداد چرخه برای نمونه‌ای با طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۰,۳۵kN و افزایش دامنه نیرو ۰,۸۵kN، ۰,۹۵kN، ۱,۰۵kN در بارگذاری خمشی سیکلی

۳-۶- بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی

برای بررسی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی سیکلی، ابتدا یک تست ساده خمشی و پیچشی با طول بازوی ۱۸۰mm با توجه به شکل ۳-۱۹ انجام شد. در نتیجه محدوده‌ی اعمال بار در ناحیه‌ی پلاستیک مشخص شد که نمودار بار اعمالی به بازو توسط فک دستگاه بر حسب جابجایی نقطه‌ی اعمال بار در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است.

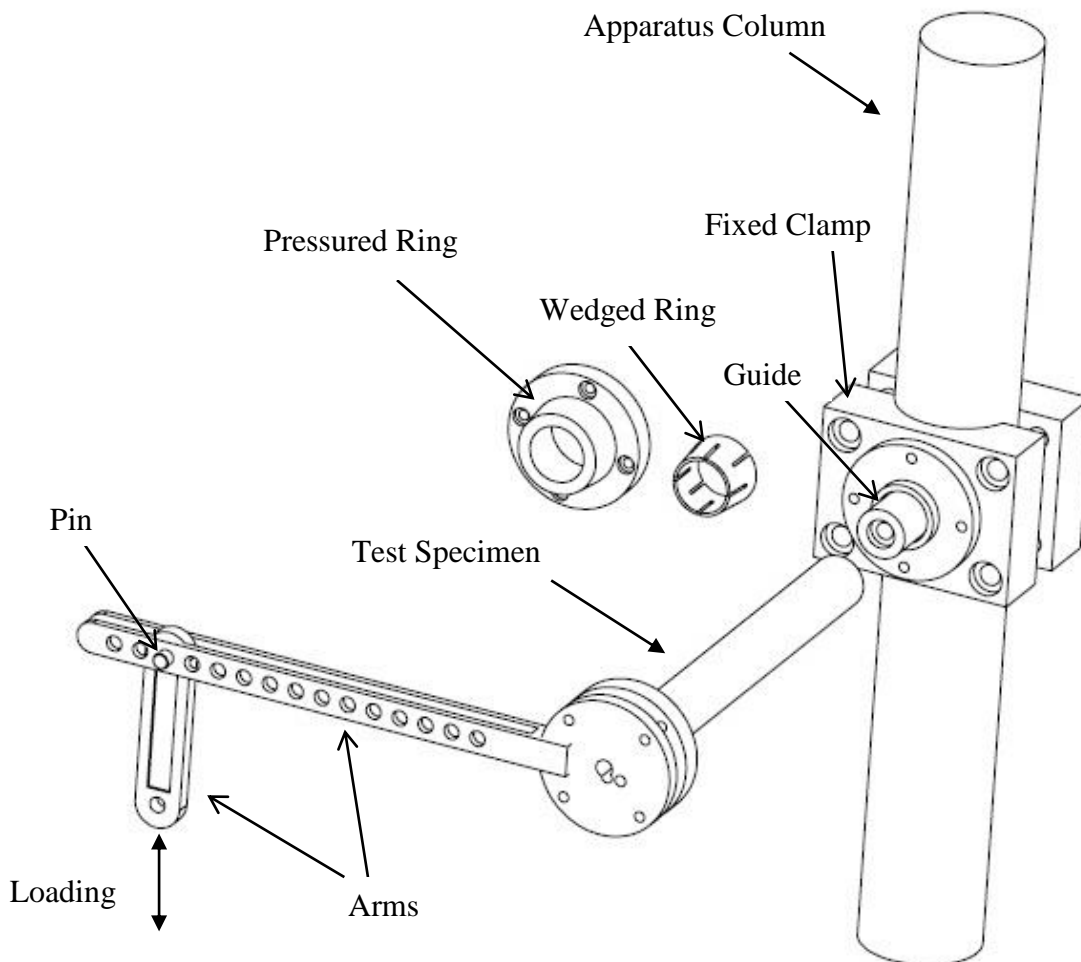


شکل ۳-۱۹: منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی ساده

۳-۶-۱- شرایط مرزی

در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، از یک بازوی شیاردار استفاده شده است که از انتها به دیسک جوش شده است (شکل ۳-۲۰). بازو در فواصل مساوی سوراخ شده است که برای مقادیر مختلف بارگذاری گشتاور پیچشی و خمشی قابل استفاده است. در این فیکسچر با توجه به شکل ۳-۲۰، از یک راهنمای استوانه‌ای در دو طرف استفاده شده است که از له‌شدگی پوسته جلوگیری می‌کند. برای نگه داشتن پوسته از هر طرف نیز از یک گوه فنری و یک رینگ فشاری استفاده شده است که با پیچ از یک طرف به گیره ثابت و از طرف دیگر به دیسک بازو متصل می‌شود.

اعمال نیروی فک به وسیله‌ی یک بازوی عمودی انجام می‌شود که توسط یک پین به بازوی افقی شیاردار متصل می‌باشد.



شکل ۳-۲۰: نمایی از فیکسچر استفاده شده در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی و نحوه اتصال پوسته به آن

۳-۶-۲- بارگذاری تحت شرایط جابجایی- کنترل

در این قسمت، حلقه‌های هیستریزیس برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی با جابجایی-کنترل نامتقارن رسم شده است. طول موثر پوسته‌ها ۲۸۰ mm می‌باشد. در این بخش تاثیر دامنه‌ی جابجایی و جابجایی میانگین بر رفتار نرم شوندگی و سخت شوندگی پوسته بررسی می‌شود و در ادامه با تغییر طول بازو، تاثیر گشتاور پیچشی و گشتاور خمشی بر میزان نرم شوندگی پوسته مشخص می‌شود. برای اندازه‌گیری جابجایی ابتدای پوسته از یک ساعت

دیجیتال مطابق شکل ۳-۲۱ استفاده شده است که جابجایی عمودی ابتدای پوسته را نشان داده و مطابق شکل به دستگاه متصل می‌شود. حرکت افقی ابتدای پوسته نیز توسط یک ساعت عقربه‌ای اندازه گیری شد که جابجایی اندازه گیری شده ناچیز بوده و بنابراین در این بخش فرض می‌شود که پوسته فقط حرکت عمودی و چرخشی حول محور خود دارد. همه منحنی‌های نشان داده شده در قسمت بارگذاری مرکب برای نقطه ابتدای پوسته رسم شده است.

ساعت دیجیتالی برای اندازه گیری
جابجایی عمودی

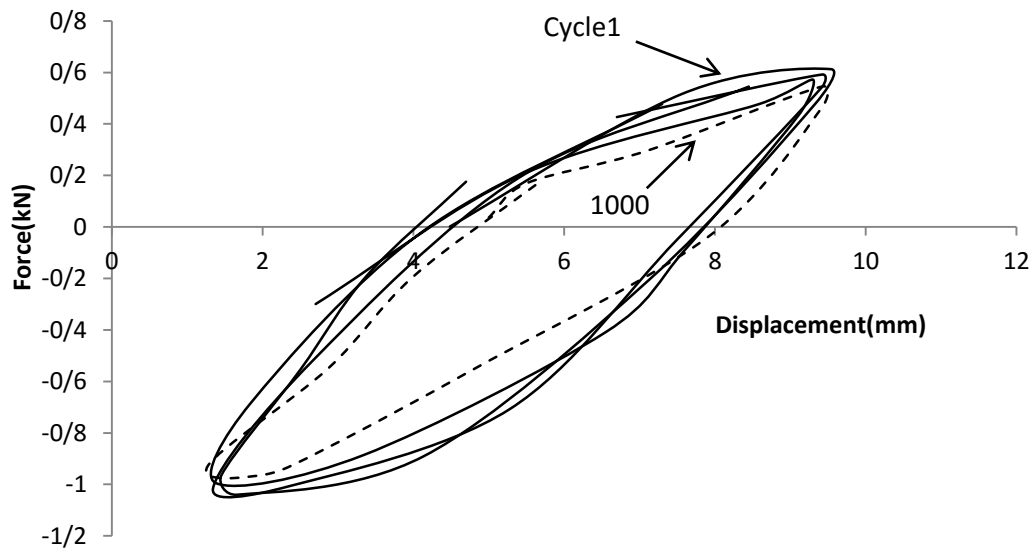


ساعت عقربه‌ای برای اندازه گیری
جابجایی افقی

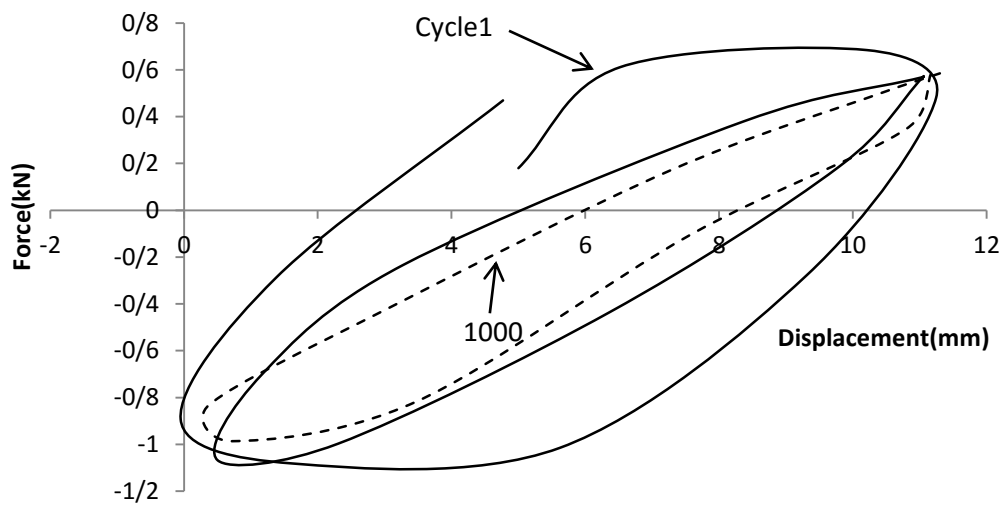
شکل ۳-۲۱: فیکسچر بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی و استفاده از ساعت‌های اندازه گیری دیجیتالی و عقربه‌ای

۳-۶-۳- تاثیر دامنه جابجایی بر رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای فولادی ضدزنگ

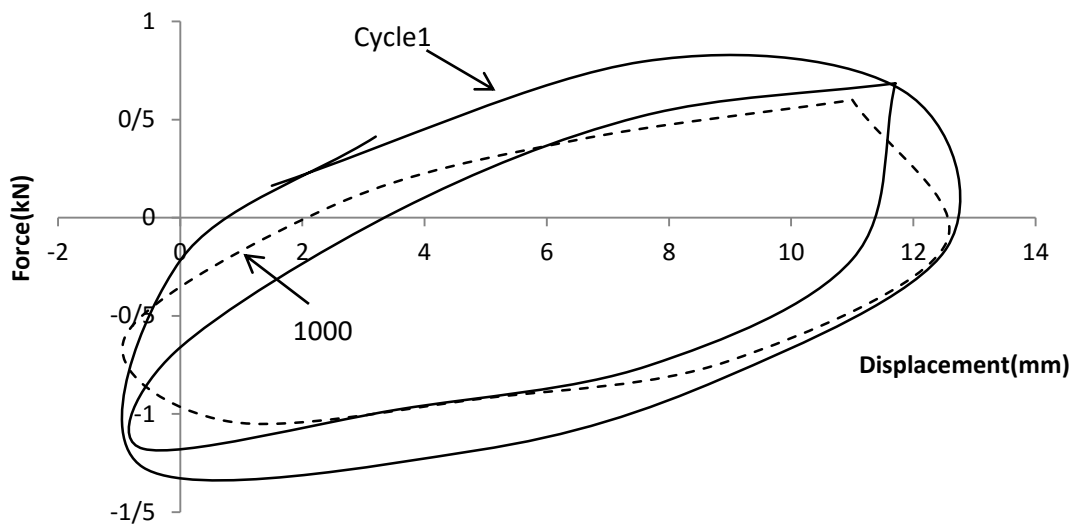
در شکل های ۳-۲۲، ۳-۲۳ و ۳-۲۴ حلقه‌های هیستریزس نیروی فک دستگاه بر حسب جابجایی عمودی ابتدای پوسته با طول بازوی ۱۸۰ mm نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه، سطح حلقه‌ها بزرگ‌تر می‌شود. همان طور که قبلاً گفته شد، بزرگ‌تر شدن حلقه‌های هیستریزس به دلیل تغییر شکل‌های بزرگ ایجاد شده می‌باشد که با ایجاد گرما همراه است.



شکل ۳-۲۲: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه جابجایی ۸mm در بارگذاری مرکب سیکلی



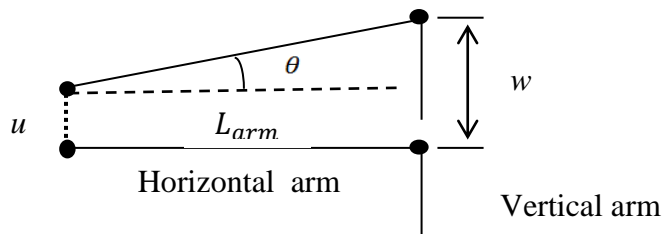
شکل ۳-۲۳: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه جابجایی ۱۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی



شکل ۳-۲۴: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه جابجایی ۲۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی

به عنوان مثال برای نمونه در جابجایی میانگین ۵mm و دامنه جابجایی ۲۰mm، دمای انتهایی نمونه متصل به گیره ثابت ۶۹ درجه سانتیگراد و دمای ابتدای نمونه تقریباً ۲۹ درجه سانتیگراد بود که نشانگر اتلاف انرژی به صورت حرارت می‌باشد.

در آزمایش‌ها تجربی مشاهده شد که در حین آزمایش بازوی عمودی نسبت به محور افق با تقریب قابل قبولی، ۹۰ درجه باقی می‌ماند. بنابراین اگر w جابجایی فک، u جابجایی ابتدای پوسته و v جابجایی مطلق باشد، زاویه پیچش θ ، از روابط ۳-۳ و ۴-۳ محاسبه می‌شود.



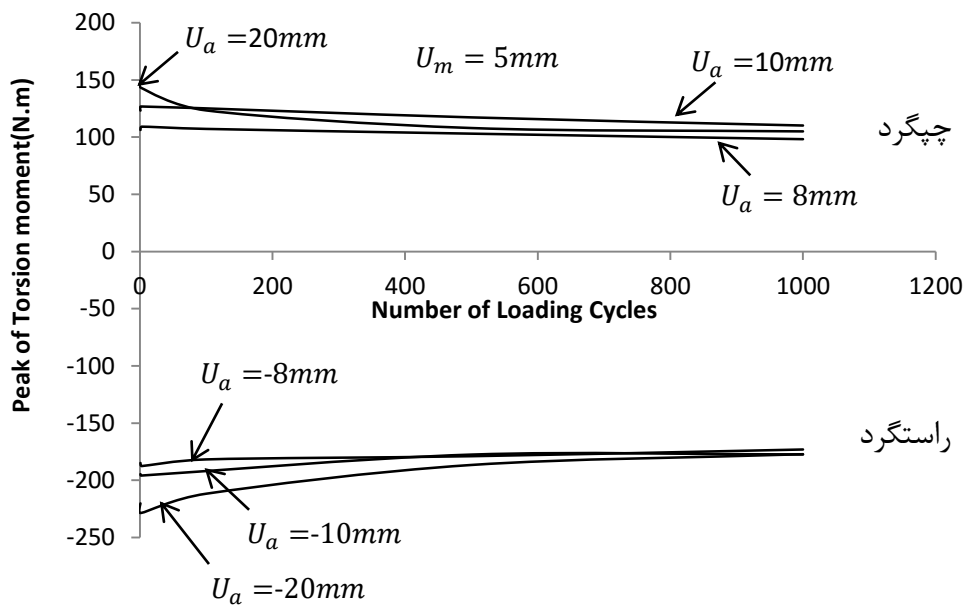
$$v = w - u \quad (3-3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v}{L_{arm}} \quad (4-3)$$

همچنین گشتاور پیچشی T نیز از رابطه ۳-۵ تعیین می‌شود که در آن نیروی فک و L_{arm} طول بازوی افقی است.

$$T = F \cos(\theta) \times L_{arm} \quad (۳-۵)$$

در شکل ۳-۲۵، مقادیر حداکثر گشتاور پیچشی اعمالی به پوسته در حالت راستگرد (مقادیر منفی) و چپگرد (مقادیر مثبت) نسبت به تعداد چرخه‌ها ترسیم شده است. در این تحقیق منظور از گشتاور پیچشی راستگرد، حرکت فک دستگاه به سمت بالا و گشتاور پیچشی چپگرد، حرکت فک دستگاه به سمت پایین است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه جابجایی، شیب منحنی نرم شوندگی در هر دو حالت راستگرد و چپگرد بیشتر می‌گردد و سرعت نرم شوندگی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳-۲۵، گشتاور پیچشی در حالت راستگرد، برای یک دامنه جابجایی ثابت بیشتر از حالت چپگرد است و این به دلیل جابجایی میانگین در لحظه شروع کار است که با ایجاد نیرو و گشتاور پیچشی راستگرد اولیه همراه است.

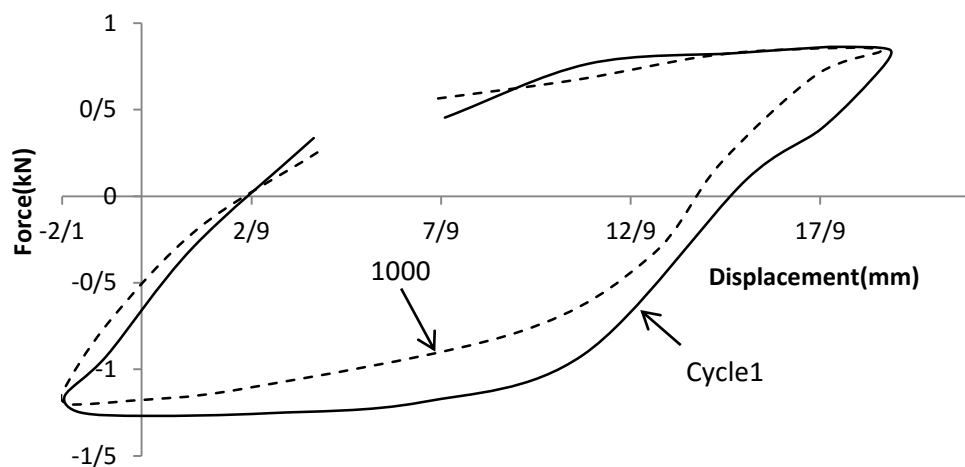


شکل ۳-۲۵: تغییرات دامنه گشتاور پیچشی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm با جابجایی میانگین ۵mm و دامنه‌های جابجایی ۲۰، ۱۰، ۸mm در بارگذاری مرکب سیکلی

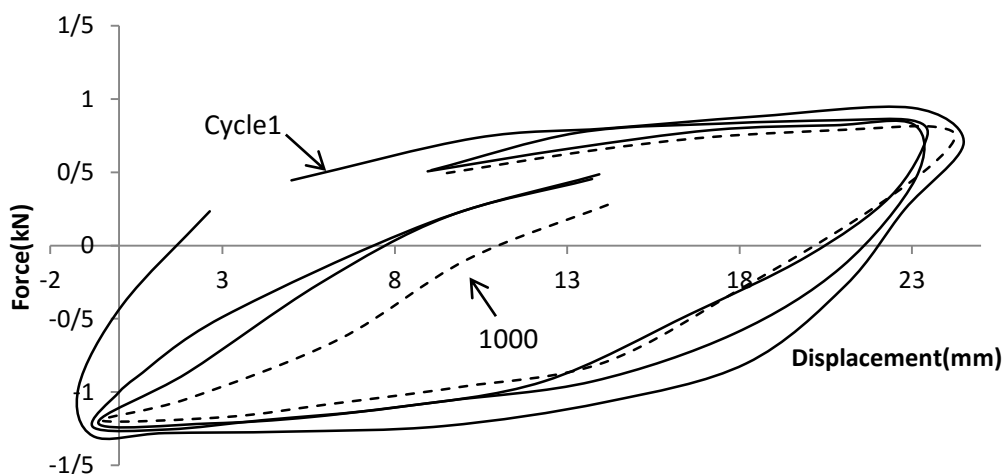
۳-۶-۴- تاثیر جابجایی میانگین بر رفتار نرم شوندهای پوسته استوانه‌ای فولادی

ضدزنگ

شکل‌های ۳-۲۶ و ۳-۲۷، حلقه‌های هیستریزیس برای پوسته استوانه‌ای با طول بازوی ۱۸۰ mm و دامنه جابجایی ثابت ۲۰mm و جابجایی میانگین ۸ و ۱۰ mm را تحت بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر جابجایی میانگین از ۸mm به ۱۰، سطح حلقه‌ها بزرگ‌تر می‌شود که بیانگر تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ‌تر می‌باشد.

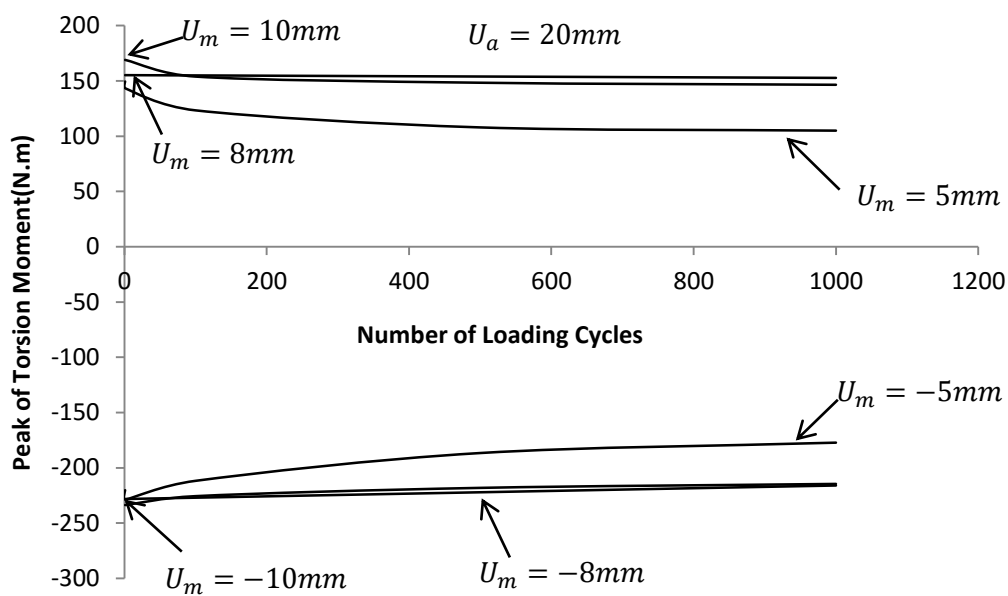


شکل ۳-۲۶: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۲۰mm و جابجایی میانگین ۸mm در بارگذاری مرکب سیکی



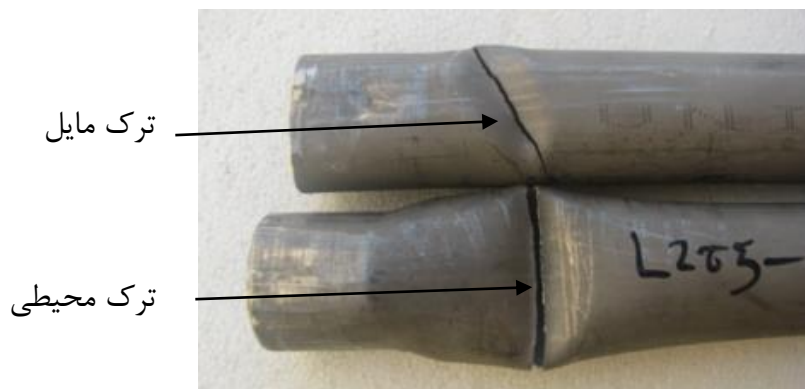
شکل ۳-۲۷: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۲۰mm و جابجایی میانگین ۱۰mm در بارگذاری مرکب سیکی

در شکل ۳-۲۸، تغییرات گشتاور پیچشی بر حسب تعداد سیکل در دو حالت راستگرد و چپگرد نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳-۲۸، با افزایش جابجایی میانگین از ۵ mm به ۸ و ۱۰، سرعت نرم شوندگی کاهش می‌یابد. در حالت راستگرد، سرعت نرم شوندگی تقریباً به صفر می‌رسد؛ ولی در حالت چپگرد تا حدودی شاهد نرم شوندگی نمونه هستیم و این به دلیل تغییر وضعیت بارگذاری از حالت راستگرد به چپگرد است که باعث تسریع نرم شوندگی پوسته نسبت به حالت راستگرد نمونه می‌شود.



شکل ۳-۲۸: تغییرات دامنه گشتاور پیچشی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm با دامنه جابجایی ۲۰mm و جابجایی میانگین ۵، ۸، ۱۰ در بارگذاری مرکب سیکلی

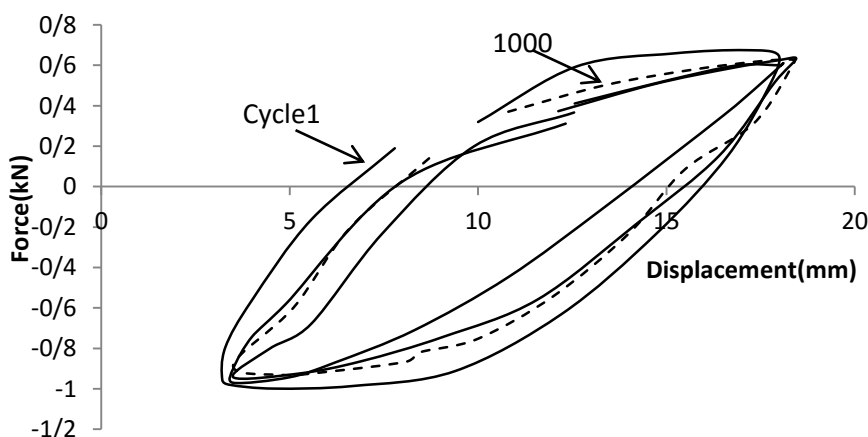
در شکل ۳-۲۹، دو نمونه پوسته استوانه‌ای از جنس SS316L نشان داده شده است که بعد از انجام آزمایش و تحت بارگذاری خمشی و مرکب خمشی و پیچشی دچار شکست شده‌اند. مشاهده می‌شود که در نمونه‌های تحت بارگذاری خمشی، ترک به صورت محیطی رشد کرده حال آنکه در نمونه‌های تحت بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، ترک به صورت مایل رشد کرده و باعث شکست پوسته گردیده است.



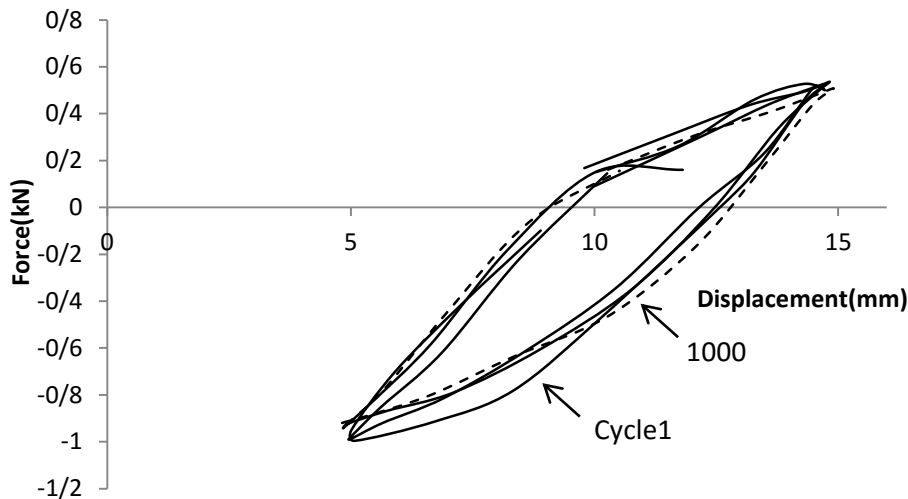
شکل ۳-۲۹: دو نمونه پوسته استوانه‌ای آزمایش شده با ترک محیطی و مایل تحت بارگذاری خمشی و مرکب

۳-۶-۵- تاثیر طول بازو بر رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه‌ای فولادی ضدزنگ

در این قسمت، رفتار نرم شوندگی پوسته برای بازوهایی با طول $180, 240, 290$ mm بررسی می‌شود. از آنجایی که تغییر طول بازو با تغییر گشتاور پیچشی همراه است، بر رفتار نرم شوندگی پوسته موثر خواهد بود. شکل‌های ۳-۳۰ و ۳-۳۱ حلقه‌های هیستریزس را برای دو نمونه با طول بازوی 240 و 290 mm نشان می‌دهد و برای نمونه با طول 180 mm در شکل ۳-۲۷ نشان داده شد. مشاهده می‌شود که با افزایش طول بازو، سطح حلقه‌ها کوچک‌تر می‌شود. دلیل کاهش سطح حلقه‌ها، افزایش اثر گشتاور پیچشی و کاهش اثر گشتاور خمشی با افزایش طول بازو است که این امر در تغییر دمای انتهای پوسته با تغییر طول بازو نیز مشاهده می‌شود.

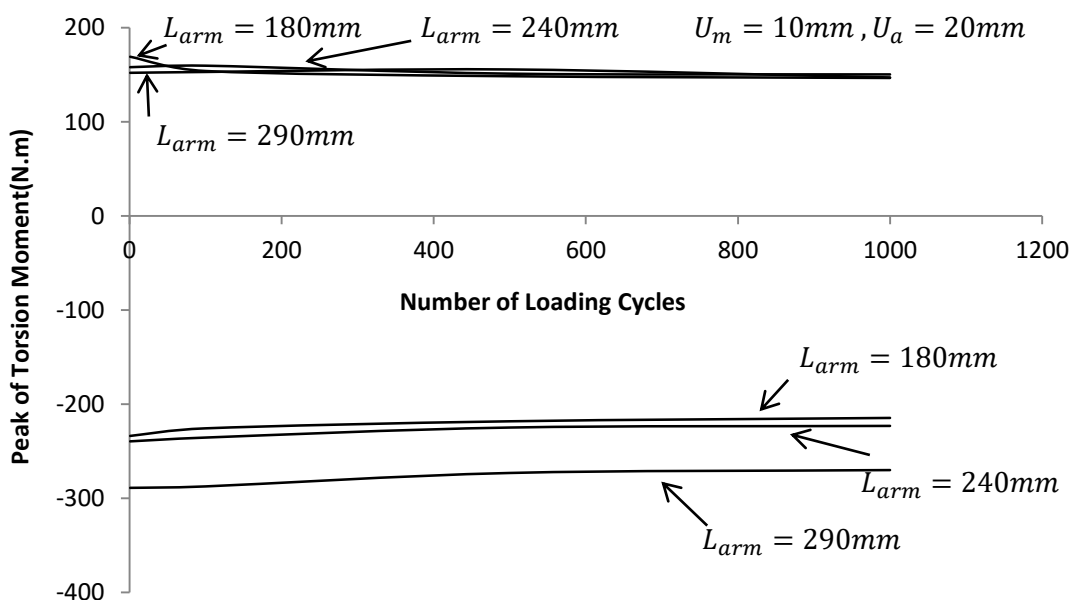


شکل ۳-۳۰: منحنی‌های هیستریزس پوسته استوانه‌ای با طول 280 mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین 10 mm و دامنه جابجایی 20 mm با طول بازوی 240 mm در بارگذاری مرکب سیکلی



شکل ۳-۳۱: منحنی‌های هیستریزیس پوسته استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با جابجایی میانگین ۱۰mm و دامنه جابجایی ۲۰mm با طول بازوی ۲۹۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی

در شکل ۳-۳۲، نمودار گشتاور پیچشی بر حسب تعداد سیکل برای سه طول بازو رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول بازو، سرعت نرم شوندگی در هر دو حالت راستگرد و چپگرد تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند؛ اما با افزایش طول بازو مقدار حداکثر گشتاور پیچشی در حالت راستگرد به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۳۲: تغییرات دامنه گشتاور پیچشی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۸۰mm با جابجایی میانگین ۱۰mm و دامنه جابجایی ۲۰mm با طول بازوی ۲۹۰، ۲۴۰، ۱۸۰mm در بارگذاری مرکب سیکلی

در شکل ۳-۳۳، وضعیت شکست تعدادی نمونه‌ی آزمایش شده از جنس SS316L تحت بارگذاری خمشی و مرکب سیکلی نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۳: وضعیت شکست تعدادی پوسته استوانه‌ای بعد از انجام آزمایش بارگذاری خمشی و مرکب سیکلی

۳-۷- نتیجه‌گیری

در این فصل رفتار تجربی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ SS316L تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای خمشی و مرکب خمشی و پیچشی مورد بررسی قرار گرفت. در بارگذاری خمشی شرایط نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل روی نمونه‌ها اعمال گردید و تاثیر پارامترهای دامنه جابجایی، نیروی میانگین و تاریخچه بارگذاری روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی شرایط جابجایی-کنترل نامتقارن اعمال گردید و تاثیر پارامترهای دامنه جابجایی، جابجایی میانگین و طول بازوی گشتاور پیچشی بررسی شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی در زیر گزارش شده است.

۱- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری در بارگذاری خمشی سیکلی، رفتار نرم-

شوندگی مشاهده می‌شود و با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندگی افزایش می‌یابد

و نمونه در تعداد سیکل کمتری می‌شکند.

- ۲- تحت بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی سیکلی انباشتگی جابجایی رچتینگ یا پدیده رچتینگ مشاهده می‌شود و با افزایش نیروی میانگین، جابجایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد.
- ۳- تحت بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی سیکلی، برای یک نمونه آزمایش با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش یافته تا اینکه انباشتگی کرنش متوقف شود.
- ۴- در بارگذاری نیرو-کنترل چند مرحله‌ای، در بارگذاری خمشی سیکلی، با افزایش دامنه نیرو، نرخ جابجایی رچتینگ افزایش می‌یابد و به ازای دامنه نیروهای بزرگ‌تر، شیب جابجایی رچتینگ در سیکل‌های بالاتر به صفر نزدیک می‌شود.
- ۵- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، سرعت نرم شوندگی در هر دو ناحیه راستگرد و چپگرد افزایش می‌یابد و برای یک دامنه جابجایی و جابجایی میانگین ثابت، گشتاور پیچشی در حالت راستگرد بیشتر از حالت چپگرد است.
- ۶- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، با افزایش جابجایی میانگین سرعت نرم شوندگی به شدت کاهش می‌یابد.
- ۷- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، با افزایش طول بازوی گشتاور پیچشی، سرعت نرم شوندگی در هر دو حالت راستگرد و چپگرد تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند؛ ولی با افزایش طول بازو مقدار حداکثر گشتاور پیچشی در حالت راستگرد کاهش می‌یابد.
- ۸- در بارگذاری خمشی سیکلی، شکست نمونه از انتهای آن و متصل به گیره ثابت اتفاق می‌افتد و مسیر ایجاد و رشد ترک به صورت محیطی می‌باشد؛ اما در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی سیکلی، ترک به صورت مایل رشد کرده و سبب شکست نمونه می‌شود.

فصل ۴. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی

۴-۱- مقدمه‌ای در رابطه با تحلیل عددی

در حوزه مهندسی مکانیک و سازه، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و خواص پیچیده تحت بارگذاری‌های نامنظم می‌باشد 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 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 اجزای محدود، روش المان مرزی و روش بدون المان.

۴-۱-۱- روش اجزای 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 نامیده می‌شوند به دست می‌آیند. اگر چه مفهوم اجزای محدود در واقع برای شاخه‌ی دوم تقسیم بندی 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 کابردی 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^۱ 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^۲ و زنگویچ^۳ 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^۴ 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.

روند کلی در اجزای محدود، تقسیم بندی مدل به اجزای کوچک‌تر (المان)، تبدیل معادلات دیفرانسیل حاکم بر المان‌ها به دستگاه معادلات چند مجهولی، حل معادلات در گره‌ها و یافتن جواب در دیگر نقاط مدل به کمک توابع شکل المان‌ها می‌باشد. المان‌ها متناسب با شکل مسئله می‌توانند یک، دو و یا سه بعدی باشند. یکی از روش‌های مرسوم جهت یافتن معادلات در مکانیک

^۱ Argyris

^۲ Chung

^۳ Zienkiewicz

^۴ Oden

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 آباکوس

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 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، ساده می‌باشد و پیچیده‌ترین مسایل را می‌توان به آسانی 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 مدل‌ها 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 تیرانس‌های 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.

۳-۱-۴ - خستگی کم چرخه در آباکوس

نرم افزار آباکوس، در کنار بسیاری از توانایی‌های خود قادر به آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه‌ای^۱ نیز می‌باشد.

برای بررسی این دسته از مسایل باید از مدل سخت شوندگی سینماتیک استفاده کرد که دارای دو قسمت به نام‌های مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی و دیگری سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/ سینماتیک است.

مدل نخست می‌تواند با سطح تسلیم میسز^۲ یا هیل^۳ به کار برده شود؛ در حالی که مدل دوم را تنها با سطح تسلیم میسز می‌توان به کار برد. در واقع تفاوت این دو سطح تسلیم در آن است که با استفاده از سطح تسلیم میسز، در هر لحظه تنش تسلیم برای ماده در تمام جهات یکسان است؛ اما با استفاده از 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 کوپله‌ی تنش حرارتی، به کمک این مدل امکان پذیر نمی‌باشد؛ اما با این وجود برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه‌ای کامل‌ترین و دقیق‌ترین مدل است.

^۱ Cyclic Loading

^۲ Mises

^۳ Hill

در مدل سخت شونده گی سینماتیک خطی فرض می‌شود که سطح تسلیم متناسب با مقدار α ، به عنوان تنش زمینه در فضای تسلیم حرکت می‌کند؛ اما تغییر شکل نمی‌دهد. نرم افزار آباکوس از مدل خطی زیگلر^۱ برای شبیه‌سازی عددی مسائل استفاده می‌کند که معادله آن به صورت رابطه زیر ارائه بیان می‌شود [۳۷].

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{c} \dot{C} \alpha \quad (1-4)$$

که در آن C مدول سخت شونده گی سینماتیک و \dot{C} ، نرخ تغییرات C بر حسب دما است. در این مدل، اندازه سطح تسلیم ثابت می‌ماند. به بیان دیگر σ^0 در رابطه ۱-۴ همواره مساوی $\hat{\sigma}_0$ که تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است، باقی می‌ماند. برای معرفی این مدل به نرم‌افزار، در متن فایل ورودی^۲ 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 به وسیله‌ی نرم افزار محاسبه خواهد شد:

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

مدل سخت شونده گی غیرخطی ایزوتروپیک/ سینماتیک که بر اساس روابط ارائه شده توسط چابوچه در سال ۱۹۹۰ تهیه شده است، در بر گیرنده حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار α در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار کرنش پلاستیک

^۱ Ziegler

^۲ Input file

است. برای معرفی چنین مدلی، یک ترم غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به رابطه ۴-۱ اضافه می‌شود. مدل ارائه شده در آباکوس به صورت رابطه زیر است [۳۷].

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

که در آن C و γ 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 γ نسبت به دما ($\dot{\gamma}$) را ندارد. این مدل هنگامی که C و γ مساوی صفر فرض شوند به مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک و هنگامی که γ 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 σ^0 به صورت تابع نمایی استفاده می‌شود [۳۷].

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

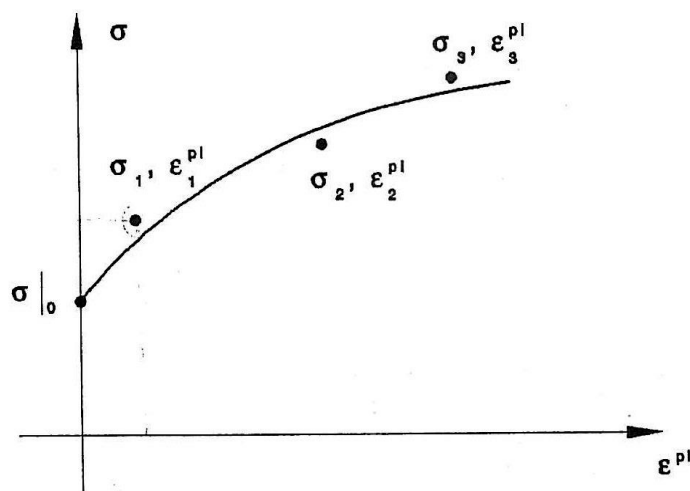
که در آن $\hat{\sigma}_0$ نشان دهنده تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است. مقادیر b و Q_∞ نیز ثابت‌های ماده هستند. اگر مقادیر این ثابت‌ها مشخص باشند، می‌توان آنها را به شکل زیر برای نرم افزار در متن فایل ورودی تعریف کرد:

, 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 γ و C را محاسبه کند. البته به کارگیری این روش تنها برای هنگامی که تعداد سیکل‌های بارگذاری کم باشد، سفارش شده است. نتایج حاصل از یک آزمون کشش، مانند شکل ۴-۱ را در نظر بگیرید.



شکل ۴-۱: نیم سیکل نخست تست کشش یک بعدی

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

$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma_i^0 \quad (5-4)$$

که در آن σ_i^0 مشخص کننده اندازه سطح تسلیم به ازای ϵ_i^{pl} است و همان گونه که بیان شد، این رابطه با کمک دستور Cyclic Hardening* برای نرم افزار تعریف شده است. با انتگرال‌گیری از رابطه ۳-۴ برای α روی یک نیم سیکل نتیجه به صورت زیر خواهد بود [۳۷].

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \epsilon^{pl}}) \quad (6-4)$$

با استفاده از روابط ۴-۵ و ۴-۶ و مقادیر مختلف $(\sigma_i, \varepsilon_i^{pl})$ که توسط کاربر داده می‌شوند، نرم‌افزار توانایی محاسبه ضرایب γ 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

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

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

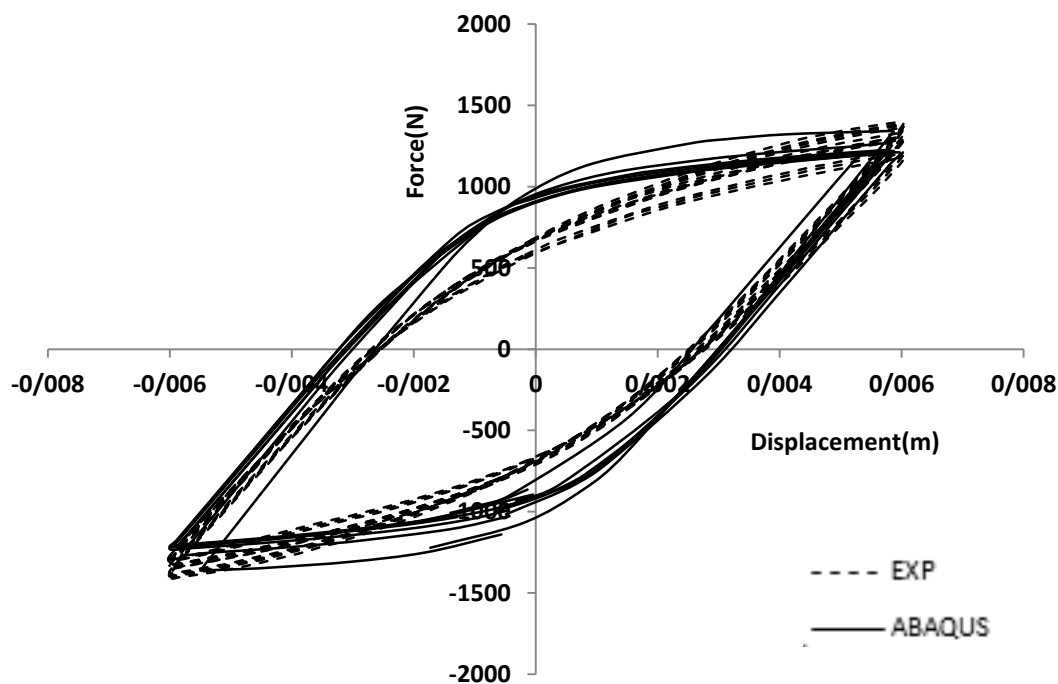
۴-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه‌ای SS316L تحت

بارگذاری خمشی سیکلی

در این بخش مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی روی پوسته استوانه‌ای SS316L تحت بارگذاری خمشی به صورت سیکلی گزارش شده است. بارگذاری‌ها به صورت نیرو- کنترل و جابجایی- کنترل شبیه سازی شده است و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی روی پوسته استوانه‌ای با هم مقایسه شده است. از المان S8R5 در شبیه سازی عددی استفاده شده است که یک المان پوسته‌ای ۸ گره‌ای می‌باشد که نوع آن غیر خطی و درجه آزادی آن ۵ می‌باشد. دو طرف پوسته استوانه‌ای با قید گره به دو صفحه صلب مقید شده است. هر صفحه صلب دارای یک نقطه مرجع می‌باشد. نقطه مرجع در یک صفحه صلب با شرایط مرزی از نوع جابجایی/ چرخشی در تمامی جهات مقید گردیده است ($U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$). نقطه مرجع صلب دیگر در تمامی جهات به غیر از جهت بارگذاری، جهت محور استوانه و چرخش حول محور افقی عمود بر محور استوانه مقید شده است ($U1=UR2=UR3=0$). برای بارگذاری از نوع جابجایی- کنترل به پارامتر U2 مقدار اختصاص می‌یابد که برای بارگذاری نوع تناوبی از پارامتر دامنه استفاده شده که به آن یک موج سینوسی اختصاص می‌یابد. برای بارگذاری از نوع نیرو- کنترل به پارامتر CF2 مقدار اختصاص می‌یابد و مانند بارگذاری جابجایی- کنترل در این بارگذاری نیز از پارامتر دامنه برای بارگذاری تناوبی استفاده شده است.

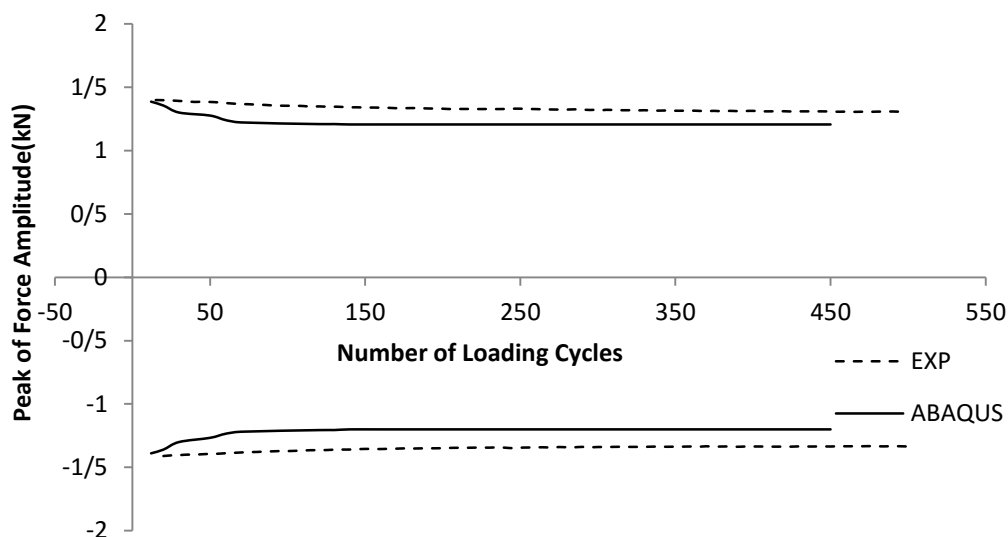
۴-۲-۱- مقایسه نتایج تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

در شکل ۴-۲، نتایج تجربی منحنی‌های هیستریزس تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن با بارگذاری خمشی برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۲۳۵mm با دامنه جابجایی ۶mm رسم شده است که با نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است. در این منحنی از مدل سخت شونده‌گی غیر خطی ایزتروپیک/ 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. در این مدل رفتار نرم شونده‌گی به خوبی نمایش داده شده است و تغییر شکل پلاستیک باقی‌مانده در جابجایی مثبت و منفی با هم برابر است. با توجه به شکل ۴-۲ تغییر شکل پلاستیک باقی‌مانده حاصل از نتایج عددی، بیشتر از نتایج تجربی است.



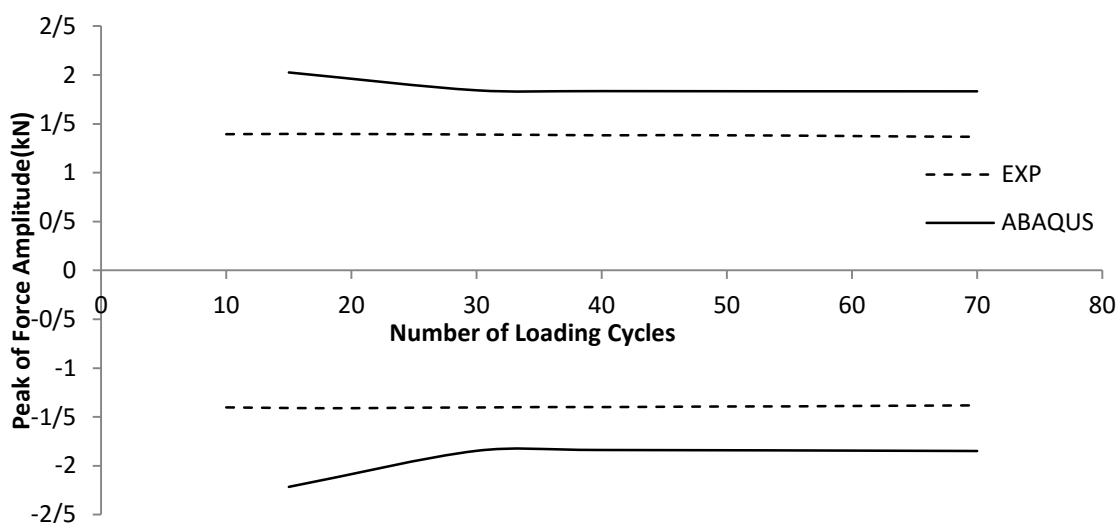
شکل ۴-۲: مقایسه نتایج عددی و تجربی رفتار نرم شونده‌گی پوسته استوانه‌ای

در شکل ۳-۴، منحنی حداکثر نیرو در حالت خمش رو به بالا (نیروی منفی) و خمش رو به پایین (نیروی مثبت) به صورت تجربی و عددی بر حسب تعداد چرخه نشان داده است. در این منحنی، از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک / سینماتیک استفاده شده است و مشاهده می‌شود که این مدل نسبت به نتایج تجربی، رفتار نرم شوندگی را به خوبی نمایش می‌دهد؛ اگرچه نسبت به نتایج تجربی، نرم شوندگی سریع‌تر می‌باشد و تنش‌های حداکثر ضعیف‌تری را نشان می‌دهد. در نتایج تجربی نرم شوندگی در تعداد سیکل‌های بیشتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۳-۴: نتایج تجربی حداکثر نیرو خمشی رو به بالا (نیروی منفی) و خمشی رو به پایین (نیروی مثبت) در مقایسه با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک / سینماتیک

در شکل ۴-۴، برای تحلیل عددی از مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است. در این مدل، سطح تسلیم به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می‌کند، بدون آنکه مرکز سطح تسلیم انتقال یابد. مشاهده می‌شود که این مدل رفتار نرم شوندگی را خیلی سریع‌تر از نتایج تجربی نشان می‌دهد و همچنین این مدل برای یک دامنه جابجایی ثابت، نیروهای حداکثر مثبت و منفی بزرگ‌تری را نسبت به نتایج تجربی نشان می‌دهد.

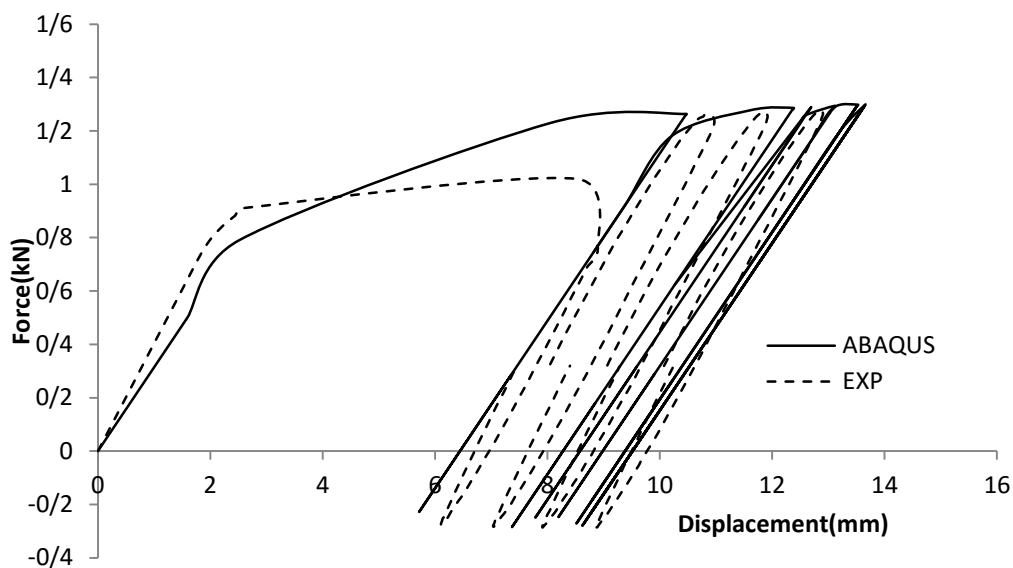


شکل ۴-۴: نتایج تجربی حداکثر نیرو خمشی رو به بالا (نیروی منفی) و خمشی رو به پایین (نیروی مثبت) در مقایسه با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک

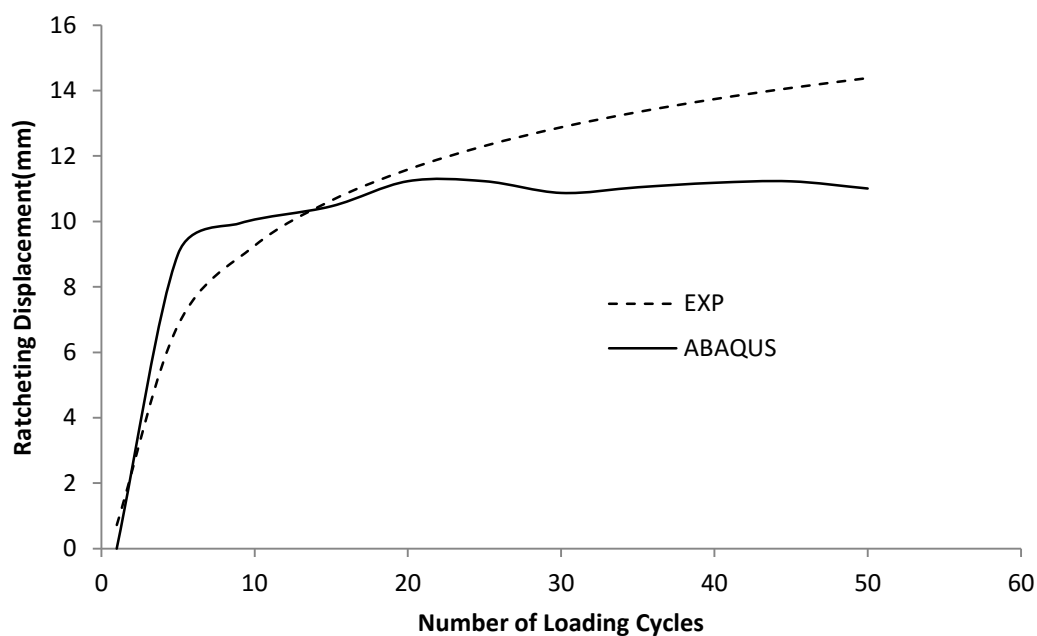
۴-۲-۲- مقایسه نتایج تحت بارگذاری نیرو-کنترل

در شکل ۴-۵، نتایج تجربی نیرو-جابجایی ابتدای پوسته تحت بارگذاری خمشی سیکلی، در چند سیکل ابتدایی برای بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن با نتایج حاصل از تحلیل عددی مقایسه شده است. در این قسمت از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک استفاده شده است. با توجه به شکل ۴-۵، سطح حلقه‌های هیستریزس نتایج تجربی، بزرگ‌تر از سطح حلقه‌های هیستریزس منحنی عددی است و این به دلیل اتلاف انرژی در آزمایش تجربی است؛ اما به طور کلی رفتار رچتینگ در شبیه‌سازی عددی به خوبی مشاهده می‌شود.

در شکل ۴-۶، مشاهده می‌شود که شیب جابجایی رچتینگ در نتایج عددی به سرعت کاهش می‌یابد؛ اما جابجایی رچتینگ در نتایج تجربی در حال افزایش است. در سیکل‌های ابتدایی، نتایج عددی، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند؛ اما در سیکل‌های بالاتر به سرعت پایدار شده و مقداری کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: مقایسه نتایج تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای SS316L

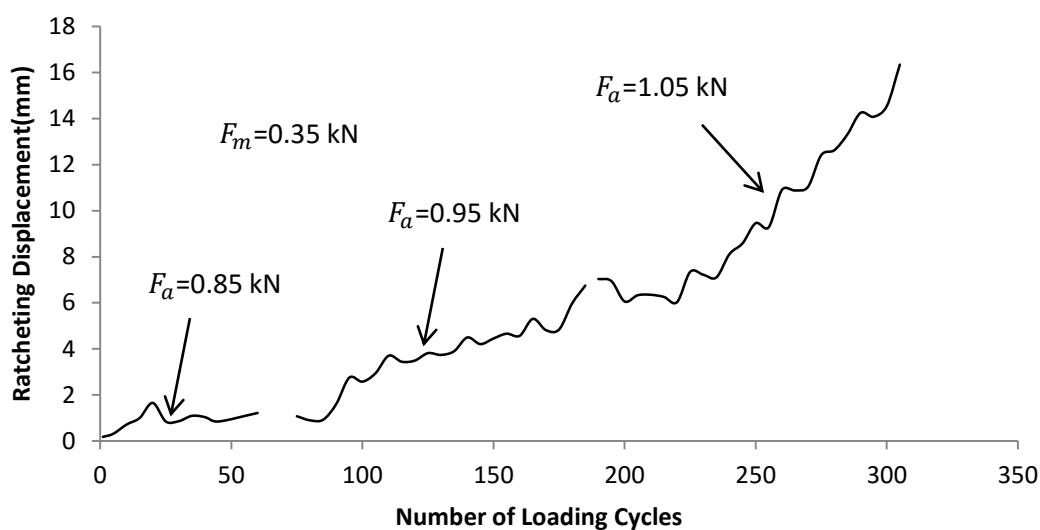


شکل ۴-۶: مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی

۴-۳- تاثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت

بارگذاری نیرو-کنترل

در این بخش نتایج عددی شبیه‌سازی شده با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک روی پوسته استوانه‌ای به طول ۲۳۵mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیرو متوسط ۰,۳۵kN و دامنه نیروهای ۰,۸۵kN، ۰,۹۵kN، ۱,۰۵kN با نتایج تجربی مقایسه شده است.



شکل ۴-۷: تغییرات جابجایی رچتینگ نسبت به تعداد چرخه با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک با نیروی میانگین 0.35 kN و دامنه نیروی افزایشی به ترتیب 0.85 kN ، 0.95 kN ، 1.05 kN

با مقایسه شکل ۴-۶ و ۴-۷، مشاهده می‌شود که در تحلیل عددی مشابه تحلیل تجربی، جابجایی رچتینگ با افزایش تعداد سیکل افزایش می‌یابد و نرخ جابجایی رچتینگ نیز با افزایش دامنه به شدت افزایش می‌یابد و همچنین تحلیل عددی در هر مرحله، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می‌کند.

۴-۴- نتیجه‌گیری

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس و مقایسه با نتایج تجربی می‌توان نتایج زیر را تحت بارگذاری خمشی سیکلی برای پوسته SS316L بدست آورد:

- ۱- در بارگذاری جابجایی-کنترل، نرم‌افزار آباکوس رفتار نرم‌شوندگی پوسته استوانه‌ای را با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک بهتر از مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک شبیه‌سازی می‌کند و کرنش پلاستیک باقیمانده در تحلیل عددی بیشتر از نتایج تجربی می‌باشد.

۲- مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک، رفتار نرم شوندگی را خیلی سریع‌تر از نتایج تجربی نشان می‌دهد و حداکثر نیروی خمشی رو به بالا و خمشی رو به پایین بزرگ‌تری را نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند.

۳- در بارگذاری نیرو-کنترل، سطح حلقه‌های هیستریزیس منحنی تجربی به دلیل اتلاف انرژی، بیشتر از نتایج عددی است.

۴- در مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک، جابجایی رجتینگ در حال افزایش است؛ اما شیب جابجایی رجتینگ کاهش می‌یابد و در سیکل‌های بالاتر به سرعت پایدار می‌شود.

۵- در بررسی تاریخچه‌ی بارگذاری به صورت نیرو-کنترل، در مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک نرخ جابجایی رجتینگ با افزایش دامنه افزایش می‌یابد و جابجایی رجتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.

فصل ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای SS316L تحت بارگذاری‌های خمشی و مرکب خمشی و پیچشی و همچنین مقایسه نتایج تجربی حاصل از بارگذاری خمشی با نتایج عددی بدست آمده توسط نرم‌افزار آباکوس می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

- ۱- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی سیکلی رفتار نرم-شوندگی مشاهده می‌شود و با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم‌شوندگی افزایش می‌یابد و نمونه در تعداد سیکل کمتری می‌شکند.
- ۲- تحت بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی سیکلی انباشتگی جابجایی رچتینگ یا پدیده رچتینگ مشاهده می‌شود و با افزایش نیروی میانگین، جابجایی رچتینگ و نرخ جابجایی رچتینگ افزایش می‌یابد.
- ۳- تحت بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی سیکلی، برای یک نمونه آزمایش با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد تا اینکه انباشتگی کرنش متوقف شود.
- ۴- در بارگذاری نیرو-کنترل چند مرحله‌ای، با افزایش دامنه نیرو، نرخ جابجایی رچتینگ افزایش می‌یابد و به ازای دامنه نیروهای بزرگ‌تر، شیب جابجایی رچتینگ در سیکل‌های بالاتر به صفر نزدیک می‌شود.
- ۵- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، سرعت نرم‌شوندگی در هر دو ناحیه راستگرد و چپگرد افزایش می‌یابد و برای یک دامنه جابجایی و جابجایی میانگین ثابت، گشتاور پیچشی در حالت راستگرد بیشتر از حالت چپگرد است.
- ۶- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی با افزایش جابجایی میانگین سرعت نرم‌شوندگی به شدت کاهش می‌یابد.

- ۷- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، با افزایش طول بازوی گشتاور پیچشی، سرعت نرم شوندگی در هر دو حالت راستگرد و چپگرد تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند؛ ولی با افزایش طول بازو مقدار حداکثر گشتاور پیچشی در حالت راستگرد کاهش می‌یابد.
- ۸- در بارگذاری خمشی سیکلی، شکست نمونه از انتهای آن و متصل به گیره ثابت اتفاق می‌افتد و مسیر ایجاد و رشد ترک به صورت محیطی می‌باشد؛ اما در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی سیکلی، ترک به صورت مایل رشد کرده و سبب شکست نمونه می‌شود.
- ۹- در بارگذاری خمشی سیکلی با شرایط جابجایی-کنترل، نرم‌افزار آباکوس رفتار نرم‌شوندگی پوسته استوانه‌ای را با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک بهتر از مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک شبیه‌سازی می‌کند و کرنش پلاستیک باقیمانده در تحلیل عددی بیشتر از نتایج تجربی می‌باشد.
- ۱۰- در بارگذاری خمشی سیکلی مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک، رفتار نرم‌شوندگی را خیلی سریع‌تر از نتایج تجربی نشان می‌دهد و حداکثر نیروی خمشی رو به بالا و خمشی رو به پایین بزرگ‌تری را نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند.
- ۱۱- در بارگذاری خمشی سیکلی با شرایط نیرو-کنترل، سطح حلقه‌های هیستریزیس منحنی تجربی به دلیل اتلاف انرژی، بیشتر از نتایج عددی است.
- ۱۲- در مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک تحت بارگذاری خمشی سیکلی، جابجایی رچتینگ در حال افزایش است؛ اما شیب جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد و در سیکل‌های بالاتر به سرعت پایدار می‌شود.
- ۱۳- در بررسی تاریخچه‌ی بارگذاری خمشی سیکلی به صورت نیرو-کنترل، در مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک، نرخ جابجایی رچتینگ با افزایش دامنه افزایش می‌یابد و جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.

۵-۲- پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌هایی که روی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری‌های خمشی و مرکب خمشی و پیچشی به صورت سیکلی انجام گردیده و همچنین مقایسه نتایج تجربی بدست آمده با نتایج عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار آباکوس، می‌توان برای ادامه این تحقیق پیشنهادهایی به شرح زیر ارائه نمود:

۱- اعمال بارگذاری‌های سیکلی به صورت خمشی و مرکب بر روی پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی و ترک انجام نشده است که می‌توان تاثیر گشودگی‌های مختلف و ترک را بر رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته بررسی کرد. همچنین می‌توان از پوسته با مقاطع مختلف از جنس‌های پرکاربرد صنعتی مثل SS304L استفاده نمود.

۲- در بارگذاری خمشی سیکلی، می‌توان با استفاده از یک نگه‌دارنده در ابتدای پوسته، بار محوری را نیز به پوسته اعمال کرده و رفتارهای آن را تحت بارگذاری سیکلی بررسی کرد.

۳- حل‌های تحلیلی روی پوسته‌های استوانه‌ای به علت پیچیدگی‌هایی که این نوع سازه‌ها در بارگذاری‌های سیکلی به خصوص بارگذاری خمشی و مرکب خمشی و پیچشی از خود نشان می‌دهند، وجود ندارد. روش‌های تحلیلی بیشتر روی نمونه‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین معادلات بدست آمده روی همان نمونه‌های استاندارد نیز در مقایسه با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی ندارد. بنابراین می‌توان در تحقیقات بعدی، روی معادلات بدست آمده برای مدل‌های سخت شوندگی مطالعه نمود و با تصحیح این روابط، دقت آن‌ها را بالا برد.

۴- می‌توان تاثیر نرخ بارگذاری و اثر دما را روی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری‌های تناوبی بررسی کرد.

۵- در بارگذاری خمشی و مرکب خمشی و پیچشی برای تعیین تغییر طول واقعی پوسته‌های استوانه‌ای می‌توان از ابزار اندازه‌گیری استفاده کرد که قابلیت اندازه‌گیری طول پوسته خمیده را نیز داشته باشد.

۶- در بارگذاری مرکب خمشی و پیچشی، برای تعیین زاویه پیچش می‌توان از ابزارهای اندازه‌گیری دقیق مثل مقاله‌های دیجیتالی و لیزری استفاده کرد و حلقه‌های هیستریزیس گشتاور پیچشی برحسب زاویه پیچش را به طور دقیق رسم نمود.

۷- در بارگذاری‌های مرکب خمشی و پیچشی، می‌توان بارگذاری را به صورت نیرو-کنترل اعمال نمود و کرنش‌های پلاستیک انباشته شده به صورت برشی را محاسبه نمود. همچنین در این نوع بارگذاری‌ها می‌توان با اعمال بار محوری، رفتار کمانش و پیچش پوسته‌ها را بررسی کرد.

۸- در تحلیل عددی برای تعیین پارامترهای شبیه‌سازی از مدل سخت شونده‌گی غیر-خطی ایزوتروپیک / سینماتیک استفاده شده است که کامل‌ترین و دقیق‌ترین مدل برای آنالیز مسائل تحت بارگذاری‌های سیکلی می‌باشد؛ اما با این وجود، برای شبیه‌سازی دقیق رفتار نرم‌شونده‌گی و رچتینگ پوسته می‌توان از یک فایل کدنویسی استفاده کرد که پارامترهای ثابت استفاده شده را در سیکل‌های مختلف محاسبه نماید و از این طریق تحلیلی جداگانه برای هر سیکل توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شود.

فهرست مراجع

- [1] Farshad, M., (1992), *"Design and analysis of shell structures"*, Dordrecht :Kluwer.
- [2] Lee, LHN., Ades, CS., (1957)," Plastic torsional buckling strength of cylinders including the effect of imperfections", *J Aero Sci*, vol. 24, pp. 241-248.
- [3] Giavotto, V., Poggi, C., Chryssanthopoulos, M., Dowling, P., (1991), "Buckling behaviour of composite shells under combined loading", *Elsevier Applied Science*, pp. 53-60.
- [4] Meyer-Piening, HR., Farshad, M., Geier, B., Zimmermann, R., (2001), "Buckling loads of CFRP composite cylinders under combined axial and torsion loading ", *Compos Struct*, vol. 53, pp. 427-435.
- [5] Sherman, D.R., (1976), "Tests of Circular Steel Tubes in Bending", *ASCE J. Struct*, vol. 102, pp. 2181-2192.
- [6] Gellin, S., (1980), " The Plastic Buckling of Long Cylindrical Shell under Pure Bending ", *Int. J. Solids Struct*, vol. 16, pp. 397-407.
- [7] Ju, G.T., and Kyriakides, S., (1992), " Bifurcation and Localization Instabilities in cylindrical Shells under Bending ", *Int. J. Solids Struct*, vol. 29, pp. 117-142.
- [8] Yeh, MK., Lin, MC., Wu, WT., (1999), "Bending buckling of an elastoplastic cylindrical shell with a cutout. ", *Eng Struct*, vol. 121, pp. 996-1005.
- [9] Elchalakani, M., and Zhao, X.L., (2002), " Plastic Mechanism Analysis of Circular Tubes under Pure Bending", *Int. J. Mechanical Sciences*, vol. 44, pp. 1117-1143.
- [10] Shu, Hengmu., (2002), "The Plastic Limit Load of Circumferentially Cracked Thin Walled Pipes under Axial Force, " *Internal Pressure and Asymmetrical Bending*, vol .79, pp. 377-382.
- [۱۱] پورسعیدی، ا؛ (۱۳۸۳)، رساله دکتری، " آنالیز پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی تحت بار محوری غیر یکنواخت"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۲] رحیمی، غ؛ و پور سعیدی، ا؛ (۱۳۸۳). " مطالعه پارامتری استحکام پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی تحت بار محوری و ممان خمشی"، مجله مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیکی ایران، شماره ۲، سال ۶.
- [13] Alashti, R.A., Rahimi, G.H., Poursaeidi, E., (2008), " Plastic limit load of cylindrical shells with cutouts subject to pure bending moment", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 85, pp. 498-506.

- [14] 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.
- [15] ASME Metals Handbook, (1979), "*Fatigue and fracture mechanics*", Vol. 19, 10th Ed.
- [16] Akhtar S.Khan., sujian Huang ., (1995), "*Continuum Theory of Plasticity*", Hardcover.
- [17] Abdel-Karim, M. (2005). "Shakedown of complex structure according to various hardening rules", *Pressure Vessels and Piping*, vol. 82, pp. 427-458.
- [18] Gaudin, C., Feugas, 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.
- [19] Bari, S., Hassan, T. (2002), "An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation", *int plasticity*, vol. 18, pp. 873-894.
- [20] Kang, GZ., Gao, Q., Cai, LX., Sun, YF., (2002), " Experimental study on the uniaxial and nonproportionally multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel at room and high temperatures ", *Nucl Eng Design*, vol. 216, pp. 13-26.
- [۲۱] میرباقری آ؛ (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی و تفکیک واماندگی‌های ناشی از رچتینگ و شیک دان در مخازن تحت فشار"، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت.
- [22] Chen, G., Shan, SH., Chen, X., Yuan, H., (2009), " Ratcheting and fatigue properties of the high-nitrogen steel X13CrMnMoN18-14-3 under cyclic loading", *Computational Materials Science*, vol. 46, no. 3, pp. 572-578.
- [23] 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.
- [24] Sun, G.Q., Shang, D.G., (2010), "Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis", *Material & Design*, vol. 31, no 1, pp. 126-133.
- [25] 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.
- [۲۶] شریعتی م، 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.
- [27] 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.

- [28] Ferry, L., Perreux, D., Varchon, D., Sicotb, N., (1999), "Fatigue behaviour of composite bar subjected to bending and torsion" , *Composites Science and Technology*, vol. 59, pp. 575-582.
- [29] Fumiko, K., Akiyoshi, I. , Yasuhide, A., (1999)," Ratcheting deformation of advanced 316 steel under creep-plasticity condition" , *Nuclear Engineering and Design*, vol. 193, pp. 327-326.
- [30] Kulkarnia, SC., Desaia, YM., Kanta, T., Reddy, GR., Prasad, P., Vaze, KK., (2004)," Uniaxial and biaxial ratcheting in piping materials experiments and analysis" , *Int J Pressure Vessel Piping*, vol. 81, pp. 609-617.
- [31] Chen, X., Jia, o R. , 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.
- [32] Ga, B ., Chen, X., Chen, G., (2006)," Ratchetting and ratchetting boundary study of ressurized straight low carbon steel pipe under reversed bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, pp. 96-106.
- [33] 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.
- [34] Zakavia,S.J., Zehsaza, M., Eslamib, M.R., (2010), "The ratchetting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model" , *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 726–737.
- [35] Zhu, J. , Chen, X., Xue, F., Yu, W., (2012)," Bending ratcheting tests of Z2CND18.12 stainless steel", *International Journal of Fatigue*, vol. 35, pp. 16-22.
- [36] ASTM A370-05, "*Standard test method and definitions for mechanical testing of steel products*".
- [37] ABAQUS Analysis User’s manual, (2009), v6.9.1, section 19.2.2, models for metals subjected to cyclic loading.

واژه نامه فارسی به انگلیسی

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Fatigue | خستگی | Finite Element | اجزای محدود |
| Ratcheting | رچتینگ | Elastic shakedown | الاستیک پایدار |
| Peak Stress Hold Time | زمان نگه داری پیک تنش | pure elastic | الاستیک مطلق |
| Extensometer | طول سنج | Accumulation of Plastic Strain | انباشتگی کرنش پلاستیک |
| Input file | فایل ورودی | Cyclic loading | بارگذاری چرخه‌ای |
| Collapse | فروپاشی | Plastic shakedown | پلاستیک پایدار |
| Fracture Mechanic | مکانیک شکست | Shell | پوسته |
| Plate | ورق | Stress Surface | تنش سطحی |
| | | cyclic creep | خزش سیکلی |

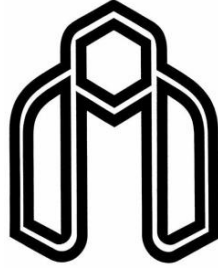
واژه نامه انگلیسی به فارسی

| | | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Accumulation of Plastic Strain | انباشتگی کرنش پلاستیک | Input file | فایل ورودی |
| Collapse | فروپاشی | Peak Stress Hold Time | زمان نگه داری پیک تنش |
| cyclic creep | خزش سیکلی | Plastic shakedown | پلاستیک پایدار |
| Cyclic loading | بارگذاری چرخه‌ای | Plate | ورق |
| Elastic shakedown | الاستیک پایدار | pure elastic | الاستیک مطلق |
| Extensometer | طول سنج | Ratcheting | رچتینگ |
| Fatigue | خستگی | Shell | پوسته |
| Finite Element | اجزای محدود | Stress Surface | تنش سطحی |
| Fracture Mechanic | مکانیک شکست | | |

Abstract

In this research, ratcheting and softening behavior of stainless steel SS316L cylindrical shell under cyclic bending and cyclic combined loading (bending-torsion) are studied. Cyclic bending was under force-control and displacement-control. Combined loading was under displacement-control. Experimental tests were performed using an INSTRON 8802 servo-hydraulic machine. Under force-control loading with non-zero mean force, plastic strain was accumulated in continuous cycles, so called phenomena ratcheting. Under displacement-control loading, softening behavior is observed and the rate of softening became higher by using of the higher force amplitude. The numerical analysis was carried out by ABAQUS software and nonlinear isotropic/kinematic hardening was compared with isotropic hardening and observed the nonlinear isotropic/ kinematic hardening model simulates the softening and ratcheting behavior of cylindrical shells under cyclic bending accurately.

Keywords: Cylindrical Shell, Cyclic Bending, Cyclic Combined Loading, Ratcheting and Softening, Hardening Model, Numerical and Experimental Analysis.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

***Numerical and Experimental Analysis of Ratcheting
Behavior of Steel Cylindrical Shells Under Combined
Cyclic Torsional and Bending Loadings***

Thesis

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

By:

GholamReza Norouzi

Supervisor:

Dr. Mahmoud Shariati

Summer 2012