



# تحلیل تجربی رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی ضدزنگ SS304L تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

محمود شریعتی<sup>۱\*</sup>، کمال کلاسنگیانی<sup>۲</sup>، حمید چاوشان<sup>۳</sup>

۱- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

\* mshariati@shahroodut.ac.ir ، ۳۶۱۹۹۵۱۶۱ صندوق پستی شاهرود

**چکیده-** در این مقاله، به طور تجربی رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای فولادی ضدزنگ SS304L تحت بارگذاری متناوب مرکب و محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها توسط یک دستگاه پیشرفته سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شد و پوسته‌ها به دو صورت عمودی و مایل تحت زاویه ۲۰ درجه قرار گرفته و بار تناوبی به آنها اعمال گردید. در این تحقیق اثر طول پوسته استوانه‌ای و همچنین زاویه آن بر رفتار رچتینگ مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، گشتاور خمشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انرژی اتلافی و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک دارد. مشاهده شد که در پوسته استوانه‌ای مایل در مقایسه با پوسته استوانه‌ای عمودی به دلیل وجود گشتاور خمشی در مقاطع مختلف پوسته استوانه‌ای مایل، تغییر شکل پلاستیک و انباشتگی آن بیشتر است. همچنین در بررسی تاریخچه بارگذاری پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب، مشاهده شد که با نیروی میانگین ثابت و افزایش نیروی دامنه، جابجایی رچتینگ افزایش می‌یابد و پیش بارهای اعمالی در بارگذاری چند مرحله‌ای باعث مهار رفتار رچتینگ و توقف انباشتگی تغییرشکل پلاستیک در بارگذاری‌های سیکلی با دامنه نیروی کمتر می‌شوند. **کلیدواژگان:** تحلیل تجربی، پوسته استوانه‌ای، رچتینگ، بارگذاری محوری و مرکب تناوبی، فولاد ضدزنگ SS304L.

## An experimental study on ratcheting behavior of stainless steel 304L cylindrical shells under cyclic axial and combined loadings

M. Shariati<sup>1\*</sup>, K. Kolasangiani<sup>2</sup>, H. Chavoshan<sup>3</sup>

1- Prof., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran

2- MSc. Student, Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran

3- MSc. Student, Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran

\*P.O.B. 361995161Shahrood, Iran. mshariati@shahroodut.ac.ir

**Abstract-** In this paper, ratcheting behavior of stainless steel 304L cylindrical shells under cyclic combined and axial loadings are studied, experimentally. Tests were performed by a servo-hydraulic INSTRON 8802 machine and the shells were fixed normal and oblique under 20 degree and subjected to cyclic loads. In this paper, the effect of length of cylindrical shell and the effect of angle of cylindrical shell on ratcheting behavior were investigated. Based on the experimental results, it was found that bending moment plays a crucial role in waste of energy and increase in plastic deformations. Seen that, due to the existence of bending moment in different cross section of oblique cylindrical shell, there are more plastic deformation and accumulation in comparison to normal cylindrical shell. Also, analyzing the loading history of cylindrical shell under combined loading, it has been seen that by keeping the mean force at constant value while increasing the force amplitude, the ratcheting displacement became higher and by the prior load with higher force amplitude retards the ratcheting behavior and plastic deformation with smaller force amplitude.

**Keywords:** Experimental Study, Cylindrical Shell, Ratcheting, Cyclic Combined and Axial Loadings, Stainless Steel 304L.

## ۱- مقدمه

امروزه پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد در سازه‌های هوایی، صنایع خودروسازی، تأسیسات شیمیایی، نیروگاه‌ها و غیره کاربرد گسترده‌ای دارند و به دلیل کاربردهای فراوان، ممکن است تحت انواع بارهای تناوبی قرار گیرند که در کاهش عمر آنها مؤثر می‌باشد. اگرچه مقدار کرنش پلاستیک در یک سیکل بارگذاری کم می‌باشد، اما انباشتگی آنها در یک جهت در طول بارگذاری، قابل ملاحظه است. این پدیده به عنوان پلاستیسیته سیکلی و یا رچتینگ<sup>۱</sup> شناخته شده است. از آنجا که رچتینگ، یک انباشتگی سیکل به سیکل تحت تنش سیکلی با تنش میانگین غیرصفر می‌باشد، شبیه‌سازی و تعیین رفتار دقیق آن به آسانی امکان‌پذیر نبوده و علاوه بر آن، مدل‌های ساختاری سیکلی برگرفته شده از نتایج آزمایشگاهی نیز تاکنون به طور کامل‌قادر به تعیین دقیق رچتینگ نیستند. بنابراین در دو دهه‌ی اخیر، رچتینگ زیاد مطالعه شده است.

یانگ [۱] به بررسی رفتار خستگی کم تکرار و رچتینگ فولاد CK45 تحت بارگذاری تک محوره پرداخت. او براساس نتایج آزمایش‌های کرنش-کنترل، معادلاتی برای پیش‌بینی عمر خستگی به دست آورد و از آنها برای پیش‌بینی آسیب خستگی در شکست رچتینگ استفاده کرد. گائو و همکاران [۲] با استفاده از فیکسچر خمش شبه سه نقطه‌ای به مطالعه تجربی رفتار رچتینگ فولادهای کربنی پرداختند و مشاهده کردند که در آزمایش خمش چند مرحله‌ای، نرخ کرنش رچتینگ با افزایش مقدار بار، افزایش می‌یابد. در تحلیل شبیه‌سازی اجزاء محدود<sup>۲</sup> رچتینگ با نرم‌افزار انسیس<sup>۳</sup>، مشاهده شد که مدل جیانگ-سهیتگلو با کم‌ترین تغییرات نتایج قابل قبولی را نتیجه می‌دهد. چن [۳] رفتار رچتینگ تک محوره‌ی لحیم 63Sn37Pb را به طور تجربی بررسی کرد و مشاهده کرد که با افزایش تنش دامنه یا تنش میانگین، کرنش رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد و نرخ کرنش رچتینگ به نرخ تنش به شدت وابسته است و با کاهش نرخ تنش، نرخ کرنش رچتینگ نیز افزایش می‌یابد. کانگ و همکاران [۴] به بررسی تأثیرات رچتینگ و خستگی فولاد ضدزنگ SS304 در بارگذاری تک محوره تحت شرایط نیرو-کنترل و در دمای اتاق پرداختند و

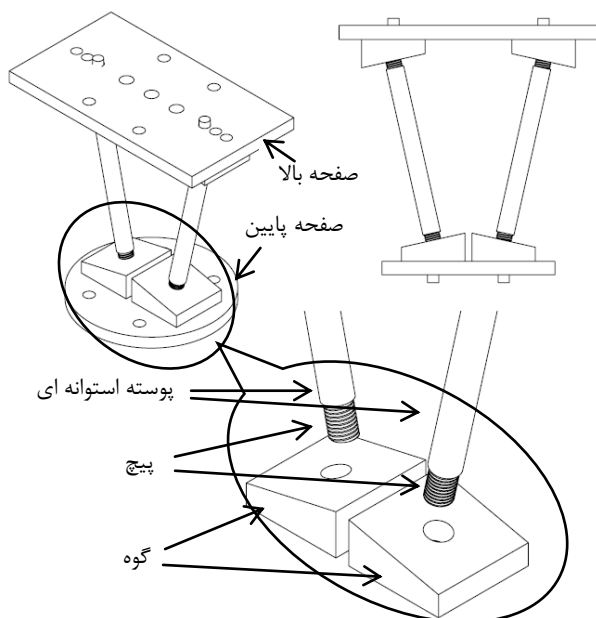
مشاهده کردند که کرنش رچتینگ و عمر خستگی این ماده وابستگی زیادی به تنش میانگین، دامنه تنش و نسبت تنش دارد. لی و همکاران [۵] به طور عددی و تجربی به بررسی رفتار سخت‌شوندگی سیکلی آلیاژ آلومینیم AC4C-T6 در شرایط جابجایی-کنترل در دمای اتاق و دمای ۱۶۵- درجه سانتیگراد پرداختند. آنها نتایج حاصل از تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده و مشاهده کردند که مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/اسینماتیک نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی بهتری ارائه داد. نیپ و همکارانش [۶] طی پژوهشی به بررسی خستگی کم تکرار و منحنی تنش-کرنش سازه‌هایی از جنس فولاد کربنی و ضدزنگ پرداختند و با استفاده از آزمایش‌های کرنش-کنترل تک محوره عمر خستگی سه نوع فولاد را مورد مطالعه قرار دادند. سانگ و شانگ [۷] روی پوسته‌های استوانه‌ای آلیاژی تحت بارگذاری‌های دو محوره مطالعه کرده و با روش‌های عددی و استفاده از مدل‌های سخت‌شوندگی، منحنی‌های هیستریزس را شبیه‌سازی کردند. شریعتی و همکاران [۸] روی نمونه‌های استاندارد پلی استال، بارگذاری‌های 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 نیرو متوسط از نتایج به دست آمده طی این مطالعه می‌باشد. همچنین روی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس منیزیم نیز بارگذاری تنها به صورت کرنش-کنترل اعمال شده و تعداد سیکل‌ها تا شکست نمونه‌ها تحت تأثیر دامنه کرنش و کرنش میانگین مورد مطالعه قرار گرفته است [۹].

شریعتی و حاتمی [۱۰] به طور تجربی رفتار نرم‌شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی ضدزنگ SS304 را تحت شرایط جابجایی-کنترل با بارگذاری متناوب محوری مطالعه کردند. در بارگذاری جابجایی-کنترل پوسته رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کمانش در بارگذاری فشاری، نرم‌شوندگی شدت یافت. ژو و همکاران [۱۱] به طور تجربی کرنش رچتینگ را تحت بار خمشی بر روی میله فولادی Z2CND18.12 بررسی کردند و مشاهده کردند که کرنش رچتینگ به شدت به دما وابسته است.

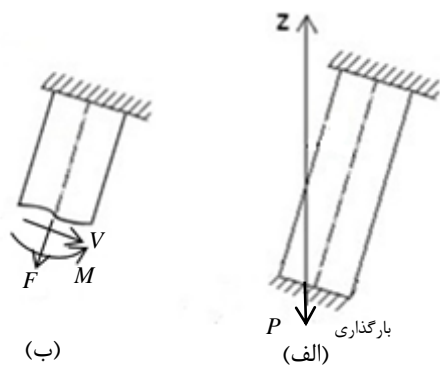
در این مقاله، پوسته‌های استوانه‌ای SS304L تحت بارگذاری‌های مرکب و محوری تناوبی قرار گرفته‌اند. در شرایط نیرو-کنترل، پدیده رچتینگ اتفاق افتاد و در بارگذاری مرکب

1. Ratcheting
1. Finite Element
2. ANSYS

بار تناوبی از طریق فک پایین مطابق شکل ۳-الف به ابتدای پوسته‌ها اعمال می‌شود. با ایجاد یک مقطع فرضی در پوسته و در طول دلخواه، نیروی محوری، برشی و گشتاور خمشی به صورت تناوبی مطابق شکل ۳-ب در مقطع ایجاد می‌شود که به دلیل ضخامت کم پوسته‌ها از اثر نیروی برشی صرف‌نظر شده است. در بارگذاری محوری، پوسته‌ها به طور مستقیم به فک‌های بالا و پایین دستگاه متصل شده و تحت بار محوری تناوبی قرار می‌گیرند که نتیجه آن، تنها ایجاد نیروی محوری در پوسته استوانه‌ای است (شکل ۱-الف).



شکل ۲ شماتیکی از نحوه اتصال پوسته استوانه‌ای به فیکسچر با استفاده از پیچ‌های رزوه شده در بارگذاری مرکب



شکل ۳ الف- شماتیک بارگذاری مرکب، ب- بارهای ایجاد شده در مقطع (نیروی برشی،  $F$  نیروی محوری و  $M$  گشتاور خمشی)

نسبت به بارگذاری محوری، تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگتری مشاهده شد.

## ۲- دستگاه آزمایش

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

## ۳- شرایط مرزی

برای اعمال بارگذاری مرکب و قرارگیری پوسته به صورت زاویه‌دار نسبت به خط عمود، از فیکسچرهای گوه‌ای استفاده شده است. پیچ‌های رزوه شده با طول مشخص نیز به مقدار ۲۰mm درون دو انتهای پوسته قرار گرفته و از طریق جوش آرگون به لبه‌های پوسته جوش شده‌اند. بنابراین طول مؤثر پوسته با کاهش ۲۰mm از هر طرف پوسته به دست می‌آید. پیچ‌ها نیز از هر دو انتهای پوسته از طریق سوراخ‌های رزوه شده بر روی سطح بالایی گوه به آن متصل می‌شوند (شکل ۲). از آنجا که اعمال بارگذاری مرکب باعث ایجاد نیروهای افقی ناخواسته می‌شود، از دو نمونه پوسته استوانه‌ای با شرایط بارگذاری و هندسه متقارن به منظور عدم آسیب دیدن دستگاه و فک آن، استفاده شده است.



الف- بارگذاری محوری ب- بارگذاری مرکب

شکل ۱ دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲

### 1. Extensometer

در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در بارگذاری مرکب به دلیل استفاده از دو نمونه در هر آزمایش، نیروی دامنه و نیروی میانگین  $60\text{ kN}$  اعمال می‌شود که سهم هریک از پوسته‌های استوانه‌ای، نیروی دامنه و نیروی میانگین  $30\text{ kN}$  از بار اعمالی می‌باشد. در بررسی تاریخچه‌ی بارگذاری، پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب قرار می‌گیرند که بارگذاری متوالی با نیروی میانگین ثابت  $30\text{ kN}$  و نیروی دامنه  $20\text{ kN}$  تا  $40\text{ kN}$  به هریک از نمونه‌ها اعمال می‌شود. در این تحقیق، بیشترین جابجایی ابتدای پوسته در هر سیکل به عنوان جابجایی رچتینگ تعریف می‌شود [۱۱] و برای بی‌بعدکردن، پارامتر  $X_r$  به عنوان نسبت جابجایی رچتینگ پوسته به طول مؤثر آن تعیین می‌شود.

#### ۵-۱- تأثیر طول پوسته استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری مرکب

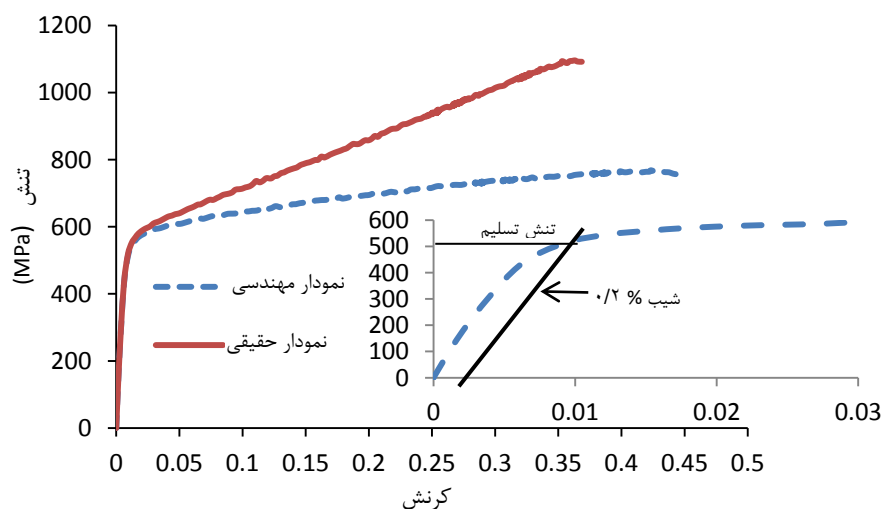
در شرایط نیرو-کنترل با تنش میانگین غیرصفر، انباشتگی تغییر شکل پلاستیک یا پدیده رچتینگ مشاهده شد. تغییر شکل سیکیلی، باعث به دست آمدن یک حلقه هیستریزس برای هر سیکل بارگذاری می‌شود و در آزمایش‌هایی که پدیده رچتینگ رخ می‌دهد، حلقه هیستریزس بسته نمی‌شود. در شکل ۵، حلقه‌های هیستریزس نیرو-جابجایی ابتدای پوسته استوانه‌ای با طول مؤثر  $400\text{ mm}$  تحت بارگذاری مرکب نشان داده شده است.

#### ۴- هندسه و خواص مکانیکی پوسته استوانه‌ای

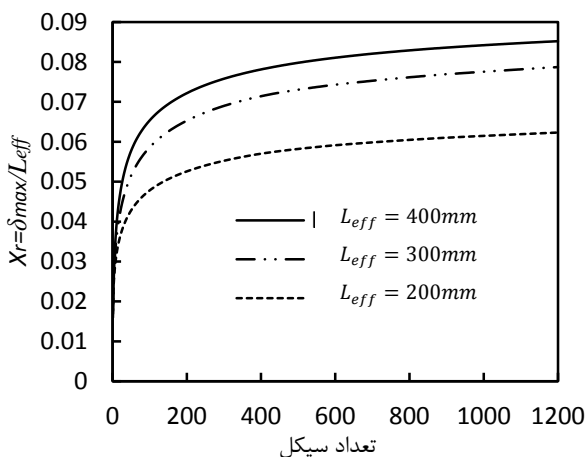
پوسته‌های استوانه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی از جنس فولاد ضدزنگ SS304L با قطر خارجی  $25/2\text{ mm}$  و طول‌های  $240\text{ mm}$ ،  $340\text{ mm}$  و  $440\text{ mm}$  هستند. طول مؤثر پوسته با توجه به توضیح بخش قبل برابر  $200\text{ mm}$ ،  $300\text{ mm}$  و  $400\text{ mm}$  می‌باشند. ضخامت پوسته‌ها نیز  $1/4\text{ mm}$  است. در این تحقیق در بارگذاری مرکب پوسته‌های استوانه‌ای با توجه به شکل ۳- الف تحت زاویه  $\alpha=20^\circ$  نسبت به محور عمود قرار گرفته و بار تناوبی به آنها اعمال شده است. برای به دست آوردن خواص مکانیکی پوسته استوانه‌ای فولادی، از آزمایش کشش ساده بر طبق استاندارد ASTM-E8 استفاده شده است [۱۲]. منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی و حقیقی در شکل ۴ نشان داده شده است. مدول یانگ با محاسبه شیب منطقه خطی نمودار تنش-کرنش برابر  $E=202/495\text{ GPa}$  به دست آمد. مقدار تنش تسلیم برای فولاد با توجه به شکل ۴، از ترسیم خط  $0/2\%$  برابر  $\sigma_y=513/01\text{ MPa}$  محاسبه شد. ضریب پواسون نیز  $0/33$  فرض شده است.

#### ۵- نتایج تجربی

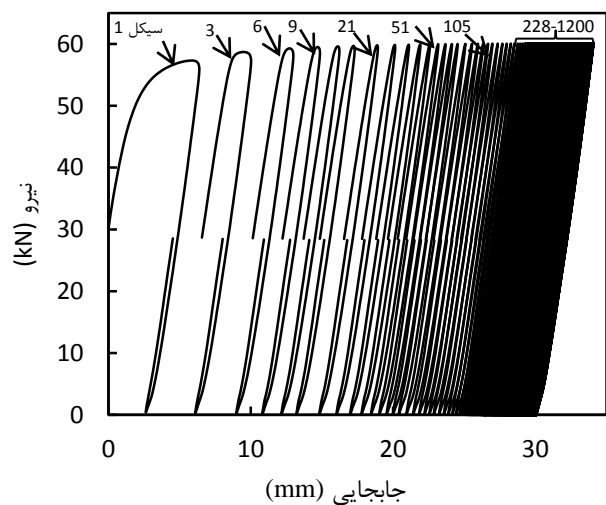
در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای به دو صورت عمود و مایل تحت زاویه  $\alpha=20^\circ$  قرار گرفته و بار تناوبی در شرایط نیرو-کنترل به صورت سینوسی با نیروی دامنه و نیروی میانگین یکسان  $30\text{ kN}$  به آنها اعمال می‌شود. نرخ بارگذاری  $60\text{ kN/s}$



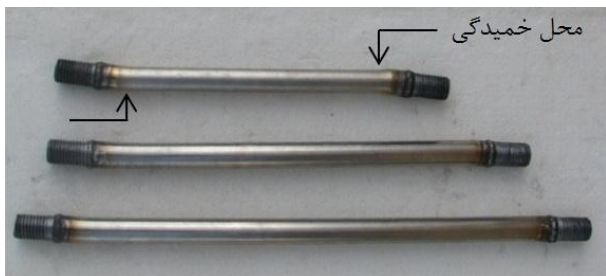
شکل ۴ نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش استاندارد



شکل ۶ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی



شکل ۵ رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب تناوبی



شکل ۷ چند نمونه پوسته استوانه‌ای آزمایش شده تحت بارگذاری مرکب تناوبی

اما در هر سیکل، نرخ جابجایی رچتینگ برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول ۳۴۰ و ۴۴۰mm، اختلاف بسیار کمی نسبت به هم دارند و پوسته استوانه‌ای با طول ۴۴۰mm دارای نرخ جابجایی بالاتری است. در ۵۰۰ سیکل ابتدایی، کاهش نرخ جابجایی رچتینگ بسیار زیاد است؛ اما در ادامه این کاهش قابل چشم‌پوشی می‌باشد. مقدار نرخ جابجایی رچتینگ در سیکل‌های انتهایی تقریباً ثابت و به صفر میل می‌کند.

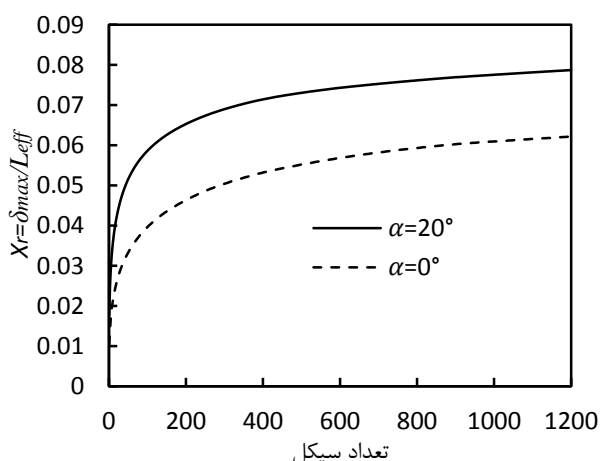
کاهش نرخ جابجایی رچتینگ و میل کردن آن به صفر یا به عبارت دیگر توقف انباشتگی تغییرشکل پلاستیک و پدیده رچتینگ، به دلیل شکل‌گیری و گسترده‌ی نابجایی<sup>۱</sup>ها با تغییرشکل‌های سیکلی است. وقتی که ماده‌ای تحت تغییرشکل‌های سیکلی است، نابجایی‌هایی در ساختار آن در نتیجه سخت‌شدگی کرنشی<sup>۲</sup> تولید می‌شوند.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

آزمایش‌های نیرو-کنترل در ۱۲۰۰ سیکل انجام شد و در شکل ۶، نسبت جابجایی رچتینگ به طول مؤثر پوسته بر حسب تعداد سیکل برای سه طول مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای یک طول معین پوسته استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد که این رفتار در حرکت حلقه‌های هیستریزس و نزدیک شدن حلقه‌ها به هم با افزایش تعداد سیکل در شکل ۵ نیز مشاهده شد. همچنین با افزایش طول پوسته‌های استوانه‌ای، جابجایی رچتینگ نیز افزایش می‌یابد که این تغییر به دلیل افزایش گشتاور خمشی و افزایش تنش‌های عمودی در مقاطع مختلف پوسته‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر است. گشتاور خمشی در نقاط انتهایی پوسته‌های استوانه‌ای مایل دارای بیشترین مقدار است و در آزمایش‌های تجربی مشاهده شد که پوسته‌های استوانه‌ای در این نواحی دچار خمش می‌شوند و کشیدگی در این نواحی بیشتر است (شکل ۷).

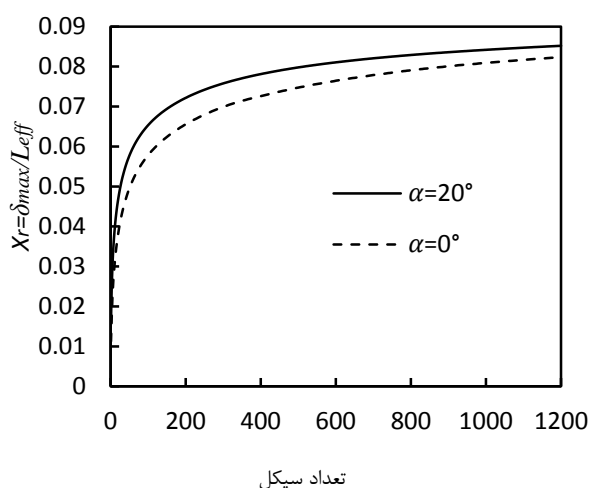
## ۵-۲- اشباع جابجایی رچتینگ

در شکل ۸، تغییرات نرخ جابجایی رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول‌های ۳۴۰mm و ۴۴۰mm نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نرخ جابجایی رچتینگ برای هر دو طول با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد.

1. Dislocation  
2. Strain hardening



شکل ۱۰ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی



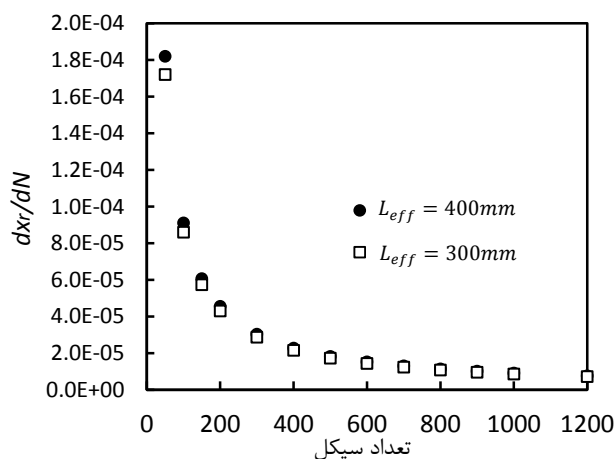
شکل ۱۱ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۴۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پوسته استوانه‌ای مایل دارای جابجایی رچتینگ بیشتری نسبت به پوسته استوانه‌ای عمودی است که این به دلیل ایجاد گشتاور خمشی علاوه بر نیروی عمودی در مقاطع مختلف پوسته استوانه‌ای مایل است که با خمش پوسته استوانه‌ای عمودی، تنها نیروی عمودی اعمال شده است.

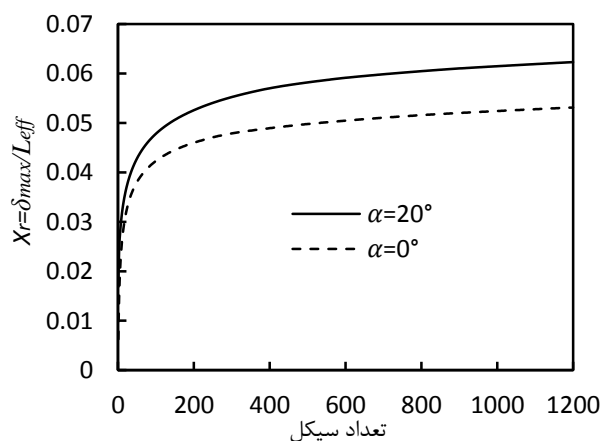
سیکل، به شکل المان‌های نابجایی منظم در می‌آیند [۱۳]. پس از تعداد سیکل معین (بستگی به کرنش‌های سیکلی اعمالی دارد)، نابجایی‌های تولید شده جدید، شکل‌بندی پایدار و منظمی به خود گرفته و این تغییر موجب کاهش و صفر شدن نرخ جابجایی رچتینگ می‌شود.

### ۵-۳- تأثیر زاویه پوسته استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن

در این قسمت پوسته‌های استوانه‌ای به دو صورت عمودی و مایل تحت زاویه  $\alpha = 20^\circ$  قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که در حالت بارگذاری عمودی مشابه بارگذاری مرکب، با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.



شکل ۸ نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی



شکل ۹ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پوسته‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۲۰۰mm تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام مطالعات تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری متناوب، رفتار رچتینگ این پوسته‌ها بررسی شد و تأثیر گشتاور خمشی تحت بارگذاری مرکب پوسته‌های استوانه‌ای مشاهده شد. نتایج زیر از این تحلیل به دست آمد.

در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته استوانه‌ای برای یک سیکل معین، جابجایی رچتینگ به دلیل افزایش گشتاور خمشی، افزایش می‌یابد.

- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل برای یک طول معین پوسته استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل، پوسته استوانه‌ای از نقاط انتهایی به دلیل وجود گشتاور خمشی بیشتر در این نواحی، دچار خمش می‌شود و کشیدگی بیشتر در این نواحی مشاهده می‌گردد.

- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته استوانه‌ای جابجایی رچتینگ دارای نرخ بالاتری است.

- در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پوسته استوانه‌ای مایل دارای جابجایی رچتینگ بیشتری نسبت به پوسته استوانه‌ای عمودی است که این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پوسته‌های استوانه‌ای مایل است.

- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای با افزایش دامنه‌ی نیرو، جابجایی رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد.

- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل چندمرحله‌ای با کاهش دامنه‌ی نیرو، نرخ جابجایی رچتینگ صفر و انباشتگی تغییر شکل پلاستیک متوقف می‌شود. بنابراین پیش‌بارهای اعمالی باعث مهار رفتار رچتینگ در بارگذاری‌های سیکلی متوالی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شوند.

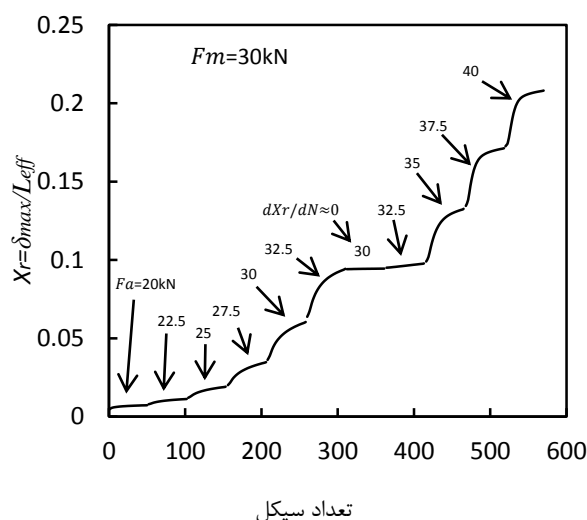
## ۷- فهرست علائم

$F_m$  نیروی میانگین (kN)

## ۴-۵- تأثیر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب

در این قسمت پوسته استوانه‌ای مایل با طول ۲۴۰ mm تحت بارگذاری متوالی با نیروی میانگین ثابت ۳۰ kN و دامنه‌ی نیرو از ۲۰ kN تا ۴۰ kN قرار گرفته است. به دلیل بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن (نیروی میانگین غیرصفر) رفتار رچتینگ در پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد شده است. با توجه به شکل ۱۲، با افزایش دامنه‌ی نیرو، جابجایی رچتینگ و نرخ جابجایی رچتینگ ( $dX_r/dN$ ) افزایش می‌یابد. در شرایط بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین ثابت و دامنه‌ی نیروی متغیر، افزایش دامنه‌ی نیرو موجب افزایش نیروی ماکزیمم می‌شود و باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه انباشتگی کرنش نیز افزایش می‌یابد. این پدیده به نابجایی زیر ساختارهای ماده در طول بارگذاری سیکلی مربوط می‌باشد.

با کاهش دامنه‌ی نیرو از ۳۲/۵ kN به ۳۰ kN، نرخ جابجایی رچتینگ تقریباً صفر فرض می‌شود و انباشتگی تغییرشکل پلاستیک متوقف می‌شود. این پدیده نتیجه‌ی افزایش مقاومت تغییرشکل ماده است که به دلیل پیش‌بارهای سیکلی با دامنه‌ی نیروی بالاتر ایجاد شده است. این سخت‌شوندگی سبب کند شدن انباشتگی کرنش پلاستیک در بارگذاری‌های سیکلی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شود. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که پیش‌بارهای اعمالی باعث مهار رفتار رچتینگ در بارگذاری‌های سیکلی متوالی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شوند.



شکل ۱۲ اثر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی

- |   |                                      |                |
|---|--------------------------------------|----------------|
| Structural Carbon Steel and Stainless Steel”, <i>Journal of Constructional Steel Research</i> , Vol. 66, 2010, pp. 96-110.  | نیروی دامنه (kN)                     | $F_a$          |
| [7] Sun G.Q., Shang D.G., “Prediction of Fatigue Lifetime under Multiaxial Cyclic Loading using Finite Element Analysis”, <i>Materials &amp; Design</i> , Vol. 31, No. 1, 2010, pp. 126-133.                                    | طول مؤثر پوسته استوانه‌ای (mm)       | $L_{eff}$      |
| [8] Shariati M., Hatami H., Yarahmadi H., Epakchi H.R., “An Experimental Study on the Ratcheting and Fatigue Behavior of Polyacetal under Uniaxial Cyclic Loading”, <i>Materials &amp; Design</i> , Vol. 34, 2011, pp. 302-312. | تعداد سیکل                           | N              |
| [9] Zhang J., Yu Q., Jiang Y., Li Q., “An Experimental Study of Cyclic Deformation of Extruded AZ61A Magnesium Alloy”, <i>International Journal of Plasticity</i> , Vol. 27, No. 5, 2011, pp. 768-787.                          | جابجایی رچتینگ پوسته استوانه‌ای (mm) | $\delta_{max}$ |
| [10] Shariati M., Hatami H., “Experimental Study of SS304L Cylindrical Shell With/Without Cutout under Cyclic Axial Loading”, <i>Theoretical and Applied Fracture Mechanics</i> , Vol. 58, 2012, pp. 35-43.                     |                                      |                |
| [11] Zhu, J., Chen, X., Xue, F., Yu, W., “Bending Ratcheting Tests of Z2CND18.12 Stainless Steel”, <i>International Journal of Fatigue</i> , Vol. 35, 2012, pp. 16-22.  |                                      |                |
| [12] ASTM A370-05, “Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”.   |                                      |                |
| [13] Gaudin C., Feaugas X., “Cyclic Creep Process in AISI 316L Stainless Steel in Terms of Dislocation Patterns and Internal Stresses”, <i>Acta Materials</i> , Vol. 52, 2004, pp. 3097-3110.                                   |                                      |                |

## ۸- مراجع

- [1] Yang X., “Low Cycle Fatigue and Cyclic Stress Ratcheting Failure Behavior of Carbon Steel 45 under Uniaxial Cyclic Loading”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, 2005, pp. 1124-132.
- [2] Gao B., Chen X., Chen G., “Ratchetting and Ratchetting Boundary Study of Pressurized Straight Low Carbon Steel Pipe under Reversed Bending”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, 2006, pp. 96-106.
- [3] Chen G., Chen X., Chang-Dong N., “Uniaxial Ratcheting Behavior of 63Sn37Pb Solder with Loading Histories and Stress Rates”, *Materials Science & Engineering*, Vol. 421, 2006, pp. 238-244.
- [4] Kang G. et al, “Experimental Study on Ratcheting-Fatigue Interaction of SS304 Stainless Steel in Uniaxial Cyclic Stressing”, *Materials Science & Engineering*, Vol. 435-436, 2006, pp. 396-404.
- [5] Lee J. et al, “A Numerical Simulation Model of Cyclic Hardening Behavior of AC4C-T6 for LNG Cargo Pump using Finite Element Analysis”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 22, 2009, pp. 889-896.
- [6] Nip K.H., Gardner L., Davies C.M., Elghazouli A.Y., “Extremely Low Cycle Fatigue Tests on