



## تحلیل تجربی رفتار رچتینگ و نرم‌شوندگی پوسته‌های جدار نازک فولادی ضدزنگ SS304L تحت بارگذاری خمشی خالص تناوبی

محمود شریعتی<sup>1\*</sup>، کمال کلاسنگیانی<sup>2</sup>، بهزاد جهانگیری<sup>3</sup>، امین صابر<sup>4</sup>

- 1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود  
 4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 \* مشهد، صندوق پستی 9177948944@um.ac.ir، mshariati44

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 22 بهمن 1394  
 پذیرش: 25 اسفند 1394  
 ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1395  
 کلید واژگان:

در این تحقیق به بررسی تجربی رفتار رچتینگ و نرم‌شوندگی پوسته‌های جدار نازک فولادی ضدزنگ SS304L تحت بارگذاری خمشی خالص به صورت تناوبی پرداخته شده است. آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون 8802 تحت شرایط بارگذاری نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل انجام شده است و تأثیر پارامترهای مختلف شامل نیروی میانگین، دامنه نیرو، طول پوسته‌های استوانه‌ای، وجود گشودگی و موقعیت آن بررسی شد. در بارگذاری جابجایی-کنترل، رفتار نرم‌شوندگی در پوسته‌ها مشاهده می‌شود و تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر انباشتگی کرنش پلاستیک یا پدیده‌ی رچتینگ اتفاق می‌افتد. براساس نتایج تجربی، رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک و نرخ تغییر شکل پلاستیک مشاهده شد که بیانگر صلیبت فیکسچرهای مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی است. مشاهده شد که افزایش دامنه‌ی نیرو باعث افزایش نیروی بیشینه و در نتیجه منجر به افزایش تغییر شکل پلاستیک می‌شود. همچنین در بررسی وجود گشودگی، پوسته استوانه‌ای دارای گشودگی در میانه، دارای جابجایی رچتینگ بیشتری در مقایسه با پوسته استوانه‌ای بدون گشودگی است و باعث رشد ترک از این نواحی می‌شود. در بارگذاری جابجایی-کنترل، پاسخ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی خالص تناوبی به چهار ناحیه رشد اولیه، گذر، پایدار و رشد ترک تقسیم می‌شود.

پوسته جدار نازک  
 بارگذاری خمشی خالص تناوبی  
 رچتینگ  
 نرم‌شوندگی  
 گشودگی

## Experimental study on ratcheting and softening behavior of stainless steel 304L thin-walled shells under cyclic pure bending load

Mahmoud Shariati<sup>1\*</sup>, Kamal Kolasangiani<sup>1</sup>, Behzad Jahangiri<sup>2</sup>, Amin Saber<sup>1</sup>

- 1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran  
 \* P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, mshariati44@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 11 February 2016  
 Accepted 15 March 2016  
 Available Online 20 April 2016

### Keywords:

Thin-walled shell  
 Cyclic pure bending load  
 Ratcheting  
 Softening, Cutout

### ABSTRACT

In this research, softening and ratcheting behavior of SS304L thin-walled shells under cyclic pure bending load were investigated. Experimental tests were carried out by a servo-hydraulic INSTRON 8802 machine under force-control and displacement-control conditions and the effect of different parameters such as mean force, force amplitude, length of the shells existence and position of cutout were examined. Under displacement-control loading, softening behavior was observed and under force-control loading with non-zero mean force, accumulation of plastic deformation or ratcheting phenomena occurred. Based on experimental results, linear relation was observed between plastic energy and rate of plastic deformation, which shows the rigidity of fixtures used in the experimental tests. It was observed that increase of the force amplitude was accompanied by an increase in maximum force and plastic deformation. Also, analyzing the existence of cutout, ratcheting displacement of cylindrical shells with cutout in the middle of shell is higher than that of the shell without cutout and crack propagation occurred in this area. Under displacement-control loading, reaction of thin-walled shells under cyclic pure bending load is divided into four areas, incubation, transition, steady-state and crack propagation.

### 1- مقدمه

صنایع دارند. از کاربردهای پوسته‌ها می‌توان در سازه‌های هوایی برای بدنه هواپیماها، روکش بال و دم هواپیما، بدنه‌ی موشک اشاره کرد. استفاده از ورق‌ها و پوسته‌ها در صنایع دیگر نظیر خودروسازی، شناورسازی، مخازن نفت

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

Please cite this article using:

M. Shariati, K. Kolasangiani, B. Jahangiri, A. Saber, Experimental study on ratcheting and softening behavior of stainless steel 304L thin-walled shells under cyclic pure bending load, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 324-332, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

داخلی ثابت بررسی کردند و با رسم نمودار ممان-جابجایی مشاهده کردند که شبیه‌سازی کرنش رچتینگ با استفاده از مدل‌های چند ساختاری بهتر است [7].

یوشیدا و همکاران در سال 2010 ثابت کردند که حتی در دمای اتاق تعدادی از مواد از قبیل فولاد SS304L، خاصیت ویسکوزیته دارند و تغییر در نرخ تنش بر رچتینگ تأثیر می‌گذارد. یوشیدا تعدادی آزمایش یک محوره و چند محوره بر روی تداخل رچتینگ و خزش در دمای اتاق و دمای 65 سانتیگراد انجام داد و بر روی تأثیر نرخ تنش، زمان نگهداری قله تنش<sup>1</sup> و نسبت تنش بر رچتینگ بحث کرد [14].

شریعتی و همکاران در سال 2010 روی نمونه‌های استاندارد پلی‌استال، بارگذاری محوری تناوبی انجام داده و تأثیر دامنه نیرو و نیروی متوسط را روی رفتار رچتینگ نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. افزایش کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ با افزایش پارامترهای دامنه نیرو و نیروی متوسط از نتایج به دست آمده طی این مطالعه می‌باشد [15]. ژو و همکاران در سال 2012 به‌طور تجربی خواص کششی و کرنش رچتینگ را تحت بار خمشی بر روی میله فولادی Z2CND18.12 بررسی کردند و به مطالعه رابطه بین مدول یانگ و دما پرداختند. انباشتگی کرنش غیرالاستیک در دما و بارگذاری‌های مختلف به‌طور آزمایشگاهی مشاهده شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییرات مدول یانگ به‌صورت خط با دما تغییر می‌کند و به تدریج با افزایش دما کاهش می‌یابد و کرنش رچتینگ به شدت به دما وابسته است [16].

شریعتی و حاتمی در سال 2012 به‌طور تجربی رفتار نرم‌شوندگی و رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولاد ضدزنگ SS304 را تحت بارگذاری محوری سیکنی در شرایط نیرو-کنترل و جابه‌جایی کنترل مطالعه کردند. در بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر، شاهد پدیده رچتینگ بودند و انباشتگی کرنش پلاستیک تا شکست پوسته ادامه یافت. آن‌ها مشاهده کردند که نرخ کرنش رچتینگ با افزایش نیروی دامنه، افزایش می‌یابد. در بارگذاری جابه‌جایی-کنترل پوسته رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کمانش در بارگذاری فشاری، نرم‌شوندگی شدت یافت [17].

شریعتی و همکاران به مطالعه رفتار رچتینگ و نرم‌شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای به صورت یک سر گیردار تحت بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط نیرو کنترل و جابه‌جایی-کنترل پرداختند و تأثیر دامنه جابه‌جایی، نیرو میانگین و تاریخچه بارگذاری بررسی شد. آن‌ها همچنین با ایجاد گشودگی دایروی در موقعیت‌های مختلف پوسته استوانه‌ای مشاهده کردند که در نمونه‌های دارای گشودگی در نقاط انتهایی، جایی که گشتاور خمشی دارای بیشترین مقدار است، انباشتگی تغییر شکل پلاستیک بیشتر است [18].

با توجه به کارهای گذشتگان که اکثراً به بررسی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری و پیچشی یا خمش سه نقطه‌ای به صورت تناوبی پرداخته‌اند، در این پژوهش سعی می‌شود که فیکسچری جهت اعمال بارگذاری خمش خالص تناوبی بر پوسته‌های استوانه‌ای طراحی و ساخته شود تا بتوان رفتار رچتینگ آن‌ها را تحت این نوع بارگذاری بررسی کرد. در این مقاله، پوسته‌های جدار نازک تحت بارگذاری خمش خالص تناوبی قرار می‌گیرند و تأثیر نیروی میانگین، وجود گشودگی و طول تحت خمش بررسی

و گاز در صنایع پتروشیمی، خطوط لوله، مخازن نگهداری مایعات و سیلوهای انبار دانه‌های نباتات و غلات، مخازن تحت فشار، سرپوش‌ها یا کله‌گی‌ها، و غیره رایج است. این پوسته‌ها در طول عمر خود ممکن است تحت بارهای مختلف تناوبی قرار گیرند. اگرچه مقدار کرنش پلاستیک در یک سیکل بارگذاری کم می‌باشد، اما انباشتگی آن‌ها در یک جهت در طول بارگذاری، قابل ملاحظه است. این پدیده به‌عنوان پلاستیسیته‌ی سیکلی و یا رچتینگ شناخته شده است.

از آنجایی که رچتینگ یک انباشتگی تغییر شکل غیرالاستیک سیکل به سیکل می‌باشد، شبیه‌سازی و تعیین رفتار آن به‌طور دقیق امکان‌پذیر نخواهد بود و علاوه بر آن مدل‌های ساختاری سیکلی رچتینگ به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی نیز قادر به تعیین دقیق رچتینگ نبودند. بنابراین در دو دهه گذشته، رچتینگ به‌شدت مورد مطالعه قرار گرفته است. از مشکلات مهمی که باعث می‌شود بارگذاری تناوبی روی پوسته‌های استوانه‌ای به‌ندرت مورد مطالعه تجربی قرار گیرد، ساخت فیکسچرهای مخصوص به آن‌ها می‌باشد.

به‌طور گسترده، بارگذاری خمشی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای در کاربردهای مهندسی مشاهده می‌شود، بنابراین مطالعات آزمایشگاهی بر روی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی تناوبی انجام شده است [8-1]. مورتون و همکاران [9] به بررسی لوله‌های فولادی ضدزنگ و لوله‌های فولادی نرم دارای فشار داخلی با گشتاور خمشی سیکلی متقارن پرداختند و مشاهده کردند که انباشتگی کرنش پلاستیک نمونه‌های فولادی نرم بیشتر از نمونه‌های فولادی ضدزنگ می‌باشد.

گائو و همکاران [10] با استفاده از فیکسچر خمش شبه سه نقطه‌ای به مطالعه تجربی انباشتگی کرنش پلاستیک فولادهای کربنی پرداختند و مشاهده کردند که در آزمایش خمش چند مرحله‌ای، نرخ انباشتگی کرنش با افزایش مقدار بار، افزایش می‌یابد اما با اعمال مقدار بار کم پس از بارگذاری با بار زیاد، نرخ انباشتگی کرنش کاهش و یا حتی از بین می‌رود.

یانگ در سال 2005 به بررسی رفتار خستگی کم‌تکرار و رچتینگ فولاد CK45 تحت بارگذاری تک‌محوره پرداخت. در این مقاله آزمایش‌های کرنش-کنترل با و بدون کرنش میانگین به منظور بررسی اثر کرنش میانگین بر عمر خستگی انجام شده است. همچنین او براساس نتایج آزمایش‌های کرنش-کنترل، معادلاتی برای پیش‌بینی عمر خستگی به‌دست آورد و از آن‌ها برای پیش‌بینی آسیب خستگی در شکست رچتینگ استفاده کرد [11].

چنا و همکاران در سال 2005 عملکرد چهار مدل ساختاری را در پاسخ رچتینگ فولاد CK45 برای بارگذاری محوری/پیچشی بررسی کردند. مشاهده شد که مدل اهنو-وانگ در بارگذاری چند محوره، رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. در حالی که مدل جیانگ-سهیتوگلو پیش‌بینی خوبی برای بارگذاری چند محوره محوری/پیچشی با انتخاب ترم بازگشتی دینامیکی ارائه داد [12].

کانگ و همکارانش در سال 2006 به بررسی تأثیرات رچتینگ و خستگی فولاد ضد زنگ SS304 در بارگذاری تک‌محوره تحت شرایط نیرو-کنترل و در دمای اتاق پرداختند. اثرات تنش میانگین، دامنه‌ی تنش و نسبت تنش حداکثر به حداقل برکرنش رچتینگ و عمر نمونه‌ها در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. آن‌ها مشاهده کردند که کرنش رچتینگ و عمر خستگی این ماده وابستگی زیادی به تنش میانگین، دامنه تنش و نسبت تنش دارد [13].

سید و همکاران در سال 2008، به‌طور تجربی رفتار کرنش رچتینگ شعاعی و محیطی یک لوله فولادی مستقیم را تحت بارگذاری خمشی و فشار

<sup>1</sup> Peak stress hold time

$$\alpha_y = \alpha_z = -\frac{1}{2}\alpha_x \quad (5)$$

با توجه به روابط (1) و (5) [20]:

$$\left| \sigma_x - \left(\frac{3}{2}\right)\alpha_x \right| = \sigma_0 \quad (6)$$

پس [20]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_0 + \left[ \frac{\beta}{\gamma} + \frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)] \right], & d\varepsilon_x^P \geq 0 \\ \sigma_x &= -\sigma_0 + \left[ \frac{\beta}{\gamma} - \frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)] \right], & d\varepsilon_x^P < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

تنش‌های ابتدایی و انتهایی در حالت بارگذاری به ترتیب برابر  $\sigma_m - \sigma_a$  (اختلاف تنش میانگین و دامنه) و  $\sigma_m + \sigma_a$  (مجموع تنش میانگین و دامنه) است و در حالت باربرداری، تنش‌های ابتدایی و انتهایی به ترتیب  $\sigma_m + \sigma_a$  و  $\sigma_m - \sigma_a$  می‌باشند و در این شرایط و با استفاده از رابطه (7)، کرنش‌های ابتدایی در حالت بارگذاری ( $\varepsilon_1$ ) و باربرداری ( $\varepsilon_3$ ) و کرنش‌های انتهایی در حالت بارگذاری ( $\varepsilon_2$ ) و باربرداری ( $\varepsilon_4$ ) طبق روابط (8) و (9) می‌باشند. بیشترین کرنش در حالت بارگذاری و با تنش  $\sigma_m + \sigma_a$  رخ می‌دهد. در لحظه‌ی بارگذاری کرنش‌های ابتدایی و انتهایی به صورت رابطه (8) می‌باشد.

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_{x0}^P - \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_{x0}^P - \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

و در لحظه‌ی باربرداری نیز کرنش‌های ابتدایی و انتهایی به صورت رابطه (9) می‌باشد:

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= \varepsilon_{x0}^P + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \\ \varepsilon_4 &= \varepsilon_{x0}^P + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{3}{2} \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

انرژی کرنشی پلاستیک در هر سیکل طبق رابطه‌ی (10) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} w_p &= \oint_{cycle} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^P \\ &= \int_{\sigma_m - \sigma_a}^{\sigma_m + \sigma_a} (\sigma_x)_{Loading} d\varepsilon_x^P \\ &\quad + \int_{\sigma_m + \sigma_a}^{\sigma_m - \sigma_a} (\sigma_x)_{Unloading} d\varepsilon_x^P \\ &= -\frac{1}{\gamma} \left[ 2\sigma_a + \left( \sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) \left[ \ln \left( \sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) - \ln \left( \sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) \right] \right] \\ &\quad + \frac{1}{\gamma} \left[ -2\sigma_a + \left( -\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) \left[ \ln \left( \sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) - \ln \left( \sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) \right] \right] \\ &= -\frac{4\sigma_a}{\gamma} + \left( \sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_2 - \varepsilon_{x0}^P) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_{x0}^P)] \\ &\quad + \left( -\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_4 - \varepsilon_{x0}^P) - (\varepsilon_3 - \varepsilon_{x0}^P)] \end{aligned} \quad (10)$$

می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش طول پوسته استوانه‌ای به دلیل افزایش گشتاور خمشی، جابجایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد.

## 2- انرژی و رابطه آن با نرخ تغییر شکل موسان

انرژی به‌عنوان یک تابع با مقدار اسکالر و مستقل از جهت، قابل مقایسه برای بارگذاری مختلف مرکب سیکی و بارگذاری عمودی سیکی برای طول‌های مختلف می‌باشد. انرژی پلاستیک و انرژی کل (مجموع انرژی کرنشی پلاستیک و انرژی کرنشی الاستیک) با افزایش تعداد سیکل به مقدار پایداری می‌رسند و از این جهت به‌عنوان پارامترهای مناسب برای بررسی رفتار رچتینگ می‌باشند. در این قسمت انرژی پلاستیک و انرژی الاستیک در حلقه‌ی هیستریزس نشان داده شده است. پوسته استوانه‌ای تحت نیروی میانگین بزرگ‌تر دارای انرژی پلاستیک بزرگ‌تر است و این به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگ‌تر در مقاطع مختلف طول موثر پوسته است. اکثر مواد در اثر بارگذاری سیکی تا یک تعداد مشخص از سیکل دچار سخت‌شوندگی و یا نرم‌شوندگی می‌شوند؛ سپس به حالت پایدار<sup>1</sup> می‌رسند و یا تغییر اندازه‌ی سطح تسلیم متوقف می‌شود. با این حال رچتینگ همچنان بعد از پایداری سیکی مواد ادامه می‌یابد. از این رو می‌توان سخت‌شوندگی سینماتیک را به عنوان اصلی‌ترین دلیل وقوع رچتینگ دانست. به عبارت دیگر دخالت دادن سخت‌شوندگی ایزوتروپیک ضروری به نظر نمی‌رسد [19].

همه‌ی مدل‌های سخت‌شوندگی دارای یک مشخصه مشترک می‌باشند و آن این است که براساس معیار تسلیم ون مایرز و مدل سخت‌شوندگی سینماتیک بنا نهاده شده‌اند. معیار تسلیم ون مایرز به‌صورت رابطه‌ی (1) تعریف می‌شود [20].

$$f(\sigma - \alpha) = \sqrt{(s - \alpha) \cdot (s - \alpha)} - k = 0 \quad (1)$$

در این رابطه  $s$  تانسور تنش انحرافی،  $\alpha$  تانسور پیش تنش انحرافی (نشان دهنده‌ی مرکز سطح تسلیم) و  $k = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_0$ ، اندازه سطح تسلیم است که در مدل سخت‌شوندگی ثابت است.

مدل سخت‌شوندگی آرمسترانگ-فریدریش<sup>2</sup> به‌عنوان یکی از مدل‌های اولیه با اضافه کردن یک ترم، مورد استفاده محققین بسیاری قرار گرفته است و به صورت رابطه‌ی (2) می‌باشد [20].

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

مدل سخت‌شوندگی AF برای بارگذاری تک‌محوره به فرم رابطه‌ی (3) هست [20].

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

با حل رابطه‌ی (3) برای شرایط بارگذاری و باربرداری رابطه‌ی (4) استخراج می‌شود [20].

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{2\beta}{3\gamma} + \left( \alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)], & d\varepsilon_x^P \geq 0 \\ \alpha_x = -\frac{2\beta}{3\gamma} + \left( \alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)], & d\varepsilon_x^P < 0 \end{cases} \quad (4)$$

همچنین [20]:

<sup>1</sup> Stabilize

<sup>2</sup> Armstrong-Frederick

تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد در شکل 3 برای فولاد SS304 نشان داده شده است.

### 3-3- بارگذاری و شرایط مرزی

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

برای اعمال بارگذاری خمشی، فیکسچر موردنظر طراحی شده است. جهت ثابت نگهداشتن پوسته‌ها در داخل فیکسچر، از قرقره‌های تفلون تراش کاری شده به دو صورت انحنای جهت لوله‌ها و پله‌ای جهت قوطی‌ها استفاده شده است. در لبه فک‌ها پیچ‌های قابل تنظیمی طراحی شده است که پوسته‌ها با هر قطری درون آن ثابت گردد. دو فک بالایی قابلیت حرکت به صورت ریلی در طول‌های مؤثر 280mm, 650mm را دارد. بار تناوبی از طریق فک پایین مطابق شکل 4 به ابتدای پوسته اعمال می‌گردد. در این شکل پوسته‌ی استوانه‌ای با طول 280mm نشان داده شده است که به صورت متقارن با استفاده از فیکسچرهای طراحی شده به دستگاه اینسترون متصل می‌شوند. با برش پوسته در طول‌های متفاوت، نیروی محوری، برشی و گشتاور خمشی به صورت تناوبی مقطع ایجاد می‌شود که به دلیل ضخامت کم پوسته‌ها از اثر نیروی برشی صرف‌نظر می‌شود.

### 4- نتایج و بحث

#### 4-1- بارگذاری نیرو - کنترل

##### 4-1-1- تأثیر نیروی میانگین بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر 280mm تحت بارگذاری خمشی تناوبی با شرایط نیرو-کنترل قرار می‌گیرند. در این شرایط انباشتگی تغییر شکل پلاستیک یا پدیده رچتینگ مشاهده شد. در شکل 5 نمودار



Fig.3 stress-strain curve for SS304

شکل 3 نمودار تنش کرنش برای فولاد SS304

جدول 1 خواص مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش

Table 1 Mechanical property of specimens		
تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول یانگ (MPa)
510	768	204

با مقایسه‌ی روابط (8)، (9) و (10)، نتیجه می‌شود که انرژی کرنشی پلاستیک با نمو بیشترین کرنش در هر سیکل، رابطه‌ی خطی دارد. یا به عبارت دیگر انرژی پلاستیک با تغییر طول نمونه در هر سیکل به صورت خطی تغییر می‌کند. با توجه به این که در این تحقیق هدف بررسی رفتار رچتینگ پوسته‌های است، بنابراین باید از صلبیت فیکسچر مورد استفاده اطمینان حاصل کرد. وجود رابطه خطی (10) در نتایج، بیانگر صلبیت فیکسچر و کاهش خطا می‌باشد.

### 3- مواد و روش‌ها

#### 3-1- دستگاه آزمایش

آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک اینسترون 8802 انجام شده است که توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت 250 کیلو نیوتن را دارد (شکل 1). همچنین برای نمونه‌های مورد آزمایش، فیکسچر مناسب جهت اعمال گشتاور خمشی طراحی شده است که در شکل 2 نشان داده شده است. برای بدست آوردن جابه‌جایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج نیز استفاده شده است.

#### 3-2- هندسه و خواص مکانیکی

در این تحقیق پوسته استوانه‌ای با قطر 25 و 32 میلی‌متر و پوسته مربعی با طول ضلع 20 میلی‌متر و پوسته مستطیلی با ابعاد 20 و 40 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضخامت همه پوسته‌ها 1.1 میلی‌متر است. جنس تمامی نمونه‌ها از فولاد SS304 می‌باشد که خواص مکانیکی آن در جدول 1 نشان داده شده است. طول مؤثر در این آزمایش در دو حالت 280 میلی‌متر و 650 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته شده است.

جهت به‌دست آوردن خواص مکانیکی پوسته فولادی، از آزمایش کشش استاندارد بر طبق استاندارد ASTM-E8 [21] استفاده شده است. منحنی



Fig.1 Test machine with fixture

شکل 1 دستگاه آزمایش به همراه فیکسچر نصب شده به آن

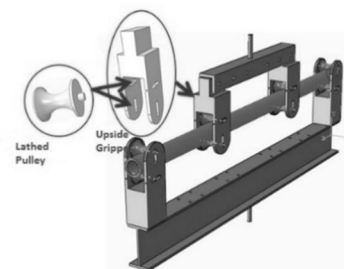
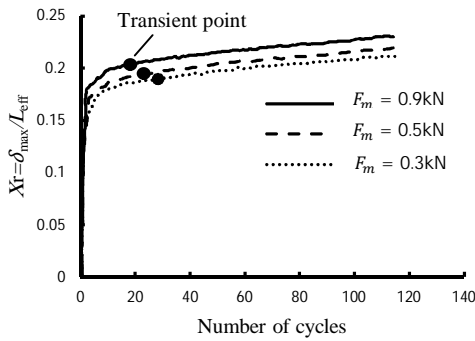


Fig.2 designed fixture in order to making pure bending

شکل 2 فیکسچر طراحی شده جهت اعمال خمش خالص



**Fig.6** Ratcheting displacement vs. number of cycles for cylindrical shells with different mean forces and force amplitude 1.4kN under pure bending

شکل 6 جابه‌جایی رچتینگ پوسته برحسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌های با نیروی میانگین  $F_m$  مختلف و دامنه نیروی 1.4kN تحت خمش خالص

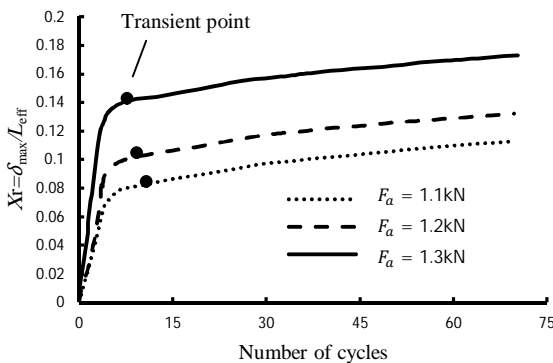
میانگین 0.1kN و دامنه نیرو 1.1kN، 1.2kN و 1.3kN قرار گرفت. به دلیل بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن (نیروی میانگین غیرصفر) رفتار رچتینگ در پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد شده است. با توجه به شکل 7 با افزایش دامنه نیرو، جابه‌جایی رچتینگ افزایش می‌یابد. در این شرایط بارگذاری، افزایش دامنه نیرو موجب افزایش نیروی بیشینه می‌شود و باعث تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه انباشتگی کرنش نیز افزایش می‌یابد.

این پدیده به نابجایی زیرساختارهای ماده در طول بارگذاری سیکلی مربوط می‌شود [23]. به دلیل بارگذاری غیرممتقارن با تنش میانگین مثبت، نابجایی‌های ایجاد شده در هر سیکل در طی بارگذاری بیشتر از برابرداری می‌باشند در نتیجه مقداری از نابجایی از بین رفته و بقیه آن به‌عنوان پسماند در زیر ساختارهای ماده باقی می‌ماند. افزایش چگالی نابجایی با افزایش کرنش پلاستیک همراه است. بنابراین با افزایش دامنه نیرو برای یک نیروی میانگین ثابت، به دلیل افزایش چگالی نابجایی‌های باقی‌مانده، انباشتگی تغییر شکل پلاستیک کلی، افزایش می‌یابد.

همچنین افزایش دامنه نیرو باعث می‌شود که انباشتگی تغییر شکل پلاستیک با نرخ ثابت، سریع‌تر اتفاق بیافتد که محل نقاط گذار در نمودار شکل 7 بر این امر صحنه می‌گذارد.

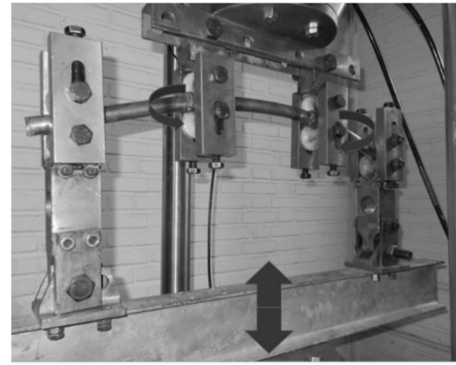
**1-4-3- اشباع جابه‌جایی رچتینگ**

در شکل 8 تغییرات نرخ رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پوسته‌های



**Fig.7** Ratcheting bending vs. number of cycles with mean force 0.1kN and different force amplitudes

شکل 7 جابه‌جایی رچتینگ برحسب تعداد سیکل در نیروی میانگین 0.1kN و دامنه نیروهای  $F_a$  مختلف



**Fig.4** Converting tensile-compact load into pure bending load by fixture

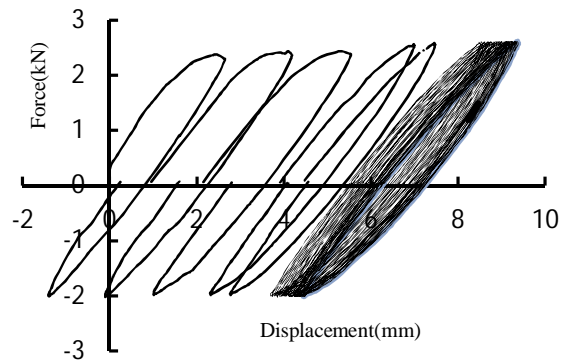
شکل 4 نحوه تبدیل بار کششی فشاری به بار خمش خالص توسط فیکسچر

حلقه‌های هستریزیس نیرو-جابه‌جایی نشان داده شده است. آزمایش‌های نیرو-کنترل در 120 سیکل انجام شد و در شکل 6 نسبت جابه‌جایی رچتینگ به طول مؤثر پوسته بر حسب تعداد سیکل برای سه نیروی میانگین تحت دامنه نیروی 1.4kN نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای نیروی میانگین ثابت با افزایش تعداد سیکل، جابه‌جایی رچتینگ افزایش و نرخ رچتینگ کاهش می‌یابد که این رفتار رچتینگ در حرکت حلقه‌های هستریزیس در شکل 6 نیز مشاهده شد. همچنین با افزایش نیروی میانگین در دامنه ثابت، به دلیل افزایش گشتاور خمشی اعمالی، جابه‌جایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی میانگین، نیروی بیشینه و گشتاور خمشی ایجاد شده در لوله و در نتیجه تنش‌های نرمال افزایش می‌یابند. با تغییر نیروی بیشینه، چگالی نابجایی‌های زیرساختارهای ماده افزایش یافته که با افزایش کرنش پلاستیک همراه است.

نقطه‌ی گذر<sup>1</sup> به‌عنوان نقطه‌ای که بین ناحیه با نرخ جابه‌جایی رچتینگ زیاد و ناحیه با نرخ جابه‌جایی رچتینگ ثابت قرار دارد، تعریف می‌شود تا رچتینگ گذرا<sup>2</sup> و رچتینگ پیوسته<sup>3</sup> را متمایز کند [22]. مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی میانگین نقطه گذر در تعداد سیکل‌های کمتری اتفاق می‌افتد و به‌عبارت دیگر نیروی میانگین بزرگ‌تر باعث تسریع در پایداری حلقه‌های هستریزیس می‌شود.

**1-4-2- تأثیر دامنه نیرو بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای**

در این قسمت هر یک از پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری نیروی



**Fig.5** Load-displacement hysteresis loops curve

شکل 5 نمودار حلقه‌های هستریزیس نیرو- جابه‌جایی

<sup>1</sup> Transient point  
<sup>2</sup> Transient ratcheting  
<sup>3</sup> Continuous ratcheting

می‌شود، در نتیجه کرنش‌های پلاستیک بزرگ‌تری در اطراف گشودگی مشاهده می‌شود و اطراف گشودگی به‌عنوان محل بحرانی در این پوسته‌ها می‌باشد و این امر باعث رشد ترک می‌گردد، که این ترک در سیکل 24 اتفاق

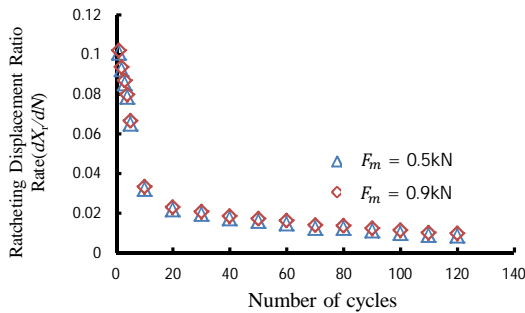


Fig.8 Ratcheting displacement rate vs. number of cycles for cylindrical shells under pure bending with different mean forces

شکل 8 نرخ جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت خمشی خالص به ازای نیروهای میانگین  $F_m$  مختلف

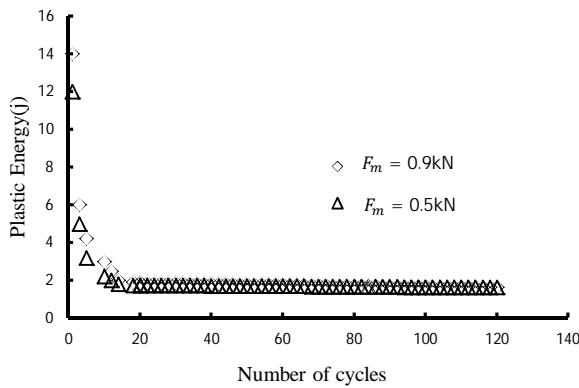


Fig.9 Plastic energy vs. number of cycles for cylindrical shells with different mean forces and force amplitude 1.4kN under pure bending

شکل 9 انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیروی میانگین  $F_m$  مختلف و دامنه نیروی 1.4kN تحت خمشی خالص

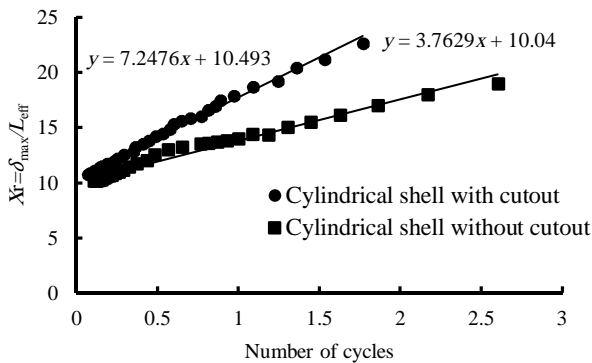


Fig.10 Plastic energy vs. ratcheting displacement rate

شکل 10 انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابه‌جایی رچتینگ

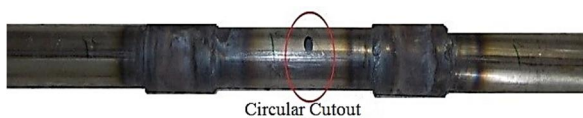


Fig.11 Circular cutout at the middle of cylindrical shells

شکل 11 گشودگی دایره‌ای در مرکز پوسته استوانه‌ای

استوانه‌ای با دامنه نیروی 1.4kN و نیروهای میانگین 0.5 و 0.9kN نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نرخ جابه‌جایی رچتینگ برای هر دو نیرو با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد. کاهش نرخ جابه‌جایی رچتینگ و میل کردن آن به صفر یا به عبارت دیگر توقف انباشتگی تغییر شکل پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ، به دلیل شکل‌گیری و گسترده‌ی نایجایی‌ها با تغییر شکل‌های سیکلی است. وقتی که ماده‌ای تحت تغییر شکل‌های سیکلی است، نایجایی‌هایی در نتیجه‌ی سخت‌شوندگی کرنشی تولید می‌شوند. این نایجایی‌ها، ابتدا به حالت آشفته قرار گرفته‌اند و سپس با افزایش تعداد سیکل، به شکل المان‌های نایجایی منظم درمی‌آیند. پس از تعداد سیکل معین (بستگی به کرنش‌های سیکلی اعمالی دارد)، نایجایی‌های تولیدشده‌ی جدید، شکل‌بندی پایدار و منظمی به خود می‌گیرند و این تغییر شکل موجب کاهش و صفر شدن نرخ جابه‌جایی رچتینگ می‌شود [23].

#### 4-1-4- انرژی پلاستیک و رابطه آن با نرخ جابه‌جایی رچتینگ

در شکل 9 انرژی پلاستیک برای پوسته‌های استوانه‌ای با دامنه نیروی 1.4kN و نیروهای میانگین 0.5 و 0.9kN رسم شده است. مشاهده می‌شود که در سیکل‌های اولیه با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک به شدت کاهش می‌یابد و در ادامه به مقدار ثابتی می‌رسد که این بیانگر پایداری حلقه‌های هیستریزس و یا به عبارت دیگر پدیده شیک دان<sup>1</sup> است که این رفتار همان‌طور که در بخش قبل گفته شد به دلیل شکل‌گیری نایجایی‌ها از حالت نامنظم به منظم می‌باشد. در شکل 10 رابطه خطی بین تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابه‌جایی رچتینگ برای دو نمونه با گشودگی و بدون گشودگی رسم شده است که با رابطه (10) مطابقت دارد و در هر دو نمونه به صورت خط راست می‌باشد که تنها در شیب خط بین حالت با گشودگی و بدون گشودگی تفاوت دارند که مشاهده می‌شود پوسته استوانه‌ای با گشودگی دارای شیب بیشتری است که به ازای افت نرخ معین جابه‌جایی رچتینگ، کاهش در انرژی کرنش آن بیشتر است و این نشان دهنده حساسیت وجود گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی خالص تناوبی است. همچنین با توجه به رابطه (10) می‌توان نتیجه گرفت که فیکسچرهای مورد استفاده در این آزمایش، تا حد قابل قبولی صلب می‌باشند و تغییر شکل‌های قابل ملاحظه‌ای که باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود، وجود ندارد.

#### 5-1-4- تأثیر وجود گشودگی و موقعیت آن بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای تحت گشتاور خمشی خالص

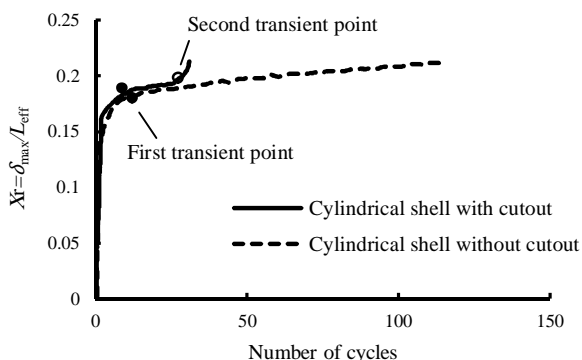
در این قسمت ابتدا یک پوسته استوانه‌ای تحت نیرو میانگین 0.3kN و بار دامنه‌ی 1.4kN تحت گشتاور خمشی قرار گرفته است. یک گشودگی دایره‌ی به قطر 10mm در میانه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای مطابق شکل 11 ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود به دلیل نیروی اعمالی که باعث باز و بسته شدن گشودگی می‌گردد نمونه از محل گشودگی دچار شکست می‌شود. در شکل 13 مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل، جابه‌جایی رچتینگ برای پوسته استوانه‌ای با گشودگی دایره‌ی در میانه‌ی آن، افزایش می‌یابد و جابه‌جایی رچتینگ برای پوسته‌ی استوانه‌ای با گشودگی دایره‌ی بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون گشودگی است.

گشتاور خمشی در مقاطع شامل گشودگی در جهت باز شدن آن عمل می‌کند و گشودگی دایره‌ی با افزایش تعداد سیکل، تبدیل به شکل بیضوی می‌شود. از آن جایی که ایجاد گشودگی باعث تمرکز تنش در اطراف گشودگی

<sup>1</sup> Shakedown

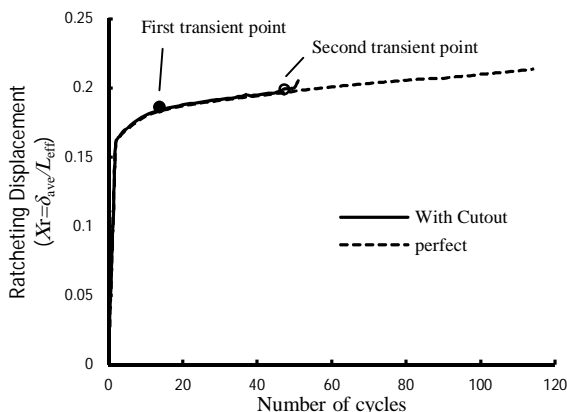


نتایج نشان می‌دهند که جابه‌جایی رچتینگ و نرخ آن برای پوسته‌ی استوانه‌ای با قطر 25mm بیشتر از پوسته‌ی استوانه‌ای با قطر 32mm است که این به دلیل کاهش ممان اینرسی و در نتیجه افزایش تنش‌های عمودی ناشی



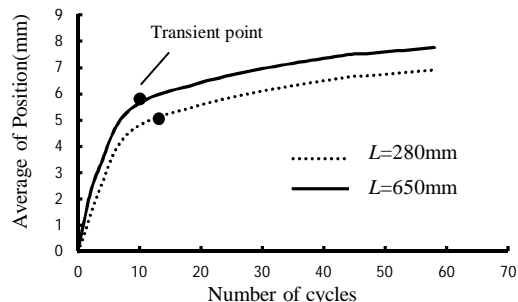
**Fig.13** ratcheting displacement vs. number of cycles for cylindrical shells with mean force 0.3kN and force amplitude 1.4kN with/without circular cutout under pure bending

شکل 13 جابه‌جایی رچتینگ برحسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیرو میانگین 0.3kN و دامنه نیرو 1.4kN با و بدون گشودگی دایروی تحت خمش خالص



**Fig.14** Ratcheting displacement vs. number of cycles of cylindrical shells with the mean force 0.3kN and force amplitude 1.4kN with a cutout at quarter of bending length and without cutout under pure bending

شکل 14 جابه‌جایی رچتینگ برحسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیرو میانگین 0.3kN و دامنه نیرو 1.4kN با گشودگی در محل یک‌چهارم طول تحت خمش و بدون گشودگی دایروی تحت خمش خالص



**Fig.15** Ratcheting displacement vs. number of cycles for cylindrical shells for mean force 0.3kN and force amplitude 1.4kN and the length 280mm and 650mm

شکل 15 جابه‌جایی رچتینگ برحسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیرو میانگین 0.3kN و دامنه نیرو 1.4kN با طول‌های 280mm و 650mm تحت خمش خالص



**Fig.12** failure of specimen from location of cutout

شکل 12 شکسته شدن نمونه از محل گشودگی افتاد.

همچنین یک گشودگی در پوسته‌های استوانه‌ای در یک‌چهارم طول مؤثر تحت خمش ایجاد شده است. این پوسته تحت نیروی میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN قرار گرفته است. مطابق حالت قبل، اعمال بار باعث باز و بسته شدن گشودگی می‌گردد. در این حالت هم در میانه‌ی پوسته و هم در محل گشودگی انباشتگی کرنش صورت می‌گیرد که این امر سبب می‌گردد نسبت به حالت قبل، رشد ترک دیرتر یعنی در سیکل 50 اتفاق افتد شکل 14. لازم به ذکر است زمانی که گشودگی در مرکز قرار دارد، گشتاور خمش و تمرکز تنش ناشی از گشودگی در میانه بیشترین می‌باشد؛ که باعث رشد ترک می‌گردد و در نهایت شکست پوسته در وسط و سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد. همچنین برای پوسته‌های استوانه‌ای با گشودگی نرخ جابه‌جایی رچتینگ ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و با توجه به شکل 13 و 14 می‌توان دو نقطه گذر، به‌عنوان نقطه گذر اول و نقطه گذر دوم تعریف کرد که سه ناحیه را از هم جدا می‌کند [18].

#### 6-1-4 - تأثیر طول تحت خمش در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن‌ها تحت بارگذاری نیرو خالص

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای با طول‌های میانی 280mm و 650mm تحت بارگذاری خمشی قرار گرفته‌اند. نیرو میانگین 0.3kN و دامنه بار 1.4kN به دو نمونه اعمال شد. در شکل 15 جابه‌جایی رچتینگ برای دو طول نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول پوسته‌های استوانه‌ای تحت خمش، جابه‌جایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد و نقطه گذر سریع‌تر اتفاق می‌افتد. این تغییر به دلیل افزایش گشتاور خمشی و افزایش تنش‌های عمودی در مقاطع مختلف پوسته استوانه‌ای ناشی از بزرگ شدن بازوی اعمال نیرو می‌باشد که باعث ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگ‌تر در نمونه می‌شود.

#### 7-1-4 - تأثیر قطر در پوسته‌های استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن‌ها تحت بارگذاری خمش خالص

در شکل 16 تغییرات جابه‌جایی رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با قطرهای 25mm و 32mm نشان داده شده است.

بیش تر است که این به دلیل اختلاف ممان اینرسی سطح دایروی، مربعی و مستطیلی می‌باشد که کاهش ممان اینرسی سطح با افزایش تنش نرمال ناشی از گشتاور خمشی خالص و در نتیجه افزایش نرم‌شوندگی همراه است. در مقاطع مختلف رفتار نرم‌شوندگی ماده با افزایش سیکل ثابت می‌گردد و در هر سه هندسه نرم‌شوندگی در قسمت فشاری بیشتر از کششی می‌باشد. همچنین پاسخ پوسته‌های جدار نازک SS316L با هر سه هندسه تحت بارگذاری خمش خالص تناوبی در شرایط جابجایی-کنترل به چهار ناحیه تقسیم می‌شود:

- مرحله رشد اولیه<sup>1</sup> (افزایش اولیه نیروی خمشی در سیکل‌های ابتدایی)
- مرحله گذر<sup>2</sup> (کاهش نیروی خمشی از یک سیکل به سیکل دیگر)
- مرحله پایدار<sup>3</sup> (ثبات نیروی خمشی برای تعداد سیکل مشخص)
- مرحله رشد ترک<sup>4</sup> (کاهش شدید نیروی خمشی در سیکل‌های متوالی)

### 6- نتیجه گیری

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی جابجایی-کنترل و نیرو-کنترل روی پوسته‌های جدار نازک فولادی تحت بارگذاری خمش خالص تناوبی می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

- 1- در شرایط جابجایی-کنترل تحت بارگذاری خمش خالص تناوبی، انباشتگی کرنش پلاستیک یا پدیده رچتینگ مشاهده می‌شود. با افزایش تعداد سیکل جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد. همچنین با دامنه نیرو یکسان برای یک طول معین پوسته استوانه‌ای، با افزایش نیروی میانگین در یک سیکل معین، جابه‌جایی رچتینگ و نرخ آن به دلیل افزایش گشتاور خمشی، افزایش می‌یابند و نقطه گذر در تعداد سیکل‌های کمتری اتفاق می‌افتد.
- 2- در بارگذاری خمش خالص تناوبی در شرایط نیرو-کنترل، با افزایش دامنه نیرو در نیروی میانگین ثابت، انباشتگی کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد که این به دلیل افزایش چگالی نابجایی‌های پسماند باقی‌مانده در زیر ساختار ماده طی بارگذاری و باربرداری است.
- 3- به دلیل شکل‌گیری منظم نابجایی‌ها در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمش خالص تناوبی، نرخ جابجایی رچتینگ کاهش و به صفر میل می‌کند. همچنین با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک به شدت کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی می‌رسد که نشان‌دهنده پایداری حلقه‌های هیستریزس است.
- 4- در بارگذاری نیرو-کنترل تحت بارگذاری خمش خالص تناوبی، رابطه خطی بین انرژی پلاستیک و نرخ جابجایی رچتینگ مشاهده شد که نشانگر صلبیت فیکسچرهای مورد استفاده است. همچنین با ایجاد گشودگی در میانه پوسته استوانه‌ای با شرایط بارگذاری یکسان، شیب نمودار انرژی پلاستیک برحسب نرخ جابجایی رچتینگ افزایش می‌یابد به عبارت دیگر به ازای افت نرخ معین جابجایی رچتینگ، کاهش در انرژی پلاستیک نمونه‌های دارای گشودگی بیشتر است.
- 5- در بارگذاری خمش خالص تناوبی تحت شرایط نیرو-کنترل و بارگذاری یکسان با ایجاد گشودگی، جابجایی رچتینگ افزایش

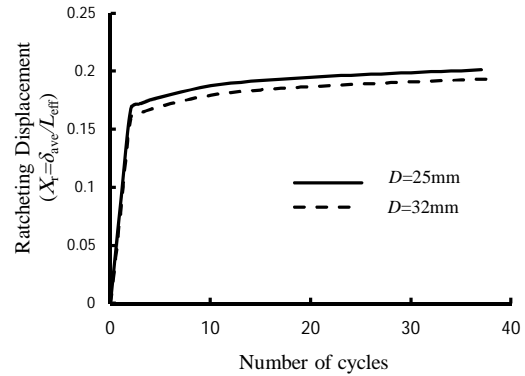


Fig.16 Ratcheting displacement vs. number of cycles of cylindrical shells with mean force 0.3kN and force amplitude 1.4kN and length 280mm with different diameters

شکل 16 جابه‌جایی رچتینگ برحسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با نیرو میانگین 0.3kN و دامنه نیرو 1.4kN با طول تحت خمش 280mm و قطرهای مختلف

از گشتاور خمشی می‌باشد. بنابراین ممان اینرسی سطح پارامتر مهمی در انباشتگی کرنش پلاستیک پوسته‌ها تحت گشتاور خمشی تناوبی است.

### 5- بارگذاری جابه‌جایی-کنترل

برای بررسی سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی ماده، نمونه‌ها تحت بارگذاری جابه‌جایی-کنترل قرار گرفته‌اند. در این قسمت سه هندسه پوسته‌ای استوانه‌ای و پوسته‌های با سطح مقطع مربعی 2x2 و مستطیلی 4x2 تحت دامنه جابه‌جایی 20mm قرار گرفته‌اند. این نوع بارگذاری نیز همانند نیرو-کنترل شامل یک مرحله می‌باشد. در این تحقیق، نیروی منفی برای خمش رو به بالا (جهت نیرو به سمت بالا) و نیروی مثبت برای خمش رو به پایین (جهت نیرو به سمت پایین) در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 17 مشاهده می‌شود که در هر سه هندسه جز در سیکل‌های اولیه، پس از هر سیکل، تحمل بار خمشی رو به بالا و بار خمشی رو به پایین در پوسته‌های جدار نازک کاهش می‌یابد. یعنی پوسته‌ها تحت بارگذاری جابجایی-کنترل، رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان می‌دهد و نرم‌شوندگی اولیه پوسته‌ای با سطح مقطع دایروی به ترتیب از پوسته‌ای با سطح مقطع مربعی و مستطیلی

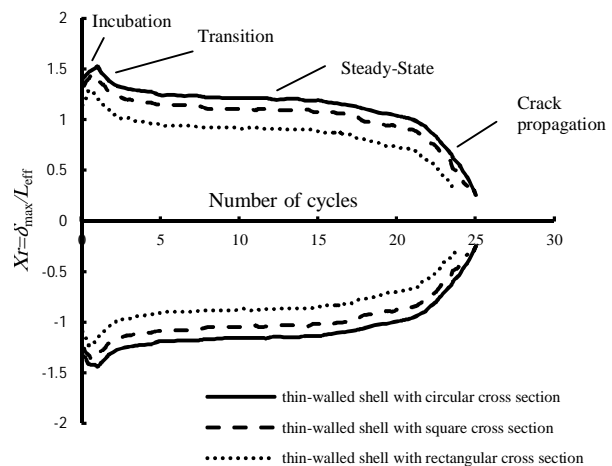


Fig.17 Force changes vs. number of cycles for displacement-control in different geometries

شکل 17 تغییرات نیرو نسبت به تعداد سیکل برای بارگذاری جابه‌جایی کنترل برای هندسه‌های مختلف

<sup>1</sup> Incubation  
<sup>2</sup> Transition  
<sup>3</sup> Cyclic steady-state region  
<sup>4</sup> Crack propagation region



- steady internal pressure, *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, No. 10, pp. 1756-1791, 2008.
- [8] S. P. Vaze, E. Corona, Degradation and collapse of square tubes under cyclic bending, *Thin-Walled Structures*, Vol. 31, No. 4, pp. 325-341, 1998.
- [9] D. Moreton, K. Yahiaoui, D. Moffat, H. Machin, L. Amesbury, The behaviour of pressurised plain pipework subjected to simulated seismic loading, *Strain*, Vol. 30, No. 2, pp. 63-72, 1994.
- [10] B. Gao, X. Chen, G. Chen, Ratchetting and ratchetting boundary study of pressurized straight low carbon steel pipe under reversed bending, *International journal of pressure vessels and piping*, Vol. 83, No. 2, pp. 96-106, 2006.
- [11] X. Yang, Low cycle fatigue and cyclic stress ratcheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, No. 9, pp. 1124-1132, 2005.
- [12] X. Chen, R. Jiao, K. S. Kim, On the Ohno-Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, No. 1, pp. 161-184, 2005.
- [13] G. Kang, Y. Liu, Z. Li, Experimental study on ratchetting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 435, pp. 396-404, 2006.
- [14] F. YOSHIDA, J. KONDO, Y. KIKUCHI, Viscoplastic behavior of SUS304 stainless steel under cyclic loading at room temperature, *JSME international journal. Ser. 1, Solid mechanics, strength of materials*, Vol. 32, No. 1, pp. 136-141, 1989.
- [15] M. Shariati, H. Hatami, H. Yarahmadi, H. R. Eipakchi, An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetel under uniaxial cyclic loading, *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 302-312, 2012.
- [16] J. Zhu, X. Chen, F. Xue, W. Yu, Bending ratcheting tests of Z2CND18. 12 stainless steel, *International Journal of Fatigue*, Vol. 35, No. 1, pp. 16-22, 2012.
- [17] M. Shariati, H. Hatami, Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic axial loading, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 58, No. 1, pp. 35-43, 2012.
- [18] M. Shariati, K. Kolasangiani, G. Norouzi, A. Shahnavaz, Experimental study of SS316L cantilevered cylindrical shells under cyclic bending load, *Thin-Walled Structures*, Vol. 82, pp. 124-131, 2014.
- [19] S. Bari, T. Hassan, Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, No. 3, pp. 381-409, 2000.
- [20] M. Rezaiee-Pajand, S. Sinaie, On the calibration of the Chaboche hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 16, pp. 3009-3017, 2009.
- [21] ASTM A370-05, *Standard test method and definitions for mechanical testing of steel products*.
- [22] G. Chen, X. Chen, C.-D. Niu, Uniaxial ratcheting behavior of 63Sn37Pb solder with loading histories and stress rates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 421, No. 1, pp. 238-244, 2006.
- [23] K. Dutta, K. Ray, Ratcheting phenomenon and post-ratcheting tensile behaviour of an aluminum alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 540, pp. 30-37, 2012.

می‌یابد و شکست نمونه نیز از همین نواحی اتفاق می‌افتد.

6- در بارگذاری خمش خالص تناوبی تحت شرایط نیرو-کنترل و بارگذاری یکسان، با افزایش طول پوسته استوانه‌ای به دلیل افزایش گشتاور خمشی و تنش‌های عمودی، جابجایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد و نقطه گذر سریع تر اتفاق می‌افتد. همچنین با کاهش قطر پوسته استوانه‌ای و در نتیجه کاهش ممان اینرسی و افزایش تنش، انباشتگی کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد.

7- پوسته‌های جدار نازک با سطح مقطع دایروی، مربعی و مستطیلی تحت بارگذاری خمش خالص تناوبی در شرایط جابجایی کنترل، رفتار نرم شوندگی از خود نشان می‌دهند و در شرایط بارگذاری یکسان، پوسته جدار نازک با سطح مقطع دایروی دارای سرعت نرم شوندگی بیشتری در مقایسه با سطح مقطع مربعی و مستطیلی است. همچنین برای پوسته‌های جدار نازک با هر سه مقطع دایروی، مربعی و مستطیلی، چهار ناحیه رشد اولیه، گذر، پایدار و رشد ترک مشاهده شد.

#### 7- مراجع

- [1] K.-H. Chang, W.-F. Pan, Buckling life estimation of circular tubes under cyclic bending, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 2, pp. 254-270, 2009.
- [2] K.-H. Chang, W.-F. Pan, K.-L. Lee, Mean moment effect on circular thin-walled tubes under cyclic bending, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 28, No. 5, pp. 495-514, 2008.
- [3] E. Corona, S. Kyriakides, An experimental investigation of the degradation and buckling of circular tubes under cyclic bending and external pressure, *Thin-Walled Structures*, Vol. 12, No. 3, pp. 229-263, 1991.
- [4] M. Elchalakani, Plastic mechanism analyses of circular tubular members under cyclic loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 45, No. 12, pp. 1044-1057, 2007.
- [5] M. Elchalakani, X.-L. Zhao, R. Grzebieta, Variable amplitude cyclic pure bending tests to determine fully ductile section slenderness limits for cold-formed CHS, *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 9, pp. 1223-1235, 2006.
- [6] S. Kulkarni, Y. Desai, T. Kant, G. Reddy, P. Prasad, K. Vaze, C. Gupta, Uniaxial and biaxial ratcheting in piping materials—experiments and analysis, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, No. 7, pp. 609-617, 2004.
- [7] S. M. Rahman, T. Hassan, d E. Corona, Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and