

اللَّهُمَّ الرَّحْمَنُ الرَّحِيمُ



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

تحلیل عددی و تجربی عمر کمانش پوسته های استوانه ای دارای

گشودگی دایروی تحت بار محوری تناوبی

نگارش

حسین حاتمی

اساتید راهنما:

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمیدرضا ایپکچی

تابستان ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد ( رساله دکتری ) آقای / خانم حسین حاتمی

تحت عنوان:

تحلیل عددی و تجربی عمر کمانش پوسته های استوانه ای دارای گشودگی دایروی تحت بار محوری  
تناوبی

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور         | امضاء | اساتید راهنما                          |
|-------|----------------------|-------|--|
|       | نام و نام خانوادگی : |       | نام و نام خانوادگی :<br>محمود شریعتی   |
|       | نام و نام خانوادگی : |       | نام و نام خانوادگی :<br>حمیدرضا ایپکچی |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی                 | امضاء | اساتید داور                         |
|-------|--|-------|-------------------------------------|
|       | نام و نام خانوادگی :<br>سید هادی قادری |       | نام و نام خانوادگی :<br>محمد جعفری  |
|       |  |       | نام و نام خانوادگی :<br>مهدی گردویی |
|       |  |       | نام و نام خانوادگی :                |
|       |  |       | نام و نام خانوادگی :                |

تقدیم به آنانکه وجودم برایشان همه رنج بود  
و وجودشان برایم همه مهر

تقدیم به مهربانترین پدر و تقدیم به صبورترین مادر

آنانکه توانشان رفت تا به توان برسم  
و مویشان سپید گشت تا رویم سپید بماند  
آنان که راستی قامت در شکستگی قامتشان بقاء یافت

## تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که منت نهاد، هستی بخشید و توفیق کسب علم و دانش داد. اکنون که به فضل خدا در این موقعیت قرار گرفته‌ام بر خود لازم می‌دانم تا از تمامی عزیزانی که در این پروژه از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان بهره برده‌ام، قدردانی نمایم.

بدین وسیله از کلیه اساتید گرانقدرم که در تمام مراحل همواره پشتیبان و حامی بنده بودند، بی‌نهایت سپاسگزارم. بویژه از استاد ارزشمند جناب آقای دکتر محمود شریعتی که درس‌های بزرگی را از ایشان فرا گرفته‌ام. لازم است از زحمات و راهنمایی‌های ایشان در انجام این پروژه حداکثر تشکر را داشته باشم. در پایان از کلیه عزیزانی که تا بدین جا زحمات زیادی را برایم کشیده‌اند تشکر می‌کنم. از خانواده خوبم که از آغاز تا کنون با تمام وجود برایم زحمت کشیده و همواره مشوق و پشتیبانم بوده‌اند. امید که توانسته باشم در سایه لطف خداوند گامی هر چند کوچک در راستای توسعه و تعالی کشورم بردارم.

حسین حاتمی

دانشجوی کارشناسی ارشد

گروه طراحی کاربردی،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی شاهرود،

شهریور ماه ۱۳۹۰.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه ( رساله ) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه ( رساله ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

ماه و سال  
شهریور ۱۳۹۰

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- 1- Shariati. M., **Hatami. H.**, Yarahmadi. H. and Eipakchi. H.R., (2012), "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading ". *Materials & Design*, vol. 34, pp. 302-312.
  - 2- Shariati. M., Epakchi. H.R., **Hatami. H.**, Yarahmadi. H. and Torabi. H., " Experimental and numerical investigations on softening behavior of POM under cyclic strain-controlled loading", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Accepted.
  - 3- Shariati. M., **Hatami. H.**, Torabi H. and Epakchi. H.R., " Experimental and numerical investigations on the ratcheting characteristics of cylindrical shell under cyclic axial loading", *Structural Engineering and Mechanics*, Revised.
  - 4- Shariati. M., Epakchi. H.R., **Hatami. H.** and Yarahmadi. H., "Experimental investigations on the softening and ratcheting behavior of steel cylindrical shells under cyclic axial loading", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Under Review.
  - 5- Shariati. M., **Hatami. H.** and Epakchi. H.R., "Experimental study of SS304L cylindrical Shell with/without cutout under cyclic axial loading", Ready for Submission.
  - 6- Shariati. M., **Hatami. H.** and Epakchi. H.R., "Numerical and Experimental study of SS304L cylindrical Shell with/without cutout under cyclic axial loading", Ready for Submission.
- ۷- محمود شریعتی، حسین حاتمی، حسین یاراحمدی، "تست های تجربی و تحلیل عددی تاثیر پارامترهای دامنه کرنش و کرنش متوسط روی عمر پلی استال"، دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه تربیت مدرس، اسفند ۱۳۸۹، جلد ۲، صفحه ۱۵.
- ۸- محمود شریعتی، حسین حاتمی، "بررسی تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری محوری تناوبی"، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، اردیبهشت ۱۳۹۰، جلد ۲، صفحه ۶۵.
- ۹- محمود شریعتی، حسین حاتمی، حمیدرضا ایپکچی، " بررسی تجربی و عددی رفتار پوسته استوانه ای تحت بارگذاری کرنش کنترلی متقارن محوری"، اولین کنفرانس تخمین و تمدید عمر سازه های هوایی و قطعات صنعتی پیر و فرسوده، دانشگاه صنعتی شریف، تیر ۱۳۹۰، صفحه ۲۷.

۱۰- محمود شریعتی، حسین حاتمی، حمیدرضا ایپکچی، " تاثیر کمانش بر رفتار منحنی های هیستریزیس پوسته های استوانه ای"، اولین کنفرانس تخمین و تمدید عمر سازه های هوایی و قطعات صنعتی پیر و فرسوده، دانشگاه صنعتی شریف، تیر ۱۳۹۰، صفحه ۲۸.

۱۱- محمود شریعتی، حسین حاتمی، حسین یاراحمدی، حمیدرضا ایپکچی، " بررسی تجربی و عددی رفتار پلی استال تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری"، اولین کنفرانس تخمین و تمدید عمر سازه های هوایی و قطعات صنعتی پیر و فرسوده، دانشگاه صنعتی شریف، تیر ۱۳۹۰، صفحه ۲۹.



## چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های استوانه ای فولادی تحت بارگذاری نیرو کنترل و جابجایی کنترلی محوری تناوبی پرداخته شده است. تست های تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام گردیده است. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس با استفاده از مدل های پلاستیسیته پیشرفته سخت شوندگی ایزوتروپیک، سخت شوندگی سینماتیک خطی و سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک انجام شده و دقت این مدل ها با نتایج تجربی سنجیده شده است. تحت بارگذاری نیرو کنترلی به علت وجود نیروی میانگین غیر صفر، کرنش پلاستیک در سیکل های متوالی در پوسته استوانه ای انباشت می گردد یا به عبارت دیگر رفتار رچتینگ در پوسته اتفاق می افتد. تحت بارگذاری جابجایی کنترلی، رفتار نرم شوندگی در پوسته ها مشاهده می گردد و به علت کماتش ایجاد شده در ناحیه فشاری، این رفتار شدیدتر می گردد. تاثیر گشودگی روی رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای نیز تحت این نوع بارگذاری ها مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده می گردد که گشودگی باعث تسریع رفتار نرم شوندگی و رچتینگ در پوسته های استوانه ای می گردد. مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک به خوبی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته را شبیه سازی می کند؛ ولی مدل های سخت شوندگی ایزوتروپیک و سخت شوندگی سینماتیک خطی توانایی شبیه سازی رفتار های نرم شوندگی و رچتینگ را ندارند.

**کلید واژه:** پوسته استوانه ای، بارگذاری محوری تناوبی، رچتینگ، نرم شوندگی، مدل سخت شوندگی.

## فهرست مطالب

| صفحه | عنوان   |
|------|---|
| د    | فهرست علایم و نشانه‌ها  |
| ه    | فهرست جدول‌ها   |
| و    | فهرست شکل‌ها  |
| ۱    | فصل ۱- مقدمه ای بر پوسته ها و کاربرد آنها                     |
| ۱-۱  | تعریف پوسته ها  |
| ۲    | کاربرد پوسته ها   |
| ۲-۱  | مقدمه ای بر مکانیک شکست                                       |
| ۳    | تاریخچه مکانیک شکست   |
| ۴-۱  | تحلیل پدیده شکست  |
| ۵    | بررسی روش های مختلف حل روی پوسته ها تحت بارگذاری های مختلف    |
| ۶-۱  | مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه کمانش پوسته ها            |
| ۸    | فصل ۲- اعمال بارگذاری های سیکلی بر روی سازه ها                |
| ۱۰   | مقدمه ای درباره بارگذاری سیکلی و خستگی سازه ها                |
| ۱۱   | مروری بر کارهای گذشته   |
| ۱۲   | تاثیر انواع بارگذاری های سیکلی روی رفتار مواد مختلف           |
| ۱۳   | تاثیر انواع بارگذاری های سیکلی روی رفتار پوسته های استوانه ای |
| ۱۸   | جمع بندی  |
| ۲۱   | فصل ۳- تحلیل تجربی  |
| ۲۲   | مقدمه درباره آزمایش های انجام شده                             |
| ۲۳   | دستگاه آزمایش   |
| ۲۳   | شرایط مرزی  |
| ۲۴   | نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای St37                         |
| ۲۶   | هندسه و خواص مکانیکی  |
| ۲۶   | بارگذاری نیرو-کنترل   |
| ۲۷   | بارگذاری جابجایی-کنترل  |
| ۲۹   | تاثیر کمانش بر رفتار منحنی های هیستریزس                       |
| ۳۰   | نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای Ck20                         |
| ۳۴   | هندسه و خواص مکانیکی  |
| ۳۴   | آزمایش های جابجایی-کنترل                                      |
| ۳۵   | تاثیر دامنه ی جابجایی بر رفتار منحنی های هیستریزس             |
| ۳۵   |   |

|          |  |
|----------|--|
| ۳۸.....  | ۳-۵-۲-۲- تاثیر افزایش مرحله ای دامنه جابجایی بر رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای..... |
| ۳۹.....  | ۳-۵-۳- آزمایش های نیرو-کنترل.....  |
| ۳۹.....  | ۳-۵-۳-۱- تاثیر دامنه ی نیرو بر رفتار منحنی های هیستریزس.....                           |
| ۴۱.....  | ۳-۵-۳-۲- تاثیر دامنه ی نیرو و نیروی متوسط بر رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای.....    |
| ۴۳.....  | ۳-۵-۳-۳- مقایسه منحنی های کشش و فشار تحت بارگذاری چرخه ای و یکنواخت.....               |
| ۴۶.....  | ۳-۵-۴- اثر تاریخچه بارگذاری.....   |
| ۴۷.....  | ۳-۶-۶- نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای SS304L.....                                    |
| ۴۸.....  | ۳-۶-۱- هندسه و خواص مکانیکی.....   |
| ۴۹.....  | ۳-۶-۲- تاثیر کماتش روی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای.....                          |
| ۵۱.....  | ۳-۶-۳- تاثیر تاریخچه بارگذاری.....   |
| ۵۱.....  | ۳-۶-۳-۱- تاثیر ترتیب بارگذاری روی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای.....               |
| ۵۳.....  | ۳-۶-۳-۲- تاثیر تاریخچه بارگذاری روی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ.....    |
| ۵۵.....  | ۳-۶-۴- تاثیر گشودگی در پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری چرخه ای.....                  |
| ۵۵.....  | ۳-۶-۴-۱- تاثیر گشودگی روی رفتار نرم شوندگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.....             |
| ۵۹.....  | ۳-۶-۴-۲- تاثیر گشودگی روی رفتار رچتینگ تحت بارگذاری نیرو-کنترل.....                    |
| ۶۳.....  | ۳-۶-۵- تاثیر طول به همراه گشودگی روی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری چرخه ای.....    |
| ۶۳.....  | ۳-۶-۵-۱- تاثیر طول به همراه گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.....                     |
| ۶۴.....  | ۳-۶-۵-۲- تاثیر طول به همراه گشودگی تحت بارگذاری نیرو-کنترل.....                        |
| ۶۵.....  | ۳-۷- نتیجه گیری.....   |
| ۶۸.....  | ۴- تحلیل عددی و مقایسه نتایج عددی با تجربی.....  |
| ۶۹.....  | ۴-۱- مقدمه ای در رابطه با تحلیل های عددی.....  |
| ۷۱.....  | ۴-۲- معرفی نرم افزار آباکوس.....   |
| ۷۲.....  | ۴-۳- آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای توسط نرم افزار آباکوس.....                      |
| ۷۶.....  | ۴-۴- مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی.....   |
| ۷۶.....  | ۴-۴-۱- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای St37.....                            |
| ۷۷.....  | ۴-۴-۱-۱- مقایسه نتایج تحت بارگذاری نیرو-کنترل.....                                     |
| ۷۹.....  | ۴-۴-۱-۲- مقایسه نتایج تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.....                                  |
| ۸۱.....  | ۴-۴-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای SS304L.....                          |
| ۸۲.....  | ۴-۴-۲-۱- تاثیر کماتش در رفتار منحنی های هیستریزس پوسته استوانه ای.....                 |
| ۸۶.....  | ۴-۴-۲-۲- تاثیر دامنه جابجایی روی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای.....                |
| ۸۹.....  | ۴-۴-۲-۳- تاثیر گشودگی روی رفتار نرم شوندگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.....             |
| ۹۷.....  | ۴-۴-۲-۴- تاثیر طول به همراه گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.....                     |
| ۱۰۱..... | ۴-۴-۲-۵- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل.....       |
| ۱۰۲..... | ۴-۵- نتیجه گیری.....   |
| ۱۰۴..... | ۵- فصل نتیجه گیری و پیشنهادها.....   |

---

|          |                              |
|----------|------------------------------|
| ۱۰۵..... | نتیجه‌گیری ۱-۵               |
| ۱۰۸..... | پیشنهاد‌ها ۲-۵               |
| ۱۱۱..... | فهرست مراجع                  |
| ۱۱۴..... | واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی |
| ۱۱۵..... | واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی |

## فهرست علائم و نشانه‌ها

| علائم اختصاری            | عنوان  |
|--------------------------|--|
| R                        | باقیمانده  |
| $\alpha$                 | تنش زمینه  |
| $\sigma_y$               | تنش تسلیم  |
| $\hat{\sigma}_0$         | تنش تسلیم اولیه                                      |
| $\sigma^0$               | تنش تسلیم جاری                                       |
| $S_u$                    | تنش نهایی  |
| $\gamma$                 | ثابت ماده  |
| C                        | ثابت ماده  |
| $\delta x$               | جابجایی محوری  |
| Fa                       | دامنه نیرو   |
| Rc                       | شعاع گشودگی  |
| t                        | ضخامت پوسته  |
| L                        | طول پوسته استوانه ای                                 |
| D                        | قطر خارجی پوسته استوانه ای                           |
| Lo                       | فاصله مرکز گشودگی از تکیه گاه پایین پوسته استوانه ای |
| $\varepsilon^{pl}$       | کرنش پلاستیک   |
| $\bar{\varepsilon}^{pl}$ | کرنش پلاستیک معادل                                   |
| c                        | مدول سخت شوندگی سینماتیک                             |
| E                        | مدول یانگ  |
| $\nu$                    | نسبت پواسون  |
| Fm                       | نیروی متوسط  |
| N                        | نیروی محوری بر واحد محیط مقطع استوانه                |

## فهرست جدول‌ها

| صفحه | عنوان   |
|------|---|
| ۲۶   | جدول ۱-۳: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده St37   |
| ۳۴   | جدول ۲-۳: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده CK20   |
| ۴۸   | جدول ۳-۳: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS304L |

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲: مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل سخت شونده گی سینماتیک خطی نرم افزار آباکوس [۲۹]. ۱۵
- شکل ۲-۲: مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل سخت شونده گی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک نرم افزار آباکوس [۲۹]. ۱۶
- شکل ۳-۲: شکست از ناحیه جوش در پوسته با مقطع قوطی تحت بارگذاری سیکلی [۳۳]. ۱۷
- شکل ۴-۲: منحنی های هیستریزیس پوسته با مقطع قوطی تحت دامنه کرنش های متفاوت [۳۳]. ۱۷
- شکل ۵-۲: دستگاه تست خمش سیکلی روی پوسته های استوانه ای [۴۰]. ۱۹
- شکل ۶-۲: تغییرات قطر خارجی پوسته استوانه ای نسبت به زاویه خمش [۴۰]. ۱۹
- شکل ۷-۲: منحنی های هیستریزیس تحت بارگذاری کرنش-کنترل با دامنه کرنش های متفاوت [۴۴]. ۲۰
- شکل ۸-۲: سخت شونده گی تحت بارگذاری کرنش-کنترل با دامنه کرنش های متفاوت [۴۴]. ۲۰
- شکل ۱-۳: دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲. ۲۴
- شکل ۲-۳: استفاده از نیروسنج ۲۵kN و طول سنج برای تست کشش استاندارد. ۲۴
- شکل ۳-۳: شماتیکی از اتصال پوسته استوانه ای به فیکسچر با استفاده از جوش، رزوه و پین (ابعاد بر حسب سانتیمتر). ۲۵
- شکل ۴-۳: منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی برای فولاد St37. ۲۷
- شکل ۵-۳: رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل. ۲۸
- شکل ۶-۳: رفتار نرم شونده گی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل. ۲۹
- شکل ۷-۳: کماتش تحت بارگذاری بار-کنترل متقارن برای پوسته ای با طول ۳۹۰mm. ۳۱
- شکل ۸-۳: تغییر شکل سطح مقطع پوسته استوانه ای با طول ۲۹۰mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل متقارن محوری. ۳۱
- شکل ۹-۳: منحنی های هیستریزیس برای پوسته ای با طول ۲۹۰mm تحت بارگذاری نیرو-کنترلی متقارن محوری. ۳۲
- شکل ۱۰-۳: منحنی هیستریزیس برای پوسته ای با طول ۲۳۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترلی متقارن محوری. ۳۳
- شکل ۱۱-۳: منحنی های هیستریزیس برای پوسته ای با طول ۳۹۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری. ۳۳
- شکل ۱۲-۳: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از تست کشش استاندارد برای CK20. ۳۵
- شکل ۱۳-۳: منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای با طول ۲۵۰mm تحت بارگذاری جابجایی کنترلی با دامنه های ۱.۷۵ mm، ۲ و ۲.۲. ۳۶

- شکل ۳-۱۴: تغییرات دامنه نیرو نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی- کنترلی برای پوسته های با طول ۲۵۰mm با دامنه های ۱،۷۵ mm، ۲ و ۲،۲..... ۳۶
- شکل ۳-۱۵: تغییرات نیروی متوسط نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی- کنترلی برای پوسته های با طول ۲۵۰mm با دامنه های ۱،۷۵ mm، ۲ و ۲،۲..... ۳۷
- شکل ۳-۱۶: منحنی های هیستریزس برای نمونه ای با طول ۲۵۰mm با افزایش دامنه جابجایی از ۰،۵ تا ۱،۷۵ mm..... ۳۸
- شکل ۳-۱۷: تغییرات دامنه نیرو نسبت به تعداد چرخه برای نمونه ای با طول ۲۵۰mm با افزایش دامنه جابجایی از ۰،۵mm تا ۱،۷۵mm..... ۳۹
- شکل ۳-۱۸: منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای با طول ۲۵۰mm تحت بارگذاری نیرو- کنترلی متقارن با دامنه های ۷۰، ۷۵ و ۸۵..... ۴۰
- شکل ۳-۱۹: تغییرات دامنه جابجایی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری نیرو- کنترلی متقارن برای پوسته های ۲۵۰mm با دامنه های ۷۰، ۷۵ و ۸۵..... ۴۰
- شکل ۳-۲۰: تغییرات جابجایی مرکز حلقه های هیستریزس نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری نیرو- کنترلی برای پوسته های ۲۵۰mm با دامنه های ۷۰، ۷۵ و ۸۵..... ۴۱
- شکل ۳-۲۱: رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای (a) طول نمونه ۳۰۰mm تحت نیروی متوسط ۶۰kN و دامنه نیروی ۳۰kN (b) طول نمونه ۳۶۰mm تحت نیروی متوسط ۶۰kN و دامنه نیروی ۳۵kN..... ۴۲
- شکل ۳-۲۲: مقایسه رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای با نیروی متوسط ۶۰kN و دامنه نیروهای متفاوت: (a) طول نمونه ۳۰۰mm و (b) طول نمونه ۳۶۰mm..... ۴۳
- شکل ۳-۲۳: منحنی های هیستریزس به صورت نیم چرخه کششی تحت بارگذاری نیرو- کنترلی با افزایش نیروی کششی از ۲۰kN تا ۱۰۱kN برای نمونه ای با طول ۲۵۰mm و منحنی های کشش ساده پوسته های استوانه ای با طول یکسان تحت نیروهای ۷۵ kN و ۸۵ kN..... ۴۴
- شکل ۳-۲۴: منحنی های هیستریزس به صورت نیم چرخه فشاری تحت بارگذاری با افزایش نیروی فشاری از ۲۰kN- تا ۱۰۰kN- برای نمونه ای با طول ۲۵۰mm و مقایسه با ناحیه فشاری منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای با طول یکسان تحت نیروهای ۷۵- و ۸۵kN- مطابق شکل ۳-۱۸..... ۴۵
- شکل ۳-۲۵: (a) تعدادی از پوسته های استوانه ای تست شده (b) شکست نمونه در مجاورت جوش فیکسچرها (c) کمانش نمونه در مجاورت جوش فیکسچرها..... ۴۶
- شکل ۳-۲۶: تاریخچه بارگذاری روی نمونه های با طول ۳۰۰mm و نیروی متوسط ۶۰kN با دامنه متفاوت نیرو (a) دامنه بارگذاری به ترتیب ۲۵، ۳۰، ۲۵ و ۳۰ kN و (b) دامنه بارگذاری به ترتیب ۲۵، ۳۰، ۲۵ kN..... ۴۷
- شکل ۳-۲۷: منحنی تنش- کرنش تست کشش ساده برای نمونه SS304L..... ۴۹
- شکل ۳-۲۸: منحنی های هیستریزس پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری جابجایی- کنترل با دامنه ۱۰mm..... ۵۰



- شکل ۳-۲۹: حداکثر و حداقل تنش در منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰mm ..... ۵۰
- شکل ۳-۳۰: کماتش پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰mm ..... ۵۱
- شکل ۳-۳۱: منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای از جنس فولاد ضد زنگ تحت بارگذاری جابجایی-کنترل به ترتیب فشاری-کششی ..... ۵۲
- شکل ۳-۳۲: منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای از جنس فولاد ضد زنگ تحت بارگذاری جابجایی-کنترل به ترتیب کششی-فشاری ..... ۵۲
- شکل ۳-۳۳: پیک های تنش در منحنی های هیستریزیس برای دو آزمایش جابجایی-کنترل با ترتیب بارگذاری متفاوت ..... ۵۳
- شکل ۳-۳۴: رفتار رچتینگ در پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ تحت بارگذاری نیرو-کنترل ..... ۵۴
- شکل ۳-۳۵: تاثیر تاریخچه بارگذاری روی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ ..... ۵۴
- شکل ۳-۳۶: تاثیر وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی در پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل ..... ۵۷
- شکل ۳-۳۷: رفتار پوسته های استوانه ای به طول ۲۵۰mm در مجاورت گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، (a) دارای گشودگی با شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، (b) دارای گشودگی با شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، (c) دارای گشودگی با شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه ..... ۵۹
- شکل ۳-۳۸: رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل روی پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ بدون گشودگی ..... ۶۰
- شکل ۳-۳۹: کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری روی پوسته استوانه ای بدون گشودگی ..... ۶۰
- شکل ۳-۴۰: مقایسه رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای و تاثیر گشودگی روی نمونه ها ..... ۶۱
- شکل ۳-۴۱: رفتار پوسته های استوانه ای به طول ۲۵۰mm در مجاورت گشودگی تحت بارگذاری نیرو-کنترل، (a) دارای گشودگی با شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، (b) دارای گشودگی با شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، (c) دارای گشودگی با شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه ..... ۶۲
- شکل ۳-۴۲: تاثیر طول به همراه گشودگی روی رفتار پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی کنترل ..... ۶۳
- شکل ۳-۴۳: تاثیر طول به همراه گشودگی روی رفتار پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل ..... ۶۴
- شکل ۳-۴۴: تعدادی پوسته استوانه ای با طول های متفاوت با و بدون گشودگی، (a) قبل از انجام آزمایش، (b) بعد از انجام آزمایش ..... ۶۵
- شکل ۴-۱: منحنی تنش بر حسب کرنش پلاستیک آزمون کشش ..... ۷۵
- شکل ۴-۲: مقایسه نتایج تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای ..... ۷۸
- شکل ۴-۳: مقایسه مقادیر کرنش تجربی و عددی در حداکثر تنش موجود در هر سیکل ..... ۷۸
- شکل ۴-۴: مقایسه نتایج تجربی با مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی ..... ۸۰

- شکل ۴-۵: مقایسه نتایج تجربی با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک..... ۸۰
- شکل ۴-۶: نتایج تجربی حداکثر تنش فشاری و کششی در مقایسه با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک..... ۸۱
- شکل ۴-۷: مقایسه نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۸۳
- شکل ۴-۸: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۸۳
- شکل ۴-۹: مقایسه نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک غیرخطی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۸۴
- شکل ۴-۱۰: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک غیرخطی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۸۵
- شکل ۴-۱۱: تغییر شکل های ایجاد شده از نماهای مختلف در مدل پوسته استوانه ای به طول ۳۰۰ mm، (a) قبل، (b) بعد از بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰ mm و (c) در حالت تجربی..... ۸۵
- شکل ۴-۱۲: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۲ mm..... ۸۶
- شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۳ mm..... ۸۷
- شکل ۴-۱۴: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۴ mm..... ۸۷
- شکل ۴-۱۵: مقایسه نتایج (a) عددی، (b) تجربی منحنی های هیستریزس تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های مختلف..... ۸۸
- شکل ۴-۱۶: مقایسه نتایج عددی و تجربی پیک های تنش منحنی های هیستریزس تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های مختلف..... ۸۹
- شکل ۴-۱۷: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶ mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲ mm، (b) ۳ mm و (c) ۴ mm..... ۹۰
- شکل ۴-۱۸: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶ mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۹۱
- شکل ۴-۱۹: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹ mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲ mm، (b) ۳ mm و (c) ۴ mm..... ۹۲
- شکل ۴-۲۰: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹ mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۹۲
- شکل ۴-۲۱: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶ mm در نیمه بالایی طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲ mm، (b) ۳ mm و (c) ۴ mm..... ۹۴

- شکل ۴-۲۲: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۹۴
- شکل ۴-۲۳: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج (a عددی، b) تجربی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۹۵
- شکل ۴-۲۴: مقایسه رفتار تجربی و عددی پوسته های استوانه ای به طول ۲۵۰mm در مجاورت گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، (a دارای گشودگی با شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، b) دارای گشودگی با شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، c) دارای گشودگی با شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه..... ۹۷
- شکل ۴-۲۵: پوسته استوانه ای به طول (a) ۲۵۰ mm، (b) ۳۴۰ mm با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه..... ۹۷
- شکل ۴-۲۶: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲mm، (b) ۳mm و (c) ۴mm..... ۹۹
- شکل ۴-۲۷: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای به طول ۳۴۰mm با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۹۹
- شکل ۴-۲۸: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج (a عددی، b) تجربی پوسته های استوانه ای با طول های متفاوت تحت بارگذاری جابجایی-کنترل..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۹: تغییر شکل های ایجاد شده در مدل پوسته استوانه ای به طول ۳۴۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های (a) ۲mm در ناحیه فشاری، (b) ۳mm در ناحیه فشاری و (c) ۳mm در ناحیه کششی..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۰: مقایسه نتایج عددی مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک با نتایج تجربی پوسته استوانه ای به طول ۲۵۰mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با دامنه نیرو های متفاوت..... ۱۰۲

## فصل ۱- مقدمه ای بر پوسته ها و کاربرد آنها

## ۱-۱- تعریف پوسته ها<sup>۱</sup>

ورقها<sup>۲</sup> 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 بکار برده می‌شود؛ این است که باید نسبت ضخامت به طول ضلع کوچکتر ورق کمتر از ۰،۰۵ باشد. این نسبت در مواردی به کمتر از ۰،۰۱ نیز می‌رسد [۱].

## ۱-۲- کاربرد پوسته ها

امروزه پوسته‌ها و ورقها بخش اعظمی از سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده‌اند. پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد کاربرد وسیعی 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 محسوب می‌شوند و به همین دلیل در طبیعت نیز پوشش اندام گیاهان و جانوران ماهیت پوسته‌ای دارد. با درک ویژگی‌های مهم سازه‌های پوسته‌ای از جمله قدرت تحمل بار، استحکام بالا و راحتی ساخت، مهندسیین 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، بدنه موشک و غیره اشاره کرد. استفاده از ورقها و پوسته‌ها در صنایع دیگر نظیر خودرو سازی، شناور سازی، 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 استفاده کرد. در این تحقیق حالت خاصی از پوسته‌های متقارن محوری یعنی پوسته‌های استوانه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد. همانطور که بیان شد این نوع

---

<sup>1</sup> Shells

<sup>2</sup> Plate

پوسته‌ها در سازه‌هایی مانند بدنه موشکها، بالگردها، هواپیماها، پایه سکوه‌های دریایی، کندانسور و دودکش نیروگاهها و تجهیزات ورزشی استفاده فراوان دارند [۱].

این سازه‌ها در طول عمر خود ممکن است تحت بارهای محوری تناوبی قرار بگیرند. به علاوه، این اجزا اغلب در بعضی قسمت‌ها ناپیوستگی‌هایی مانند گشودگی دارند که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در پایداری سازه‌ها تأثیرگذار 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 غالباً به صورت فشاری به سازه اعمال می‌گردد. اگرچه برای محاسبه بار کمانش پوسته استوانه‌ای تحقیقات متعددی انجام شده است؛ ولی 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 رابطه دقیقی برای بار کمانش این پوسته‌ها ارائه نشده است و تحقیقات 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- مقدمه ای بر مکانیک شکست<sup>۱</sup>

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

---

<sup>1</sup> Fracture Mechanics

## ۱-۴- تاریخچه مکانیک شکست

تاریخچه شکست سازه ها در حین فعالیت به سال های بسیار گذشته بر می گردد. شنک<sup>۱</sup> و پارکر<sup>۲</sup> در اوایل قرن ۱۹ میلادی مروری بر تاریخچه شکست ترد را ارائه دادند. پس از آن نیز موارد متعددی از شکست های ناگهانی اتفاق افتاد که برخی از آنها با خسارات زیادی همراه بودند. حتی در مواردی دیده شد که یک کشتی به طور کامل از وسط به دو نیم تقسیم شد. بسیاری از موارد به خاطر عبور کشتی ها از آب های سرد بوده که در این حالت فولاد از خود رفتار مواد ترد را نشان می دهد. یکی از عوامل مهم و محل شروع بسیاری از ترک ها را نیز محل های جوشکاری تشخیص دادند.

سابقه علم مکانیک شکست به دهه ۱۹۲۰ و آزمایشات گریفیث<sup>۳</sup> بر روی شیشه بر می گردد. او ضمن آزمایش خود متوجه شد که استحکام کششی شیشه درصد ناچیزی از استحکام نظری این ماده است که از روابط حاکم بر اتصالات اتمی به دست می آید. در عین حال او متوجه شد که با کاهش ضخامت الیاف شیشه، استحکام واقعی به مقدار استحکام نظری نزدیک می گردد. بر این اساس او نتیجه گرفت که وجود این اختلاف ها ناشی از وجود ترک های ریز در داخل شیشه می باشد. بر این اساس او معیاری را برای شکست قطعات در نظر گرفت. گریفیث بیان کرد که شکست هنگامی رخ می دهد که نرخ تغییر انرژی پتانسیل ناشی از رشد ترک با مقاومت در برابر رشد ترک یکسان شود. بر این اساس می توان گفت دیدگاه گریفیث بیشتر متوجه ساختار میکروسکوپی ماده بود. البته به علت دشوار بودن سنجش و تحلیل در مقیاس اتمی، پس از گریفیث تا چند دهه این عرصه به عنوان یک زمینه تئوری محض بدون استفاده باقی ماند. حوزه مکانیک شکست در دهه ۱۹۵۰ با وقوع سوانح هوایی و همچنین شکستن قطعات بسیاری از وسایل که میزان بارگذاری بر روی آنها بسیار کمتر از حد تحمل آنها بود وارد مرحله جدیدی گردید. این مورد بیشتر در وسایلی دیده می شد که بارگذاری بر روی آنها به صورت تناوبی انجام می گرفت. به

---

<sup>1</sup> Shank

<sup>2</sup> Parker

<sup>3</sup> Griffith

همین علت این نوع شکست را اصطلاحاً شکست خستگی نامگذاری کردند. از آن زمان به بعد مطالعه بر روی این موضوع اهمیت برجسته ای در طراحی سازه های تحت بارگذاری های تکراری پیدا کرد.

## ۱-۵- تحلیل پدیده شکست

با افزایش موارد شکست در اواسط قرن بیستم میلادی توجه زیادی به این موضوع شد. به این ترتیب مکانیک شکست در زمره یکی از علوم مهم در زمینه مکانیک قرار گرفت. عوامل زیادی که می توانست در ایجاد پدیده شکست موثر باشد بررسی گردید. به این ترتیب سه عامل که نقش موثرتری در ایجاد شکست داشتند به عنوان پارامتر های اصلی شکست در نظر گرفته شدند. این سه عامل به شرح زیر می باشند:

۱. استحکام شکست ماده<sup>۱</sup>.

۲. طول ترک<sup>۲</sup>.

۳. سطح تنش<sup>۳</sup> اعمالی.

استحکام شکست ماده، میزان توانایی ماده برای تحمل بارهای وارد شده بر روی جسم دارای ترک می باشد. این پارامتر که یکی از خواص ذاتی ماده می باشد به تغییر شکل پلاستیک ماده در اطراف ترک بستگی دارد که خود تابعی از درجه حرارت محیط می باشد. طول ترک نیز تاثیر به سزایی در شکست قطعات دارد و به طور کلی می توان گفت هر چه طول ترک موجود در سازه بیشتر باشد، احتمال به وقوع پیوستن شکست ناگهانی بر اثر اعمال نیروی مشخص بیشتر می گردد. عاملی که باعث رشد ترک و ایجاد شکست می گردد، تنش کششی می باشد. در این رابطه می توان گفت که هر چه سطح تنش اعمالی بیشتر گردد، احتمال به وقوع پیوستن گسیختگی نیز بیشتر می شود.

با توجه به مطالبی که گفته شد، علم مکانیک شکست پایه ریزی شد. در ابتدا با روش های تئوری به بررسی پدیده شکست پرداخته شد. روش های تئوری در ابتدای امر با توجه به ساده بودن مسائل و

---

<sup>1</sup> Fracture Strength of Material

<sup>2</sup> Crack Length

<sup>3</sup> Stress Surface



هندسه های موجود، کارایی مطلوبی را از خود نشان می دادند. با پیچیده شدن قطعات و سازه ها، دیگر روش های ثنوری به صورت کامل نمی توانستند شرایط ایجاد شده را در نظر بگیرند. به همین علت، ساده سازی هایی در صورت مسائل انجام می گرفت و از طرف دیگر برای حصول اطمینان از عملکرد صحیح سازه، ضرایب اطمینانی نیز در طراحی قطعات منظور می گردید.

در دهه های اخیر با پیشرفت در علوم کامپیوتر و سریع تر شدن وسایل محاسباتی شاخه دیگری که روش حل عددی بود مورد توجه بیشتری قرار گرفت. ابداع این روش ها به دهه ۵۰ میلادی بازمی گردد، ولی در آن زمان شرایط لازم برای به کار گرفتن این روش ها موجود نبود. با به کارگیری این روش ها بسیاری از مشکلات موجود بر سر راه علوم مکانیک از جمله مکانیک شکست برداشته شد. اصل اولیه در استفاده از این روش ها این است که دامنه حل به قطعات کوچکتر و هندسه های ساده تر تقسیم می شوند و سپس با تامین شرایط پیوستگی نتایج کلی برای کل دامنه مساله به دست می آید. روش های مختلفی نیز در این رابطه ابداع گردیدند که در هر یک سعی شده به صورت دقیق تری به بررسی مسایل شکست پرداخته شود.

## ۱-۶- بررسی روش های مختلف حل روی پوسته ها تحت بارگذاری های مختلف

استفاده بسیار وسیع از ورقها و پوستهها به عنوان المانهای سازه ای باعث شده است که تحقیقات دیرینه و بسیار وسیعی پیرامون آنها انجام شود. تحقیقات در این زمینه به یکی از سه روش زیر استوار هستند:

۱- تحقیقات و مطالعات تحلیلی سازهها

۲- تحقیقات و مطالعات تجربی سازهها

۳- تحقیقات و مطالعات عددی سازهها

امروزه سه روش فوق رایج بوده و گاهی از هر سه روش برای انجام یک تحقیق استفاده می شود. حل تحلیلی سازهها، روشی است که بر یک یا چند اصل فیزیکی استوار است؛ که توسط روشهای ریاضی

توسعه داده شده‌اند. این روش حل عمدتاً برای مسائل و سازه‌های با هندسه‌های ساده و بارگذاری‌ها و شرایط مرزی متقارن جوابهای دقیقی ارائه می‌دهد و حل بسیاری از مسائل ساده در کتابهای منتشر شده موجود است. در روش تحلیلی اگر اندکی مسئله از لحاظ هندسه، بارگذاری یا شرایط مرزی پیچیده شود، دست یافتن به جواب دقیق بسیار دشوار و حتی غیر ممکن می‌گردد. در مواردی نیز جوابهای تقریبی برای حل تحلیلی سازه‌ها بدست می‌آید. شاید دلیل تقریبی بودن این جوابها فرضهای ساده کننده‌ای باشد که برای حل معادلات بکار رفته‌اند. عدم توانایی در حل معادلات دیفرانسیلی که از حل‌های تحلیلی حاصل می‌شوند، از مهمترین مشکلات انجام حل تحلیلی می‌باشد.

حل عددی سازه‌ها نیز روش دیگری است که امروزه توسط برنامه‌های قدرتمند اجزای محدود به بازار صنعت آمده است. این روش بسیار ارزان قیمت و مقرون به صرفه است و همواره می‌توان از آن بهره برد. زمانی که استفاده از روشهای تجربی و آزمایشگاهی گران قیمت و یا غیر ممکن باشد و حل تحلیلی نیز ممکن نباشد، استفاده از حل عددی می‌تواند کمک زیادی به انجام تحلیل بکند.

رایج‌ترین روش عددی که امروزه مورد استفاده مهندسين و محققين قرار می‌گیرد، روش اجزای محدود می‌باشد که بوسیله آن یک سازه پیوسته تبدیل به تعداد محدودی المان سازه‌ای می‌شود. در این زمینه کتابهای بسیار زیادی تألیف و منتشر شده است که بیانگر اهمیت و قابلیت استفاده از این روش در حل مسائل سازه‌ای می‌باشد.

آخرین روش برای حل مسائل سازه‌ای روش آزمایش یا روش تجربی می‌باشد. این روش همواره جواب نهایی مسأله است. هیچ گاه نمی‌توان جوابهای حل تحلیلی یا عددی را بر جوابهای حل تجربی ترجیح داد. در بسیاری از مسائل روابط تحلیلی وجود دارند که توسط نتایج آزمایش بهینه شده‌اند. بنابراین اولین معیار مقایسه برای صحت نتایج عددی یا تحلیلی مقایسه با نتایج تجربی است. بدست آوردن نتایج تجربی می‌تواند به قیمت بسیار بالایی تمام شود. بنابراین استفاده از آن مستلزم محدودیت در مسائل اقتصادی می‌باشد.

## ۱-۷- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه کمانش پوسته ها

سازه های پوسته ای دارای کاربرد فراوان در صنایع هوافضا، سازه های معدنی، سدهای بزرگ، سقفهای پوسته ای، خط لوله، سازه های حمل و نگهداری سیالات و برجهای خنک کن می باشد [۱]. یکی از مهمترین مسائلی که هنگام طراحی این سازه ها باید مورد بررسی قرار گیرد، پدیده کمانش است [۲]. اولین تحقیقات بر روی تعیین بار کمانش در ناحیه الاستیک متمرکز بود، ولی تحقیقات تجربی [۳و۴] نشان داد که ظرفیت بار کمانش سازه های پوسته ای بسیار کمتر از مقداری است که تئوریهای کلاسیک نشان می دهد و کوچکترین انحراف از شرایط ایده آل هندسی و بار گذاری باعث کاهش قابل توجه بار قابل تحمل توسط سازه می شود [۵ و ۶].

از تئوری کلاسیک می توان برای پیش بینی بار کمانش پوسته های استوانه ای نازک تحت بار فشاری محوری یکنواخت، با بکار بردن فرمول زیر، استفاده کرد:

$$N_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left( \frac{t^2}{R} \right) \quad (1-1)$$

که در آن  $N$  نیروی محوری بر واحد محیط مقطع استوانه،  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون،  $t$  ضخامت پوسته و  $R$  شعاع پوسته است. باید توجه داشت که این معادله، برای پوسته های نازک بدون گشودگی با  $L/R \leq 5$ ، جواب مناسبی می دهد [۷]. این معادله، برای پوسته های با ضخامت متوسط ( $R/t < 50$ ) نیز اغلب مقداری بیشتر از بار کمانش واقعی را نشان می دهد، بطوریکه پوسته قبل از رسیدن به این بار دچار کمانش می شود. باید توجه کرد که معادله (۱-۱) فقط برای پوسته هایی که از مواد ایزوتروپ ساخته شده و رفتار الاستیک داشته باشند، بکار می رود.

مانند دیگر سازه ها، پوسته ها نیز مستعد ایجاد ترک، وجود گشودگی و خوردگی و تغییرات شیمیایی هستند. وجود ترک به شدت بر روی رفتار کمانش پوسته ها تاثیر گذاشته و باعث کاهش توان باربری آن می شود [۸-۱۰]. با توجه به وجود پارامترهای زیادی مانند ترک ها و نیز پیچیده بودن رفتار پوسته ها که نمی توان به کمک یک رابطه تحلیلی رفتار پوسته را پیش بینی کرد، حل عددی مسئله کمانش پوسته ها بهترین روش به نظر می رسد [۱۱-۱۴].

شریعتی و همکارانش، با بررسی تجربی و عددی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای با وجود عیب هایی مانند گشودگی و ترک، بار کمانش نتایج تجربی و نتایج عددی را مورد مقایسه قرار دادند [۱۵-۱۸].

## فصل ۲- اعمال بارگذاری های سیکلی بر روی سازه ها

## ۲-۱- مقدمه ای درباره بارگذاری سیکلی و خستگی سازه ها

ایجاد پدیده خستگی<sup>۱</sup> در مواد یکی از موضوعات مهمی است که باید در بسیاری از طراحی های مهندسی، خصوصاً در صنایع اتومبیل سازی و هواپیمایی در نظر گرفته شود. این مطلب موجب شکل گرفتن تحقیقات وسیعی بر روی رفتار خستگی آلیاژهای فلزی مختلف در طول دهه های اخیر شده است. خواص خستگی مواد ممکن است توسط آزمون های خستگی پرتکرار<sup>۲</sup> (که تغییر شکل الاستیک در آنها حاکم است) یا آزمون های خستگی کم تکرار<sup>۳</sup> (که بیشتر با تغییر شکل پلاستیک در ارتباط است) بررسی شود. از آنجایی که مکانیزم های تغییر شکل سیکلی منجر به تمرکز کرنش پلاستیک و در ادامه تشکیل ترک ها می شود، مطالعه رفتار مواد تحت شرایط خستگی کم تکرار به لحاظ ترک خوردگی و تخریب ماده از اهمیت بالایی برخوردار است.

تا چند دهه پیش از این، طراحی در مهندسی تنها به استفاده از مواد در ناحیه الاستیک محدود می شد؛ اما به تدریج با توجه به نیاز های روز افزون برای طراحی قطعاتی با ظرفیت تحمل بار بسیار بالا و در عین حال سبک، ایده استفاده از ظرفیت ماده در محدوده پلاستیک در ذهن مهندسين طراح شکل گرفت. به این ترتیب بسیاری از قطعات به گونه ای طراحی شده اند که امکان ایجاد تغییر شکل های پلاستیک در اثر بارگذاری در قطعه منتفی نیست. 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 می شوند؛ 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 شاخه ای در علم پلاستیسیته به نام خستگی کم تکرار شد (در کنار بررسی مسائل معمول خستگی که گاه تا چند میلیون سیکل بارگذاری و باربرداری را در بر

---

<sup>1</sup> Fatigue

<sup>2</sup> High cycle fatigue (HCF)

<sup>3</sup> Low cycle fatigue (LCF)

می گیرد) که علیرغم پیشرفت های بسیار به دست آمده در این زمینه، هنوز یکی از شاخه های ناشناخته ی پلاستیسیته به شمار می آید.

رچتینگ<sup>۱</sup> نوعی رفتار تغییر شکل سیکلی مواد و سازه هایی است که تحت تنش های سیکلی با تنش میانگین غیر صفر قرار می گیرند. بارگذاری تنش-کنترل به صورت سیکلی با وجود تنش میانگین غیر صفر باعث انباشت کرنش پلاستیک باقیمانده<sup>۲</sup> در ماده می شود که این پدیده را رچتینگ می نامند. این تنش ها می بایست بزرگتر از تنش تسلیم ماده باشند. به این معنا که ماده یا سازه ی تحت تنش باید وارد ناحیه ی پلاستیک شود. رچتینگ از اهمیت ویژه ای در امنیت و پیش بینی عمر سازه های مهندسی برخوردار است.

با توجه به مباحث مطرح شده در مورد اهمیت پدیده خستگی و ناشناخته بودن خستگی کم تکرار (به ویژه پدیده نرم شوندگی و رچتینگ که از نتایج خستگی های کم تکرار است)، از طرفی رشد روز افزون استفاده از پوسته های استوانه ای و کمبود اطلاعات مربوط به خواص خستگی آنها، ما را بر آن داشت تا در این مجال به بررسی پدیده خستگی در مورد پوسته های استوانه ای پردازیم.

## ۲-۲- مروری بر کارهای گذشته

برای مرور کارهای انجام شده روی انواع مواد تحت بارگذاری های مختلف سیکلی، بررسی ها در قالب دو بخش مطرح می شود. بخش اول درباره بارگذاری های سیکلی روی مواد مختلف و تاثیر انواع بارگذاری ها روی پارامترهایی نظیر کرنش رچتینگ، نرخ کرنش رچتینگ، تعداد چرخه تا شکست مواد و دیگر پارامترها می باشد. در بخش دوم به مرور مقالاتی پرداخته می شود که مختص به پوسته های استوانه ای می باشند که تحت بارگذاری های سیکلی قرار گرفته اند.

---

<sup>1</sup> Ratcheting

<sup>2</sup> Accumulation of Residual Plastic Strain

## ۲-۱-۲ - تاثیر انواع بارگذاری های سیکلی روی رفتار مواد مختلف

یانگ در سال ۲۰۰۵ به بررسی رفتار خستگی کم تکرار و رچتینگ فولاد CK45 تحت بارگذاری تک محوره پرداخت. او هم آزمایش های کرنش-کنترل و هم تنش-کنترل را بر روی این فولاد انجام داد. در این مقاله آزمایش های کرنش-کنترل با و بدون کرنش میانگین به منظور بررسی اثر کرنش میانگین بر عمر خستگی انجام شده است. آزمایش های تنش-کنترل نیز به منظور مشاهده ی اثرات تنش میانگین و دامنه ی تنش بر شکست رچتینگ انجام گرفته است. همچنین بر اساس نتایج آزمایش های کرنش-کنترل، معادلاتی برای پیش بینی عمر خستگی به دست آورده شده و از آنها برای پیش بینی آسیب خستگی در شکست رچتینگ استفاده شده است [۱۹].

لیم و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به بررسی رفتار رچتینگ و خستگی نوعی آلیاژ مس تحت بارگذاری تک محوره همراه با تنش میانگین پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش های تنش-کنترل در دمای اتاق با و بدون تنش میانگین، کرنش رچتینگ را تا زمان شکست اندازه گیری کردند. آنها با ترسیم منحنی های رچتینگ-سیکل نشان دادند که برای این آلیاژ، منحنی مربوطه شبیه به منحنی خزش شامل سه قسمت اولیه، پایدار و بحرانی می باشد. این محققین به بررسی نرخ کرنش رچتینگ نیز پرداخته و پیش بینی عمر خستگی این آلیاژ را با استفاده از مدل هایی نظیر مدل Walker و SWT انجام دادند [۲۰].

نیپ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ طی پژوهشی به بررسی خستگی کم تکرار و منحنی تنش-کرنش سازه هایی از جنس فولاد کربنی و ضد زنگ پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش های کرنش-کنترل تک محوره عمر خستگی سه نوع فولاد را مورد مطالعه قرار دادند [۲۱].

گاوو و چن در سال ۲۰۰۹ طی آزمایش هایی به مطالعه اثر کرنش رچتینگ محوری بر عمر خستگی پیچشی نوعی لچیم بدون سرب پرداختند. آنها با استفاده از بارگذاری های تنش-کنترل چند محوره در دمای اتاق دریافتند که با افزایش کرنش رچتینگ محوری عمر خستگی کاهش می یابد. همچنین معادلاتی را برای بیان عمر خستگی تحت بارگذاری های چند محوره بیان نمودند [۲۲].



در سال ۲۰۰۹ چن و همکاران آزمایش هایی را در رابطه با مطالعه خواص خستگی و رچتینگ فولاد های نیتروژن دار، تحت بارگذاری تک محوره انجام دادند. در این آزمایش ها آنها به بررسی اثرات دامنه ی تنش، تنش میانگین، تاریخچه بارگذاری و نرخ تنش بر رفتار رچتینگ این نوع فولاد ها پرداختند. بحث در مورد اثر اندازه ی نمونه ها بر رفتار خستگی این مواد از دیگر مباحثی می باشد که در این مطالعه به آن پرداخته شده است [۲۳].

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 بارگذاری های تک محوره، پیچش خالص و محوری-پیچشی از خود رفتار نرم شوندگی نشان داد. همچنین در این مطالعه اثرات نرخ کرنش اعمالی در حالت های مختلف بر کرنش رچتینگ مورد بررسی قرار گرفت [۲۴].

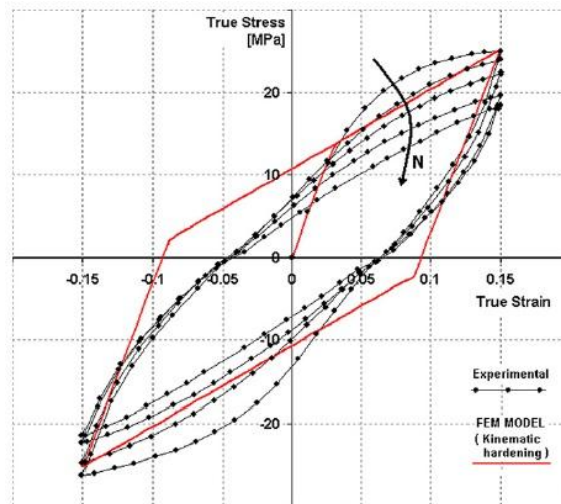
کانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی تاثیرات رچتینگ و خستگی فولاد ضد زنگ SS304 در بارگذاری تک محوره تحت شرایط تنش-کنترل و در دمای اتاق پرداختند. اثرات تنش میانگین، دامنه ی تنش و نسبت تنش حداکثر به حداقل بر کرنش رچتینگ و عمر نمونه ها در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. نتایج این آزمایش ها نشان دادند که کرنش رچتینگ و عمر خستگی این ماده وابستگی زیادی به تنش میانگین، دامنه ی تنش و نسبت تنش دارد. همچنین مشخص شد که دو نوع شکست، ناشی از رچتینگ کم تکرار با دامنه ی کرنش تقریباً ثابت که به ترتیب رخ می دهند، بسته به سطح تنش اعمالی در آزمایش می باشند [۲۵].

البته روی نمونه های استاندارد از جنس فولادهای ضد زنگ مانند SS304، SS304L، SS316 و SS316L مطالعات خستگی بسیاری انجام شده است. زیرا این نمونه ها تحت بارگذاری های سیکلی مقاومت بالایی داشته و رفتار رچتینگ با نرخ کرنش بالایی از خود نشان می دهند [۲۶-۲۸].

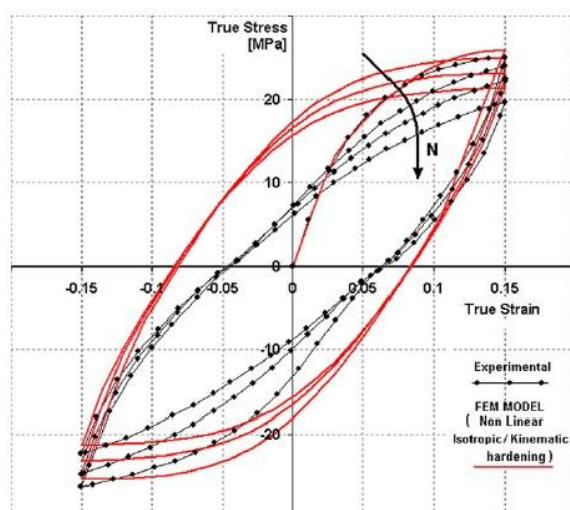
در سال ۲۰۰۸ آوانزینی به مطالعه خصوصیات مکانیکی و مدل سازی اجزای محدود رفتار تنش-کرنش سیکلی پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق سنگین پرداخت. در این مقاله با استفاده از آزمایش های کرنش-کنترل کاملاً متقارن، با و بدون خنک کاری با استفاده از جت هوایی، ثابت های ماده (برای

استفاده در مدل های پیشرفته ی پلاستیسیته در نرم افزار تجاری آباکوس به منظور تعیین رفتار سخت شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک ماده) استخراج شده و در نرم افزار آباکوس به منظور مدل سازی حلقه های هیستریزیس استفاده شد [۲۹].

در شکل ۱-۲ و شکل ۲-۲ به ترتیب مدل سازی حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش پلی اتیلن فوق سنگین با استفاده از مدل های سخت شوندگی سینماتیک خطی و سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک نشان داده شده است. ملاحظه می شود با اینکه این نوع پلیمر رفتار کاملا متقارنی در کشش و فشار از خود نشان می دهد؛ مدل سازی حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آن به طور کامل بر داده های تجربی منطبق نمی شود.



شکل ۱-۲: مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی نرم افزار آباکوس [۲۹].



شکل ۲-۲: مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک نرم افزار آباکوس [۲۹].

در زمینه تحلیل مدل های سخت شوندگی مختلف و بخصوص بررسی رفتار رچتینگ سازه ها، مقالات و پایان نامه های فارسی اندکی می توان یافت که رفتار سازه ها تحت بارگذاری های تناوبی با استفاده از مدل های سخت شوندگی را مورد مطالعه قرار داده اند. از آن جمله می توان به پایان نامه ای در زمینه رفتار رچتینگ در مخازن تحت فشار اشاره کرد [۳۰]. همچنین مقاله ای به بررسی رفتار سیکلی مخازن استوانه ای پرداخته و از مدل های سخت شوندگی ایزوتروپیک، سینماتیک و مدل سخت شوندگی ترکیبی برای بررسی رفتار سیکلی مخازن استوانه ای استفاده کرده است [۳۱].

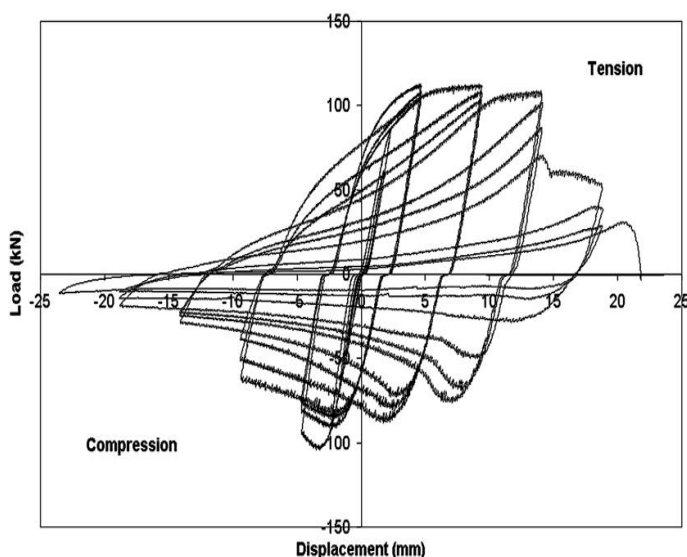
در سال ۲۰۱۱ شریعتی و همکارانش روی نمونه های استاندارد پلی استال، بارگذاری های محوری تناوبی انجام داده و تاثیر دامنه نیرو و نیروی متوسط را روی رفتار رچتینگ نمونه ها مورد بررسی قرار دادند. افزایش کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ با افزایش پارامترهای دامنه نیرو و نیرو متوسط از نتایج بدست آمده طی این مطالعه می باشد [۳۲].

همچنین روی پوسته های استوانه ای با سطح مقطع های قوطی شکل نیز بارگذاری های سیکلی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار این سازه ها نیز تحت بارگذاری های چرخه ای مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۳].

در شکل ۳-۲ مشاهده می شود برای اینکه پوسته ها تحت بارگذاری سیکلی قرار گیرند به فیکسچرها جوش شده اند. ضمناً اشاره شده است که جوشکاری باعث ضعیف شدن مقاومت پوسته در ناحیه جوش می گردد و شکست تحت بارگذاری سیکلی در نزدیکی ناحیه جوش اتفاق می افتد. همچنین منحنی های هیستریزیس برای یک نمونه تست شده نیز در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. پوسته ها تحت بارگذاری سیکلی در ناحیه فشاری به کمانش می رسند، و کمانش باعث کاهش عمر پوسته می گردد.



شکل ۳-۲: شکست از ناحیه جوش در پوسته با مقطع قوطی تحت بارگذاری سیکلی [۳۳].



شکل ۴-۲: منحنی های هیستریزیس پوسته با مقطع قوطی تحت دامنه کرنش های متفاوت [۳۳].

## ۲-۲-۲- تاثیر انواع بارگذاری های سیکلی روی رفتار پوسته های استوانه ای

کاربردهای پوسته ها در صنایع هوافضا مانند هواپیماها و موشکها، خطوط لوله کشی، سازه های دریایی بسیار فراوان می باشد. این پوسته ها در طول عمر خود تحت بارگذاری های محوری تناوبی قرار گرفته و در کاهش عمر آنها تاثیر فراوانی دارند. زمین لرزه ها از جمله بارگذاری های طبیعی هستند که می توانند روی این سازه ها اعمال گردد [۳۴]. از مشکلات مهمی که باعث می شود بارگذاری چرخه ای روی پوسته های استوانه ای به ندرت مورد مطالعه تجربی قرار گیرد، ساخت فیکسچرهای مخصوص به آنها برای اعمال بارگذاری مذکور می باشد. به علت مشکلات تست تجربی موجود در بارگذاری محوری تناوبی پوسته های استوانه ای، تحقیقات اندکی روی آنها صورت گرفته است. یکی از این مطالعات در مقاله یوون می باشد که دامنه کرنش کمانشی پوسته ها تحت بارگذاری محوری تناوبی را کمتر از بارگذاری فشاری یکنواخت پیش بینی کرده است؛ ولی به رفتار نرم شوندگی و یا سخت شوندگی نمونه ها اشاره ای نکرده است [۳۵].

سانگ و شانگ در سال ۲۰۱۰ روی پوسته های استوانه ای آلیاژی تحت بارگذاری های دوماحوره مطالعه کرده و با روش های عددی و استفاده از مدل های سخت شوندگی، منحنی های هیسترزیس را شبیه سازی کرده اند. بارگذاری ها به صورت کرنش-کنترل و تحت جابجایی کشش-پیچش روی نمونه ها اعمال شده است [۳۶].

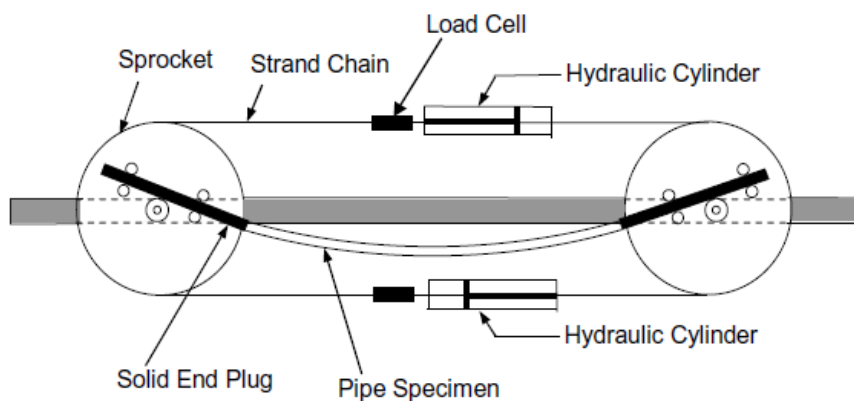
مطالعات تجربی روی پوسته های استوانه ای بیشتر با بارگذاری های خمشی تناوبی انجام گرفته است که دارای تست های تجربی ساده تری می باشند و نتایج تجربی بسیاری با این نوع بارگذاری روی پوسته های استوانه ای بدست آمده است [۳۷-۴۲].

برای نمونه در مرجع [۴۰] تصویری شماتیک از دستگاه تست خمش سیکلی پوسته های استوانه ای نشان داده شده است (شکل ۲-۵). همچنین در شکل ۲-۶ منحنی بیضی گون شدن<sup>۱</sup> برای یک پوسته

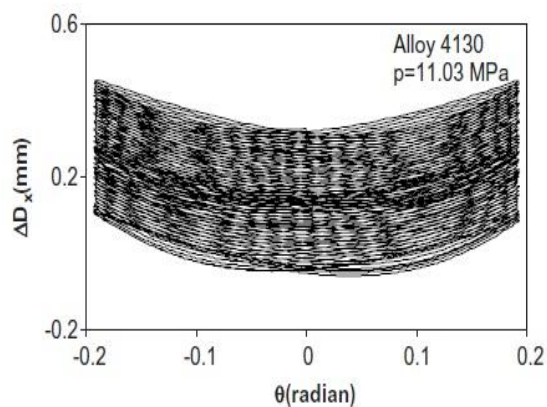
---

<sup>۱</sup> Ovalization

استوانه ای از آلیاژ آلومینیوم نشان داده شده است که این رفتار روی پوسته ها بر اثر بارگذاری خمشی بوجود می آید. در وسط طول پوسته و با ابزار اندازه گیری جابجایی خطی<sup>۱</sup>، تغییرات قطر خارجی در طول بارگذاری خوانده می شود.



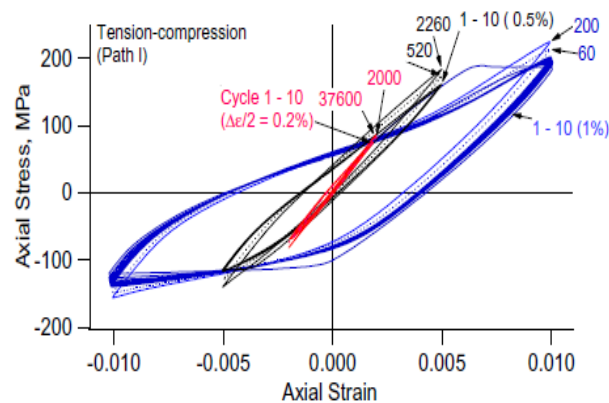
شکل ۲-۵: دستگاه تست خمش سیکلی روی پوسته های استوانه ای [۴۰].



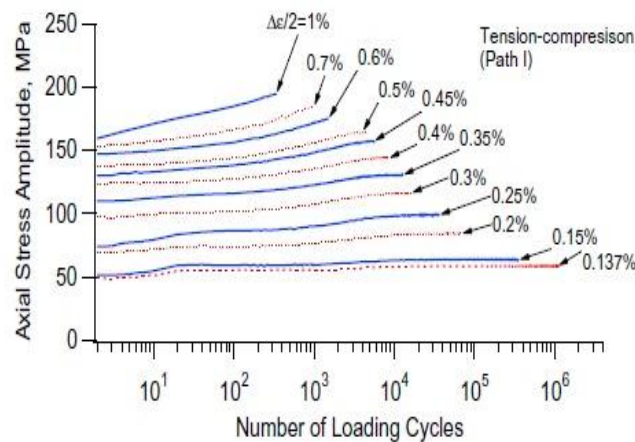
شکل ۲-۶: تغییرات قطر خارجی پوسته استوانه ای نسبت به زاویه خمش [۴۰].

<sup>۱</sup> LVDT

در مطالعات جی‌او روی تیوب‌ها مشخص شده است که تعداد سیکل‌ها به همراه تنش میانگین و دامنه تنش از پارامترهای تاثیرگذار برای فروپاشی این نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری تناوبی به همراه فشار داخلی بوده است [۴۳]. همچنین روی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس منیزیم نیز بارگذاری تنها به صورت کرنش-کنترل اعمال گردیده و تعداد سیکل‌ها تا شکست نمونه‌ها تحت تاثیر دامنه کرنش و کرنش میانگین مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۴]. در شکل ۷-۲ مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه کرنش، تعداد سیکل‌ها تا شکست نمونه کاهش می‌یابد. همچنین در شکل ۸-۲ با افزایش تعداد سیکل‌ها در نمونه‌ها سخت‌شوندگی ایجاد شده و با افزایش دامنه کرنش، رفتار سخت‌شوندگی افزایش می‌یابد.



شکل ۷-۲: منحنی‌های هیستریزس تحت بارگذاری کرنش-کنترل با دامنه کرنش‌های متفاوت [۴۴].



شکل ۸-۲: سخت‌شوندگی تحت بارگذاری کرنش-کنترل با دامنه کرنش‌های متفاوت [۴۴].

یکی دیگر از این مطالعات، بررسی رفتارهای کمانشی مختلف بر اثر بارگذاری های یکنواخت و سیکلی کرنش-کنترل، تحت تاثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت، طول و شعاع پوسته های استوانه ای می باشد [۴۵].

## ۲-۳- جمع بندی

با مطالعه مقاله های مختلف در رابطه با بارگذاری های سیکلی روی پوسته های استوانه ای، تاثیر پارامترهای مختلف مانند طول، شعاع و جنس ماده روی رفتار پوسته های استوانه ای مورد مطالعه قرار گرفته است. پوسته ها تحت بارگذاری های مختلف نیز مورد مطالعه قرار گرفته اند و تاثیر انواع بارگذاری ها مانند بارگذاری های خمشی سیکلی و پیچشی سیکلی روی رفتار آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. در رابطه با بارگذاری های محوری تناوبی مطالعات کمتری روی پوسته ها انجام گردیده و تاثیر پارامترهای هندسی و همچنین تاثیر جنس های مختلف روی رفتار منحنی های هیستریزیس پوسته های استوانه ای کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق سعی شده رفتار های مختلف پوسته های استوانه ای با تغییر پارامترهای مختلف تحت تاثیر انواع بارگذاری های محوری تناوبی مورد مطالعه قرار گیرد. لذا در ادامه نتایج تجربی تست های انجام شده روی پوسته های استوانه ای مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد.



## فصل ۳ - تحلیل تجربی

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

در این فصل نتایج تجربی به دست آمده از آزمایشات مختلفی که روی پوسته های استوانه ای انجام گردیده مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش ها روی سه جنس مختلف انجام گردیده و رفتار های منحنی های هیستریزیس به دست آمده روی هر کدام از پوسته های استوانه ای مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۲- دستگاه آزمایش

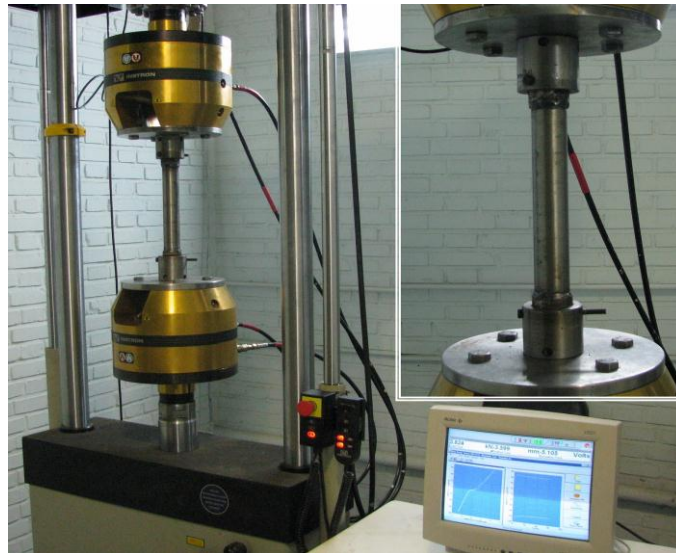
آزمایش های انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون<sup>۱</sup> ۸۸۰۲ انجام شده است (شکل ۳-۱). این دستگاه توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت ۲۵۰ kN را دارد. البته برای انجام تست های کشش استاندارد برای بدست آوردن خواص مکانیکی پوسته ها، از نیرو سنج<sup>۲</sup> با ظرفیت تحمل بار ۲۵kN استفاده شده است. همچنین برای بدست آوردن جابجایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج<sup>۳</sup> نیز استفاده شده است (شکل ۳-۲).

---

<sup>۱</sup> INSTRON

<sup>۲</sup> Load cell

<sup>۳</sup> Extensometer



شکل ۳-۱: دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲.

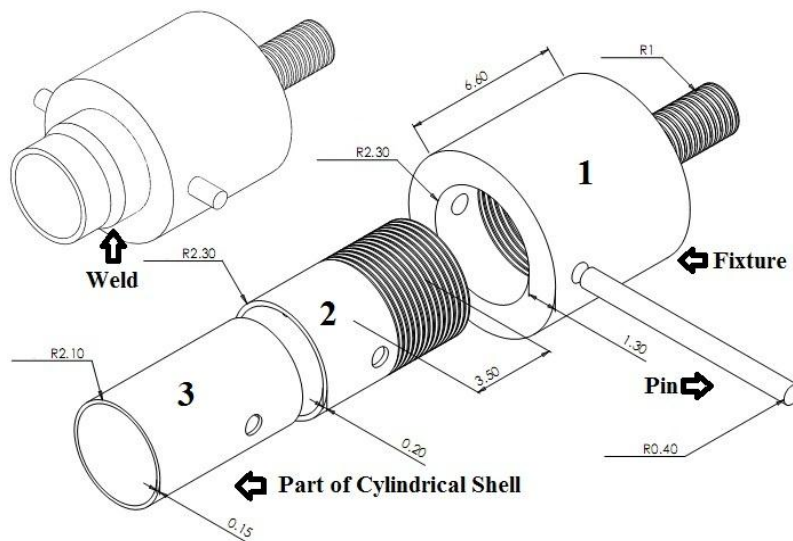


شکل ۳-۲: استفاده از نیروسنج ۲۵kN و طول سنج برای تست کشش استاندارد.

### ۳-۳- شرایط مرزی

برای بارگذاری محوری تناوبی روی پوسته های استوانه ای نیاز به فیکسچری است که بتواند بار کشش و فشار را بدون هیچ لغزشی روی پوسته اعمال کند. به علت اینکه پوسته ها از ضخامت اندکی برخوردار هستند (حدوداً ۱mm)، رزوه کردن دو طرف آنها امکان پذیر نمی باشد. لذا از سر دنده هایی برای تقویت دو سر پوسته ها استفاده شده است و این سر دنده ها رزوه شده اند و هر کدام از آنها از دو

طرف به پوسته استوانه ای جوش داده شده اند تا در هنگام بارگذاری، پوسته از سردنده ها جدا نگردد (شکل ۳-۳). نمونه هایی از این نوع اتصالات در بارگذاری محوری تناوبی در مقاله های [۳۳ و ۴۶] نیز آورده شده است. بدلیل حصول اطمینان از عدم تغییر شکل در فیکسچرها، علاوه بر رزوه کردن نمونه به فیکسچرها از یک پین نیز در محل اتصال نمونه به فیکسچر استفاده شده است. در شکل ۳-۳، قطعه شماره ۱ فیکسچر جهت اتصال به فک دستگاه می باشد. قطعه شماره ۲ سر دنده می باشد و بدلیل تقویت پوسته استوانه ای در ناحیه پین استفاده گردیده است. همچنین بدلیل ضخامت کم پوسته استوانه ای امکان رزوه کردن آن وجود ندارد، لذا از قطعه شماره ۲ برای اتصال به فیکسچر نیز استفاده گردیده است. قطعه شماره ۳ قسمتی از پوسته استوانه ای را نشان می دهد. همچنین در شکل ۳-۱ می توان فیکسچرها را به صورت متصل به فک های دستگاه و نمونه در زمان بارگذاری مشاهده نمود.



شکل ۳-۳: شماتیکی از اتصال پوسته استوانه ای به فیکسچر با استفاده از جوش، رزوه و پین (ابعاد بر حسب سانتیمتر)

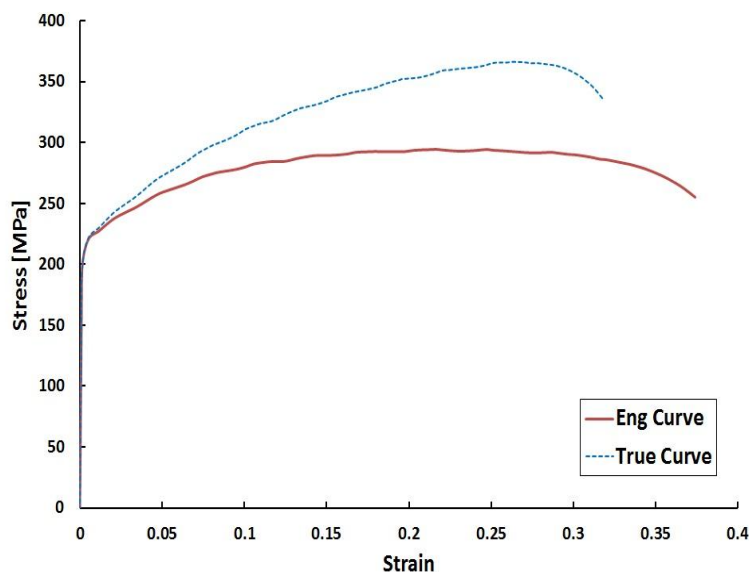
### ۴-۳- نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای St37

#### ۱-۴-۳- هندسه و خواص مکانیکی

نمونه های مورد آزمایش، پوسته های استوانه ای از جنس فولاد آلیاژی St37 با ابعاد هندسی نشان داده شده در جدول ۱-۳ می باشند. پوسته استوانه ای با ضخامت ۰.۸۵mm ، طول ۱۲۵mm و قطر خارجی ۴۲mm تحت بارگذاری تنش- کنترل نامتقارن محوری قرار گرفته است. همچنین پوسته استوانه ای با ضخامت ۰.۸۵mm ، طول ۱۹۵mm و قطر خارجی ۴۲mm تحت بارگذاری کرنش-کنترل متقارن محوری قرار گرفته است. خواص مکانیکی پوسته استوانه ای مورد آزمایش، بر طبق استاندارد ASTM-E8 [۴۷] بدست آمده است. منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. ضریب پواسون نیز برابر ۰.۳۳ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱-۳: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده St37

| مشخصات          | مقدار                        |
|-----------------|------------------------------|
| قطر خارجی       | D=42mm                       |
| ضخامت           | t=0.85mm                     |
| طول             | L=125,195mm                  |
| مدول الاستیسیته | E=218(GPa)                   |
| تنش تسلیم       | $\sigma_y = 198(\text{MPa})$ |
| تنش نهایی       | $S_u = 290(\text{MPa})$      |
| ضریب پواسون     | $\nu = 0.33$                 |



شکل ۳-۴: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از تست کشش استاندارد برای فولاد St37.

در شکل ۳-۴ روابط تنش-کرنش حقیقی و مهندسی به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\varepsilon_{Eng} = dL / L_0 \quad (۱-۳)$$

$$\sigma_{Eng} = F / A_0 \quad (۲-۳)$$

$$\varepsilon_T = Ln(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (۳-۳)$$

$$\sigma_T = \sigma_{Eng} (1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (۴-۳)$$

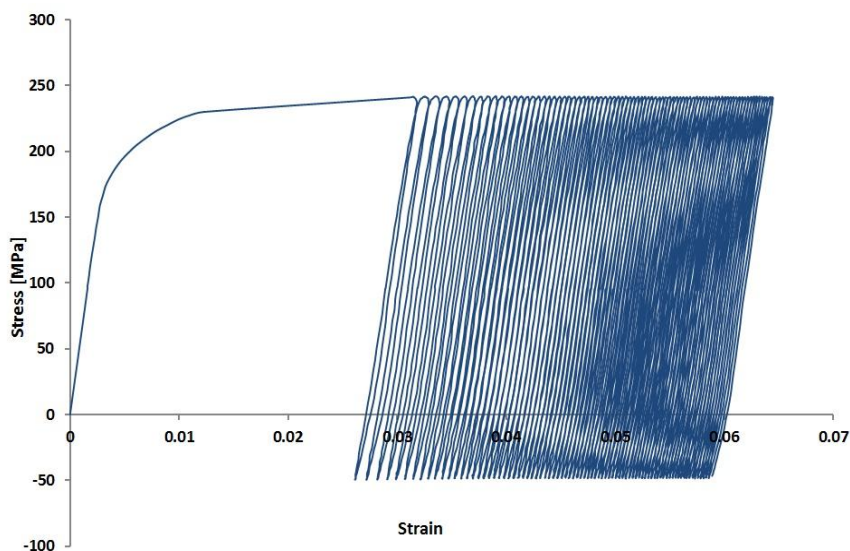
که در روابط بالا، پارمتر  $\varepsilon_{Eng}$ ،  $\sigma_{Eng}$ ،  $\varepsilon_T$  و  $\sigma_T$  به ترتیب عبارت اند از کرنش مهندسی، تنش مهندسی، کرنش حقیقی و تنش حقیقی.

### ۳-۴-۲- بارگذاری نیرو-کنترل

برای به دست آوردن رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای، بارگذاری به صورت تنش-کنترلی با تنش متوسط ۹۶MPa و دامنه تنش ۱۴۶MPa روی نمونه ای با طول ۱۲۵mm اعمال می گردد. هر چه از دامنه تنش بزرگتری استفاده گردد، نرخ انباشت کرنش پلاستیک بیشتر می شود و رفتار رچتینگ بهتر نمایش داده می شود. همچنین با افزایش تنش میانگین، گسیختگی سریعتر منجر می شود. لذا تنش

میانگین مقداری انتخاب گردیده است تا گسیختگی نمونه در تعداد سیکل بیشتری رخ دهد. همچنین اگر دامنه تنش و تنش میانگین کوچک انتخاب شوند، باعث متوقف شدن کرنش رچتینگ در ادامه بارگذاری روی پوسته استوانه ای خواهد شد [۴۸].

منحنی تنش-کرنش بدست آمده تحت این نوع بارگذاری در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. مشاهده می شود که پس از هر سیکل، کرنش پلاستیک در پوسته استوانه ای انباشت می گردد و این رفتار منجر به گسیختگی پوسته استوانه ای در ادامه بارگذاری می گردد. حلقه های ایجاد شده در سیکل های بالاتر به هم نزدیک می گردد؛ یعنی نرخ کرنش رچتینگ در سیکل های بالاتر کاهش می یابد. در سیکل های بالاتر زمانی که بارگذاری به حداکثر تنش کششی می رسد، در نزدیکی دو سر نمونه، حالت گلوبی شدن ایجاد می شود و در سیکل های بعدی با انباشت کرنش پلاستیک منجر به گسیختگی پوسته می گردد.

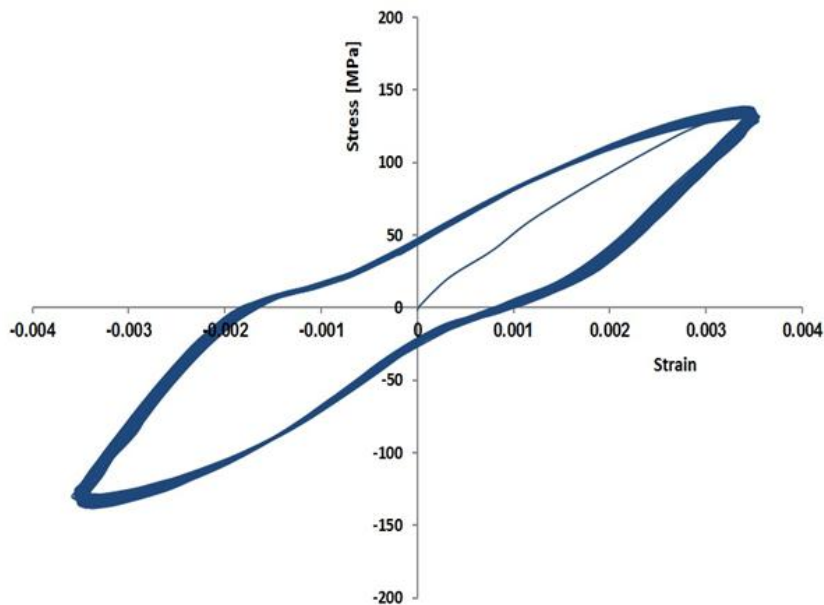


شکل ۳-۵: رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل.

### ۳-۴-۳- بارگذاری جابجایی-کنترل

برای به دست آوردن رفتار نرم شوندگی یا سخت شوندگی پوسته استوانه ای، بارگذاری به صورت کرنش-کنترلی با دامنه کرنش  $0.0037$  روی نمونه ای با طول  $195\text{mm}$  اعمال شد. بارگذاری به صورت متقارن روی نمونه اعمال شده و کرنش میانگین، صفر در نظر گرفته شده است تا رفتار رهاسازی<sup>۱</sup> در پوسته ایجاد نگردد [۴۹]. در این رفتار که بر اثر بارگذاری جابجایی-کنترل نامتقارن محوری بوجود می آید، به علت وجود تنش متوسط غیر صفر ایجاد شده در منحنی های هیستریزیس، در ادامه بارگذاری این تنش به تدریج به سمت صفر حرکت می کند که همان رهاسازی تنش متوسط ایجاد شده در ماده می باشد.

منحنی تنش-کرنش بدست آمده تحت این نوع بارگذاری در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که پس از هر سیکل، تحمل بار کششی و فشاری پوسته استوانه ای کاهش می یابد. یعنی در پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، رفتار نرم شوندگی از خود نشان می دهد.



شکل ۳-۶: رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.

<sup>1</sup> Relaxation

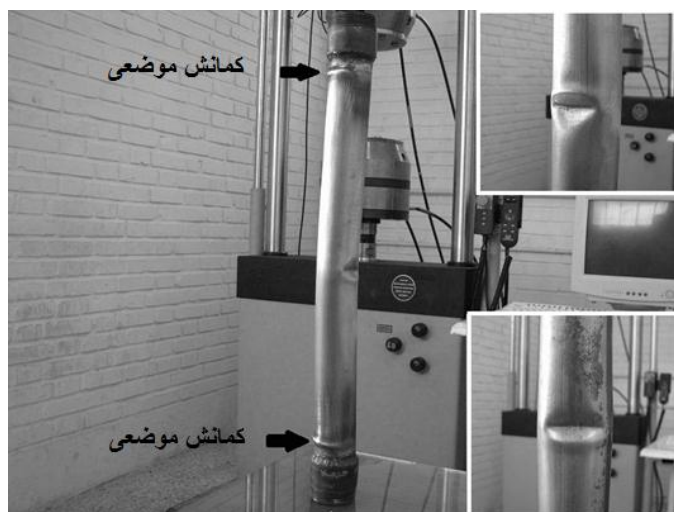


### ۳-۴-۴- تاثیر کمانش بر رفتار منحنی های هیستریزیس

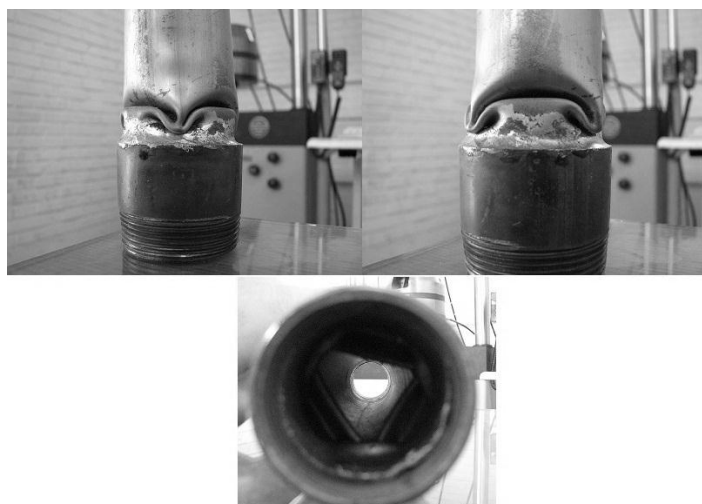
رفتار منحنی های هیستریزیس به دست آمده برای پوسته های استوانه ای به شدت به کمانش موضعی ایجاد شده در نمونه ها در هنگام بارگذاری طی سیکل های متوالی وابسته است. بارگذاری جابجایی- کنترل در محدوده ۱mm روی نمونه ها اعمال گردیده است و بارگذاری نیرو-کنترل در محدوده ۲۰kN اعمال شده است.

در حالت بارگذاری نیرو-کنترل متقارن محوری با نیروی ۲۰kN برای پوسته های با طول بیشتر از ۳۰۰mm پس از چند چرخه در نزدیکی فیکسچرها پوسته شروع به کمانش موضعی می کند؛ ولی در نهایت در وسط دهانه پوسته، کمانش اتفاق می افتد (شکل ۳-۷). همانطور که از شکل مشخص است، کمانش موضعی ایجاد شده در نزدیکی فیکسچرها مشابه یکدیگر می باشد. اما برای طول های کمتر، از همان نقاطی که کمانش موضعی اتفاق افتاده است، پوسته فشرده می گردد که این فشردگی به صورت سه گوش برای پوسته ای با طول ۲۹۰mm (شکل ۳-۸) و یا به صورت دایروی که در شکل ۳-۷ با فلش سیاه رنگ مشخص گردیده ایجاد می گردد. نوع فشردگی سه گوش ایجاد شده در شکل ۳-۸ با ادامه بارگذاری به صورت کاملا مشابه روی هم ایجاد می گردد. همچنین از داخل پوسته نیز تقارن این فشردگی به وضوح دیده می شود که در مرجع [۴۵] روی همین رفتار انتهای پوسته ها تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه ای بحث کاملی صورت گرفته و تعداد ضلع های ایجاد شده در حین بارگذاری مثل سه گوش و یا حتی شش ضلعی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با تغییر پارامترهایی همچون قطر پوسته ها، طول آنها و نوع بارگذاری، تغییر شکل های ایجاد شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

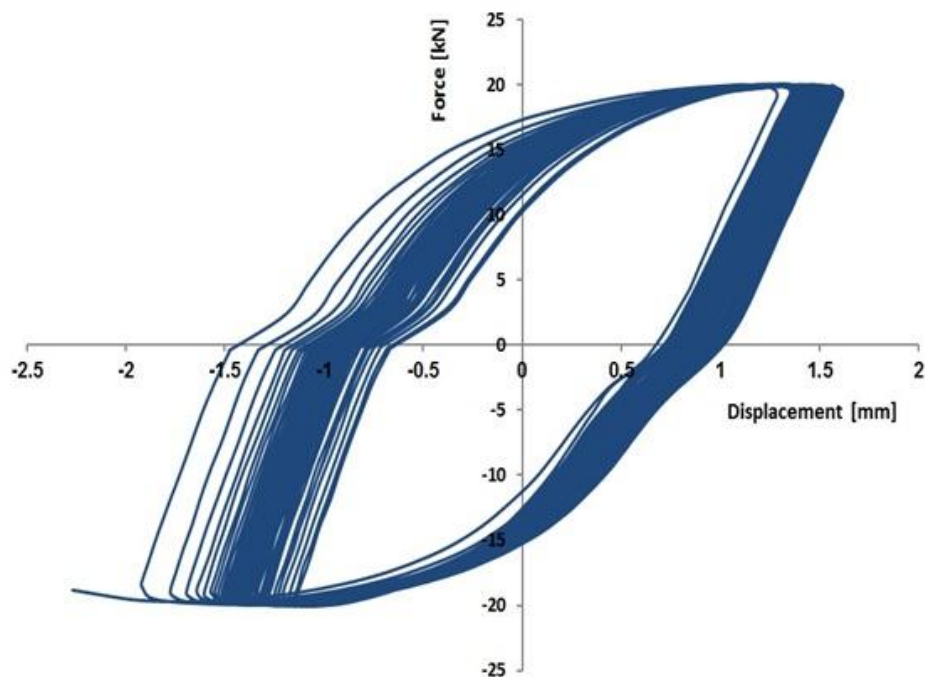
تحت این نوع بارگذاری منحنی های هیستریزیس به دست آمده، در شکل ۳-۹ نشان داده شده اند. مشاهده می شود که تحت بارگذاری نیرو-کنترلی متقارن محوری به علت ایجاد کمانش موضعی در مجاورت فیکسچرها، رفته رفته به کرنش پلاستیک باقیمانده در ناحیه فشاری در سیکل های بعدی اضافه می گردد و این انباشت کرنش پلاستیک در نهایت منجر به فروپاشی نمونه می گردد.



شکل ۳-۷: کمانش تحت بارگذاری نیرو-کنترل متقارن برای پوسته ای با طول  $390\text{ mm}$ .

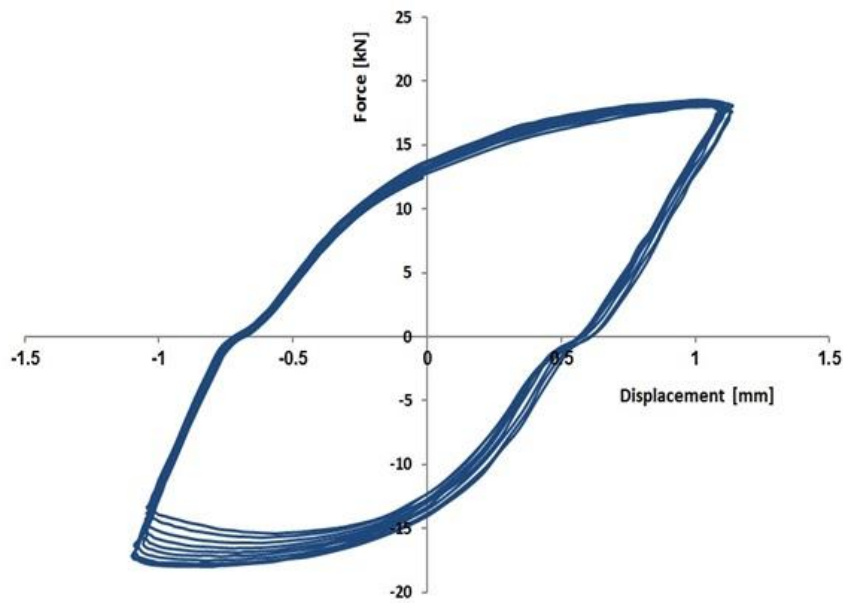


شکل ۳-۸: تغییر شکل سطح مقطع پوسته استوانه ای با طول  $290\text{ mm}$  تحت بارگذاری نیرو-کنترل متقارن محوری تحت بارگذاری نیرو-کنترلی با نیروی متوسط صفر، انباشت کرنش پلاستیک هم در ناحیه کششی و هم در ناحیه فشاری منحنی های هیستریزیس مشاهده می گردد. اما به علت وجود کمانش موضعی ایجاد شده در ناحیه فشاری، سرعت انباشت کرنش پلاستیک در این ناحیه بیشتر از ناحیه کششی می باشد و منحنی های هیستریزیس در سیکل های متوالی به سمت چپ نمودار تمایل پیدا کرده است. برای پوسته های استوانه ای به علت پدیده کمانش موضعی در ناحیه فشاری این رفتار به وضوح در منحنی های هیستریزیس حتی بدون نیروی متوسط غیر صفر مشاهده می گردد.

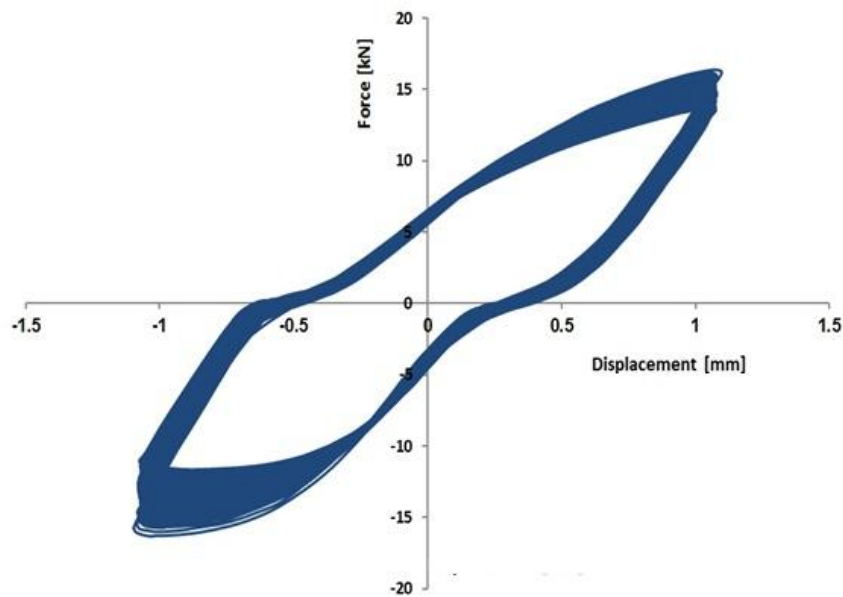


شکل ۳-۹: منحنی های هیستریزیس برای پوسته ای با طول ۲۹۰mm تحت بارگذاری نیرو-کنترلی متقارن محوری.

تحت بارگذاری های جابجایی-کنترلی متقارن محوری مشاهده می شود که پوسته از خود رفتار نرم شوندگی نشان می دهد. در صورتی که اعمال بار در ناحیه فشاری باعث ایجاد کمانش موضعی در پوسته گردد، این کمانش به وجود آمده باعث می گردد سرعت نرم شوندگی پوسته در ناحیه فشاری بیشتر از ناحیه کششی گردد که برای دو طول ۲۳۰mm و ۳۹۰mm با جابجایی ۱mm به ترتیب در شکل ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. در هر دو نمونه مشاهده می شود که در اولین سیکل از بارگذاری، کرنش پلاستیک باقیمانده در ناحیه فشاری بیشتر از ناحیه کششی می باشد و این به دلیل کمانش موضعی ایجاد شده در ناحیه فشاری است. در هر دو آزمایش به دلیل ایجاد کمانش موضعی، سرعت نرم شوندگی در ناحیه فشاری بیشتر از ناحیه کششی منحنی های هیستریزیس می باشد.



شکل ۳-۱: منحنی هیستریزیس برای پوسته ای با طول ۲۳۰ mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترلی متقارن محوری.



شکل ۳-۱۱: منحنی های هیستریزیس برای پوسته ای با طول ۳۹۰ mm تحت بارگذاری جابجایی- کنترل متقارن محوری.

از منحنی های هیستریزیس مشاهده می گردد که در نزدیکی محور افقی، منحنی ها لحظه ای دارای شیب صفر می گردند، لقی موجود در فیکسچرها و پر شدن فضای خالی بین رزوه ها در زمان تغییر وضعیت از کشش به فشار و بالعکس، دلیل افقی شدن منحنی های هیستریزیس در نزدیکی محور افقی می باشد.

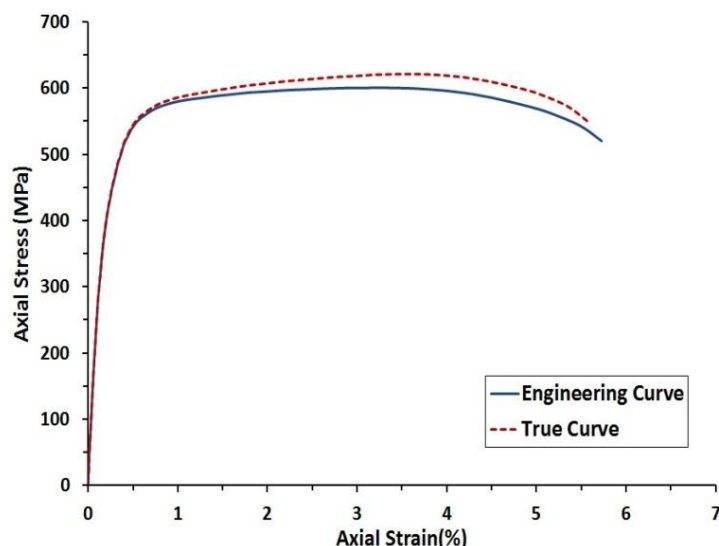
### ۳-۵- نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای CK20

#### ۳-۵-۱- هندسه و خواص مکانیکی

نمونه های مورد آزمایش، پوسته های استوانه ای از جنس فولاد آلیاژی CK20 با ابعاد هندسی نشان داده شده در جدول ۳-۲ می باشند. خواص مکانیکی ماده مورد آزمایش مطابق استاندارد ASTM-E8 تعیین شده است [۴۷]، که منحنی تنش- کرنش مربوطه در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده CK20.

| مشخصات          | مقدار                        |
|-----------------|------------------------------|
| قطر خارجی       | D=42mm                       |
| ضخامت           | t=1.5mm                      |
| طول             | L=250,300,360,450mm          |
| مدول الاستیسیته | E=201(GPa)                   |
| تنش تسلیم       | $\sigma_y = 405(\text{MPa})$ |
| تنش نهایی       | $S_u = 590(\text{MPa})$      |
| ضریب پواسون     | $\nu = 0.33$                 |



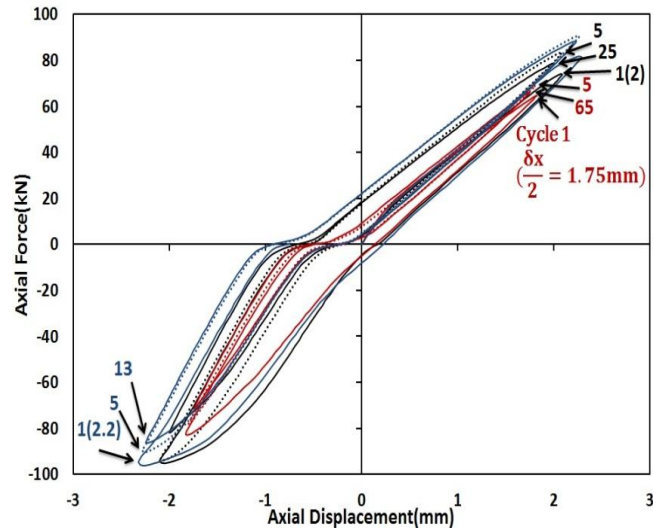
شکل ۳-۱۲: منحنی تنش- کرنش بدست آمده از تست کشش استاندارد برای CK20.

مقدار تنش تسلیم بدست آمده برای فولاد آلیاژی مورد آزمایش از ترسیم خط ۰.۲٪ بدست آمده است. همانگونه که مشاهده می شود، ناحیه پلاستیک منحنی کشش ساده تقریباً افقی می باشد؛ لذا دامنه افزایش نیرو در ناحیه پلاستیک نمونه ها بسیار محدود بوده و با کمترین افزایش نیرو، نمونه ها می شکنند.

### ۳-۵-۲- آزمایش های جابجایی-کنترل

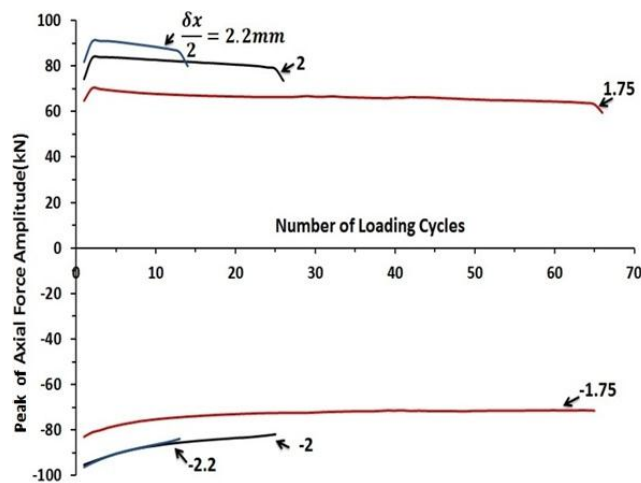
#### ۳-۵-۲-۱- تاثیر دامنه ی جابجایی بر رفتار منحنی های هیستریزس

شکل ۳-۱۳ حلقه های هیستریزس برای سه نمونه از پوسته های استوانه ای CK20 به طول ۲۵۰mm را تحت بارگذاری جابجایی- کنترلی متقارن نشان می دهد. بارگذاری تحت سه دامنه جابجایی با مقادیر ۲.۲mm ، ۲ ، ۱.۷۵  $\delta x/2$  تا شکست نمونه ها اعمال شده است. در ناحیه کشش برای هر سه نمونه در چند چرخه ابتدایی رفتار سخت شوندگی و سپس تا پایداری منحنی ها و در نهایت شکست پوسته، رفتار نرم شوندگی دیده می شود. در ناحیه فشاری برای هر سه نمونه آزمایش شده رفتار نرم شوندگی مشاهده می شود. در هر سه نمونه، جابجایی پلاستیک باقیمانده در ناحیه فشاری بیشتر از ناحیه کششی می باشد.



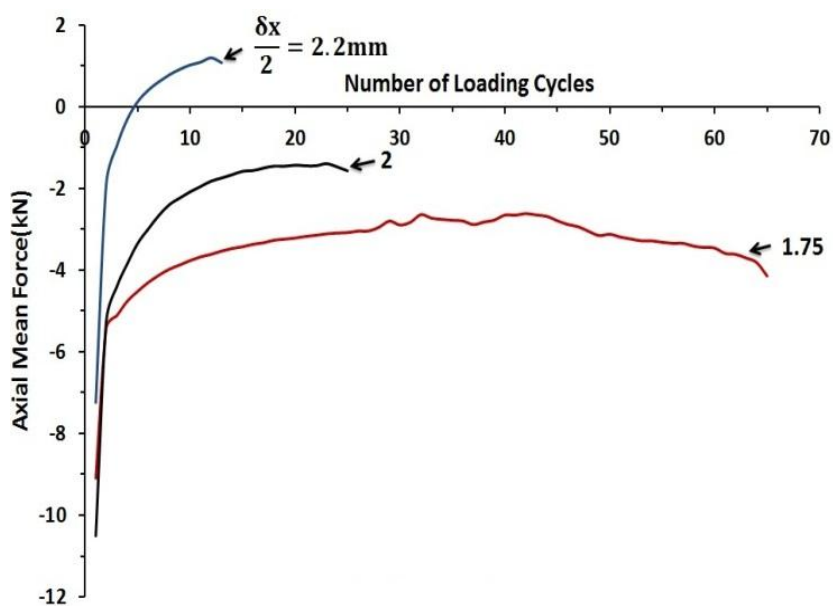
شکل ۳-۱۳: منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای با طول ۲۵۰ mm تحت بارگذاری جابجایی کنترلی با دامنه های ۱.۷۵ mm، ۲ و ۲.۲.

در شکل ۳-۱۴ مقادیر حداکثر نیروهای کششی و فشاری در هر چرخه نسبت به تعداد چرخه ها تا شکست نمونه ترسیم شده است. مشاهده می شود که با افزایش دامنه جابجایی، شیب منحنی نرم شوندگی در هر دو ناحیه کششی و فشاری بیشتر می گردد. همچنین شکست نمونه در تعداد چرخه کمتری ایجاد می شود که به ترتیب افزایش دامنه جابجایی، شکست در تعداد چرخه ۶۵، ۲۵ و ۱۳ اتفاق افتاده است. تغییر ناگهانی نیرو در سیکل اول به علت درگیر شدن رزوه ها در ناحیه فیکسچر می باشد و رفتار نرم شوندگی از سیکل های بعدی قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۴: تغییرات دامنه نیرو نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترلی برای پوسته های با طول ۲۵۰ mm با دامنه های ۱.۷۵ mm، ۲ و ۲.۲.

در شکل ۳-۱۵ تغییرات نیروی متوسط در هر حلقه هیستریزیس نسبت به تعداد چرخه ها تا شکست نمونه ها نشان داده شده است. نیروی متوسط برای هر حلقه هیستریزیس برابر میانگین مجموع حداکثر نیروی کششی و فشاری در آن حلقه هیستریزیس می باشد. افزایش مقدار نیروی متوسط در نمونه های مورد آزمایش نشان می دهد که سرعت نرم شوندگی ناحیه فشاری منحنی های هیستریزیس بیشتر از ناحیه کششی است. در دامنه جابجایی های بزرگتر، مقدار نیروی متوسط سریعتر افزایش می یابد و برای دامنه جابجایی  $2.2\text{mm}$ ، مقدار نیروی متوسط در چرخه های انتهایی مثبت می گردد. مقدار نیروی متوسط در اولین حلقه هیستریزیس برای دامنه جابجایی های کوچکتر، منفی تر می باشد. این رفتار نشان می دهد که تحمل بار ناحیه فشاری نسبت به ناحیه کششی بسیار بیشتر می باشد؛ ولی در دامنه جابجایی های بزرگتر، نیروی متوسط برای اولین حلقه هیستریزیس به سمت صفر نزدیک می شود؛ زیرا در ناحیه فشاری در نمونه، کمانش موضعی اتفاق می افتد.



شکل ۳-۱۵: تغییرات نیروی متوسط نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری جابجایی-کنترلی برای پوسته های با طول  $250\text{mm}$  با دامنه های  $1.75\text{mm}$ ،  $2$  و  $2.2$ .



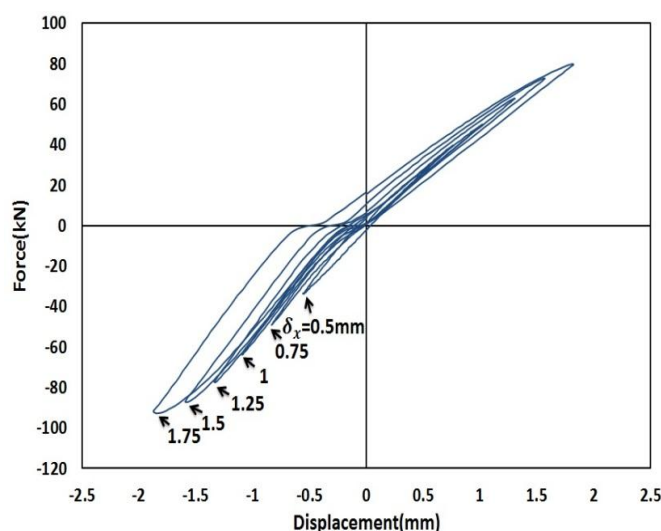
### ۳-۵-۲-۲-تاثیر افزایش مرحله ای دامنه جابجایی بر رفتار نرم شوندهگی پوسته استوانه ای

نمونه ای به طول ۲۵۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترلی به صورت مرحله ای با دامنه جابجایی

۰.۵ و ۰.۷۵ میلیمتر به تعداد ۵ چرخه و دامنه جابجایی های ۱، ۱.۲۵، ۱.۵ و ۱.۷۵ میلیمتر به تعداد ۱۰

چرخه تا شکست پوسته قرار گرفته است. اولین منحنی هیستریزیس برای هر دامنه جابجایی در شکل

۳-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶: منحنی های هیستریزیس برای نمونه ای با طول ۲۵۰mm با افزایش دامنه جابجایی از ۰.۵ تا ۱.۷۵ mm.

در شکل ۳-۱۷ تغییرات دامنه نیرو نسبت به تعداد چرخه برای همان نمونه نشان داده شده است.

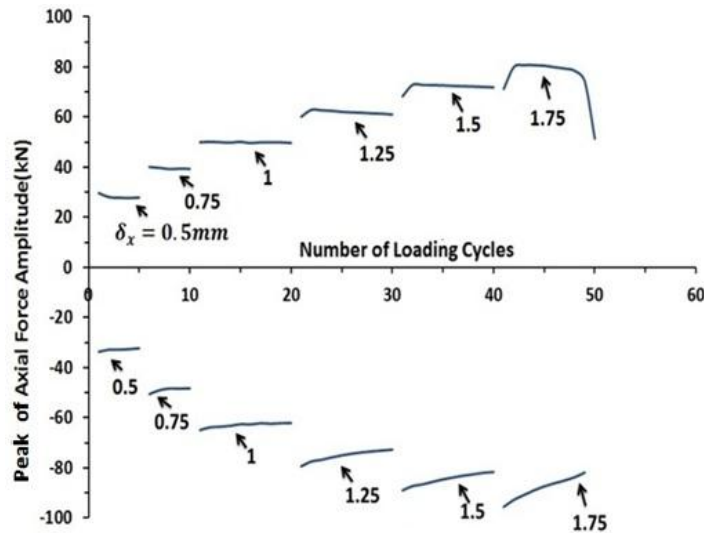
مشاهده می شود که با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندهگی در هر دو ناحیه کششی و فشاری

بیشتر می شود؛ ولی در ناحیه فشاری سرعت نرم شوندهگی در دامنه جابجایی های بالاتر بسیار زیاد می

باشد. این رفتار به دلیل کماتش موضعی ایجاد شده در ناحیه فشاری می باشد. برای دامنه جابجایی های

بالاتر، در چند چرخه ابتدایی در ناحیه کششی، سخت شوندهگی ایجاد شده و سپس رفتار نرم شوندهگی

ادامه می یابد.

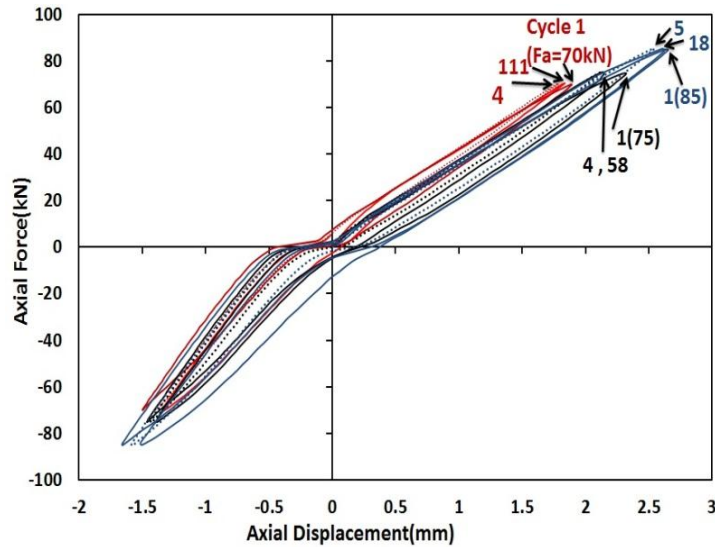


شکل ۳-۱۷: تغییرات دامنه نیرو نسبت به تعداد چرخه برای نمونه ای با طول  $250\text{mm}$  با افزایش دامنه جابجایی از  $0.5\text{mm}$  تا  $1.75\text{mm}$ .

### ۳-۵-۳- آزمایش های نیرو-کنترل

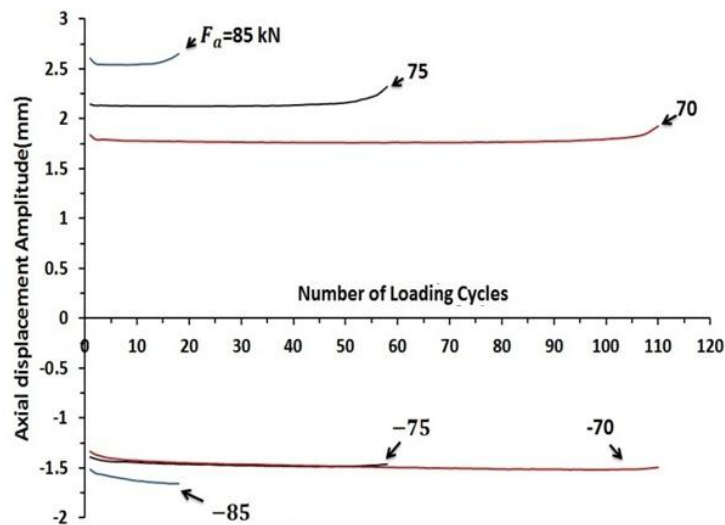
#### ۳-۵-۳-۱- تاثیر دامنه ی نیرو بر رفتار منحنی های هیستریزیس

در شکل ۳-۱۸ منحنی های هیستریزیس سه پوسته استوانه ای با طول  $250\text{mm}$  تحت بارگذاری نیرو-کنترلی متقارن با دامنه های  $70$ ،  $75$  و  $85$  نشان داده شده است. مشاهده می شود که تحت نیروی ثابت، دامنه جابجایی ناحیه کششی بیشتر از ناحیه فشاری می باشد. این رفتار بدلیل نوع ماده مورد آزمایش می باشد. زیرا بیشتر فولاد های آلیاژی تحت بارگذاری کششی و فشاری یکسان، رفتار متفاوتی از خود نشان می دهند. با افزایش مقدار نیرو، افزایش دامنه جابجایی ناحیه کششی بیشتر از ناحیه فشاری می باشد؛ ولی انباشت جابجایی پلاستیک باقیمانده در ناحیه فشاری بیشتر از ناحیه کششی می باشد. همچنین شکست نمونه ها سریعتر اتفاق می افتد که به ترتیب با افزایش مقدار نیرو، تعداد چرخه ها تا شکست نمونه برابر  $111$ ،  $58$  و  $18$  چرخه می باشد.



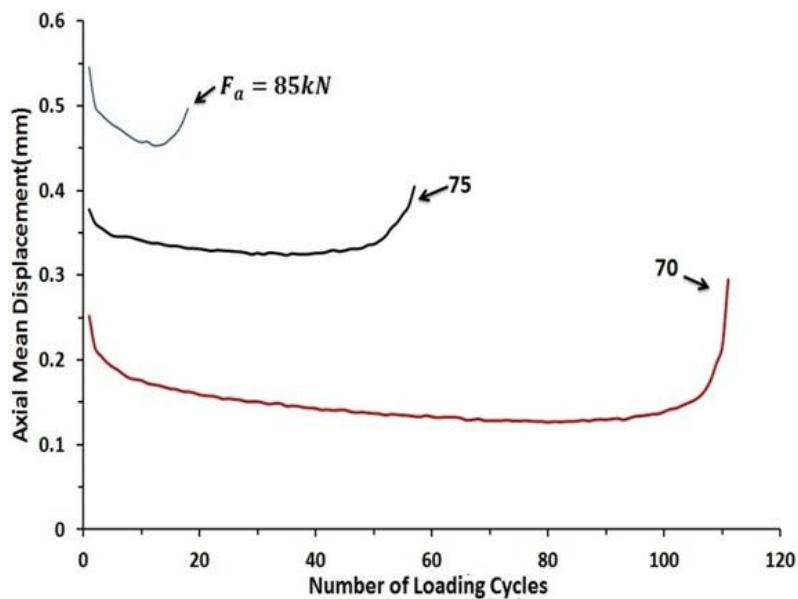
شکل ۳-۱۸: منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای با طول ۲۵۰ mm تحت بارگذاری نیرو- کنترلی متقارن با دامنه های ۷۰، ۷۵ و ۸۵ kN

در شکل ۳-۱۹ تغییرات دامنه جابجایی نسبت به تعداد چرخه ها تا شکست نمونه ها مقایسه شده اند. مشاهده می شود که با افزایش نیرو، دامنه جابجایی در ناحیه فشاری مانند کششی افزایش نمی یابد و برای دو مقدار نیروی ۷۰ و ۷۵ kN، مقادیر دامنه جابجایی در ناحیه فشاری تقریباً منطبق بر یکدیگر هستند. افزایش دامنه جابجایی نسبت به تعداد چرخه ها برای نیروی ۸۵ kN بیشتر می باشد.



شکل ۳-۱۹: تغییرات دامنه جابجایی نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری نیرو- کنترلی متقارن برای پوسته های ۲۵۰ mm با دامنه های ۷۰، ۷۵ و ۸۵ kN

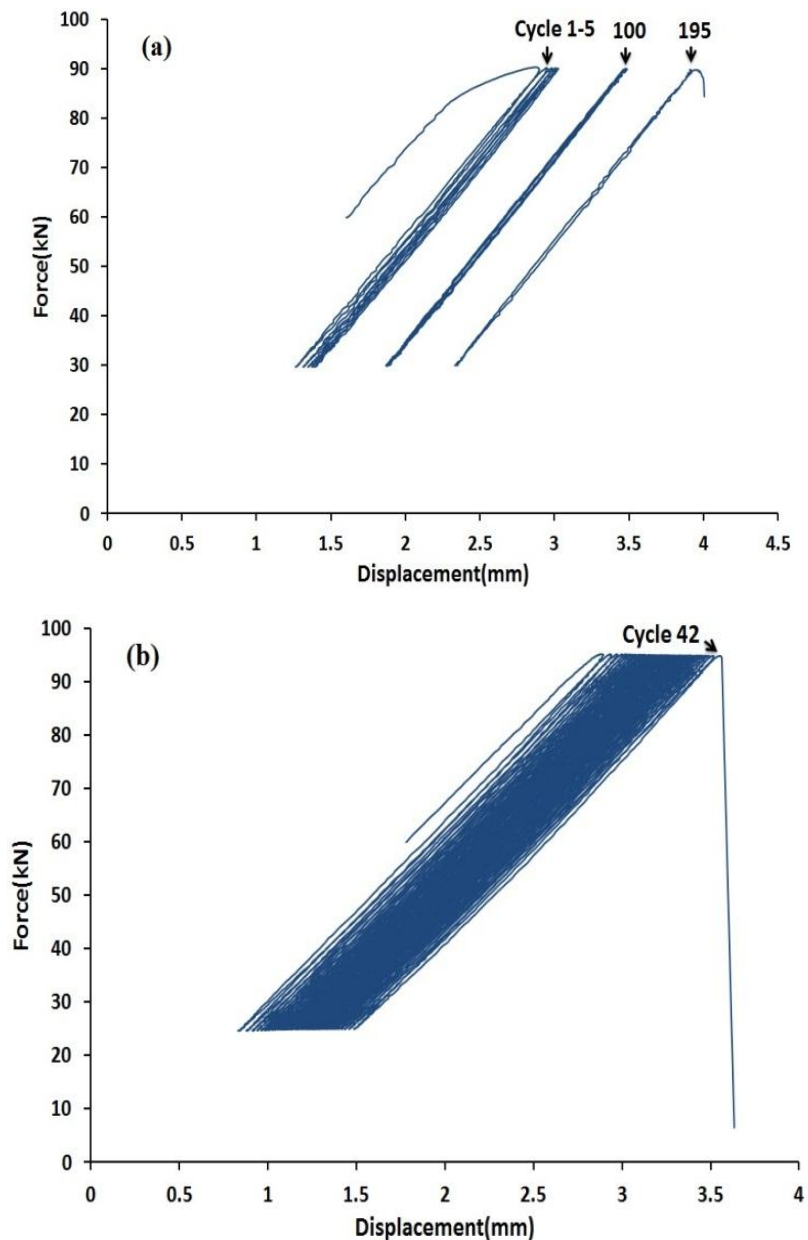
در شکل ۳-۱۹ مشاهده می شود که با افزایش تعداد چرخه ها، دامنه جابجایی در ناحیه فشاری سریعتر از ناحیه کششی رشد میکند. لذا در شکل ۳-۲۰ مشاهده می شود که جابجایی مرکز حلقه های هیستریزیس به تدریج کاهش می یابد و سپس در هنگام شکست، افزایش ناگهانی می یابد. اما چون دامنه جابجایی ناحیه کششی همواره بیشتر از ناحیه فشاری است؛ لذا جابجایی مرکز حلقه های هیستریزیس همواره مقداری مثبت است.



شکل ۳-۲۰: تغییرات جابجایی مرکز حلقه های هیستریزیس نسبت به تعداد چرخه تحت بارگذاری نیرو-کنترلی برای پوسته های ۲۵۰ mm با دامنه های ۷۰، ۷۵ و ۸۵ kN.

### ۳-۵-۳-۲-تاثیر دامنه ی نیرو و نیروی متوسط بر رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای

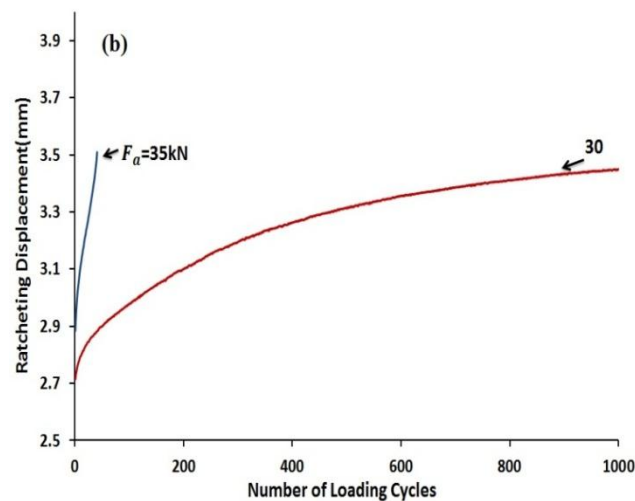
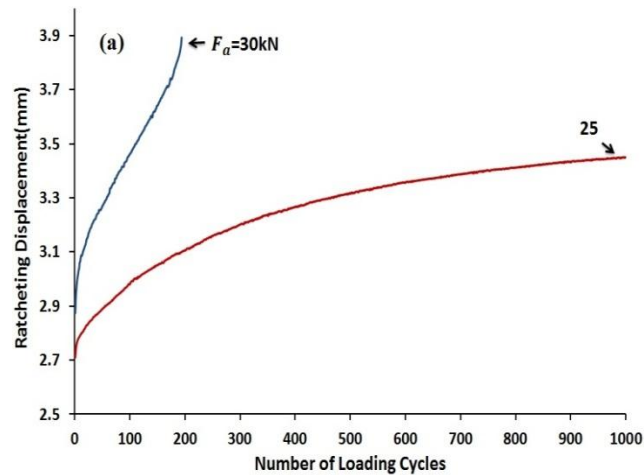
دو آزمایش روی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترلی با نیروی متوسط غیر صفر در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. رفتار رچتینگ تحت این نوع بارگذاری در پوسته ها ایجاد می گردد و انباشت جابجایی پلاستیک طی چرخه های متوالی تا شکست پوسته ادامه می یابد.



شکل ۳-۲۱: رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای (a) طول نمونه ۳۰۰ mm تحت نیروی متوسط ۶۰ kN و دامنه نیروی ۳۰ kN و (b) طول نمونه ۳۶۰ mm تحت نیروی متوسط ۶۰ kN و دامنه نیروی ۳۵ kN.

در شکل ۳-۲۲ نمونه هایی با طول های متفاوت تحت بارگذاری با نیروی متوسط یکسان ۶۰ kN و دامنه نیرو های مختلف مقایسه شده اند. مشاهده می شود که برای طول های متفاوت با افزایش دامنه نیرو، شیب منحنی جابجایی رچتینگ افزایش می یابد و منجر به شکست پوسته می شود. در قسمت (الف) دو نمونه با طول های ۳۰۰ mm تحت بارگذاری نیرو- کنترلی با نیروی متوسط ۶۰ kN و دامنه نیروی ۲۵ kN و ۳۰ kN قرار گرفته اند. مشاهده شده است که نمونه تحت دامنه نیروی ۳۰ kN در چرخه

۱۹۵ می شکند؛ ولی با دامنه نیروی ۲۵kN تا ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری را بدون شکست می تواند تحمل کند. در قسمت (ب) برای طول ۳۶۰mm نیز برای دامنه نیروی بالاتر، نمونه تا قبل از شکست ۴۲ سیکل بارگذاری و در دامنه نیروی ۳۰kN تا ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری را بدون شکست می تواند تحمل کند.

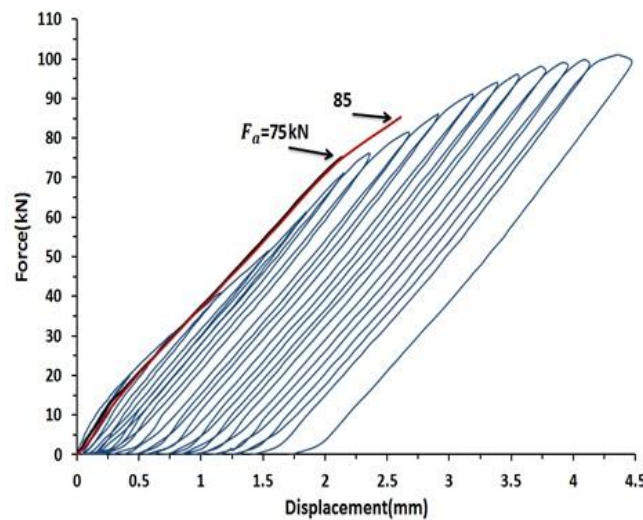


شکل ۳-۲۲: مقایسه رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای با نیروی متوسط ۶۰kN و دامنه نیروهای متفاوت: (a) طول نمونه ۳۰۰mm و (b) طول نمونه ۳۶۰mm.

### ۳-۳-۵-۳- مقایسه منحنی های کشش و فشار تحت بارگذاری چرخه ای و یکنواخت

در شکل ۳-۲۳ رفتار منحنی های هیستریزیس به صورت نیم چرخه کششی تحت بارگذاری نیرو-کنترلی با افزایش نیروی کششی از ۲۰kN تا ۱۰۱kN با دامنه نیروهای به ترتیب ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۷۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰، ۹۳، ۹۵، ۹۷، ۹۸، ۹۹ و ۱۰۰ kN برای نمونه ای با طول ۲۵۰mm در مقایسه با

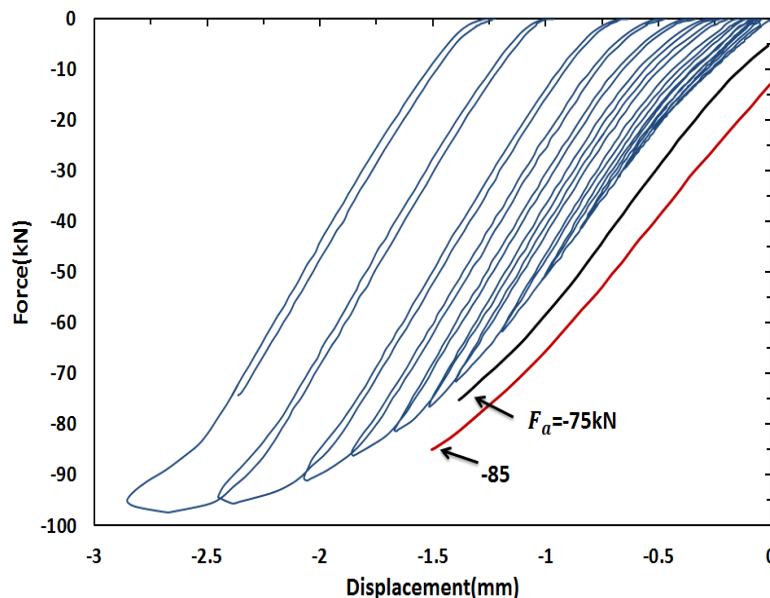
منحنی های کشش یکنواخت نمونه هایی با طول یکسان تحت نیروهای ۷۵ و ۸۵ kN نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دامنه نیرو، مقدار جابجایی پلاستیک باقیمانده در نمونه ای که به صورت چرخه ای بارگذاری کششی روی آن صورت گرفته، افزایش می یابد. افزایش نیرو به صورت نیم چرخه تا شکست پوسته ادامه می یابد. در مقایسه با دو منحنی کشش یکنواخت، مقدار جابجایی ایجاد شده برای نمونه ای با بارگذاری چرخه ای تحت نیروهای یکسان، بیشتر می باشد.



شکل ۳-۲۳: منحنی های هیستریزیس به صورت نیم چرخه کششی تحت بارگذاری نیرو- کنترلی با افزایش نیروی کششی از ۲۰ kN تا ۱۰۱ kN برای نمونه ای با طول ۲۵۰ mm و منحنی های کشش ساده پوسته های استوانه ای با طول یکسان تحت نیروهای ۷۵ kN و ۸۵ kN.

همچنین در شکل ۳-۲۴ منحنی های هیستریزیس به صورت نیم چرخه فشاری تحت بارگذاری نیرو- کنترلی با افزایش نیروی فشاری از ۲۰ kN تا ۱۰۰ kN با دامنه نیروی های به ترتیب ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۷۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰، ۹۵ و ۹۷ kN برای نمونه ای با طول ۲۵۰ mm در مقایسه با ناحیه فشاری اولین منحنی هیستریزیس نمونه هایی با طول یکسان تحت نیروهای ۷۵ و ۸۵ kN موجود در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. افزایش بار فشاری تا کمانش موضعی ایجاد شده در نزدیکی انتهای نمونه که در شکل ۳-۲۵ قسمت c مشاهده می شود، ادامه می یابد. با ادامه بارگذاری و افزایش نیروی فشاری به صورت چرخه ای، مقدار جابجایی پلاستیک باقیمانده در ناحیه فشاری منحنی های

هیستریزیس بیشتر می گردد و در نزدیکی یکی از فیکسچرها دچار کمانش می شود. از مقایسه بین منحنی های هیستریزیس شکل ۳-۲۴ با دو منحنی ناحیه فشاری شکل ۳-۱۸ برای دو دامنه نیروی ۷۵- و ۸۵ kN- مشاهده می شود که فرم کلی منحنی هیستریزیس در ناحیه فشاری برای هر دو نوع بارگذاری مشابه یکدیگر می باشد. با افزایش مقدار نیروی فشاری، مقدار جابجایی باقیمانده در نمونه در هر چرخه نسبت به چرخه قبل بیشتر می گردد. در آخرین بارگذاری چرخه ای، نمونه در ۷۵kN- دچار کمانش می گردد؛ در صورتی که نمونه در چرخه قبلی تا نیروی ۹۷kN- را تحمل کرده بود. این رفتار بدلیل اعمال بارگذاری چرخه ای به صورت نیم چرخه های فشاری روی نمونه می باشد.



شکل ۳-۲۴: منحنی های هیستریزیس به صورت نیم چرخه فشاری تحت بارگذاری با افزایش نیروی فشاری از ۲۰ kN- تا ۱۰۰ kN- برای نمونه ای با طول ۲۵۰ mm و مقایسه با ناحیه فشاری منحنی های هیستریزیس پوسته های استوانه ای با طول یکسان تحت نیروهای ۷۵- و ۸۵ kN- مطابق شکل ۳-۱۸.

به علت استفاده از جوش برای متصل کردن پوسته های استوانه ای به فیکسچرها، استحکام نهایی پوسته ها در مجاورت جوش کاهش می یابد و غالباً پوسته در نزدیکی محل جوش می شکند [۳۳]. همچنین در بارگذاری فشاری، پوسته ها در نزدیکی فیکسچرها دچار کمانش موضعی می شوند. در شکل



۲۵-۳ تعدادی از نمونه ها که شکست در نزدیکی محل جوش اتفاق افتاده و همچنین کمانش ایجاد شده در پوسته ها نشان داده شده است.

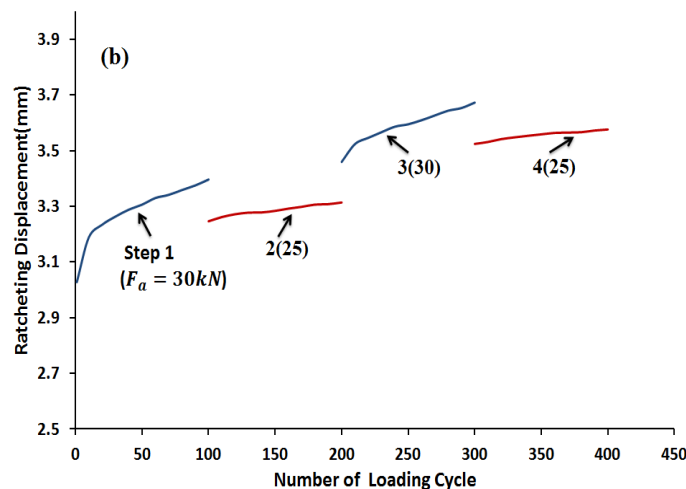
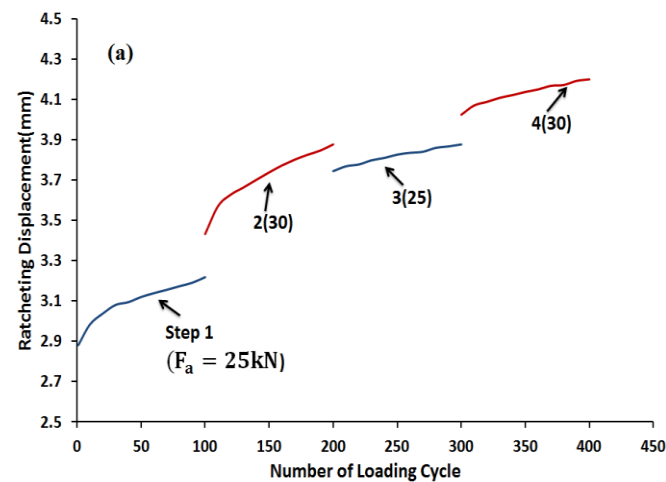


شکل ۳-۲۵: (a) تعدادی از پوسته های استوانه ای تست شده (b) شکست نمونه در مجاورت جوش فیکسچرها (c) کمانش نمونه در مجاورت جوش فیکسچرها.

### ۳-۵-۴ - اثر تاریخچه بارگذاری

در شکل ۳-۲۶ دو پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری با نیروی متوسط ۶۰kN و دامنه متفاوت نیرو قرار گرفته اند. در قسمت (الف) پوسته استوانه ای ابتدا تحت بارگذاری نیروی متوسط ۶۰kN و دامنه نیروی ۲۵kN تا ۱۰۰ چرخه قرار گرفته است؛ سپس پوسته بدون بار شده و آنگاه به تعداد ۱۰۰ چرخه دیگر تحت بارگذاری با نیروی متوسط ۶۰kN و دامنه نیروی ۳۰kN قرار می گیرد. این دو بارگذاری مجددا روی پوسته تکرار می گردد. یک بارگذاری مشابه، ولی با این تفاوت که ابتدا بارگذاری با دامنه نیروی ۳۰kN شروع شده است، در قسمت (ب) نشان داده شده است. در قسمت (الف) مشاهده می شود که رفتار رچتینگ در دو بارگذاری با دامنه نیروی ۲۵kN متفاوت می باشد و این به دلیل حضور بارگذاری با دامنه نیروی ۳۰kN بین این دو بارگذاری می باشد. به علت اینکه بارگذاری با دامنه نیروی ۳۰kN موجب کار سختی در پوسته استوانه ای می گردد؛ رفتار رچتینگ پس از اعمال بارگذاری با دامنه نیروی ۳۰kN کمتر از بارگذاری قبل از آن می باشد. همچنین افت جابجایی پس از اعمال بار با دامنه نیروی ۳۰kN به دلیل بی بار کردن نمونه و اعمال مجدد بارگذاری با دامنه نیروی ۲۵kN می باشد. پدیده کار سختی در قسمت (ب) مشاهده نمی گردد و این بدلیل اعمال بار با دامنه نیروی کمتری بین دو

بارگذاری با دامنه نیروی ۳۰kN می باشد. پس از اعمال بارگذاری در چهار مرحله ۱۰۰ چرخه ای، مشاهده می شود که افزایش جابجایی کل در قسمت (الف) بیشتر از (ب) می باشد. این رفتار به این دلیل می باشد که در بارگذاری قسمت (الف) ابتدا بارگذاری با دامنه نیروی کمتر اعمال شده است و لذا فقط یکبار افت جابجایی بین مراحل بارگذاری مشاهده می گردد.



شکل ۳-۲۶: تاریخچه بارگذاری روی نمونه های با طول ۳۰۰mm و نیروی متوسط ۶۰kN با دامنه متفاوت نیرو (a) دامنه بارگذاری به ترتیب ۲۵، ۳۰، ۲۵، ۳۰ kN و (b) دامنه بارگذاری به ترتیب ۲۵، ۳۰، ۲۵، ۳۰ kN.

### ۳-۶- نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای SS304L

روی پوسته های استوانه ای از جنس SS304L به غیر از آزمایش های نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل که در آنها پارامترهای دامنه جابجایی و دامنه نیرو را تغییر می دهیم، پارامتر گشودگی نیز اضافه گردیده

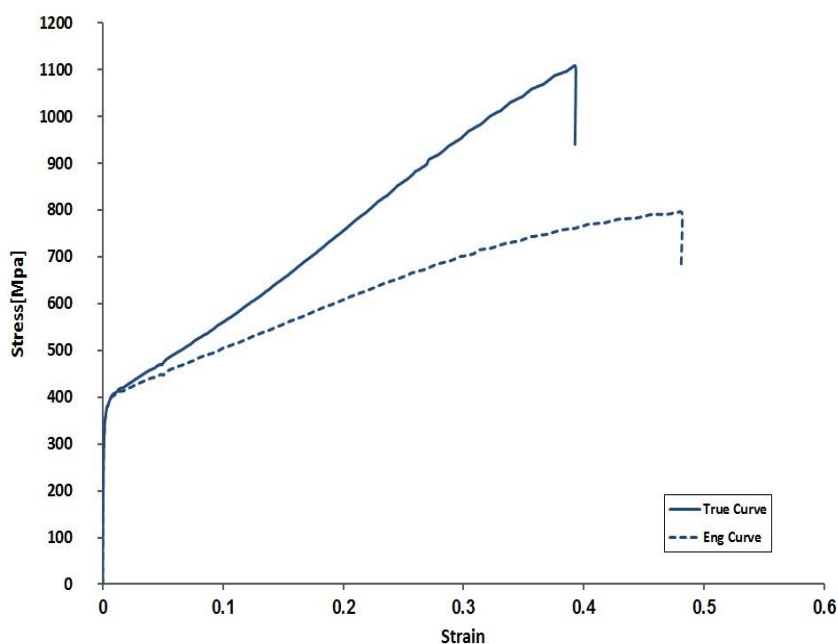
است. تاثیر وجود گشودگی، شعاع گشودگی و مکان گشودگی روی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های استوانه ای از جنس SS304L نیز مورد آزمایش قرار گرفته است.

### ۳-۶-۱ - هندسه و خواص مکانیکی

نمونه های مورد آزمایش پوسته های استوانه ای از جنس فولاد آلیاژی SS304L با ابعاد هندسی نشان داده شده در جدول ۳-۳ می باشند. خواص مکانیکی ماده مورد آزمایش مطابق استاندارد ASTM E8 تعیین شده است [۴۷]، که منحنی تنش- کرنش مربوطه در شکل ۳-۲۷ نشان داده شده است. همانطور که از منحنی کشش ساده مشخص است، ناحیه پلاستیک در نمونه های SS304L بسیار بیشتر از CK20 می باشد. لذا بارگذاری با دامنه های مختلف را می توان در ناحیه پلاستیک انجام داد و رفتار های نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های فولاد ضد زنگ به خوبی قابل مشاهده هستند و با تغییر پارامترها می توان تفاوت رفتارها را مشاهده نمود.

جدول ۳-۳: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS304L.

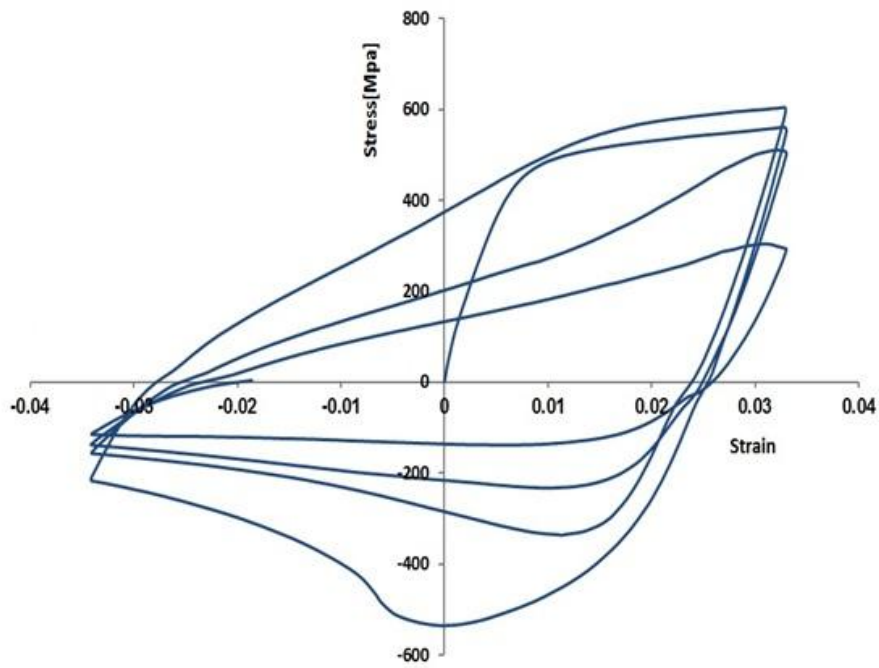
| مشخصات          | مقدار                        |
|-----------------|------------------------------|
| قطر خارجی       | D=42mm                       |
| ضخامت           | t=1.5mm                      |
| طول             | L=250,300,340mm              |
| مدول الاستیسیته | E=201(GPa)                   |
| تنش تسلیم       | $\sigma_y = 331(\text{MPa})$ |
| تنش نهایی       | $S_u = 815(\text{MPa})$      |
| ضریب پواسون     | $\nu = 0.33$                 |



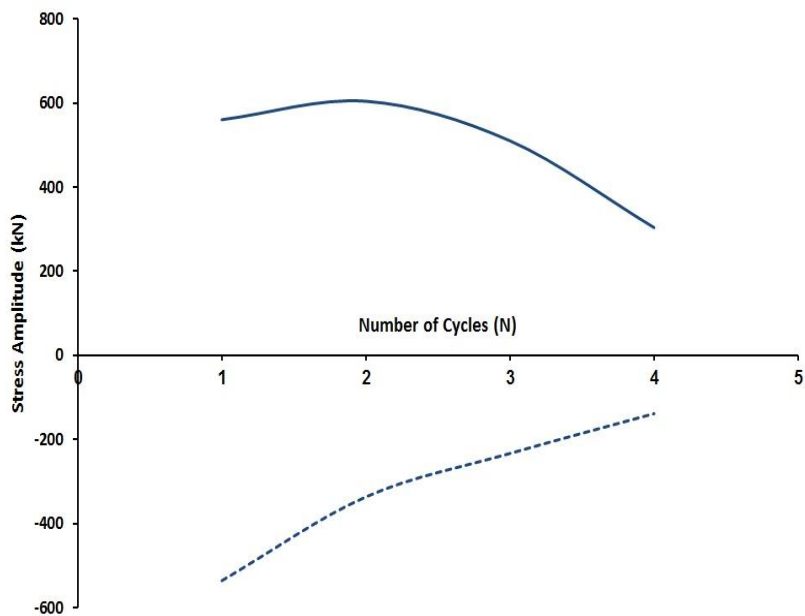
شکل ۳-۲۷: منحنی تنش-کرنش تست کشش ساده برای نمونه SS304L.

### ۳-۶-۲- تاثیر کمانش روی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای

پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰ mm تحت بارگذاری جابجایی کنترل با دامنه جابجایی ۱۰ mm و نرخ بارگذاری ۰.۱ mm/s قرار گرفته است. تحت این بارگذاری، پوسته وارد ناحیه کمانش شده و می توان رفتار منحنی های هیستریزیس را تحت تاثیر کمانش مشاهده نمود. در شکل ۳-۲۸ مشاهده می گردد که پس از ایجاد کمانش در پوسته استوانه ای، رفتار نرم شوندگی در ناحیه کشش به سرعت افزایش می یابد و در نهایت منجر به فروپاشی پوسته استوانه ای می گردد. در شکل ۳-۲۹ نیز دامنه تنش بوجود آمده در ناحیه کشش و فشار منحنی های هیستریزیس نشان داده شده است و می توان مشاهده کرد که در هر دو ناحیه، نرم شوندگی در پوسته استوانه ای بوجود می آید و در سیکل های متوالی مشاهده می شود که تحمل بار در ناحیه فشاری به علت کمانش بوجود آمده بسیار کاهش می یابد؛ همچنین تحت تاثیر کمانش، نرم شوندگی در ناحیه کششی به شدت افزایش می یابد.



شکل ۳-۲۸: منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰mm.



شکل ۳-۲۹: حداکثر و حداقل تنش در منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰mm.

در شکل ۳-۳۰ پوسته استوانه ای در زمان کمانش نشان داده شده است. مشاهده می شود که تغییر شکل ها هم در وسط طول نمونه و هم در مجاورت فیکسچرها اتفاق افتاده است.

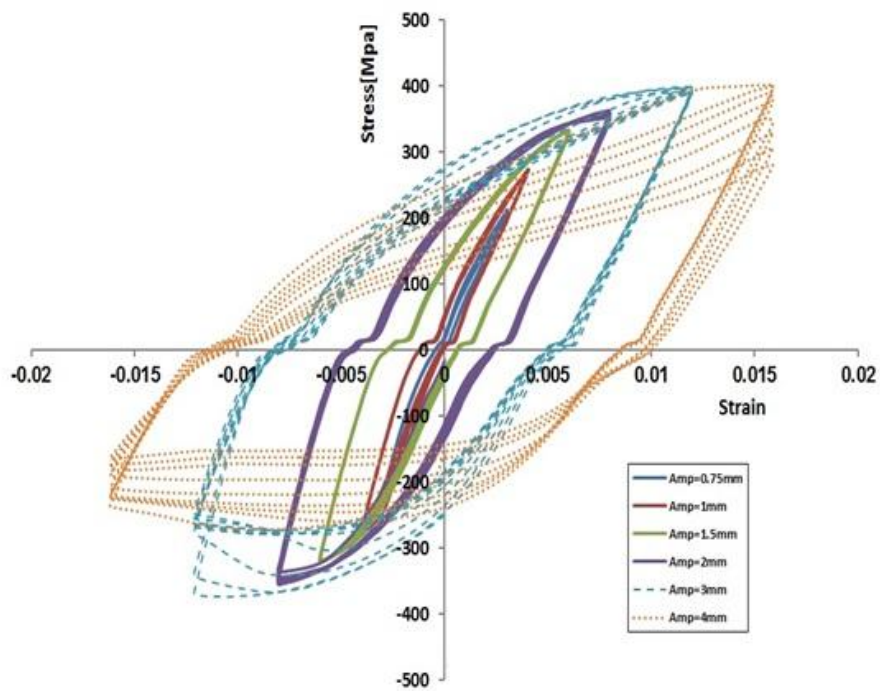


شکل ۳-۳۰: کمانش پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰ mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰ mm.

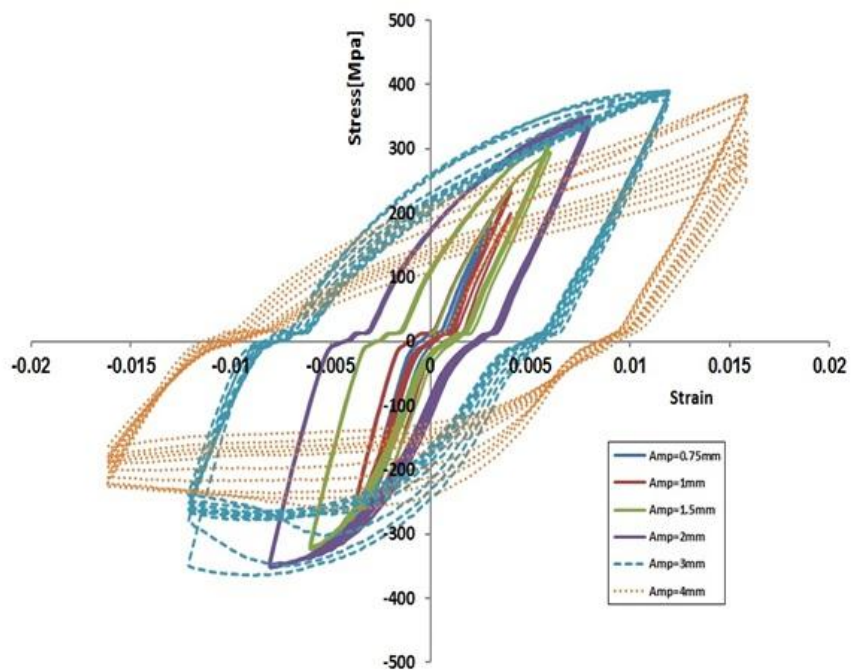
### ۳-۶-۳- تاثیر تاریخچه بارگذاری

#### ۳-۶-۳-۱- تاثیر ترتیب بارگذاری روی رفتار نرم شوندهگی پوسته استوانه ای

دو آزمایش روی پوسته های استوانه ای با طول ۲۵۰ mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل در محدوده دامنه جابجایی ۰.۷۵ mm تا ۴ mm به صورت افزایشی با نرخ بارگذاری ۰.۱ mm/s انجام شده است؛ ولی با این تفاوت که در ابتدا پوسته تحت بارگذاری فشاری تا دامنه جابجایی تعیین شده قرار می گیرد و سپس به ناحیه کششی وارد می شود و در آزمایش بعدی بالعکس. همانطور که در شکل ۳-۳۱ و شکل ۳-۳۲ مشاهده می شود، منحنی های هیستریزس برای دو آزمایش نشان داده شده است.

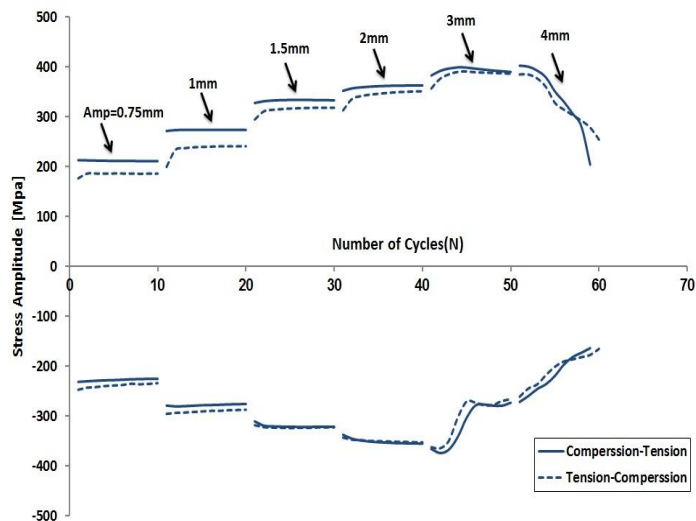


شکل ۳-۳۱: منحنی های هیستریزس پوسته استوانه ای از جنس فولاد ضد زنگ تحت بارگذاری جابجایی-کنترل به ترتیب فشاری- کششی.



شکل ۳-۳۲: منحنی های هیستریزس پوسته استوانه ای از جنس فولاد ضد زنگ تحت بارگذاری جابجایی-کنترل به ترتیب کششی- فشاری.

برای هر دو آزمایش در دامنه ۳mm پوسته های استوانه ای دچار کماتش شده و پس از آن سرعت نرم شوندگی افزایش می یابد. در شکل ۳-۳۳ مقایسه پیک های تنش در منحنی های هیستریزیس دو آزمایش با هم مقایسه شده اند.



شکل ۳-۳۳: پیک های تنش در منحنی های هیستریزیس برای دو آزمایش جابجایی-کنترل با ترتیب بارگذاری متفاوت.

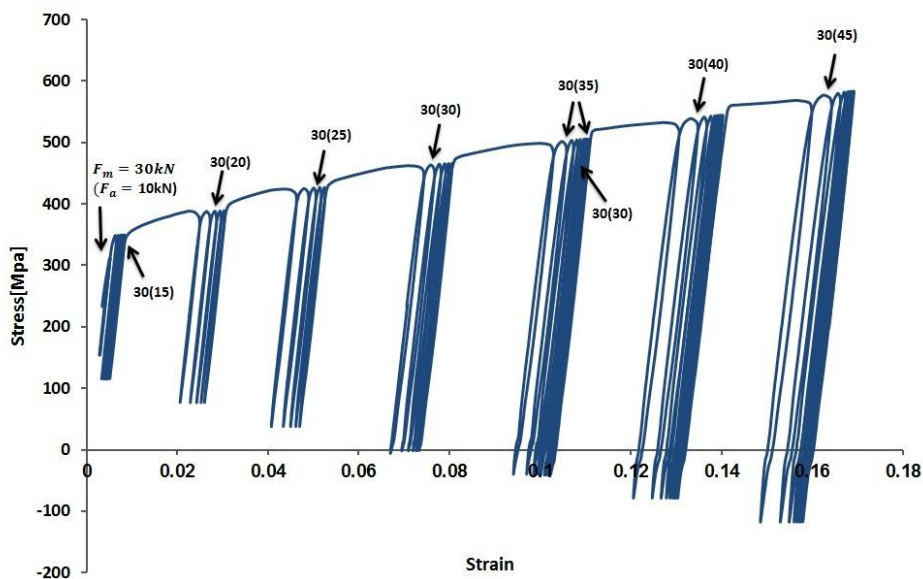
از مقایسه دو آزمایش انجام شده مشاهده می گردد که تحمل بار فشاری برای آزمایشی که ابتدا تحت بارگذاری کششی قرار گرفته است بیشتر می باشد و وقتی پوسته دچار کماتش می گردد، نقاط حداکثر تنش فشاری در هر دو آزمایش تقریباً برابر می شود. ولی تحمل بار کششی برای آزمایشی که ابتدا تحت بارگذاری فشاری قرار گرفته در مقایسه با آزمایش دوم، همواره بیشتر می باشد.

### ۳-۶-۲- تاثیر تاریخچه بارگذاری روی رفتار رجتینگ پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ

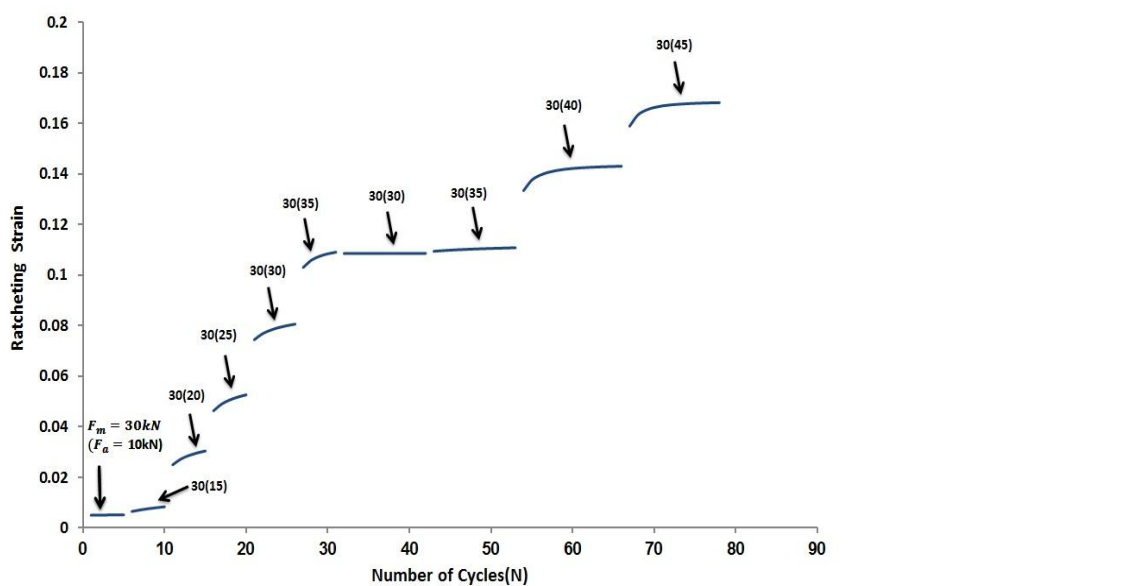
روی پوسته استوانه ای با طول ۲۵۰mm بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط ۳۰kN و دامنه تنش افزایشی از ۱۰kN تا ۴۵kN به صورت افزایشی با نرخ بارگذاری در محدوده ۲ kN/s تا ۲.۹ kN/s انجام شده است. تحت این بارگذاری همانطور که از شکل ۳-۳۴ مشاهده می شود، به علت نامتقارن بودن بارگذاری نیرو-کنترل، در پوسته رفتار رجتینگ ایجاد می گردد و با افزایش دامنه جابجایی سرعت



رچتینگ در پوسته افزایش می یابد. تحت این بارگذاری در دامنه نیروی ۳۵kN بارگذاری به دامنه نیروی ۳۰kN کاهش یافته و پس از اعمال بارگذاری در این دامنه نیرو، مجدداً بارگذاری افزایشی روی پوسته استوانه ای ادامه می یابد. تاثیر تاریخچه بارگذاری روی رفتار رچتینگ در شکل ۳-۳۵ کاملاً مشخص می باشد.



شکل ۳-۳۴: رفتار رچتینگ در پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ تحت بارگذاری نیرو-کنترل.



شکل ۳-۳۵: تاثیر تاریخچه بارگذاری روی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ.

شیب کرنش رچتینگ در دامنه نیروی ۳۰kN پس اعمال بارگذاری با دامنه نیروی ۳۵kN نسبت به قبل از اعمال بار ۳۵kN کاهش یافته و تقریباً نزدیک به صفر است. این به علت تاریخچه بارگذاری با نیروی بیشتر می باشد که باعث سخت تر شدن پوسته استوانه ای شده و نرخ رچتینگ را در ادامه بارگذاری با نیروی کمتر کاهش می دهد.

### ۳-۶-۴- تاثیر گشودگی در پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری چرخه ای

آزمایش های جابجایی-کنترل و نیرو-کنترل روی پوسته های استوانه ای که دارای گشودگی می باشند انجام گرفته است تا تاثیر وجود گشودگی، شعاع گشودگی و مکان گشودگی روی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های استوانه ای مورد بررسی قرار گیرد.

پوسته های استوانه ای با طول ۲۵۰mm بدون گشودگی و به همراه گشودگی با شعاع ۶mm در مکان

$\frac{1}{4}$  و  $\frac{3}{4}$  طول نمونه، برای تاثیر مکان گشودگی و با شعاع گشودگی ۹mm در مکان  $\frac{1}{4}$  طول نمونه، برای تاثیر

شعاع گشودگی، روی رفتار پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری های چرخه ای مورد آزمایش قرار گرفته است.

### ۳-۶-۴-۱- تاثیر گشودگی روی رفتار نرم شوندگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

آزمایش های بارگذاری جابجایی-کنترل با افزایش دامنه جابجایی از ۰.۷۵mm تا ۴mm روی پوسته های استوانه ای با طول ۲۵۰mm و با نرخ بارگذاری ۰.۱ mm/s انجام شده است. روی دو نمونه از پوسته

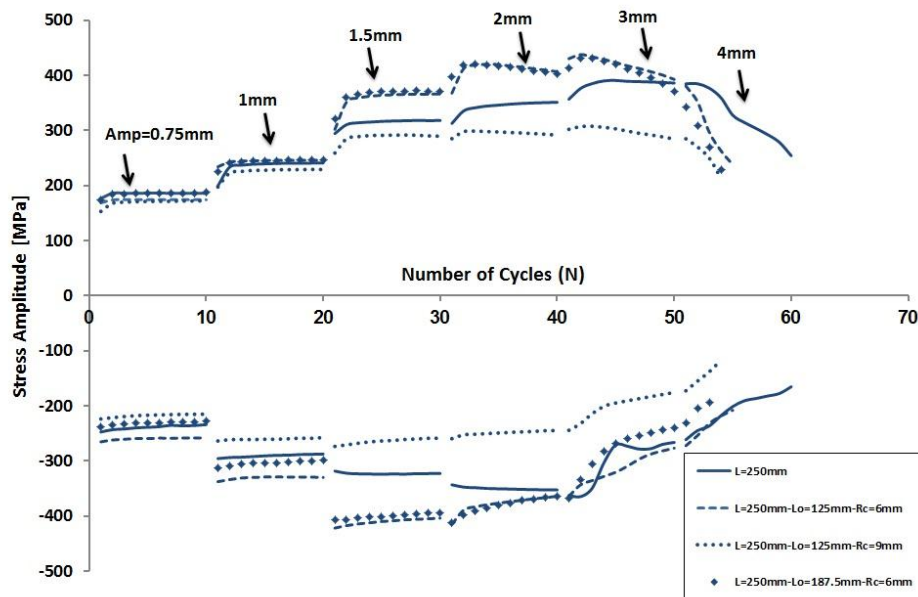
های استوانه ای، گشودگی های دایروی شکل با شعاع ۶mm در  $\frac{1}{4}$  و  $\frac{3}{4}$  طول نمونه و گشودگی با شعاع

۹mm در  $\frac{1}{4}$  طول نمونه ایجاد شده است تا تاثیر وجود گشودگی، شعاع گشودگی و مکان گشودگی روی

پوسته استوانه ای با یک پوسته استوانه ای بدون گشودگی مقایسه گردد.

همانطور که در شکل ۳-۳۶ مشاهده می گردد، پیک های تنش در ناحیه کششی و فشاری منحنی های هیستریزیس برای چهار آزمایش مختلف بدست آمده است. برای پوسته بدون گشودگی رفتار سخت شوندگی در ناحیه کششی مشاهده می گردد. ولی در ناحیه فشاری در دو مرحله اول رفتار نرم شوندگی و در دو مرحله بعدی رفتار سخت شوندگی مشاهده می گردد. در نهایت در دامنه جابجایی ۳mm پوسته استوانه ای دچار کماتش می گردد. پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، در دامنه جابجایی اولیه در ناحیه کشش دارای تحمل بار کمتری نسبت به نمونه بدون گشودگی می باشد و این به دلیل وجود گشودگی با شعاع ۶mm در وسط طول نمونه می باشد. ولی پس از وارد شدن به ناحیه فشاری تحمل بار ناحیه فشاری آن بیشتر از نمونه بدون گشودگی می باشد که این پدیده به علت نوع بارگذاری می باشد که روی نمونه اعمال می گردد؛ زیرا در دامنه جابجایی های بالاتر مشاهده می گردد که تحمل بار کششی و فشاری نمونه با گشودگی، بیشتر از نمونه بدون گشودگی می باشد. یکی از دلایل این پدیده چین خوردگی هایی می باشد که در کناره های گشودگی ایجاد می گردد و تحمل بار را در هر دو ناحیه در ادامه بارگذاری افزایش می دهد. اما مشاهده می شود که در دامنه جابجایی های بالاتر به علت ترک های ایجاد شده در کناره های گشودگی تحمل بار در مقایسه با نمونه بدون گشودگی به شدت کاهش می یابد (شکل ۳-۳۷). در قسمت هایی از مراحل بارگذاری که نمونه بدون گشودگی دارای رفتار سخت شوندگی می باشد، نمونه دارای گشودگی به علت وجود گشودگی، رفتار نرم شوندگی از خود نشان می دهد. نمونه دارای گشودگی با شعاع گشودگی ۹mm در تمامی مراحل بارگذاری، رفتار نرم شوندگی از خود نشان می دهد. همچنین تحمل بار کششی و فشاری برای این نمونه نسبت به دو نمونه فوق الذکر، کمتر می باشد و مشاهده می شود که با وجود چین خوردگی های ایجاد شده در کناره های گشودگی در این نمونه باعث افزایش تحمل بار در مقایسه با نمونه بدون گشودگی نمی باشد و این بدلیل افزایش شعاع گشودگی در مقایسه با نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm می باشد. در نهایت رفتار نمونه ای که گشودگی با شعاع ۶mm در  $\frac{3}{4}$  طول آن ایجاد گردیده، رفتار مشابهی در ناحیه کشش و فشار، نسبت به همان نمونه با همان شعاع گشودگی ولی در وسط طول نمونه دارد. هر چهار نمونه در دامنه جابجایی ۳mm در ناحیه

فشاری، ناگهان تحمل بار فشاری آنها کاهش یافته و رفتار نرم شوندگی آنها افزایش می یابد. همچنین هر چهار نمونه در دامنه جابجایی 4mm به فروپاشی می رسند.



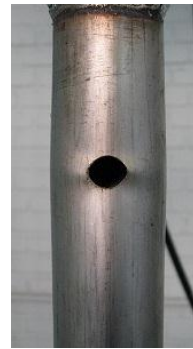
شکل ۳-۳۶: تاثیر وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی در پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.

در شکل ۳-۳۷ تعدادی از آزمایش های انجام شده روی پوسته های استوانه ای دارای گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می گردد، رفتار پوسته های استوانه ای با طول 250mm در مجاورت گشودگی در مراحل مختلفی از بارگذاری نشان داده شده است که به ترتیب عبارت است از: قبل از بارگذاری، بارگذاری با دامنه جابجایی 2mm در ناحیه فشاری، بارگذاری با دامنه جابجایی 3mm در ناحیه فشاری، بارگذاری با دامنه جابجایی 3mm در ناحیه کششی و در نهایت هنگام فروپاشی نمونه.

(a)

(b)

(c)

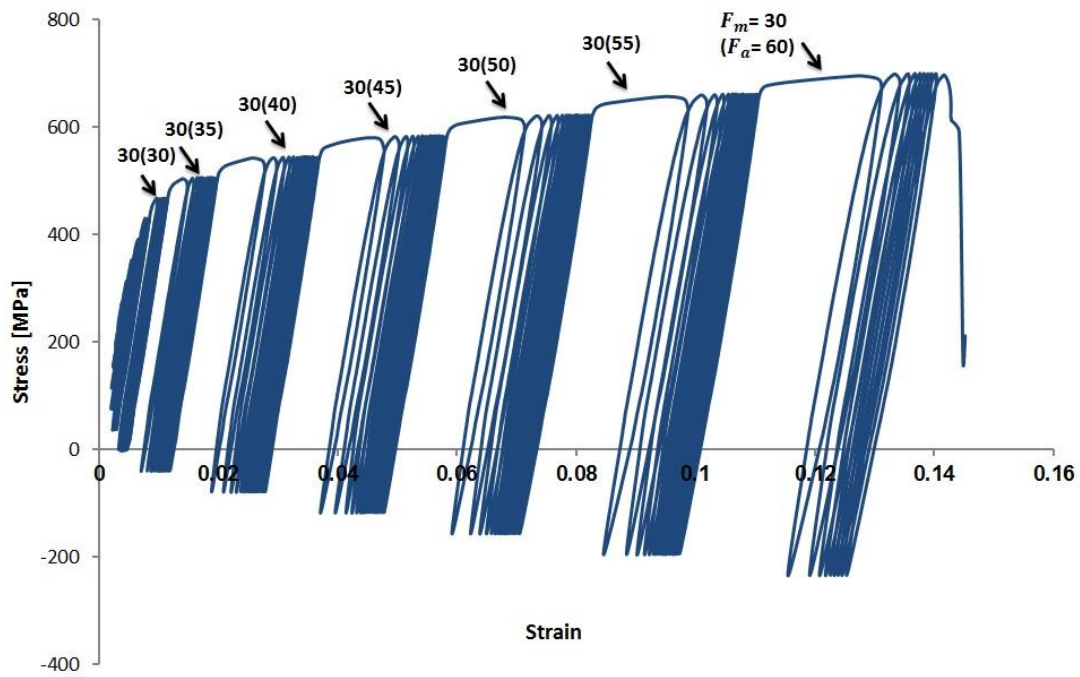




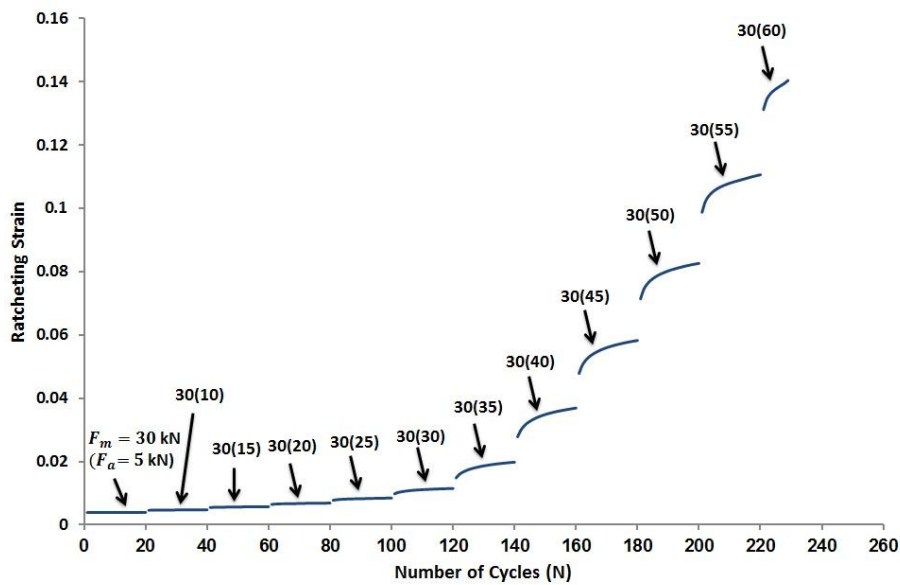
شکل ۳-۳۷: رفتار پوسته های استوانه ای به طول  $250\text{mm}$  در مجاورت گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل ، (a) دارای گشودگی با شعاع  $6\text{mm}$  در وسط طول نمونه، (b) دارای گشودگی با شعاع  $9\text{mm}$  در وسط طول نمونه، (c) دارای گشودگی با شعاع  $6\text{mm}$  در نیمه بالایی طول نمونه .

### ۳-۴-۶-۲-تاثیر گشودگی روی رفتار رچتینگ تحت بارگذاری نیرو-کنترل

تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی متوسط  $30\text{kN}$  و دامنه نیروی افزایشی از  $5\text{kN}$  و  $60\text{kN}$  و با نرخ بارگذاری  $2\text{ kN/s}$  روی پوسته های استوانه ای تاثیر گشودگی، شعاع گشودگی و مکان گشودگی مورد آزمایش قرار گرفته است. در شکل ۳-۳۸ رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای بدون وجود گشودگی، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳-۳۹ کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری آورده شده است. از شکل ها می توان مشاهده کرد که با افزایش دامنه نیرو روی پوسته استوانه ای، کرنش پلاستیک در نمونه انباشت می شود و در دامنه نیرو های بالاتر، کرنش پلاستیک با سرعت بالاتری انباشت می گردد و رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تا شکست ادامه می یابد. همچنین در دامنه نیرو های بالاتر، سرعت رچتینگ افزایش می یابد.



شکل ۳-۳۸: رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل روی پوسته استوانه ای فولاد ضد زنگ بدون گشودگی.

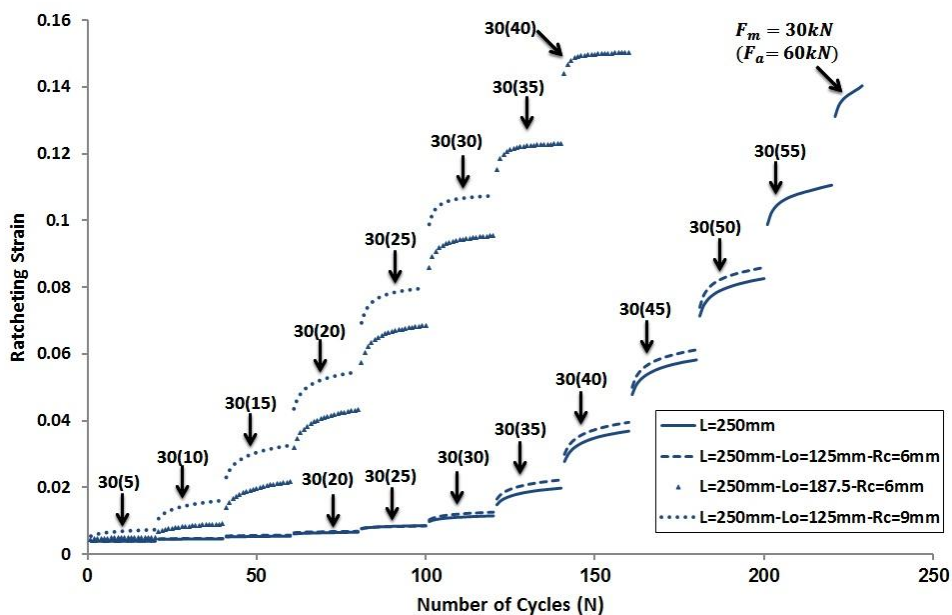


شکل ۳-۳۹: کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل بارگذاری روی پوسته استوانه ای بدون گشودگی.

در شکل ۳-۴۰ رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای با وجود گشودگی مورد مقایسه قرار گرفته است. تاثیر وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی روی رفتار رچتینگ پوسته ها، با نمونه ای که بدون

گشودگی می باشد مورد بررسی قرار گرفته است. از مقایسه منحنی های کرنش رچتینگ می توان مشاهده کرد، نمونه ای که دارای گشودگی با شعاع ۶mm در وسط طول نمونه می باشد، رفتاری مشابه همان نمونه، ولی بدون وجود گشودگی دارد. این نمونه کمی نرخ کرنش رچتینگ بیشتری نسبت به نمونه مشابه ولی بدون وجود گشودگی دارد. همچنین در دامنه نیروی ۵۰kN به فروپاشی می رسد. نمونه

ای که دارای گشودگی با شعاع گشودگی مشابه ولی در  $\frac{3}{4}$  طول نمونه می باشد، دارای کرنش رچتینگ بیشتری نسبت به دو نمونه قبلی می باشد و همچنین شیب منحنی کرنش رچتینگ آن نیز بیشتر است. این نمونه سریعتر از نمونه با گشودگی ۶mm در وسط طول نمونه به فروپاشی می رسد. در نهایت نمونه ای که دارای شعاع گشودگی ۹mm در وسط طول نمونه است، دارای رفتار شدیدتری در انباشت کرنش پلاستیک باقیمانده نسبت به نمونه های قبلی می باشد. همچنین شیب منحنی کرنش رچتینگ این نمونه بسیار بیشتر از نمونه های قبلی بوده و سریعتر از نمونه های قبلی به فروپاشی می رسد.

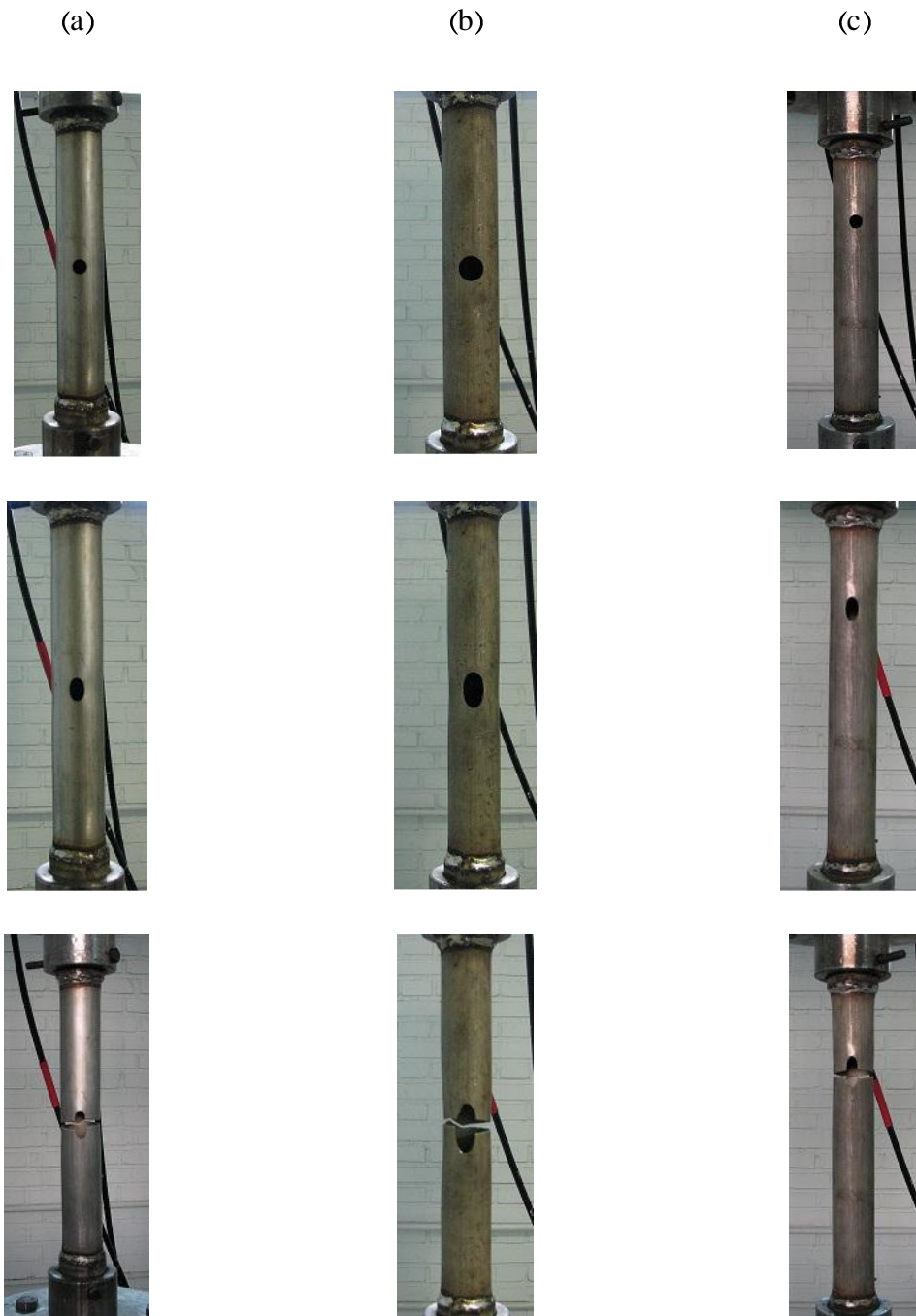


شکل ۳-۴: مقایسه رفتار رچتینگ پوسته های استوانه ای و تاثیر گشودگی روی نمونه ها.

در شکل ۳-۴ رفتار مکانیکی تعدادی از آزمایش های انجام شده روی پوسته های استوانه ای دارای گشودگی تحت بارگذاری نیرو-کنترل نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می گردد،



رفتار پوسته های استوانه ای با طول ۲۵۰mm در مجاورت گشودگی در مراحل مختلفی از بارگذاری نشان داده شده است که به ترتیب عبارت است از: قبل از بارگذاری، هنگام بارگذاری و در نهایت هنگام فروپاشی نمونه.

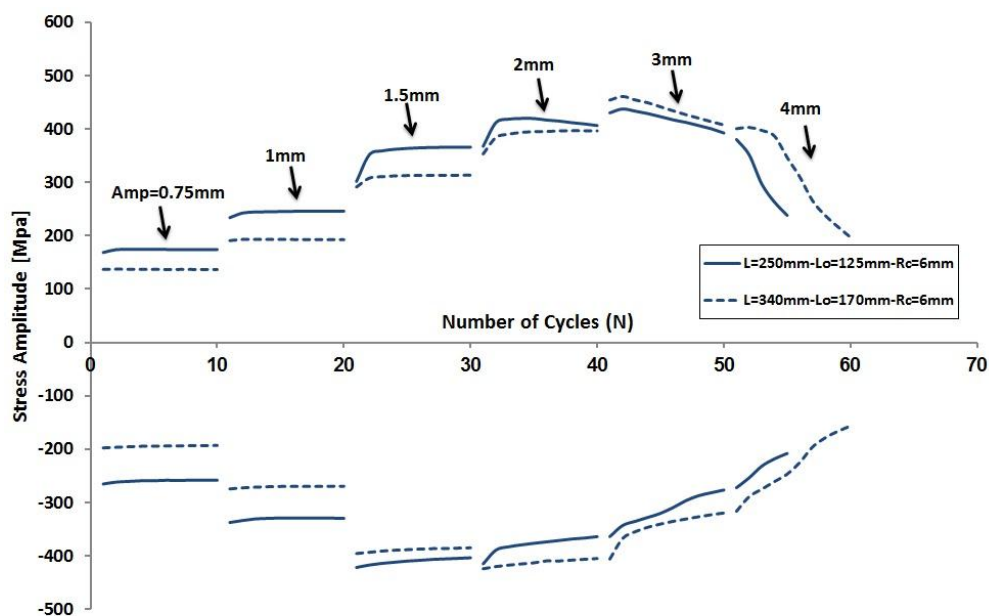


شکل ۳-۴۱: رفتار پوسته های استوانه ای به طول ۲۵۰mm در مجاورت گشودگی تحت بارگذاری نیرو-کنترل، (a) دارای گشودگی با شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، (b) دارای گشودگی با شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، (c) دارای گشودگی با شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه .

### ۳-۶-۵- تاثیر طول به همراه گشودگی روی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری چرخه ای

#### ۳-۶-۵-۱- تاثیر طول به همراه گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

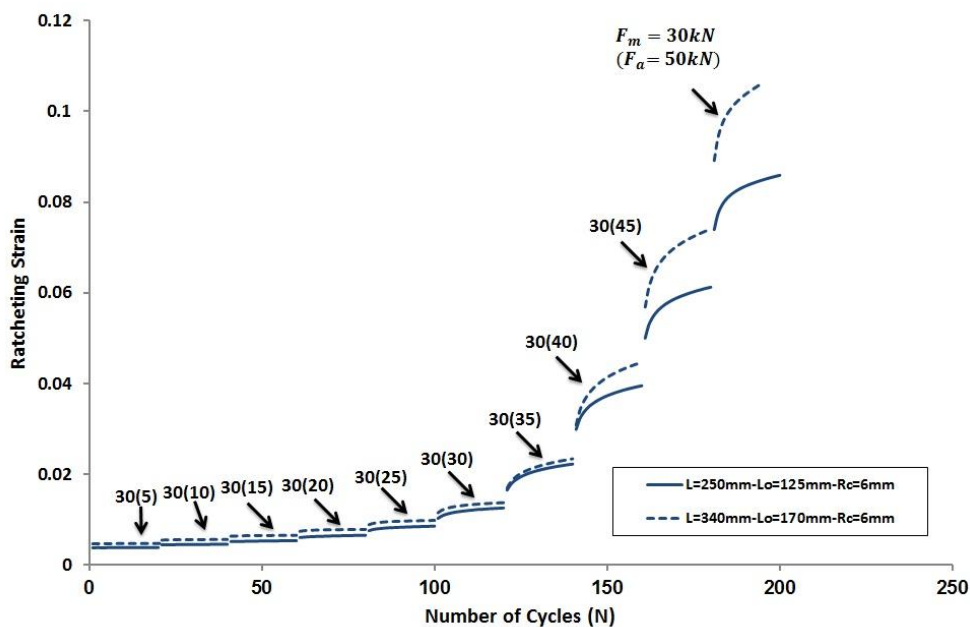
همانطور که در شکل ۳-۴۲ مشاهده می شود، دو نمونه با طول های ۲۵۰mm و ۳۴۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۰.۷۵mm تا ۴mm و با نرخ بارگذاری ۰.۱ mm/s قرار گرفته اند. هر دو نمونه دارای گشودگی با شعاع ۶mm در وسط طول نمونه ها می باشند. همانطور که از شکل ۳-۴۲ مشاهده می شود، تا دامنه جابجایی ۱.۵mm، تحمل بار کششی و فشاری نمونه کوتاه تر بیشتر می باشد. هر دو نمونه دارای رفتار نرم شوندگی در ناحیه فشاری می باشند. همچنین در دامنه جابجایی ۳mm تحمل بار فشاری هر دو نمونه به شدت کاهش یافته و پس از آن سرعت نرم شوندگی نمونه ها در هر دو ناحیه افزایش می یابد.



شکل ۳-۴۲: تاثیر طول به همراه گشودگی روی رفتار پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی کنترل.

### ۳-۶-۵-۲- تاثیر طول به همراه گشودگی تحت بارگذاری نیرو-کنترل

همانطور که از شکل ۳-۴۳ مشاهده می شود، دو نمونه با طول های ۲۵۰mm و ۳۴۰ mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیرو متوسط ۳۰kN و دامنه نیرو افزایشی در محدوده ۵kN تا ۵۰kN و با نرخ بارگذاری ۲ kN/s قرار گرفته اند. هر دو نمونه دارای گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه ها می باشند. نمونه کوتاهتر دارای کرنش رچتینگ کمتری نسبت به نمونه بلندتر بوده و شیب منحنی کرنش رچتینگ کمتری دارد. هر دو نمونه در نیروی کل ۸۰kN به فروپاشی می رسند. نمونه ها در دامنه نیرو های کمتر از ۳۵kN دارای کرنش رچتینگ مشابهی می باشند؛ ولی با افزایش دامنه نیرو، رفتار رچتینگ نمونه بلندتر، شدیدتر می گردد.



شکل ۳-۴۳: تاثیر طول به همراه گشودگی روی رفتار پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل.

در شکل ۳-۴۴ تعدادی پوسته استوانه ای از جنس SS304L قبل و بعد از انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: تعدادی پوسته استوانه ای با طول های متفاوت با و بدون گشودگی، (a) قبل از انجام آزمایش، (b) بعد از انجام آزمایش.

### ۳-۷- نتیجه گیری

در این فصل رفتار تجربی پوسته های استوانه ای با جنس های St37، CK20 و SS304L تحت بارگذاری های چرخه ای مورد بررسی قرار گرفت. بارگذاری ها تحت شرایط نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل روی نمونه ها اعمال گردید و تاثیر پارامترهای مختلف مانند طول نمونه، وجود گشودگی، شعاع گشودگی، مکان گشودگی، دامنه نیرو، دامنه جابجایی و ترتیب بارگذاری روی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایش های تجربی در زیر گزارش شده است.

۱- تحت بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری، رفتار رچتینگ در نمونه ها ایجاد می گردد. در تمامی نمونه ها با ادامه بارگذاری سیکلی در دامنه نیروی یکسان، نرخ کرنش رچتینگ کاهش می یابد. همچنین با افزایش دامنه نیرو، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می یابد و نمونه در تعداد سیکل کمتری می شکند.

۲- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری، در نمونه های St37 و CK20 رفتار نرم شوندگی مشاهده می شود ولی در نمونه های SS304L، در تمامی دامنه جابجایی ها، رفتار نرم شوندگی مشاهده نمی شود. در همه نمونه های آزمایش شده، با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندگی افزایش می یابد و در تعداد سیکل کمتری نمونه می شکند.

۳- ناحیه پلاستیک در منحنی آزمایش کشش ساده نمونه های St37 و Ck20 کمتر از نمونه SS304L می باشد.

۴- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری، کمانش موضعی ایجاد شده در ناحیه فشاری باعث تسریع رفتار نرم شوندگی می شود. آزمایش های انجام شده روی نمونه های St37 با طول های متفاوت نشان داد، برای طول های بیشتر از ۳۰۰mm کمانش در وسط طول نمونه ایجاد می گردد و در طول های کمتر از این مقدار، در مجاورت فیکسچرها اتفاق می افتد.

۵- تحت بارگذاری جابجایی کنترل متقارن محوری، تحمل بار فشاری و کششی نمونه های Ck20 همانند نمونه های St37 و SS304L یکسان نمی باشد و تحمل بار فشاری بیشتر می باشد، که بدلیل خواص مکانیکی فولاد آلیاژی Ck20 می باشد.

۶- در نمونه های آزمایش شده، پدیده کار سختی باعث کاهش نرخ کرنش رچتینگ می شود.

۷- روی دو نمونه SS304L با طول های متفاوت و با وجود گشودگی، تحت بارگذاری نیرو-کنترل یکسان، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ نمونه بلندتر بیشتر می باشد. تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری، رفتار نرم شوندگی نمونه کوتاه تر بیشتر می باشد و سریعتر به فروپاشی می رسد.

۸- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با ترتیب بارگذاری فشاری و کششی متفاوت روی نمونه های SS304L، تحمل بار کششی برای بارگذاری که ابتدا تحت بارگذاری فشاری قرار می گیرد، بیشتر از آزمایشی می باشد که ابتدا تحت بارگذاری کششی می باشد.

۹- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، به علت ایجاد چین خوردگی ها در مجاورت گشودگی در نمونه های SS304L با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، تحمل بار فشاری و کششی این نمونه بیشتر از نمونه بدون گشودگی می باشد. ولی با رشد ترک در مجاورت گشودگی، تحمل بار از نمونه بدون گشودگی کمتر می شود. نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول

نمونه نیز دارای رفتار مشابه نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه دارد. تحمل بار نمونه با گشودگی به شعاع ۹mm از تمامی نمونه ها کمتر می باشد.

۱۰- تحت بارگذاری نیرو-کنترل، نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه نرخ کرنش رچتینگ بیشتری از نمونه بدون گشودگی دارد و سریعتر از نمونه بدون گشودگی می شکند. نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه دارای کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ بیشتری نسبت به دو نمونه قبلی می باشد و سریعتر می شکند. نمونه با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، دارای کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ بیشتری نسبت به دو نمونه های قبلی می باشد و سریعتر می شکند.

## فصل ۴ - تحلیل عددی و مقایسه نتایج عددی با تجربی

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

افزایش روز افزون نیازهای بشر و تلاش برای برآورده ساختن آنها، به خلق مسائل تازه و پیچیده‌ای در همه زمینه‌های علمی و فنی منجر 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 های ساده و پیچیده تحت بارگذاری‌های نامنظم احساس 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 می‌گردد؛ که عملاً حل این معادلات، از روش تحلیلی را غیر ممکن می‌سازد.

معمولاً مهندسان و فیزیکدانها یک پدیده فیزیکی را به وسیله دستگامی از معادلات دیفرانسیل معمولی و یا پاره ای<sup>۱</sup> که در محدوده خاصی صادق است و شرایط مرزی و آغازین مناسبی را تامین می‌کند، توصیف می‌کنند. در واقع یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز خود، یک مدل ریاضی کامل از یک پدیده است. برای یافتن توزیع متغیرهای مورد نظر که ارتباط آنها در فرم دیفرانسیلی توسط معادله حاکم بیان می‌گردد، می‌بایست معادله مذکور حل گردد تا بتوان مقادیر عددی هر کمیت مرتبط را در نقاط دلخواه بدست آورد. اما با توجه به اینکه تنها می‌توان اشکال بسیار ساده را با این معادلات آن هم در ناحیه‌های هندسی بسیار ساده با روشهای تحلیلی حل نمود، حل اغلب معادلات حاکم به روش تحلیلی ممکن است.

برای مقابله با چنین مشکلاتی و نیز جهت استفاده از قدرتمندترین وسیله موجود در قرن حاضر یعنی کامپیوتر، ضروری است که مساله مورد نظر در یک قالب کاملاً جبری ریخته شود تا حل آنها تنها نیازمند عملیات جبری باشد. برای دستیابی به چنین هدفی می‌توان از انواع مختلف روشهای گسسته‌سازی یک

---

<sup>1</sup> Partial



مساله پیوسته تعریف شده به وسیله معادلات دیفرانسیل استفاده نمود. در این روشها تابع و یا توابع مجهول که می توان آنها را با مجموعه ای نامتناهی از اعداد نشان داد؛ به وسیله تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بر دارد. برای این منظور روشهای عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستمها ایجاد و امروزه به طرز وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. سه روش عمده در حل عددی یک معادله دیفرانسیل به شرح زیرند:

۱- روش تفاضل محدود<sup>۱</sup>

۲- روش تغییرات<sup>۲</sup>

۳- روشهای باقیمانده وزنی<sup>۳</sup>

بسته به نوع روش عددی و نوع المان بندی، روشهای مختلفی نظیر حجم محدود<sup>۴</sup>، اجزای محدود<sup>۵</sup>، تفاضل محدود و غیره استفاده می شود. هر کدام از روشهای فوق الذکر، در قالب نرم افزارهای متنوع به کاربران عرضه شده اند. روشی که در اغلب مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می گیرد روش اجزای محدود است که در قالب نرم افزارهایی چون انسیس، آباکوس، نسترن و غیره قابل استفاده است.

روش قدرتمند اجزای محدود از دهه ۱۹۵۰ آغاز و با گسترش کامپیوترهای عددی رو به توسعه گذاشت. البته در گسترش این روش نمی توان از توانایی های آن در مقایسه با سایر روشها چشم پوشی نمود. روش اجزای محدود را می توان ترکیبی از روش تقریبی ریتز<sup>۶</sup> و اصل تغییرات<sup>۷</sup> که در مکانیک محیطهای پیوسته به کار می رود تصور نمود. روش اجزای محدود یک دستورالعمل عددی جهت حل مسایل فیزیکی می باشد که توسط معادلات دیفرانسیل توصیف می شوند.

---

<sup>1</sup> Finite Difference

<sup>2</sup> Variational Method

<sup>3</sup> Weighted Residual Methods

<sup>4</sup> Finite Volume

<sup>5</sup> Finite Element

<sup>6</sup> Approximate Ritz method

<sup>7</sup> Variational principle

در این فصل توسط نرم افزار آباکوس ۶.۹.۱ تحلیل های عددی روی پوسته های استوانه ای انجام شده است و نتایج عددی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. پوسته های استوانه ای از جنس St37 و SS304L مورد تحلیل عددی توسط نرم افزار اجزای محدود آباکوس قرار گرفته است. البته بارگذاری های نیرو-کنترل روی پوسته های استوانه ای SS304L صرفاً تجربی می باشد. همچنین روی پوسته های استوانه ای از جنس CK20 نیز تنها تست های تجربی انجام گرفته و با نتایج عددی مورد مقایسه قرار نگرفته است.

#### ۴-۲- معرفی نرم افزار آباکوس

آباکوس یک مجموعه از برنامه های مدل سازی بسیار توانمند می باشد که مبتنی بر روش اجزای محدود، قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل سازی غیر خطی را دارا می باشد. این نرم افزار دارای مجموعه المانهای بسیار گسترده ای بوده و هر نوع هندسه ای را می توان به صورت مجازی توسط این المانها مدل کرد. همچنین دارای مدل های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل سازی 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 می سازد.

نظر به اینکه آباکوس یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده می باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل های مکانیک جامدات و سازه (تنش- تغییر مکان) نمی شود. با استفاده از این نرم افزار می توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزای الکتریکی، اکوستیک، مکانیک خاک و پیزو الکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

استفاده از نرم افزار آباکوس با وجود اینکه مجموعه قابلیت های بسیار گسترده ای را در اختیار کاربر قرار می دهد، کار نسبتاً ساده ای می باشد. پیچیده ترین مسایل را می توان به آسانی با آن مدل کرد. به عنوان مثال مسایل شامل بیش از یک جزء را می توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب مدل سازی ها، حتی مدل های با درجه غیر خطی بالا، کاربر می بایست تنها داده های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن،

شرایط مرزی و بار گذاری آن مساله را تعیین کند. در یک تحلیل غیر خطی آباکوس، به طور اتوماتیک میزان نمو بار<sup>۱</sup> و تکرانهای همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می کند. در نتیجه کاربر بندرت می بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند.

ABAQUS/CAE محیط اصلی و گرافیکی آباکوس می باشد که در آن قابلیت های متنوعی جهت مدل سازی، اجرای فرمان حل و مانیتور کردن آن به طور هم زمان و نیز مشاهده نتایج در دسترس قرار گرفته است. ABAQUS/CAE به محیط های ده گانه ای تقسیم شده است که در هر یک از این محیط ها طبق یک فرآیند منطقی یکی از بخش های مدل سازی انجام می گیرد. هنگامی که مدل سازی به اتمام رسید، ABAQUS/CAE یک فایل ورودی<sup>۲</sup> ایجاد می کند که ساختاری بسیار شبیه به یک کد برنامه نویسی شده دارد و توسط یکی از دو روش ضمنی و یا صریح، مورد تحلیل قرار می گیرد. حل گر نرم افزار، فایل ورودی را خوانده و طی فرآیند حل، اطلاعاتی را به CAE می فرستد که قابلیت مانیتور کردن پروسه حل به طور همزمان را ممکن می سازد. همچنین نتایج تحلیل در یک فایل خروجی<sup>۳</sup> ذخیره می گردد. در نهایت کاربر با استفاده از محیط Visualization فایل خروجی حل گر را باز کرده و به مشاهده نتایج به صورت نمودار، کانتور، انیمیشن و یا هر رابط گرافیکی دیگر می پردازد [۵۰].

### ۴-۳- آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای توسط نرم افزار آباکوس

این نرم افزار در تحلیل مدل های پوسته ای بسیار قوی بوده و در کنار بسیاری از توانایی های خود قادر به آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای نیز می باشد.

---

<sup>۱</sup> Load Increment

<sup>۲</sup> Input file

<sup>۳</sup> Output database

برای آنالیز این دسته از مسایل باید از مدل سخت شوندهگی سینماتیک استفاده کرد که دارای دو قسمت، یکی سخت شوندهگی سینماتیک خطی و دیگری سخت شوندهگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک است که از کامل ترین مدل ها برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای می باشد [۵۱ و ۵۲]. در مدل نخست سطح تسلیم متناسب با مقدار  $\alpha$  به عنوان تنش زمینه در فضای تسلیم حرکت می کند، اما تغییر شکل نمی دهد. نرم افزار آباکوس برای شبیه سازی عددی مسائل تحت بارگذاری چرخه ای از مدل خطی زیگلر استفاده می کند که به صورت رابطه زیر بیان می شود [۵۰]:

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

که در آن C ثابت ماده بوده و c مدول سخت شوندهگی سینماتیک می باشد. پارامتر  $\sigma^0$  تنش تسلیم جاری و  $\varepsilon^{pl}$  کرنش پلاستیک معادل می باشد. همانگونه که گفته شد در این مدل، اندازه سطح تسلیم ثابت باقی می ماند. به بیان دیگر  $\sigma^0$  در رابطه (۱-۴) همواره مساوی  $\hat{\sigma}_0$  که معادل تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است، باقی می ماند. برای معرفی این مدل به نرم افزار در متن فایل ورودی از دستور پلاستیک به صورت زیر استفاده می شود.

\*Plastic

\*Plastic, Hardening = Kinematic

$\hat{\sigma}_0, 0$

$\sigma_i^0, \varepsilon_i^{pl}$

مقدار c با استفاده از رابطه زیر و بوسیله نرم افزار محاسبه خواهد شد:

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

مدل سخت شونده‌گی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک که بر اساس روابط ارایه شده توسط چابووش<sup>۱</sup> تهیه شده، در برگیرنده حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار  $\alpha$  در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار  $\varepsilon^{pl}$  به عنوان کرنش پلاستیک است [۵۳]. برای معرفی چنین مدلی، یک جمله غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به رابطه (۴-۱) اضافه شده و معادله زیر نتیجه می شود که در آن  $\gamma$  ثابت ماده است [۵۰]:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{c} \alpha_{ij} \dot{C} \quad (۳-۴)$$

البته با استفاده از این مدل امکان آنالیز مسایل پلاستیسیته که در آنها تسلیم وابسته به نرخ کرنش است از کاربر گرفته می شود؛ اما برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای، به ناچار از این مدل استفاده شده است. به منظور معرفی این مدل به 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 شود.

برای تعیین رشد سطح تسلیم از روش معرفی اندازه  $\sigma^0$  به صورت تابعی نمایی به صورت رابطه ی زیر استفاده شده است که  $Q_\infty$  و  $b$  نیز ثابت های ماده می باشند:

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_\infty (1 - e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad (۴-۴)$$

در نرم افزار به کمک دستور زیر از رابطه بالا برای رشد سطح تسلیم استفاده می شود:

\*Cyclic Hardening, Parameters

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

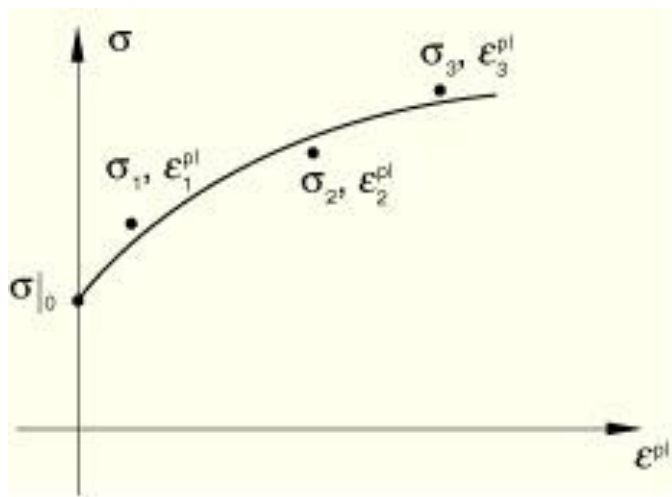
برای تعیین حرکت سطح تسلیم در فضای تنش از آزمون کشش ساده استفاده شده است. اگر نیم سیکل نخست از آزمون کشش در اختیار باشد، نرم افزار با استفاده از اطلاعات بدست آمده از این

---

<sup>1</sup> Chaboche

نیم سیکل، می تواند پارامترهای  $C$  و  $\gamma$  را محاسبه کند. البته بکارگیری این روش مانند نتایج تجربی حال حاضر، تنها برای حالتی که تعداد سیکل های بارگذاری کم باشد سفارش شده است.

نتایج حاصل از یک آزمون کشش، مانند شکل ۴-۱ را در نظر بگیرید.



شکل ۴-۱: منحنی تنش بر حسب کرنش پلاستیک آزمون کشش

برای هر نقطه روی این نمودار مانند  $(\epsilon_i^{pl}, \sigma_i)$ ، 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 کنند اندازه سطح تسلیم به ازای  $\epsilon_i^{pl}$  است و همانگونه که بیان شد، این رابطه به 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:

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

با استفاده از روابط (۴-۵) و (۴-۶) و مقادیر مختلف  $(\sigma_i^{pl}, \epsilon_i^{pl})$  که توسط کاربر داده می شوند، نرم افزار توانایی محاسبه ضرایب C و  $\gamma$  را خواهد داشت و به کمک دستور زیر، داده ها را وارد نرم افزار کرده تا حرکت سطح تسلیم در فضای تنش نیز همزمان شبیه سازی گردد.

\*Plastic, Hardening = Combine, Data type= Half Cycle

$$\sigma_1, \epsilon_1^{pl}$$

$$\sigma_2, \epsilon_2^{pl}$$

#### ۴-۴- مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی

در این بخش نتایج تجربی بدست آمده روی پوسته های استوانه ای با نتایج عددی شبیه سازی شده توسط نرم افزار آباکوس مقایسه و بحث شده است. پوسته های استوانه ای آزمایش شده در فصل سوم ، روی جنس های St37، Ck20 و SS304L می باشد. آزمایش های انجام شده روی پوسته های CK20 صرفاً تجربی است. لذا در این بخش مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی بدست آمده برای پوسته های St37 و SS304L گزارش شده است. همچنین روی پوسته های استوانه ای SS304L، نتایج عددی با نتایج تجربی بارگذاری های جابجایی-کنترل مقایسه شده است و نتایج تجربی بارگذاری نیرو-کنترل فقط با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک مقایسه شده است.

#### ۴-۴-۱- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای St37

نتایج عددی تحت دو نوع بارگذاری با نتایج تجربی مقایسه شده است. بارگذاری ها به صورت نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل روی پوسته استوانه ای شبیه سازی شده و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی تست شده روی پوسته استوانه ای با هم مقایسه شده اند.

از المان S8R5 در شبیه سازی عددی استفاده شده است که یک المان پوسته ای ۸گره ای با ۵ درجه آزادی در هر گره می باشد. البته در شبیه سازی های اولیه از المان S4R نیز استفاده گردید که المان پوسته ای با ۴ گره می باشند و نتایج به دست آمده مشابه نتایج حاضر در این بخش بدست آمده اند اما به طور کلی در تمامی شبیه سازی ها از این المان استفاده نگردیده است و لذا نتایج حاصل با هم مقایسه

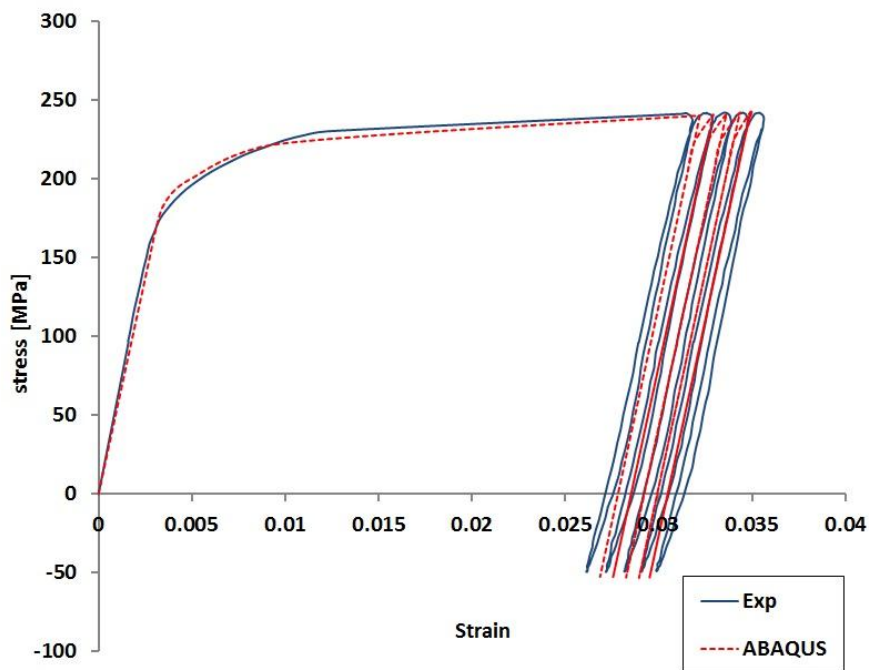
نشده اند. دو طرف پوسته استوانه ای با قید گره به یک صفحه صلب مقید شده اند. هر صفحه صلب دارای یک نقطه مرجع می باشد. نقطه مرجع در صفحه صلب بالا با شرایط مرزی از نوع جابجایی/چرخشی در تمامی جهات مقید گردیده است ( $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ ). نقطه مرجع پایین در تمامی جهات به غیر از  $U_3$  مقید گردیده است. برای بارگذاری از نوع جابجایی-کنترل به پارامتر  $U_3$  مقدار اختصاص می یابد. همچنین برای بارگذاری از نوع تناوبی به پارامتر دامنه، یک موج سینوسی اختصاص می یابد. تحت بارگذاری های نیرو-کنترل، به نقطه صلب پایین یک بار از نوع نیروی متمرکز اعمال می گردد که بارگذاری در جهات  $CF_1$  و  $CF_2$  برابر صفر می باشد و به پارامتر  $CF_3$  مقدار اختصاص می یابد. همچنین مانند بارگذاری جابجایی-کنترل، در این بارگذاری نیز از پارامتر دامنه برای بارگذاری های تناوبی استفاده می گردد.

#### ۴-۱-۱-۱- مقایسه نتایج تحت بارگذاری نیرو-کنترل

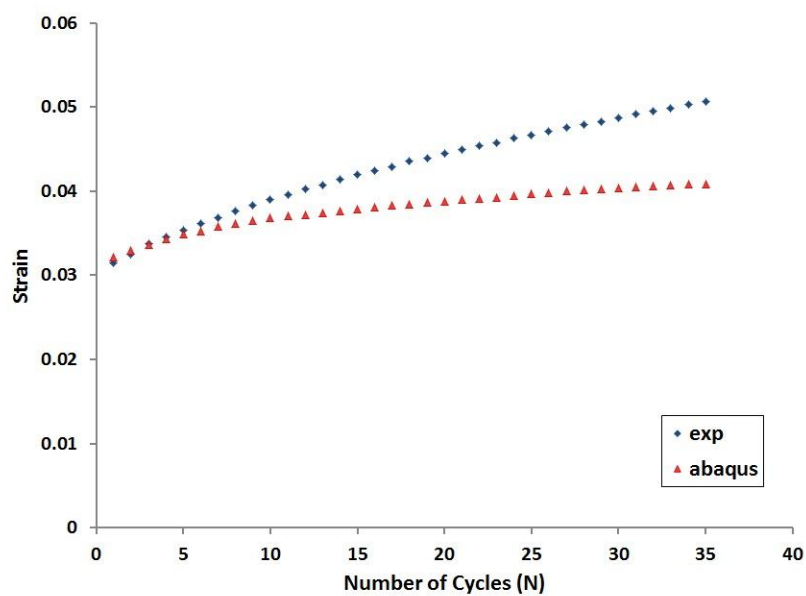
در شکل ۲-۴ نتایج تجربی تنش-کرنش چند سیکل ابتدایی برای بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری با نتایج عددی مقایسه شده است. مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک برای شبیه سازی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری استفاده شده است. مشاهده می شود که نتایج عددی به دست آمده انطباق خوبی با نتایج تجربی دارد و رفتار رچتینگ در شبیه سازی عددی به خوبی مشاهده می شود.

هر چه مقدار تنش میانگین بیشتر باشد، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می یابد و پوسته زودتر به گسیختگی می رسد. نرخ کرنش رچتینگ در نتایج عددی کمتر از نتایج تجربی می باشد. در شکل ۳-۴ مشاهده می شود که شیب کرنش رچتینگ در نتایج عددی به سرعت کاهش می یابد. اگر مقدار تنش میانگین به صفر نزدیک شود، انباشت کرنش پلاستیک بعد از چند سیکل به پایداری می رسد و شیب منحنی کرنش رچتینگ صفر می گردد.





شکل ۲-۴: مقایسه نتایج تجربی و عددی رفتار رجتینگ پوسته استوانه ای.



شکل ۳-۴: مقایسه مقادیر کرنش تجربی و عددی در حداکثر تنش موجود در هر سیکل.

از مدل های سخت شوندگی موجود در نرم افزار آباکوس تنها مدلی که می تواند رفتار رجتینگ پوسته ها را شبیه سازی کند، مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک است که با سطح

تسلیم وان - مایسز به کار برده می شود. دو مدل سخت شوندگی دیگر (ایزوتروپیک و سینماتیک خطی) نیز در این نرم افزار به صورت جداگانه وجود دارد که هر دو با سطح تسلیم وان - مایسز به کار برده می شوند. هر دو مدل نمی توانند رفتار رچتینگ پوسته را شبیه سازی کنند و در نتیجه یک حلقه بسته بدون رچتینگ را شبیه سازی می کنند.

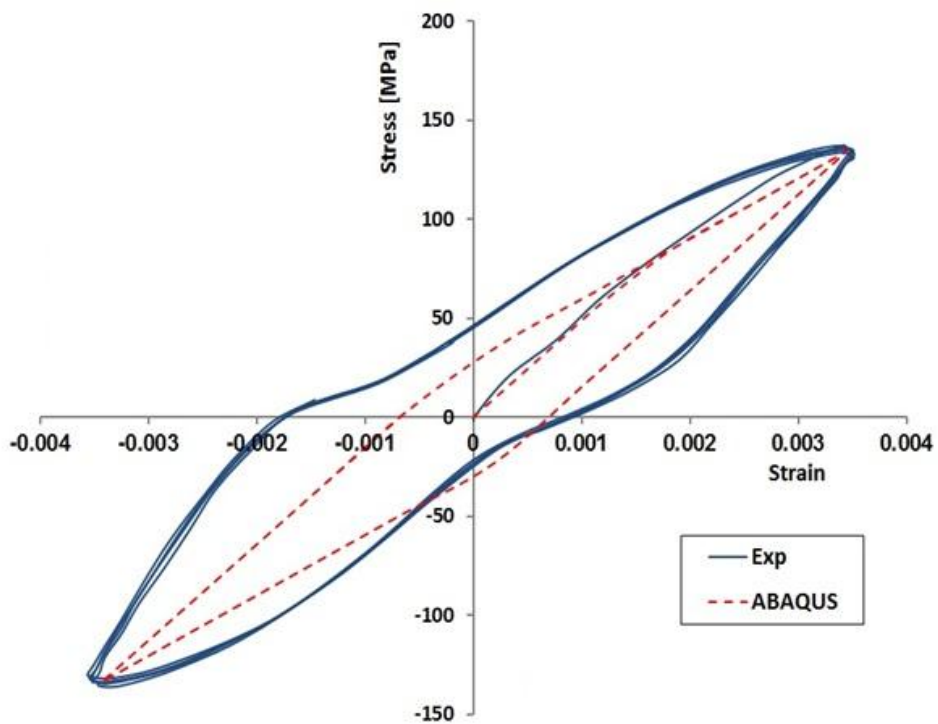
از مقایسه نتایج تجربی و عددی شکل ۴-۳ مشاهده می شود که چند سیکل ابتدایی به خوبی بر هم منطبق هستند و در ادامه چون تنش میانگین اعمالی بر روی پوسته مقداری انتخاب گردیده است تا پوسته تعداد سیکل بیشتری را تا گسیختگی طی نماید باعث گردیده رفتار رچتینگ در نتایج عددی سریعتر به حالت پایداری برسد و این اختلاف در تنش های میانگین بالاتر، کمتر از نتایج تجربی خواهد بود.

از مقایسه نتایج تجربی و عددی مشاهده می گردد که رفتار قسمت های بی باری نتایج تجربی با نتایج عددی انطباق قابل قبولی دارد و با در نظر گرفتن اینکه منحنی های قسمت بی باری رفتار کاملا غیر خطی دارند؛ روش عددی این رفتار را به خوبی شبیه سازی کرده است.

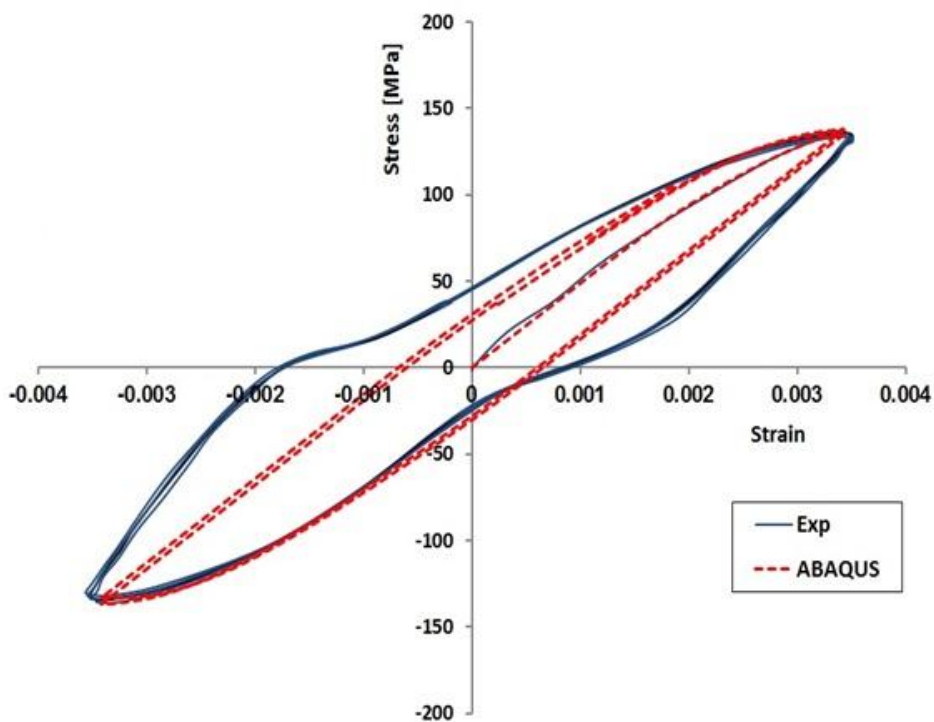
#### ۴-۱-۲-۴-۴- مقایسه نتایج تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

در شکل ۴-۴ نتایج تجربی منحنی های هیستریزیس تحت بارگذاری کرنش-کنترل متقارن محوری با مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی مقایسه شده است و به علت اینکه در این مدل فقط مرکز سطح تسلیم در فضای تنش انتقال می یابد؛ لذا این مدل قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی پوسته نمی باشد.

در مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک اندازه سطح تسلیم در فضای تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می کند و مرکز آن نیز انتقال می یابد؛ لذا نتایج عددی این مدل انطباق خوبی با نتایج تجربی دارد که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. در این مدل رفتار نرم شوندگی و افزایش کرنش پلاستیک باقیمانده در چرخه های متوالی به خوبی شبیه سازی گردیده است. کرنش پلاستیک باقیمانده در ناحیه کششی به نتایج تجربی بسیار نزدیک است.

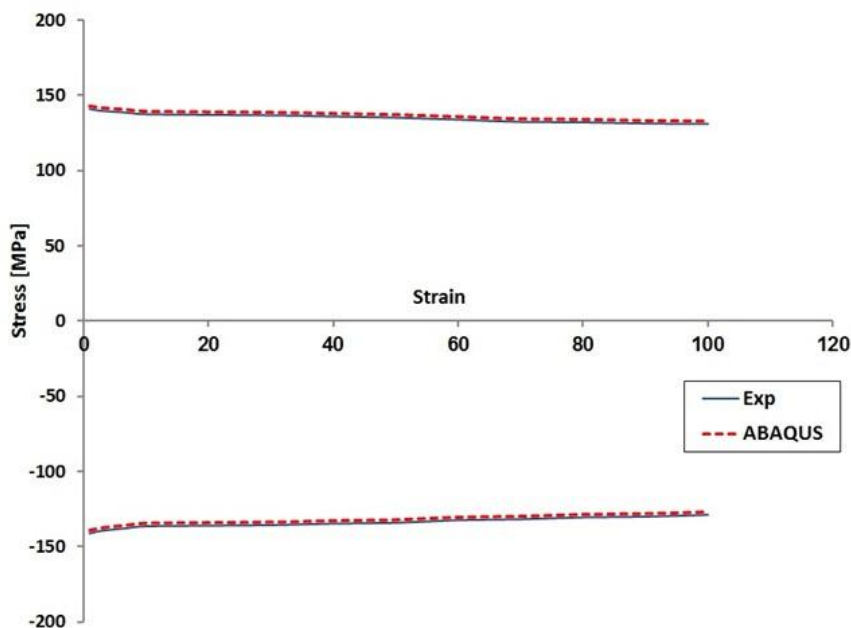


شکل ۴-۴: مقایسه نتایج تجربی با مدل سخت شوندهگی سینماتیک خطی.



شکل ۴-۵: مقایسه نتایج تجربی با مدل سخت شوندهگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک.

در شکل ۴-۶ مشاهده می گردد که پوسته تحت بارگذاری کرنش-کنترل متقارن محوری در چند چرخه اول بارگذاری رفتار نرم شوندگی از خود نشان می دهد و در چرخه های بعدی سرعت نرم شوندگی کاهش می یابد و سپس پایدار می گردد.



شکل ۴-۶: نتایج تجربی حداکثر تنش فشاری و کششی در مقایسه با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/اسینماتیک.

#### ۴-۴-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای SS304L

در این بخش نتایج بدست آمده از شبیه سازی های عددی روی پوسته های استوانه ای SS304L با نتایج تجربی مقایسه می گردند. تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای در دو حالت عددی و تجربی با هم مقایسه گردیده اند. تحت بارگذاری نیرو-کنترل نتایج تجربی و نتایج عددی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک با هم مقایسه شده اند. همچنین شبیه سازی وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی روی پوسته های استوانه ای توسط نرم افزار آباکوس انجام گردیده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

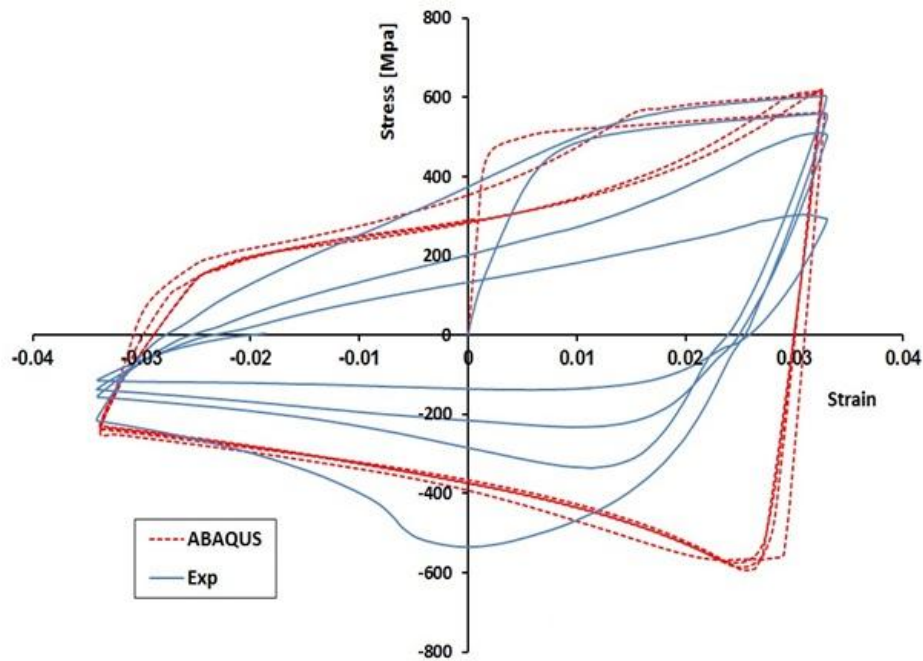
نوع المان، مشخصات المان و تعریف شرایط مرزی و نحوه اعمال آن در نرم افزار همانند مدل های شبیه سازی شده از جنس St37 می باشد.

#### ۴-۲-۱- تاثیر کماتش در رفتار منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای

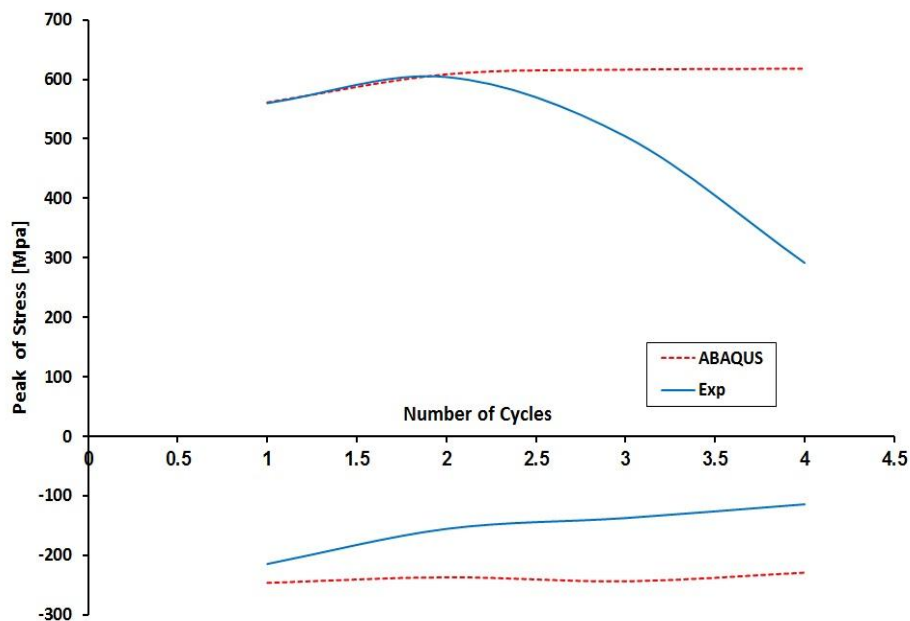
تاثیر کماتش روی رفتار نرم شوندگی پوسته های استوانه ای توسط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. از دو مدل ایزوتروپیک و ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی برای مدل سازی این قسمت استفاده شده است تا در نهایت علاوه بر شبیه سازی رفتار منحنی های هیستریزیس تحت بارگذاری جابجایی کنترل، این دو مدل موجود در نرم افزار نیز با هم مقایسه گردند.

در شکل ۴-۷ نتایج عددی و تجربی آزمایش جابجایی-کنترل، روی پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۱۰mm مقایسه شده اند. مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک برای شبیه سازی رفتار منحنی های هیستریزیس استفاده شده است. از شکل ۴-۷ مشاهده می گردد که مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل روی پوسته استوانه ای نمی باشد. این مدل تعدادی حلقه بسته که روی هم منطبق می باشند را شبیه سازی می کند.

در شکل ۴-۸ پیک های تنش منحنی های هیستریزیس شبیه سازی شده با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک با نتایج تجربی مقایسه شده است. مشاهده می شود که تغییر شکل ایجاد شده روی نمونه در مجاورت فیکسچرها و در وسط طول نمونه، باعث تسریع رفتار نرم شوندگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل می گردد. اما پیک های منحنی های هیستریزیس شبیه سازی شده در مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک یکسان می باشد.



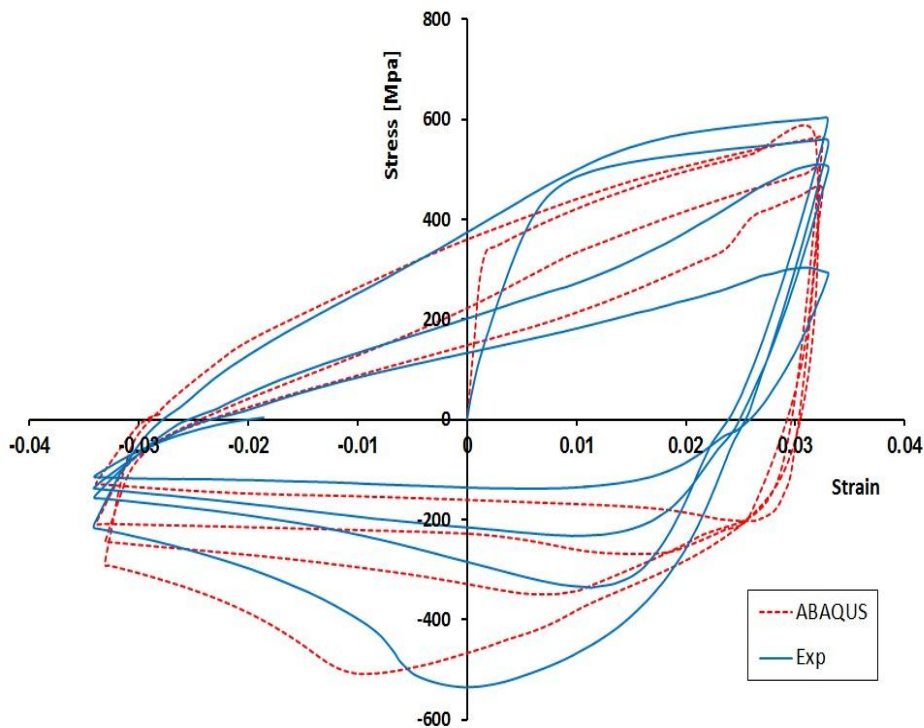
شکل ۴-۷: مقایسه نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.



شکل ۴-۸: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.

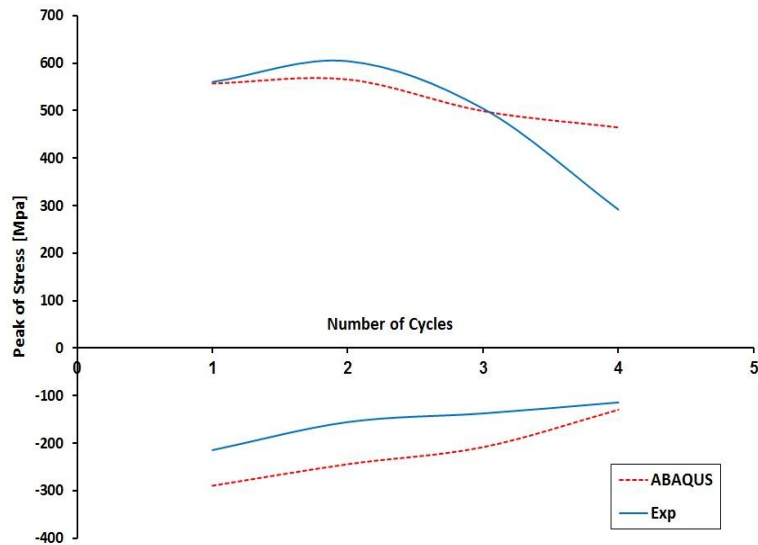
در شکل ۴-۹ از مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک غیر خطی برای شبیه سازی پوسته استوانه ای با طول ۳۰۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰mm استفاده شده است.

مشاهده می گردد که این مدل قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل می باشد. همچنین این مدل رفتار کمانشی را در منحنی های هیستریزیس بهتر از مدل ایزوتروپیک شبیه سازی می کند.



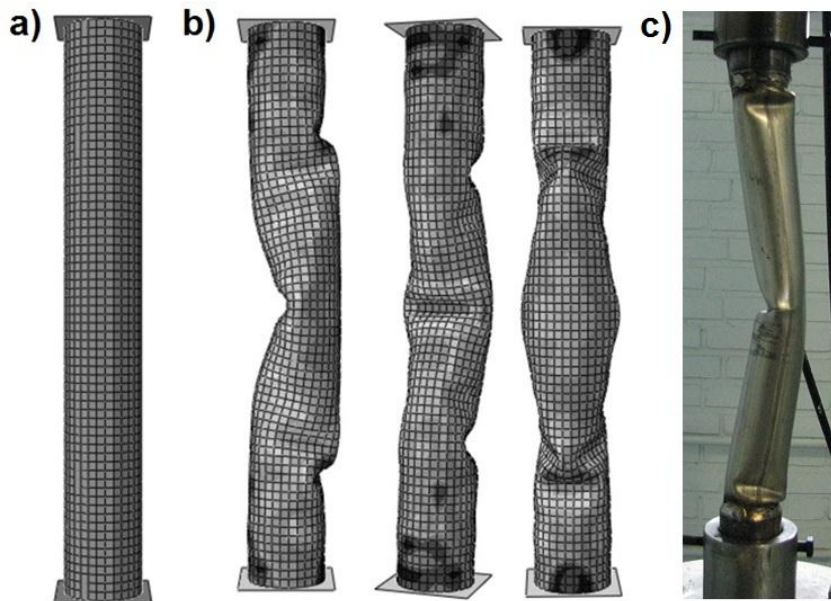
شکل ۴-۹: مقایسه نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک غیرخطی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.

در شکل ۴-۱۰ پیک های تنش منحنی های هیستریزیس شبیه سازی شده با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک غیرخطی با نتایج تجربی مقایسه شده است. مشاهده می گردد که این مدل پیک های تنش را نزدیک به نتایج تجربی شبیه سازی کرده است. در ادامه بارگذاری به دلیل اینکه گسیختگی در کناره های گشودگی افزایش می یابد، تحمل بارکششی در نتایج تجربی، به شدت کاهش می یابد.



شکل ۴-۱۰: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی با مدل سخت شوندهگی ایزوتروپیک/سینماتیک غیرخطی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل.

در شکل ۴-۱۱ مدل پوسته استوانه ای در زمان بارگذاری نشان داده شده است. همچنین تغییر شکل پوسته استوانه ای به صورت تجربی نشان داده شده است. مشاهده می شود که تغییر شکل ها در وسط طول نمونه و در مجاورت فیکسچرها در طول بارگذاری ایجاد می گردد.



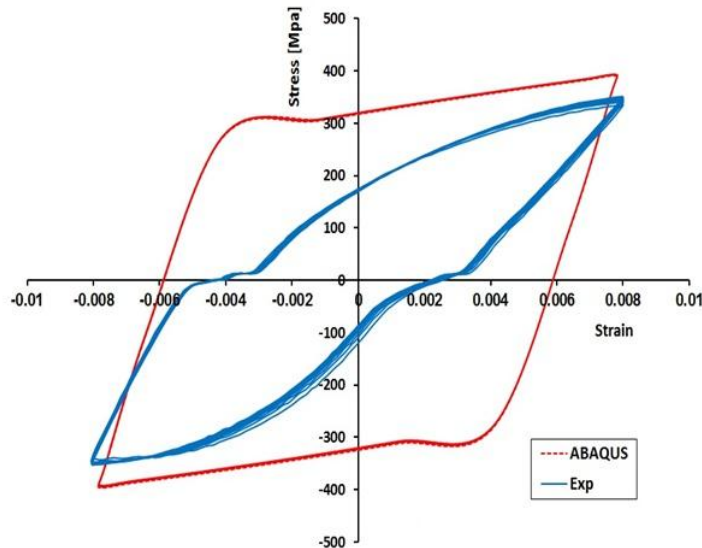
شکل ۴-۱۱: تغییر شکل های ایجاد شده از نماهای مختلف در مدل پوسته استوانه ای به طول ۳۰۰ mm (a) قبل، (b) بعد از بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۱۰ mm و (c) در حالت تجربی



#### ۴-۲-۲- تاثیر دامنه جابجایی روی رفتار نرم شوندگی پوسته استوانه ای

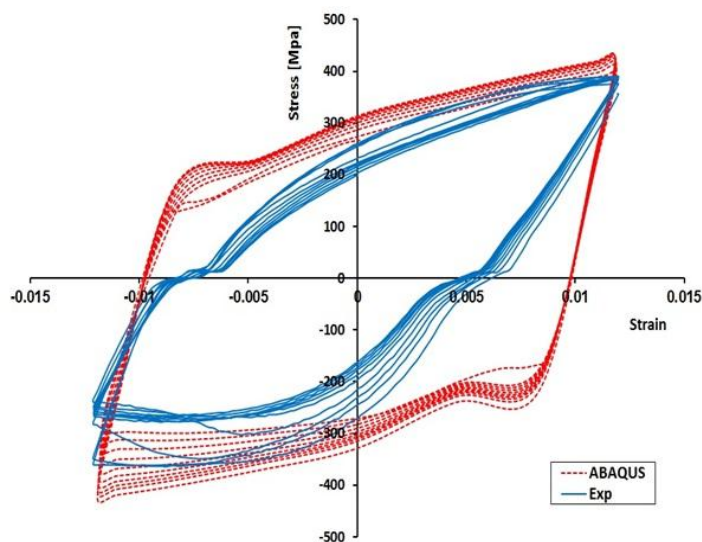
در این بخش پوسته استوانه ای با طول ۲۵۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های ۲، ۳ و ۴mm با مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک/ سینماتیک شبیه سازی گردیده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

در شکل ۴-۱۲ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۲mm قرار گرفته است و منحنی های هیستریزس بدست آمده از نرم افزار با نتایج تجربی مقایسه شده است. مشاهده می گردد که در دامنه جابجایی ۲mm، رفتار نرم شوندگی در مدل عددی دیده نمی شود؛ ولی در نتایج تجربی کمی رفتار نرم شوندگی مشاهده می شود.



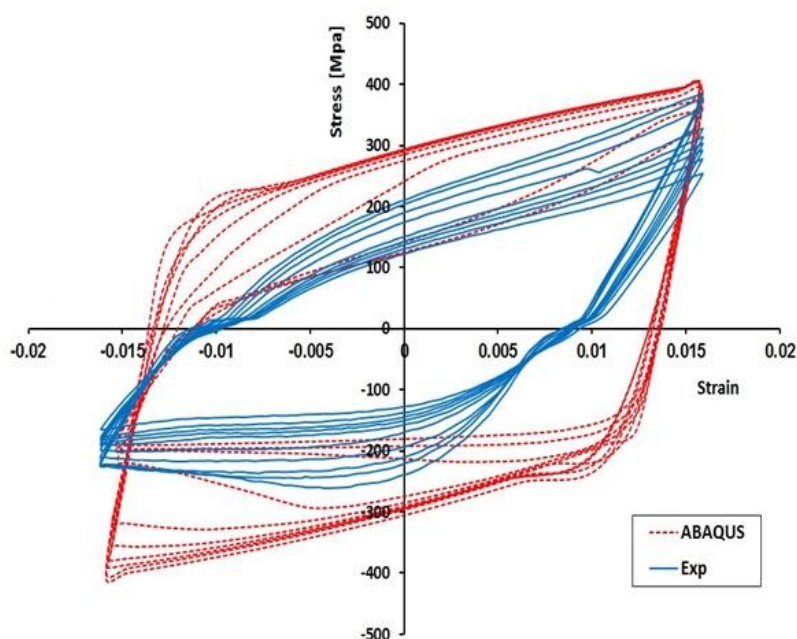
شکل ۴-۱۲: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۲mm

در شکل ۴-۱۳ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۳mm قرار گرفته است. منحنی های هیستریزس بدست آمده از نرم افزار با نتایج تجربی مقایسه شده است. در دامنه جابجایی ۳mm مدل عددی همانند نتایج تجربی طی بارگذاری از خود رفتار نرم شوندگی نشان می دهد. در نتایج تجربی افت بار فشاری در حین بارگذاری مشاهده می شود؛ ولی در نتایج عددی رفتار نرم شوندگی در ناحیه فشاری یکنواخت می باشد.



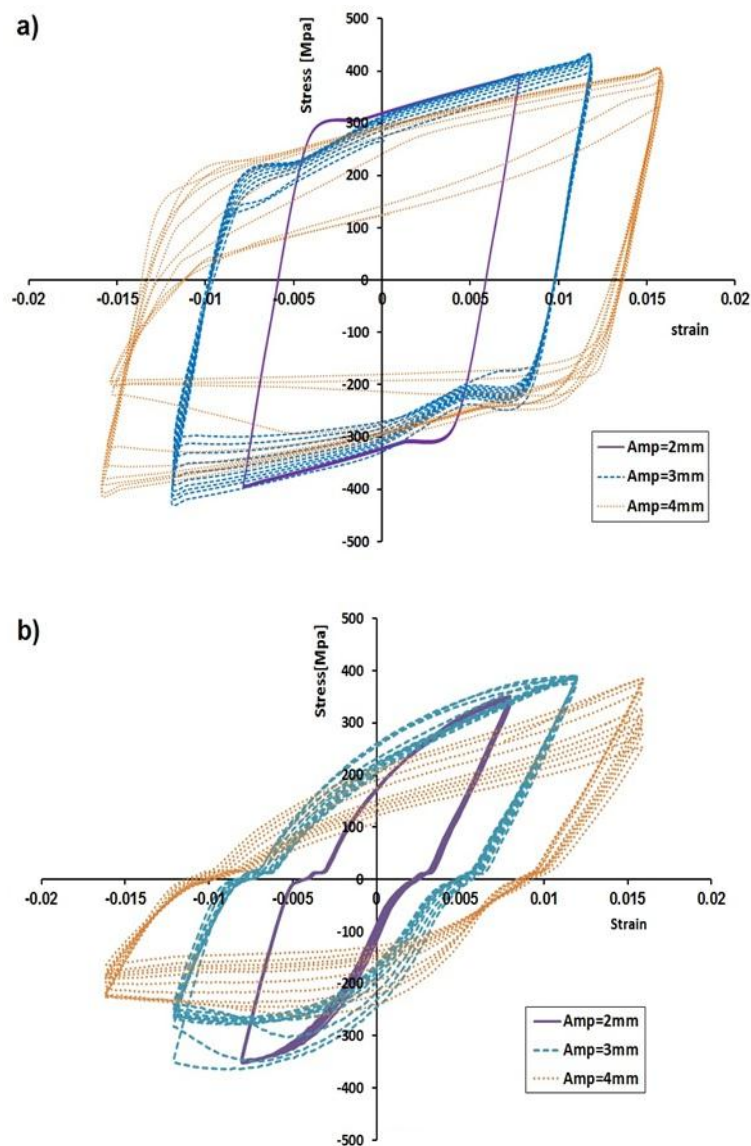
شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۳mm

در شکل ۴-۱۴ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی ۴mm قرار گرفته است. منحنی های هیستریزس بدست آمده از نرم افزار با نتایج تجربی مقایسه شده است. در نتایج عددی افت بار فشاری در حین بارگذاری مشاهده می گردد؛ ولی در نتایج تجربی رفتار نرم شوندگی یکنواخت می باشد.

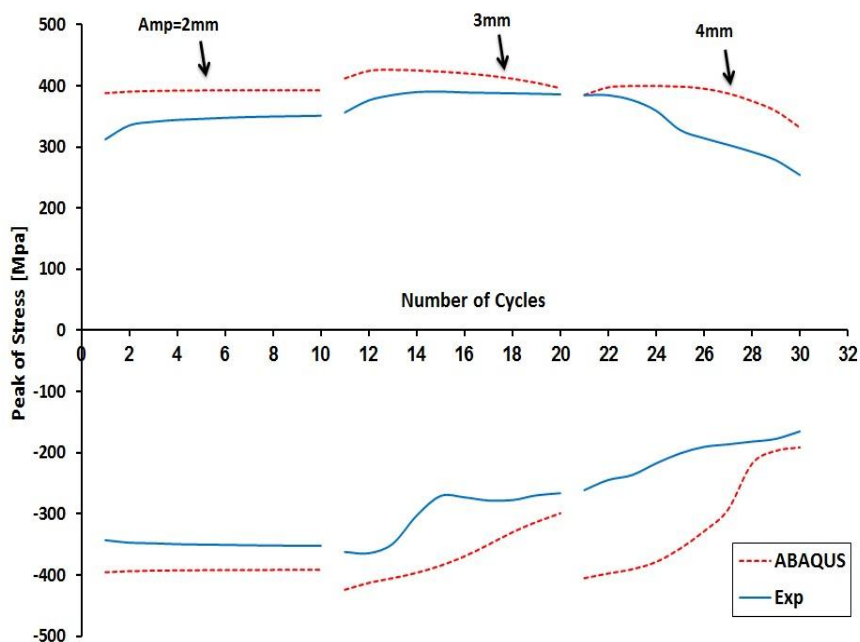


شکل ۴-۱۴: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه ۴mm

برای هر سه دامنه جابجایی، در شکل ۴-۱۵ نتایج عددی و تجربی منحنی های هیستریزیس در سه دامنه جابجایی مختلف نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴-۱۶ پیک های تنش منحنی های هیستریزیس نتایج عددی و تجربی در سه دامنه جابجایی مختلف نشان داده شده است. از شکل ۴-۱۶ مشاهده می شود که افت بار فشاری در نتایج تجربی در دامنه جابجایی ۳mm اتفاق می افتد؛ ولی در نتایج عددی در دامنه جابجایی ۴mm این اتفاق می افتد. در نتایج عددی و تجربی با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندگی افزایش می یابد. تاثیر تاریخچه بارگذاری در نتایج تجربی مشاهده می گردد؛ ولی در نتایج عددی تاریخچه بارگذاری روی رفتار نرم شوندگی مدل تاثیری ندارد.



شکل ۴-۱۵: مقایسه نتایج (a) عددی، (b) تجربی منحنی های هیستریزیس تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های مختلف



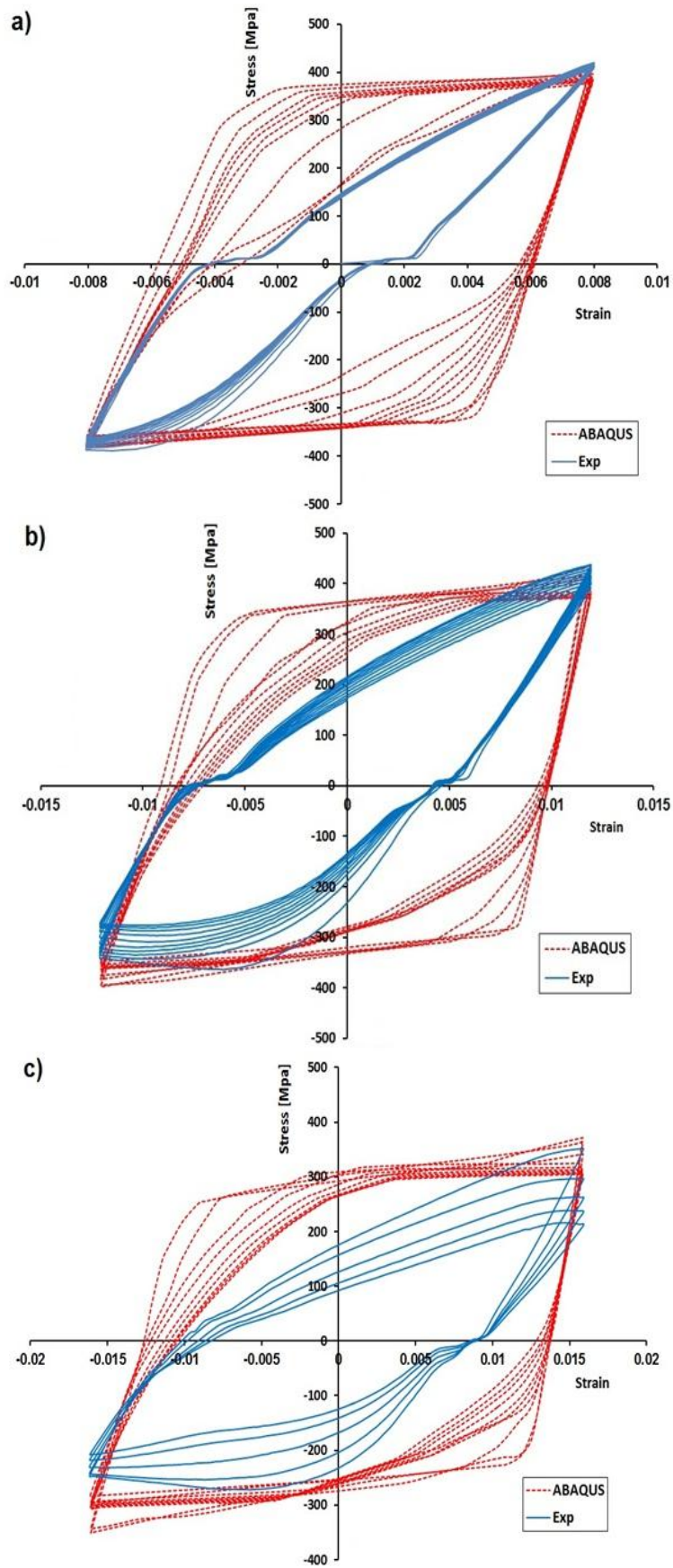
شکل ۴-۱۶: مقایسه نتایج عددی و تجربی پیک های تنش منحنی های هیستریزس تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های مختلف

#### ۴-۲-۳- تاثیر گشودگی روی رفتار نرم شوندگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

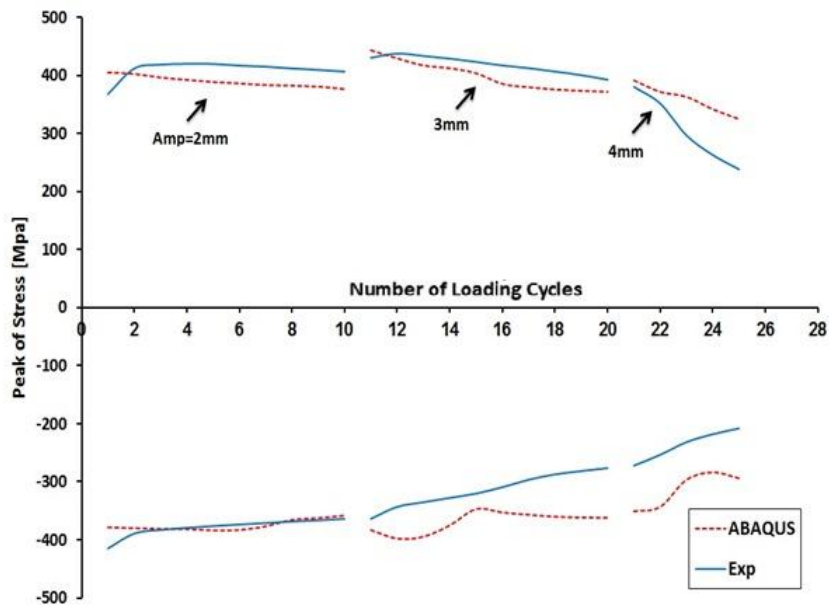
تاثیر شعاع و مکان گشودگی روی رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای توسط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

در شکل ۴-۱۷ نتایج عددی منحنی های هیستریزس پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، تحت دامنه جابجایی های ۲، ۳ و ۴mm با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.

در شکل ۴-۱۸ پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه نشان داده شده است.



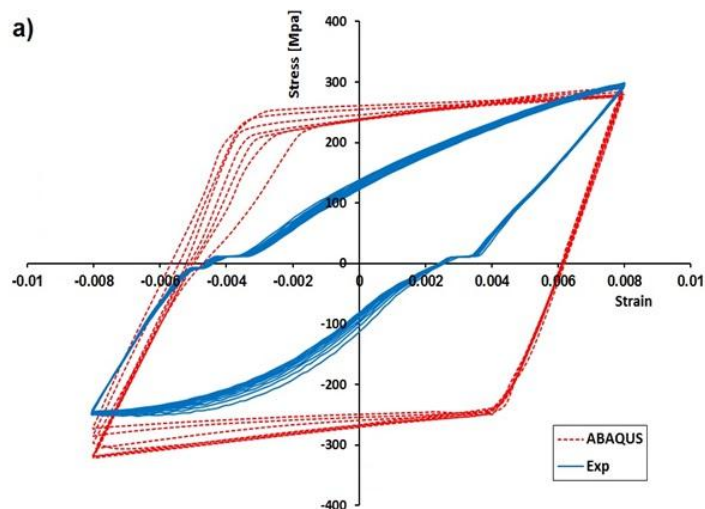
شکل ۴-۱۷: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲mm، (b) ۳mm و (c) ۴mm

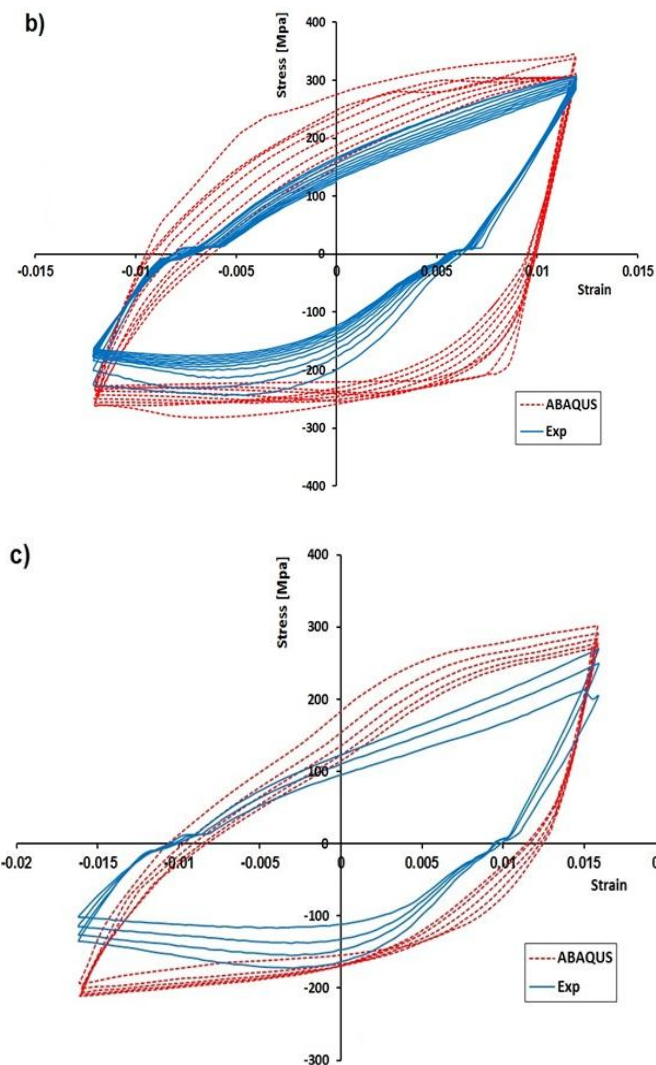


شکل ۴-۱۸: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

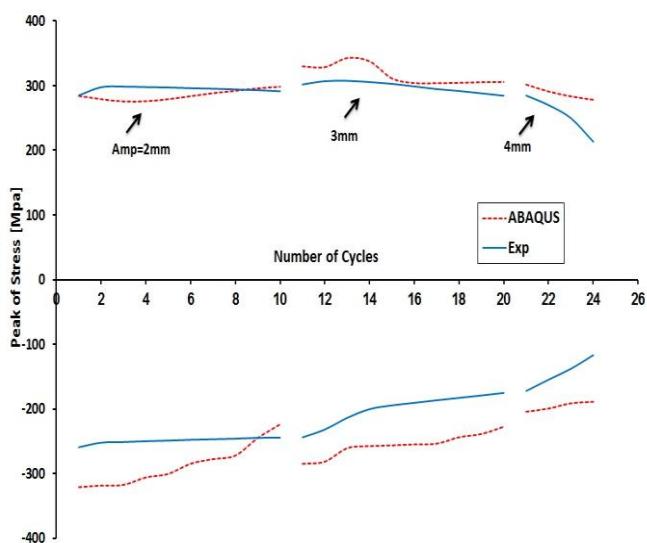
در شکل ۴-۱۹ نتایج عددی منحنی های هیستریزس پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، تحت دامنه جابجایی های ۲، ۳ و ۴mm با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.

در شکل ۴-۲۰ پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه نشان داده شده است.





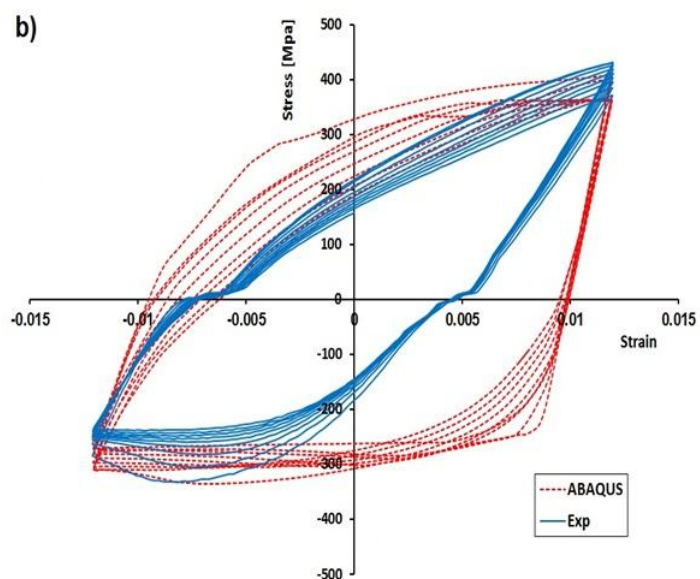
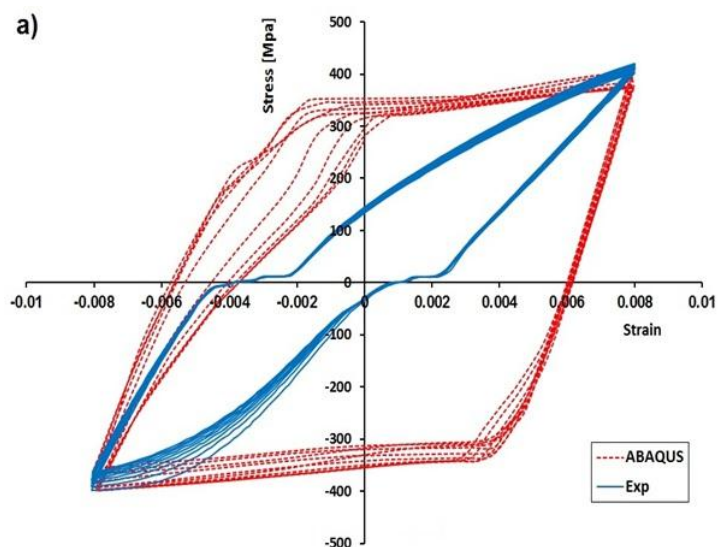
شکل ۴-۱: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲mm، (b) ۳mm و (c) ۴mm



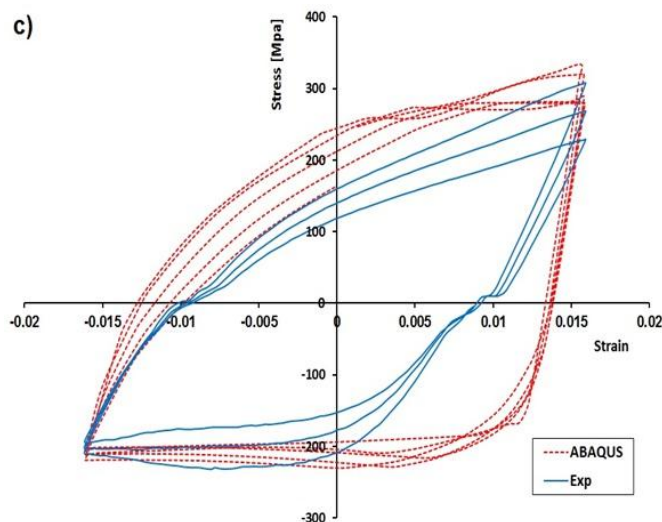
شکل ۴-۲: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

در شکل ۲۱-۴ نتایج عددی منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه، تحت دامنه جابجایی های ۲، ۳ و ۴mm با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.

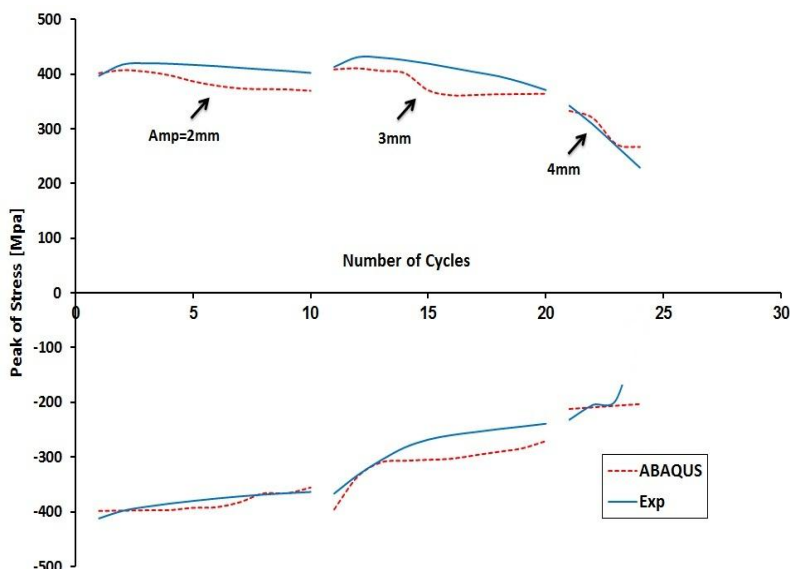
در شکل ۲۲-۴ پیک های تنش منحنی های هیستریزیس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه نشان داده شده است.







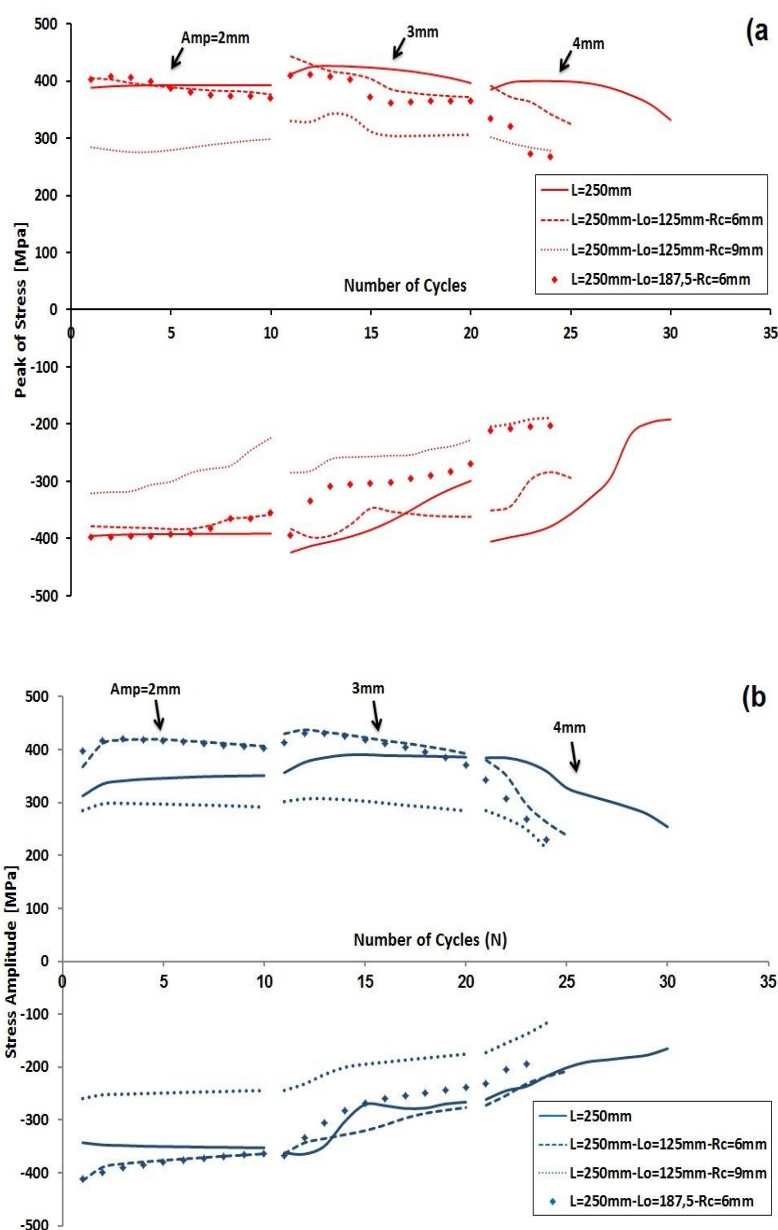
شکل ۴-۲۱: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲mm، (b) ۳mm و (c) ۴mm



شکل ۴-۲۲: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

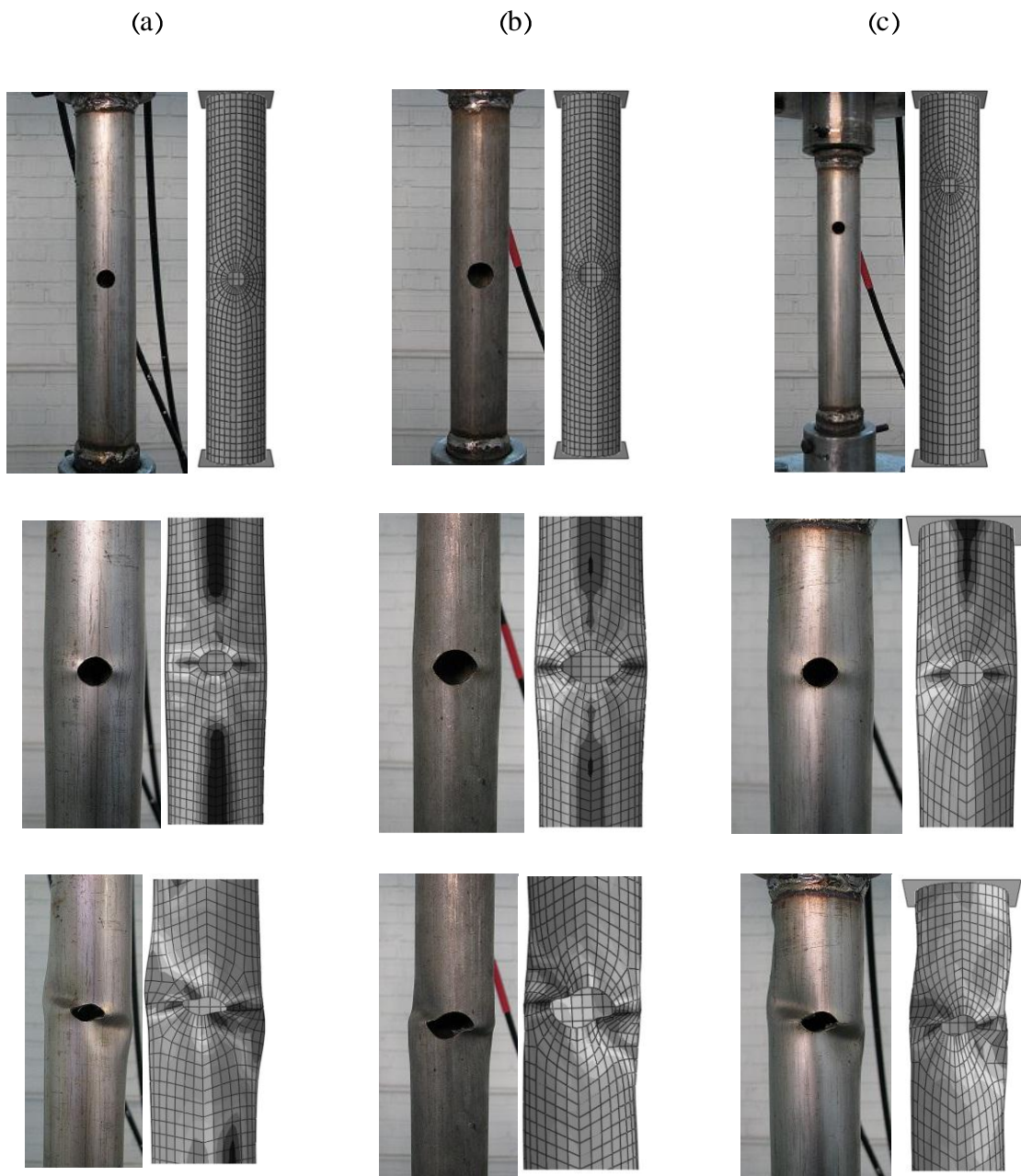
در تمامی منحنی های هیستریزس بدست آمده از نتایج عددی، کرنش پلاستیک باقیمانده در هر دو ناحیه کششی و فشاری بیشتر از نتایج تجربی می باشد. در شکل ۴-۲۳ پیک های تنش منحنی های هیستریزس شبیه سازی شده توسط نرم افزار و نتایج تجربی برای سه دامنه جابجایی نشان داده شده است. همانطور که از نتایج عددی مشاهده می شود، وجود گشودگی باعث تسریع رفتار نرم شوندگی در

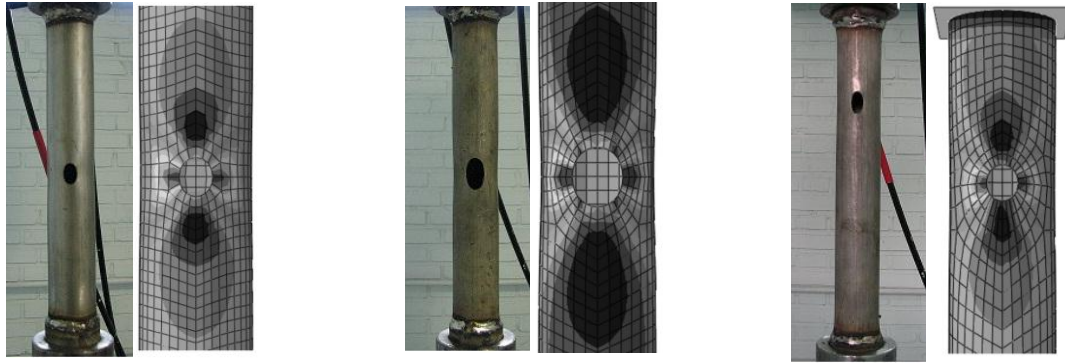
مقایسه با نمونه بدون گشودگی نمی شود. اما در نتایج تجربی، گشودگی باعث افزایش سرعت نرم شوندگی می شود. همچنین در نتایج تجربی به خاطر چین خوردگی در مجاورت گشودگی به شعاع 6mm باعث تحمل بار بیشتری در مقایسه با نمونه بدون گشودگی می شود. اما در نتایج عددی چین خوردگی های ایجاد شده به دلیل وجود گشودگی تاثیری روی تحمل بار روی مدل ها ندارد. به طور کلی با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/اسینماتیک، وجود عیوب مانند گشودگی تاثیری روی رفتار نرم شوندگی منحنی های هیستریزس شبیه سازی شده ندارد.



شکل ۴-۲۳: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج (a) عددی، (b) تجربی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

در شکل ۴-۲۴ مدل های شبیه سازی شده توسط نرم افزار با تغییر شکل های ایجاد شده در نتایج تجربی برای پوسته های استوانه ای با گشودگی مقایسه شده اند. که به ترتیب عبارت است از: مدل مش بندی شده قبل از بارگذاری، تحت بارگذاری در ناحیه فشاری با دامنه جابجایی ۲mm، تحت بارگذاری در ناحیه فشاری با دامنه جابجایی ۳mm، تحت بارگذاری در ناحیه کششی.

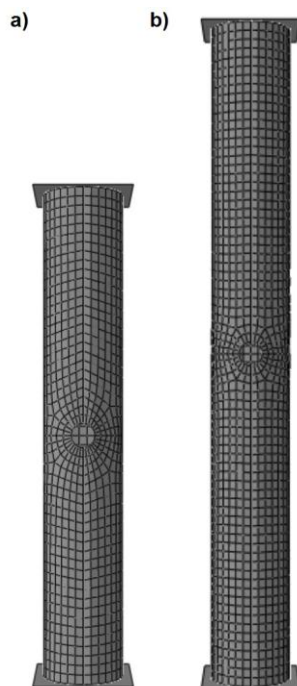




شکل ۴-۲۴: مقایسه رفتار تجربی و عددی پوسته های استوانه ای به طول  $250\text{mm}$  در مجاورت گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، (a) دارای گشودگی با شعاع  $6\text{mm}$  در وسط طول نمونه، (b) دارای گشودگی با شعاع  $9\text{mm}$  در وسط طول نمونه، (c) دارای گشودگی با شعاع  $6\text{mm}$  در نیمه بالایی طول نمونه.

#### ۴-۲-۴-۴- تاثیر طول به همراه گشودگی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

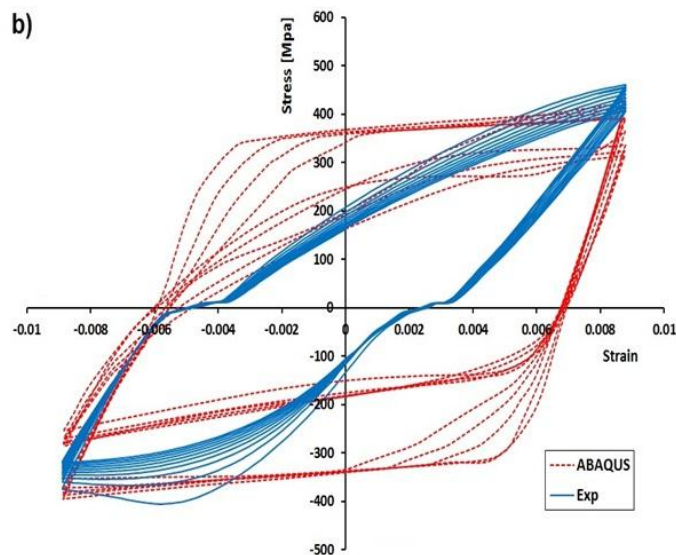
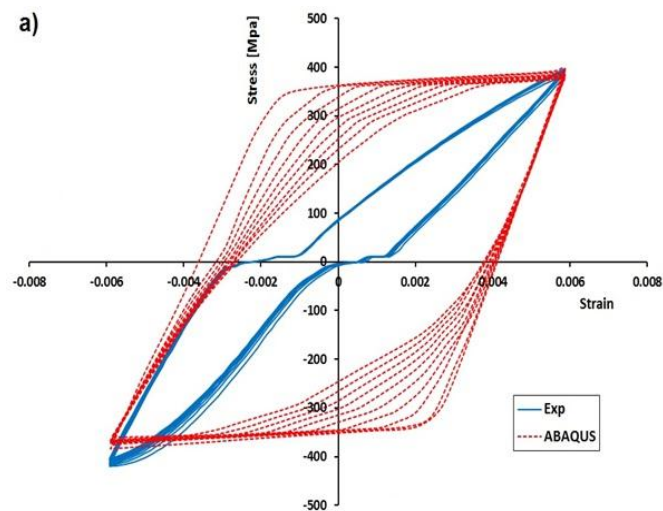
دو پوسته استوانه ای با طول های  $250\text{mm}$  و  $340\text{mm}$  با گشودگی به شعاع  $6\text{mm}$  در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های ۲، ۳ و  $4\text{mm}$  توسط نرم افزار شبیه سازی شده اند (شکل ۴-۲۵) و نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده اند.

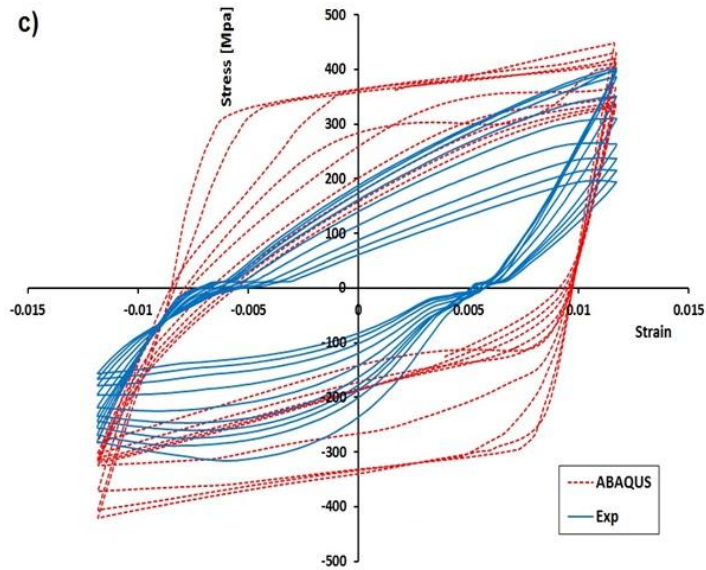


شکل ۴-۲۵: پوسته استوانه ای به طول (a)  $250\text{mm}$ ، (b)  $340\text{mm}$  با گشودگی به شعاع  $6\text{mm}$  در وسط طول نمونه

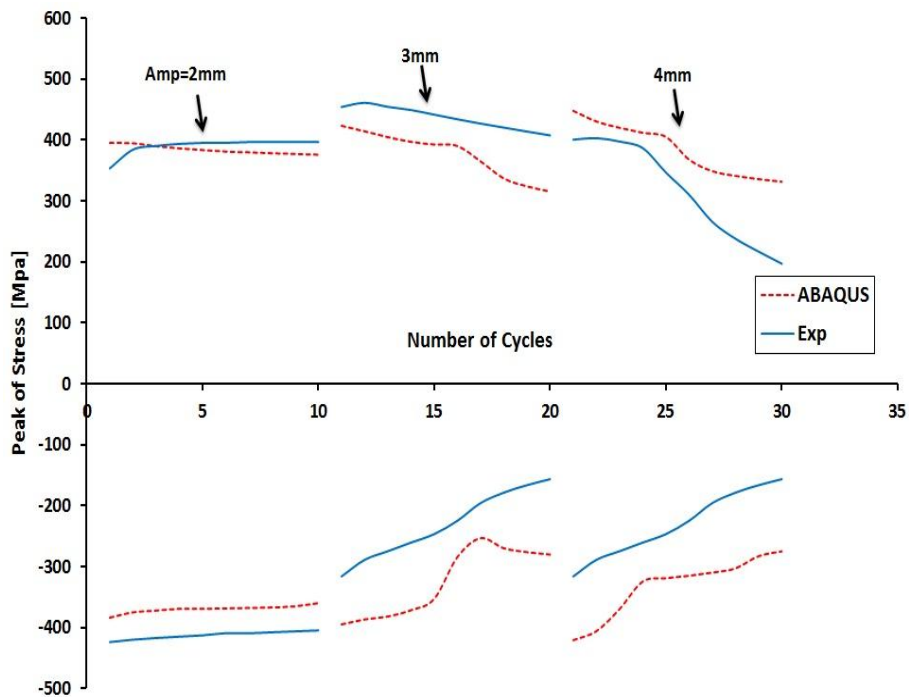
در شکل ۲۶-۴ نتایج عددی منحنی های هیستریزیس پوسته استوانه ای با طول ۳۴۰mm تحت دامنه جابجایی های ۲، ۳ و ۴mm با نتایج تجربی مقایسه شده است.

در شکل ۲۷-۴ پیک های تنش منحنی های هیستریزیس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای به طول ۳۴۰mm با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه نشان داده شده است.





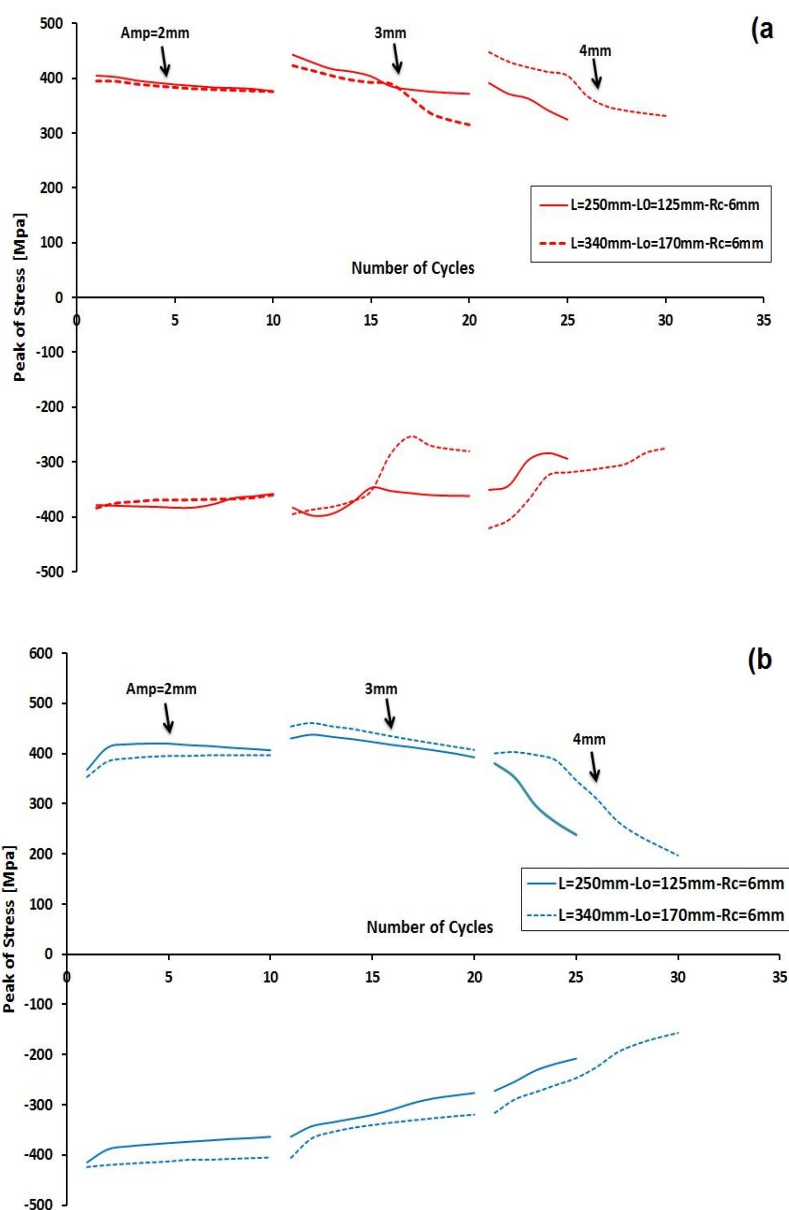
شکل ۴-۲۶: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه (a) ۲mm، (b) ۳mm و (c) ۴mm



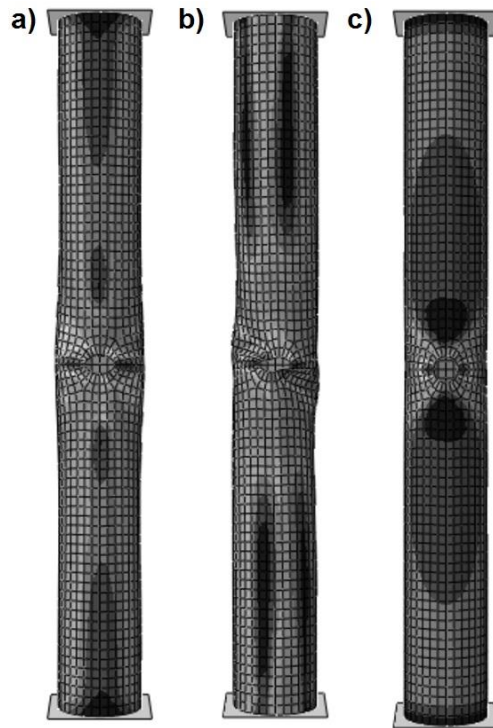
شکل ۴-۲۷: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای به طول ۳۴۰mm با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

در شکل ۲۸-۴ پیک های تنش منحنی های هیستریزس شبیه سازی شده توسط نرم افزار و نتایج تجربی برای سه دامنه جابجایی نشان داده شده است. در نتایج تجربی رفتار نرم شوندگی نمونه های کوتاه تر بیشتر می باشد. ولی در نتایج تجربی سرعت نرم شوندگی برای طول های متفاوت یکسان می باشد.

در شکل ۲۹-۴ تغییر شکل های ایجاد شده در پوسته استوانه ای به طول ۳۴۰mm با گشودگی به شعاع ۶mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲۸-۴: مقایسه پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج (a) عددی، (b) تجربی پوسته های استوانه ای با طول های متفاوت تحت بارگذاری جابجایی-کنترل

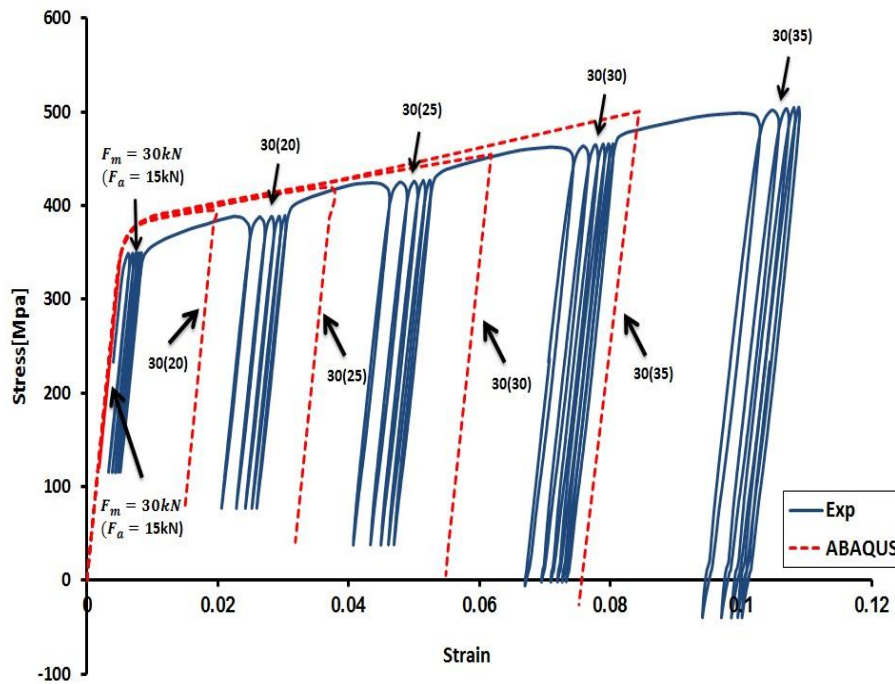


شکل ۴-۲۹: تغییر شکل های ایجاد شده در مدل پوسته استوانه ای به طول ۳۴۰mm تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با دامنه جابجایی های (a) ۲mm در ناحیه فشاری، (b) ۳mm در ناحیه فشاری و (c) ۳mm در ناحیه کششی

#### ۴-۲-۴-۵-مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو-کنترل

در این بخش با وجود صرفاً تجربی بودن آزمایش های بارگذاری نیرو-کنترل ، نتایج عددی شبیه سازی شده با مدل سخت شوندهگی ایزوتروپیک با نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای به طول ۲۵۰mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیرو متوسط ۳۰kN و دامنه نیروهای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵kN مقایسه شده است (شکل ۴-۳۰). مشاهده می شود که مدل سخت شوندهگی ایزوتروپیک توانایی شبیه سازی رفتار رچتینگ را ندارد. مشاهده می شود که این مدل حلقه های رچتینگ را ایجاد نمی کند و در دامنه نیرو های مختلف تنها یک مسیر رفت و برگشتی را ایجاد می کند.





شکل ۴-۳۰: مقایسه نتایج عددی مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک با نتایج تجربی پوسته استوانه ای به طول ۲۵۰mm تحت بارگذاری نیرو-کنترل با دامنه نیرو های متفاوت

#### ۴-۵- نتیجه گیری

با توجه شبیه سازی های انجام شده توسط نرم افزار آباکوس با مدل های سخت شوندگی مختلف و مقایسه با نتایج تجربی می توان نتایج زیر را بدست آورد:

- ۱- مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های استوانه ای را به خوبی شبیه سازی می کند. زیرا در این مدل اندازه سطح تسلیم در فضای تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می کند و همچنین مرکز آن نیز انتقال می یابد. دو مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک و سخت شوندگی سینماتیک خطی قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های استوانه ای نیستند. زیرا در مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک، تنها اندازه سطح تسلیم در فضای تنش تغییر می کند و در مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی تنها مرکز سطح تسلیم انتقال می یابد. لذا این دو مدل تنها حلقه های بسته ای را شبیه سازی می کنند.

- ۲- در نمونه St37، تحلیل عددی، نرخ کرنش رچتینگ را کمتر از تحلیل تجربی شبیه سازی میکند.
- ۳- با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندگی در نتایج عددی شبیه سازی شده با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک افزایش می یابد.
- ۴- تاریخچه بارگذاری مانند ترتیب بارگذاری، افزایش دامنه نیرو یا دامنه جابجایی در نتایج عددی تاثیری ندارد.
- ۵- نتایج عددی بدست آمده برای پوسته های استوانه ای همراه با گشودگی نشان داد که وجود گشودگی باعث افزایش سرعت نرم شوندگی نمی شود. همچنین ایجاد چین خوردگی ها در مجاورت گشودگی باعث افزایش تحمل بار در مقایسه با نمونه های بدون گشودگی نمی شود. لذا وجود عیوبی مانند گشودگی تاثیری در رفتار منحنی های هیستریزیس پوسته های استوانه ای شبیه سازی شده با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک ندارد.
- ۶- کرنش پلاستیک باقیمانده در منحنی های هیستریزیس بدست آمده از نتایج عددی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل همواره بیشتر از نتایج تجربی می باشد.

## فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱- نتیجه گیری

با توجه به انجام آزمایش های تجربی روی پوسته های استوانه ای با جنس های متفاوت و همچنین مقایسه با نتایج عددی بدست آمده توسط نرم افزار آباکوس می توان نتایج زیر را استخراج نمود:

۱- تحت بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری، رفتار رچتینگ در نمونه ها ایجاد می گردد. در تمامی نمونه ها با ادامه بارگذاری سیکلی در دامنه نیروی یکسان، نرخ کرنش رچتینگ کاهش می یابد. همچنین با افزایش دامنه نیرو، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می یابد و نمونه در تعداد سیکل کمتری می شکند.

۲- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری، در نمونه های St37 و Ck20 رفتار نرم شوندگی مشاهده می شود و در نمونه های SS304L در دامنه جابجایی هایی رفتار نرم شوندگی مشاهده می شود. در تمامی نمونه ها با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندگی افزایش می یابد و در تعداد سیکل کمتری نمونه می شکند.

۳- ناحیه پلاستیک در منحنی آزمایش کشش ساده نمونه های St37 و Ck20 کمتر از نمونه SS304L می باشد.

۴- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری، کماتش موضعی ایجاد شده در ناحیه فشاری باعث تسریع رفتار نرم شوندگی می شود. بعلاوه آزمایش های انجام شده روی نمونه های St37 با طول های متفاوت نشان داد، برای طول های بیشتر از ۳۰۰mm، کماتش در وسط طول نمونه ایجاد می گردد و در طول های کمتر از این مقدار، در مجاورت فیکسچرها اتفاق می افتد.

۵- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری، تحمل بار فشاری و کششی نمونه های Ck20 همانند نمونه های St37 و SS304L یکسان نمی باشد و تحمل بار فشاری بیشتر می باشد، که بدلیل خواص مکانیکی فولاد آلیاژی Ck20 می باشد.

- ۶- در نمونه های آزمایش شده، پدیده کار سختی باعث کاهش نرخ کرنش رچتینگ می شود.
- ۷- آزمایش بر روی دو نمونه SS304L با طول های متفاوت، نشان داد تحت بارگذاری نیرو-کنترل یکسان، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ نمونه بلندتر بیشتر می باشد. تحت بارگذاری جابجایی-کنترل متقارن محوری، رفتار نرم شوندگی نمونه کوتاه تر بیشتر می باشد و سریعتر به فروپاشی می رسد.
- ۸- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل با ترتیب بارگذاری فشاری و کششی متفاوت روی نمونه های SS304L، تحمل بار کششی برای بارگذاری که ابتدا تحت بارگذاری فشاری قرار می گیرد، بیشتر از آزمایشی می باشد که ابتدا تحت بارگذاری کششی می باشد.
- ۹- تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، به علت ایجاد چین خوردگی ها در مجاورت گشودگی در نمونه های SS304L با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، تحمل بار فشاری و کششی این نمونه بیشتر از نمونه بدون گشودگی می باشد. ولی با رشد ترک در مجاورت گشودگی، تحمل بار از نمونه بدون گشودگی کمتر می شود. نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه نیز دارای رفتار مشابه نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه دارد. تحمل بار نمونه با گشودگی به شعاع ۹mm از تمامی نمونه ها کمتر می باشد.
- ۱۰- تحت بارگذاری نیرو-کنترل، نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه نرخ کرنش رچتینگ بیشتری از نمونه بدون گشودگی دارد و سریعتر از نمونه بدون گشودگی می شکند. نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه دارای کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ بیشتری نسبت به دو نمونه قبلی می باشد و سریعتر می شکند. نمونه با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، دارای کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ بیشتری نسبت به دو نمونه های قبلی می باشد و سریعتر می شکند.
- ۱۱- مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های استوانه ای را به خوبی شبیه سازی می کند. زیرا در این مدل اندازه سطح تسلیم در فضای

تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می کند و همچنین مرکز آن نیز انتقال می یابد. دو مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک و سخت شوندگی سینماتیک خطی قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی و رچتینگ پوسته های استوانه ای نیستند. زیرا در مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک تنها اندازه سطح تسلیم در فضای تنش تغییر می کند و در مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی تنها مرکز سطح تسلیم انتقال می یابد. لذا این دو مدل تنها حلقه های بسته ای را شبیه سازی می کنند.

۱۲- در نمونه St37، نتایج حاصل از تحلیل عددی، نرخ کرنش رچتینگ را کمتر از نتایج تجربی شبیه سازی میکند.

۱۳- با افزایش دامنه جابجایی، سرعت نرم شوندگی در نتایج عددی شبیه سازی شده با مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک افزایش می یابد.

۱۴- تاریخچه بارگذاری مانند ترتیب بارگذاری، افزایش دامنه نیرو یا جابجایی در نتایج عددی تاثیری ندارد.

۱۵- نتایج عددی بدست آمده برای پوسته های استوانه ای همراه با گشودگی نشان داد که وجود گشودگی باعث افزایش سرعت نرم شوندگی نمی شود. همچنین ایجاد چین خوردگی ها در مجاورت گشودگی باعث افزایش تحمل بار در مقایسه با نمونه های بدون گشودگی نمی شود. لذا وجود عیوبی مانند گشودگی تاثیری در رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای شبیه سازی شده با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک ندارد.

۱۶- کرنش پلاستیک باقیمانده در منحنی های هیستریزس بدست آمده از نتایج عددی تحت بارگذاری جابجایی-کنترل همواره بیشتر از نتایج تجربی می باشد.

## ۵-۲- پیشنهاد ها

با توجه به آزمایش های متعددی که روی پوسته های استوانه ای با جنس های مختلف و تحت بارگذاری های چرخه ای متفاوت انجام گردیده و همچنین مقایسه نتایج تجربی به دست آمده با نتایج عددی شبیه سازی شده توسط نرم افزار آباکوس، می توان برای ادامه این تحقیق پیشنهادهایی به شرح زیر ارائه نمود:

۱- اعمال بارگذاری های چرخه ای به صورت پیچشی بر روی پوسته های استوانه ای در مقایسه با بارگذاری های خمشی بسیار کمتر صورت گرفته و نتایج تجربی تحت این گونه بارگذاری ها کمتر یافت می شود. لذا می توان رفتار پوسته های استوانه ای تحت این نوع بارگذاری را نیز مورد بررسی قرار داد.

۲- حل های تحلیلی روی پوسته های استوانه ای به علت پیچیدگی هایی که این نوع سازه ها در بارگذاری های چرخه ای خود نشان می دهند، وجود ندارد. روش هایی تحلیلی بیشتر روی نمونه های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین معادلات به دست آمده روی همان نمونه های استاندارد نیز در مقایسه با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی ندارند. لذا می توان در تحقیقات بعدی، روی معادلات به دست آمده برای مدل های سخت شوندگی مطالعه نمود و با تصحیح این روابط، دقت آنها بالا برد.

۳- برای اینکه نتایج تجربی به دست آمده روی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری های چرخه ای کمتر تحت تاثیر پارامترهایی مانند خطا در جوشکاری که در مجاورت فیکسچرها اتفاق می افتد و همچنین وجود رزوه برای گیردار کردن نمونه ها به فک ها بوجود می آید، قرار گیرد از فیکسچرهای پیشرفته تری مانند استفاده از گیره های حلقوی برای سفت کردن پوسته های استوانه ای به فک های دستگاه و همچنین استفاده از توبی هایی که به داخل پوسته ها وارد کرده و انتهای آنها را مخروطی کرده، می توان دقت آزمایش های تجربی را

بالتر برد، که این امر مستلزم پرداخت هزینه های تجربی بیشتر برای استفاده از قطعات تراشکاری شده توسط دستگاه CNC می باشد.

۴- می توان تاثیر نرخ بارگذاری و اثر دما را روی رفتار پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری های تناوبی مورد بررسی قرار داد.

۵- مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک پیشرفته ترین مدل پلاستیسیته ای می باشد که در نرم افزار آباکوس، رفتار منحنی های هیستریزیس را تحت بارگذاری های تناوبی شبیه سازی می کند، با این وجود نتایج عددی با استفاده از این مدل باز هم بر نتایج تجربی منطبق نمی باشد. می توان با استفاده از یک کد نویسی به زبان فرترن و وارد کردن فایل کدنویسی به نرم افزار آباکوس، ثابت های استفاده شده در معادلات موجود در نرم افزار را به تعداد سیکل گذرنده وابسته نمود تا حلقه های هیستریزیس شبیه سازی شده به نتایج عددی نزدیک تر گردند.

۶- می توان در وسط طول نمونه ها از ابزار اندازه گیری جابجایی خطی نیز استفاد کرد و در حین انجام آزمایش، همزمان با خواندن داده های تجربی جابجایی محوری و نیرو، داده های تغییرات شعاع سطح مقطع وسط طول نمونه ها را نیز اندازه گیری نمود. همچنین با استفاده از چند سنسور مذکور در محیط سطح مقطع، می توان تغییرات هندسی سطح مقطع از حال دایروی به بیضوی شدن را نیز در حین آزمایش ها بدست آورد.





## فهرست مراجع

- [1] Farshad, M. (1992), "*Design and analysis of shell structures*", Dordrecht: Kluwer.
- [2] Budiansky, B. and Hutchinson. J.W., (1972), "*Buckling of circular cylindrical shells under axial compression*", Netherlands: Delft University Press, pp. 239–260.
- [3] Arbocz, J. and Hol, J., (1991), "Collapse of axially compressed cylindrical shells with random imperfections", *AIAA J*, vol. 29, pp. 2247–2256.
- [4] Jullien, J.F. and Limam, A., (1998), "Effect of openings on the buckling of cylindrical shells subjected to axial compression", *Thin Wall Struct*, vol. 31, pp.187–202.
- [5] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., (1961), "*Theory of elastic stability*", New York: McGraw-Hill.
- [6] Farshad, M., (1994), "*Stability of structures*", Amsterdam: Elsevier.
- [7] Ugural, A.C., (1981), "*Stresses in plates and shells*", New York: McGraw-Hill.
- [8] Hutchinson, J.W., Tennyson, R.C. and Muggeridge, D.B., (1972), "Effect of local axisymmetric imperfection on the buckling of a cylindrical shell under axial compression". *AIAA J*, vol. 9, pp. 48–52.
- [9] Barut, A., Madenci, A., Britt, V.O. and Starnes, J.H., (1997), "Buckling of a thin, tension loaded, composite plate with an inclined crack", *Eng Fract Mech*, vol. 58, pp. 233–248.
- [10] Vafai, A. and Estekanchi, H.E., (1996), "A prologue to the buckling analysis of cracked shells", *Iranian Journal of Science and Technology*, vol. 20, pp.137–168.
- [11] Khamlichi, A., Bezzazi, M. and Limam, A., (2004), "Buckling of elastic cylindrical shells considering the effect of localized axisymmetric imperfections", *Thin Wall Struct*, vol.42, no. 7, pp. 1035–1047.
- [12] Hilburger, M.W. and Starnes, J.H., (2004), "Effects of imperfections of the buckling response of composite shells", *Thin Wall Struct*, vol. 42, no. 3, pp.369–397.
- [13] Mackerle, J., (1993), "Finite and boundary element analyses of shells-Finite Elements in Analysis and Design", vol. 14 pp.73–83.
- [14] Sih, G.C., (1973), "Methods of analysis and solutions of crack problems", Leyden (The Netherlands): Noordhoff International Publishing.
- [15] Shariati, M. and Rokhi, M.M., (2008), "Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Elliptical Cutout Subject to Axial Compression", *Thin-Walled Structures*, vol. 73, pp. 178–185.
- [16] Shariati, M., Sedighi, M., Saemi, J. and Eipakchi, H.R., (2010), "Numerical and Experimental Studies on Buckling of Cracked Cylindrical Shells under Combined Loading", *Mechanika*, vol. 84, pp. 12–19.
- [17] Shariati, M. and Rokhi, M.M., (2010), "Buckling of Steel Cylindrical Shells with an Elliptical Cutout", *International Journal of Steel Structures*", vol. 10, pp. 193–205.
- [18] شریعتی، محمود و مهدی زاده رخی، مسعود؛ (۱۳۸۹) "مطالعه تجربی و عددی کمانش پوسته های استوانه ای فولادی با گشودگی شبه بیضوی تحت بار فشاری محوری"، نشریه علمی پژوهشی دانشگاه امیرکبیر، شماره ۹، صفحات ۸-۱.
- [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] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.

- [23] Chen, G. et al, (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.
- [24] Chena, X. et al, (2005) "Experimental study on ratcheting behavior of eutectic tin–lead solder under multiaxial loading", *Materials Science and Engineering A*, vol. 406, pp. 86–94.
- [25] Kang, G. et al, (2006) "Experimental study on ratcheting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing", *Materials Science and Engineering A*, vol. 435–436, pp. 396–404.
- [26] Kang G.Z., Li, Y., Gao, Q., Kan, Q.H. and Zhang, J., (2005), "Uniaxial ratcheting in steels with different cyclic softening/hardening behaviours", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 29, pp. 93-103.
- [27] Kang G. and Liu, Y., (2008), "Uniaxial ratcheting and low-cyclic fatigue failure of the steel with cyclic stabilizing or softening feature", *Materials Science and Engineering A*, vol. 472, pp. 258-268.
- [28] Colin, J. and Fatemi, A., (2009), "Variable amplitude cyclic deformation and fatigue behaviour of stainless steel 304L including step, periodic, and random loadings" *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 33, pp. 205-220.
- [29] Avanzini, A. (2008) "Mechanical characterization and finite element modeling Mechanical characterization and finite element modeling molecular weight polyethylene", *Materials and Design*, vol. 29, pp. 330–343.
- [۳۰] میرباقری، آزاده؛ (۱۳۸۲) " بررسی و تفکیک واماندگی های ناشی از رچتینگ و شیک دان در مخازن تحت فشار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مکانیک.
- [۳۱] اخویسی، امیرهوشنگ، صدرنژاد، سید امیرالدین و شکیب، حمزه؛ (۱۳۸۸) "الگوریتم ساده ای برای تعیین سطح تسلیم چندگانه با پلاستیسیته سخت شوندگی کینماتیکی تحت بارگذاری تناوبی"، ویژه نامه مهندسی عمران، شماره ۳۵، صفحات ۲۹–۴۱.
- [32] Shariati, M., Hatami, H., Yarahmadi, H. and Eipakchi, 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.
- [33] Goggins J.M., Broderick B.M., Elghazouli A.Y. and Lucas A.S., (2005), "Experimental cyclic response of cold-formed hollow steel bracing members". *Engineering Structures*, vol. 27, pp. 977-989.
- [34] Kulkarni, S.C., Desai, Y.M., Kant, T., Reddy, G.R., Prasad, P., Vaze, K.K. and Gupta, C., (2004), "Uniaxial and biaxial ratcheting in piping materials—experiments and analysis", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 81, pp. 609-617.
- [35] Yoon, S., Hong, S.G., Lee, S.B. and Kim, B.S., (2003), "Low cyclic fatigue testing of 429EM stainless steel pipe", *International journal of fatigue*, vol. 8, no. 9-11, pp. 1301-1307.
- [36] Sun, G.Q. and Shang, D.G., (2010), "Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis", *Materials & design*, vol. 31, no. 1, pp. 126-133.
- [37] 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.
- [38] Elchalakani, M., (2007), "Plastic mechanism analyses of circular tubular members under cyclic loading", *Thin-Walled Structures*. vol. 45, pp. 1044-1057.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.

- [42] Zakavi, S.J., Zehsaz, M., and Eslami, 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.
- [43] Jiao, R., and Kyriakides, S., (2009), "Ratcheting, wrinkling and collapse of tubes under axial cycling", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, no. 14-15, pp. 2856-2870.
- [44] Zhang, J., Yu, Q., Jiang, Y., and Li, Q., (2011), "An experimental study of cyclic deformation of extruded AZ61A magnesium alloy", *International Journal of Plasticity*, vol. 27, no. 5, pp. 768-787.
- [45] Zhang, C., Liu, Y., and Goto, Y., (2008), "Plastic Buckling of Cylindrical Shells Under Transverse Loading", *Tsinghua Science & Technology*, vol. 13, no. 2, pp.202-210.
- [46] Nip, K.H., Gardner, L. and Elghazouli, A.Y., (2010), "Cyclic testing and numerical modelling of carbon steel and stainless steel tubular bracing members", *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 424\_441.
- [47] ASTM A370-05, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.
- [48] Kulkarni, S.C., Desai, Y.M., Kant, T., Reddy, G.R., Parulekar, Y. and Vaze, K.K. (2003), "Uniaxial and biaxial ratchetting study of SA333 Gr.6 steel at room temperature", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 80, pp. 179-185.
- [49] Boller, C. and Seeger, T., (1987), "*Materials data for cyclic loading*", Amsterdam, Elsevier.
- [50] ABAQUS Analysis User's manual, (2009), v6.9.1, section 19.2.2: models for metals subjected to cyclic loading.
- [51] Owen, D.R.J. and Hinton, F., (1980), "*Finite elements in plasticity – theory and practice*", Pineridge Press Ltd.
- [52] ABAQUS Theory manual, (2009), v6.9.1, section 4.3.5: models for metals subjected to cyclic loading.
- [53] Chaboche, J.L. and Lemaitre, j., (1990), "*Mechanics of solid materials*", Cambridge University Press.

## واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی

|                         |                 |   |                               |
|-------------------------|-----------------|---|-------------------------------|
| Fatigue                 | خستگی           | LVDT                                    | ابزار اندازه گیری جابجایی خطی |
| High cycle fatigue      | خستگی پرتکرار   | Finite Element                          | اجزای محدود                   |
| Linear                  | خطی             | Extensometer                            | طول سنج                       |
| Variational Method      | روش تغییرات     | Variational principle                   | اصل تغییرات                   |
| Approximate Ritz method | روش تقریبی ریتز | Element                                 | المان                         |
| Relaxation              | رها سازی        | Accumulation of Residual Plastic Strain | انباشت کرنش پلاستیک باقیمانده |
| Output database         | فایل خروجی      | INSTRON                                 | اینسترون                      |
| Input file              | فایل ورودی      | Ovalization                             | بیضی گون شدن                  |
| Mesh                    | مش              | Partial                                 | پاره ای                       |
| Load Increment          | نمو بار         | Finite Difference                       | تفاضل محدود                   |
| Load cell               | نیرو سنج        | Finite Volume                           | حجم محدود                     |
|                         |                 | Low cycle fatigue                       | خستگی کم تکرار                |

## واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی

|   |                                  |                       |                               |
|---|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Accumulation of Residual Plastic Strain | انباشت کرنش<br>پلاستیک باقیمانده | Load cell             | نیرو سنج                      |
| Approximate Ritz method                 | روش تقریبی ریتز                  | Load Increment        | نمو بار                       |
| Element                                 | المان                            | Low cycle fatigue     | خستگی کم تکرار                |
| Extensometer                            | طول سنج                          | LVDT                  | ابزار اندازه گیری جابجایی خطی |
| Fatigue                                 | خستگی                            | Mesh                  | مش                            |
| Finite Difference                       | تفاضل محدود                      | Output database       | فایل خروجی                    |
| Finite Element                          | اجزای محدود                      | Ovalization           | بیضی گون شدن                  |
| Finite Volume                           | حجم محدود                        | Partial               | پاره ای                       |
| High cycle fatigue                      | خستگی پرتکرار                    | Ratcheting            | رچتینگ                        |
| Input file                              | فایل ورودی                       | Relaxation            | رها سازی                      |
| INSTRON                                 | اینسترون                         | Variational Method    | روش تغییرات                   |
| Least Squares Method                    | روش حداقل مربعات                 | Variational principle | اصل تغییرات                   |
| Linear                                  | خطی                              |                       |                               |

## **Abstract**

The softening and ratcheting behavior of steel cylindrical shells under force-control and displacement-control of axial cyclic loadings were investigated numerically and experimentally. Experimental tests were performed using an INSTRON 8802 servo-hydraulic machine. The numerical analysis was carried out by ABAQUS software using the following advanced plasticity models based on Von Mises criterion: isotropic hardening, linear kinematic hardening, and nonlinear isotropic/kinematic hardening and the results obtained from the experiments were compared with numerical results. The specimens were subjected to force-controlled cycling with non-zero mean stress which causes the accumulation of plastic strain or ratcheting behavior in continuous cycles. Cylindrical shell under symmetric axial displacement-controlled loading showed softening behavior and due to localization buckling which occurred in compressive stress-strain curve of the shell; the softening rate is higher. Another object of this investigation is to study the influence of cutout on the behavior of hysteresis curves of cylindrical shells under various types of loadings. The results showed that the rate of softening and ratcheting increases by creating the cutouts. The nonlinear isotropic/kinematic hardening model simulates the softening and ratcheting behavior of cylindrical shell accurately but the isotropic and linear kinematic hardening models cannot simulate the softening and ratcheting behavior of a cylindrical shell.

**Keywords:** Cylindrical Shell; Axial Cyclic Loading; Ratcheting; Softening; Hardening Model



Shahrood University of Technology  
Department of Mechanical Engineering

**Numerical and Experimental Analysis of Buckling Life of Cylindrical  
Shells with Circular Cutout under Cyclic Axial Loading**

Thesis

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

By:

**Hossein Hatami**

Supervisors:

**Dr. Mahmoud Shariati**

**Dr. Hamid Reza Epakchi**

Summer 2011