ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

## **واکاوی عددی و تجربی انباشتگی کرنش پوستههای استوانهای فولادی SS316L یک** سرگیردار با بارگذاری خمشی و مرکب (خمشی-پیچشی) تناوبی

محمود شريعتى $^{1^{*}}$ ، كمال كلاسنگيانى $^{2^{*}}$ ، خليل فرهنگ دوست $^{8^{*}}$ 

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9177948944، mshariati44@um.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 31 فروردین 1393 پذیرش: 11 شهریور 1393 ارائه در سایت: 28 مهر 1393	در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی انباشتگی کرنش مومسان و رفتار نرم شوندگی پوستههای استوانهای یک سرگیردار فولادی S316L با بارگذاری خمشی و مرکب (خمشی-پیچشی) بهصورت تناوبی پرداخته شده است. بارگذاریهای خمشی بهصورت نیرو-کنترل و جابهجایی-کنترل است؛ اما در بارگذاریهای مرکب، اعمال نیرو فقط بهصورت جابهجایی-کنترل است. آزمایشهای تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون 1800 تجاه شده است که بابلگذاری نیرو تشط به صورت جابهجایی-کنترل است. آزمایشهای تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون
<i>کلید واژگان:</i> پوسته استوانهای بارگذاری خمشی تناوبی بارگذاری مرکب تناوبی انباشتگی کرنش مومسان و نرم شوندگی الگوی سخت شوندگی	میکن انجام شده است که با بار کناری نیرو کنیزل با نیروی میادین غیر صفر تغییر شکل مومسان در چرچمهای پیایی ایباسته میشود که پدیده رچتینگ نام دارد. بر اساس نتایج تجربی، رابطهی خطی بین انرژی مومسان و نرخ تغییر شکل مومسان مشاهده شد که بیانگر سفتی فیکسچرهای مورد استفاده در آزمایش های تجربی است. در بارگذاری جابهجایی -کنترل رفتار نرم شوندگی بهدلیل پدیده بیضی شدن در پوستهها مشاهده میشود و با افزایش دامنه جابهجایی، سرعت نرم شوندگی افزایش مییابد. رشد ترک در بارگذاری مرکب بهدلیل وجود نیروی پیچشی و خمشی بهصورت مایل رشد می کند؛ در حالی که در بارگذاری خمشی رشد ترک بهصورت محیطی است. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس انجام شده است و با مقایسه ی الگوی سخت شوندگی همگن و الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن/ سینماتیک مشاهده میشود که الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن/ سینماتیک وفتار ذره شوندگی و انتریت گردنش مومسان بوستههای استانهای با با گذای ، خمشی تنامد را معتر شیندگی م

# Experimental and numerical study on accumulation of plastic strain of SS316L cantilevered cylindrical shells under cyclic bending and combined (bending-torsion) loads

#### Mahmoud Shariati1\*, Kamal Kolasangiani2, Khalil Farhangdoost3

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

\* P.O.B. 9177948944 Mashhad, Iran, mshariati44@um.ac.ir

#### **ARTICLE INFORMATION** ABSTRACT In this research, accumulation of plastic strain and softening behavior of stainless steel SS316L Original Research Paper Received 20 April 2014 Accepted 23 August 2014 cylindrical shell under cyclic bending and combined loads (bending-torsion) is studied. Cyclic bending was under force-control and displacement-control but Combined loading was under Available Online 20 October 2014 displacement-control. Experimental tests were performed using an INSTRON 8802 servohydraulic machine. Under force-control loading with non-zero mean force, plastic strain was Keywords: accumulated in continuous cycles called ratcheting. Based on experimental results, linear relation Cylindrical Shell Cyclic Bending Load was observed between plastic energy and rate of plastic deformation, which shows the rigidity of Cyclic Combined Load fixtures used in experimental tests. Under displacement-control loading, softening behavior was Accumulation of plastic strain and Softening observed due to growth of ovalization and the rate of softening increased by use of the higher Hardening Model displacement amplitude. The crack growth up to failure is oblique in combined load due to torsion and bending loads whereas the crack growth is peripheral in bending load. The numerical analysis was carried out by ABAQUS software and nonlinear isotropic/kinematic hardening was compared with isotropic hardening; it was observed that the nonlinear isotropic/kinematic hardening model simulates the softening behavior and accumulation of plastic strain of cylindrical shells under cyclic bending accurately.

دارند. این خواص ناشی از طبیعت هندسی و مادی پوسته است. سازههای پوستهای از نظر تحمل بارهای فشاری و ضربهای از بهترین سازهها به شمار میروند و به همین دلیل در طبیعت نیز پوشش اندام گیاهان و جانوران

1- يىشگفتار

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

Please cite this article using:

#### برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Shariati, K. Kolasangiani, Kh. Farhangdoost, Experimental and numerical study on accumulation of plastic strain of SS316L cantilevered cylindrical shells under cyclic bending and combined (bending-torsion) loads, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 42-50, 2015 (In Persian)



ماهیت پوستهای دارد. با درک ویژگیهای سازههای پوستهای از جمله قدرت تحمل بار، استحکام بالا و راحتی ساخت، مهندسان همواره از سازههای پوستهای در طراحی و ساخت سازههای مختلف استفاده میکنند. از کاربردهای پوستهها میتوان در سازههای هوایی برای بدنه هواپیماها، روکش بال و دم هواپیما، در صنایع دیگر نظیر خودروسازی، شناورسازی، مخازن نفت و گاز در صنایع پتروشیمی، و غیره نام برد. بهدلیل کاربردهای فراوان، پوستهها در طول عمر خود ممکن است زیر بارهای مختلف محوری، پیچشی و خمشی قرار گیرند. در بعضی موارد پوستهها زیر بارهای خارج از مرکز قرار گرفتهاند و دچار خمش و پیچش میشوند و با توجه به کاربرد آنها، این نوع بارگذاری خارج از مرکز میتواند بهصورت چرخهای<sup>1</sup> اعمال شود. رچتینگ<sup>2</sup> یکی از پاسخهای خستگی کم چرخه، بهعنوان انباشتگی کرنش مومسان که با افزایش چرخهها رخ میدهد، تعریف شده است. سازههای متعددی وجود دارند که بارگذاری های تناوبی اعمال شده بر آن ها موجب می شود وضعیت تنش از حد کشسان ماده فراتر رود. از آنجا که انباشتگی کرنش مومسان می تواند منجر به واماندگیهای فاجعه آمیز در این سازهها شود، برای طراحی و واكاوى اينگونه سازهها پيش بينى دقيق پاسخ انباشتگى كرنش مومسان بسیار حائز اهمیت میباشد. بنابراین در دو دهه گذشته، انباشتگی کرنش مومسان به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است.

مورتون و همکاران [1] به بررسی لولههای فولادی ضدزنگ و لولههای فولادی نرم دارای فشار داخلی با گشتاور خمشی چرخهای متقارن پرداختند و مشاهده کردند که انباشتگی کرنش مومسان نمونههای فولادی نرم بیشتر از نمونههای فولادی ضدزنگ میباشد. کرامر و همکاران [2] رفتار انباشتگی کرنش لولههای فولادی 9 X10 CrNiNb18 را مطالعه کردند و برای این منظور یکی از انتهای لوله را به صفحه ثابت و انتهای دیگر آن را به یک اهرم صلب متصل کردند. این اهرم یک گشتاور خمشی ثابت در طول لوله اعمال میکند و نتایج نشان داد که کرنش طولی و محیطی در میانه لوله بیشتر از سایر نقاط میباشد. شریعتی و همکاران [3] به طور تجربی انباشتگی کرنش مومسان پوستههای استونهای S304L را با بارگذاری مرکب و محوری تناوبی مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که در پوسته استوانهای مایل در مقایسه با پوسته استونهای عمودی به دلیل وجود گشتاور خمشی در مقاطع مختلف پوسته استوانهای مایل، تغییر شکل مومسان بیشتر است.

رحمان و همکاران [4] به طور تجربی رفتار انباشنگی کرنش شعاعی و محیطی یک لوله فولادی صاف را با بارگذاری خمشی و فشار داخلی ثابت بررسی کردند و با رسم نمودار لنگر -جابهجایی زاویهای انتهایی مشاهده کردند که شبیه سازی انباشتگی کرنش موم سان با استفاده از الگوهای چند خطی ساختاری، بهتر است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزایش فشار داخلی یا افزایش جابهجایی باعث افزایش نرخ انباشتگی کرنش موم سان می شود و فشار داخلی تأثیر اندکی بر بیضی شدن سطح مقطع لوله ها دارد. مورتون و همکاران [5] پوسته های استوانه ای با نسبت قطر میانگین به ضخامت در کشتاور خمشی متناوب قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که محدوده 9 و 28 را مورد مطالعه قرار دادند. نمونه ها با فشار داخلی ثابت و گشتاور خمشی متناوب قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مهرین، انباشتگی کرنش موم سان نیز در همین نواحی ایجاد می شود. چنین نتایجی توسط زه ساز و همکاران [6] نیز به دست آمده است. گائو و

انباشتگی کرنش مومسان فولادهای کربنی پرداختند و مشاهده کردند که در آزمایش خمش چند مرحلهای، نرخ انباشتگی کرنش با افزایش مقدار بار، افزایش می یابد اما با اعمال مقدار بار کم پس از بارگذاری با بار زیاد، نرخ انباشتگی کرنش کاهش و یا حتی از بین میرود. در تحلیل شبیهسازی اجزاء محدود $^{8}$  انباشتگی کرنش مومسان با نرمافزار انسیس $^{4}$  مشاهده شد که الگوی جیانگ سهیتگلو با کمترین تغییرات نتایج قابل قبولی را نتیجه میدهد. همچنین، گائو [8] مشاهده کرد که در لولههای صاف با بارگذاری خمشی متقارن، سطح مقطع در هر چرخه بین حالت دایروی و بیضوی تغییر میکند. کولکارینا و همکاران [9] به طور آزمایشگاهی انباشتگی کرنش مومسان لولههای صاف با فیکسچر خمش سه نقطهای را بررسی و با الگوی چابوچه<sup>6</sup> نرم افزار انسیس مقایسه کردند. آنها [10] رفتار لولههای فولادی کربنی SA333 Gr.6 با فشار داخلی ثابت و بار خمشی چرخهای را مورد مطالعه قرار دادند و پدیده بیضی شدن را در نمونهها بهعنوان یک عامل مهم در شکست لولهها مشاهده كردند. كورونا و كيرياكيدس [11] كمانش لولهها را با بارگذاری خمشی تناوبی و فشار خارجی بررسی کردند. نتایج نشان داد که فشار خارجی باعث افزایش انباشتگی کرنش و پدیده بیضی شدن در لولهها میشود. زکوی و همکاران [12] به بررسی انباشتگی کرنش مومسان لولههای فولادی ضدزنگ و لولههای فولادی کربنی با لنگر خمشی تناوبی پرداختند و در تحليل اجزاء محدود با الكو سخت شوندكي غير خطى همكن/سينماتيك رفتار انباشتگی کرنش پوسته را مورد مطالعه قرار دادند. با مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی مشاهده شد که نرخ انباشتگی کرنش نخستین بسیار بزرگ است و با افزایش تعداد چرخه کاهش مییابد.

در این تحقیق رفتار نرم شوندگی و انباشتگی کرنش مومسان پوستههای استوانهای با بارگذاری خمشی و مرکب تناوبی در شرایط نیرو-کنترل و جابهجایی-کنترل مورد مطالعه قرار گرفته است و با نتایج عددی حاصل از نرم افزار آباکوس مقایسه شده است. در شرایط جابهجایی-کنترل تأثیر دامنهی جابهجایی در بارگذاری خمشی و تأثیر جابهجایی میانگین در بارگذاری مرکب بررسی شده است که رفتار نرم شوندگی در هر دو نوع بارگذاری مشاهده شد.

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

انرژی بهعنوان یک تابع با مقدار اسکالر و مستقل از جهت، قابل مقایسه برای انواع بارگذاریها میباشد. انرژی مومسان که مساحت سطح حلقههای هیسترزیس میباشد، با افزایش تعداد چرخه به مقدار پایداری میرسد و از این جهت بهعنوان عامل مناسب برای بررسی انباشتگی کرنش میباشد.

در اکثر مواد در اثر بارگذاری چرخهای تا یک تعداد مشخص از چرخه دچار سختشوندگی و یا نرم شوندگی میشوند؛ سپس به حالت پایدار<sup>6</sup> میرسند و یا تغییر اندازهی سطح تسلیم متوقف میشود. با این حال انباشتگی کرنش مومسان همچنان بعد از پایداری چرخهای مواد ادامه مییابد. از این رو میتوان سخت شوندگی سینماتیک را بهعنوان اصلی ترین دلیل وقوع انباشتگی کرنش مومسان دانست. به سخن دیگر دخالت دادن سخت شوندگی همگن ضروری به نظر نمیرسد[13]. همه یالگوهای سخت شوندگی دارای یک مشخصه مشترک میباشند و آن اینست که بر اساس معیار تسلیم ون مایزز و الگوی سخت شوندگی سینماتیک بنا نهاده شدهاند. معیار تسلیم ون مایزز بهصورت رابطهی (1) تعریف میشود[13].

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.49.6

<sup>1-</sup> Cyclic 2- Ratcheting

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 15

<sup>3-</sup> Finite Element 4- ANSYS

<sup>5-</sup> Chaboche

<sup>6-</sup> Stabilize

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

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

الگوی سخت شوندگی آرمسترانگ-فریدریش<sup>1</sup> (AF)، بهعنوان یکی از الگوهای نخستین با اضافه کردن یک جمله، مورد استفاده پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است و بهصورت رابطه (2) میباشد[14].

$$d\alpha = \frac{2}{3}\beta d\varepsilon^{\rm P} - \gamma \alpha \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon^{\rm P} d\varepsilon^{\rm P}$$
<sup>(2)</sup>

الگوی سخت شوندگی AF برای بارگذاری تک محوره بهصورت رابطه (3) میباشد[14].

$$d\alpha_{x} = \frac{2}{3}\beta d\varepsilon_{x}^{p} - \gamma \alpha \left| d\varepsilon_{x}^{p} \right|$$
(3)  
همچنین، رابطه (4) نیز برقرار می باشد [14]:

$$\alpha_{\rm y} = \alpha_{\rm z} = -\frac{1}{2}\alpha_{\rm x} \tag{4}$$

با توجه به روابط (1) و (4)، رابطه (5) بهدست مي آيد [14]:

$$\left|\sigma_{\mathbf{x}} - \frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}\alpha_{\mathbf{x}}\right| = \sigma_{\mathbf{0}} \tag{5}$$

بنابراين مطابق رابطه (6)، [14]:

$$\sigma_{x} = \sigma_{0} + \left[\frac{\beta}{\gamma} + \frac{3}{2}(\alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma})\exp\left[-\gamma(\varepsilon_{x}^{p} - \varepsilon_{x0}^{p})\right]\right], \ d\varepsilon_{x}^{p} \ge \mathbf{0}$$
  
$$\sigma_{x} = \sigma_{0} + \left[\frac{\beta}{\gamma} + \frac{3}{2}(\alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma})\exp\left[-\gamma(\varepsilon_{x}^{p} - \varepsilon_{x0}^{p})\right]\right], \ d\varepsilon_{x}^{p} < \mathbf{0}$$

 $\sigma_{m} - \sigma_{a} - \sigma_{a} - \sigma_{a}$  (6)  $\sigma_{m} - \sigma_{a} - \sigma_{a}$  (6)  $\sigma_{m} - \sigma_{a} - \sigma_{a}$  (6)  $\sigma_{m} - \sigma_{a}$  (6)

آغازین در حالت بارگذاری ( $\varepsilon_1$ ) و باربرداری ( $\varepsilon_3$ ) و کرنشهای پایانی در حالت بارگذاری ( $\varepsilon_2$ ) و باربرداری ( $\varepsilon_4$ ) قابل محاسبه می باشند. انرژی کرنشه مومسان در هر حرخه طبق رابطهی (7) محاسبه مر شود:

$$W_{p} = \left[ \int_{\text{cycle}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ijx}^{p} \right]$$

$$= \int_{\sigma_{m}-\sigma_{a}}^{\sigma_{m}+\sigma_{a}} (\sigma_{x})_{\text{Loading}} d\varepsilon_{x}^{p} + \int_{\sigma_{m}-\sigma_{a}}^{\sigma_{m}-\sigma_{a}} (\sigma_{x})_{\text{Unloading}} d\varepsilon_{x}^{p} =$$

$$-\frac{1}{\gamma} [2\sigma_{a} + (\sigma_{0} + \frac{\beta}{\gamma}) [\ln(\sigma_{m} + \sigma_{a} - \sigma_{0} - \frac{\beta}{\gamma}) - \ln(\sigma_{m} - \sigma_{a} - \sigma_{0} - \frac{\beta}{\gamma})] + \frac{1}{\gamma} [-2\sigma_{a} + (-\sigma_{0} + \frac{\beta}{\gamma})]$$

$$[\ln(\sigma_{m} - \sigma_{a} + \sigma_{0} - \frac{\beta}{\gamma}) - \ln(\sigma_{m} + \sigma_{a} + \sigma_{0} - \frac{\beta}{\gamma})]] =$$

$$-\frac{4\sigma_{a}}{\gamma} + (\sigma_{0} + \frac{\beta}{\gamma}) [(\varepsilon_{2} - \varepsilon_{x0}^{p}) - (\varepsilon_{1} - \varepsilon_{x0}^{p})]$$

$$+ (-\sigma_{0} + \frac{\beta}{\gamma}) [(\varepsilon_{4} - \varepsilon_{x0}^{p}) - (\varepsilon_{3} - \varepsilon_{x0}^{p})] \qquad (7)$$

با توجه به رابطهی (7) نتیجه میشود که انرژی کرنشی مومسان با نمو کمترین کرنش در هر چرخه، رابطهی خطی دارد. یا به سخن دیگر انرژی مومسان با نرخ تغییر شکل مومسان در هر چرخه بهصورت خطی تغییر میکند.

#### 3- تحليل تجربي

آزمایشهای در این مطالعه با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک اینسترون 8802، که در شکل 1 نشان داده شده است، انجام شده است. این دستگاه توانایی اعمال بار دینامیکی را تا ظرفیت 250 کیلو نیوتن دارد. برای اندازه گیری جابهجایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج نیز استفاده شده است.

#### 3-1- شرايط مرزى

برای بارگذاری خمشی تناوبی نیاز به فیکسچری است که بتواند در دو جهت رفت و برگشت نیروی عمودی به ابتدای پوسته اعمال کند. برای انجام این کار از دو قرقرهی تفلونی فشرده شده جهت اعمال بارهای عمودی استفاده شده است که ابتدای پوسته در میان دو قرقره قرار گرفته و بهطور کامل به قرقرهها چسبیده است و انتهای پوسته از طریق یک گیرهی ثابت<sup>2</sup> به ستون دستگاه متصل شده است (شکل 2-الف). در این فیکسچر، از یک راهنما<sup>3</sup>ی استوانهای در انتها استفاده شده است که از لهشدگی پوسته جلوگیری میکند. برای نگه داشتن انتهای پوسته از یک حلقه گوهای<sup>4</sup> و یک حلقه فشاری<sup>5</sup> استفاده شده است که با پیچ به گیره ثابت متصل میشود.

در شکل 2-الف، اجزای فیکسچر خمش به صورت شماتیک نشان داده شده است. در بارگذاری مرکب، از یک بازوی شیاردار استفاده شده است که از انتها به دیسک جوش شده است (شکل 2-ب). در این فیکسچر با توجه به شکل 2-ب، مشابه بارگذاری خمشی از راهنمای استونهای، حلقه گوهای و حلقه فشاری استفاده شده است با این تفاوت که این اجزا در دو طرف پوسته استوانهای قرار می گیرند؛ در حالی که در بارگذاری خمشی تنها به انتهای ثابت پوسته متصل می شوند. اعمال نیروی فک به وسیلهی یک بازوی عمودی انجام می شود که توسط یک پین به بازوی افقی شیاردار متصل می باشد.

در بارگذاری مرکب، برای اندازه گیری جابه جایی انتهای پوسته از یک ساعت دیجیتال مطابق شکل 3 استفاده شده است که جابه جایی عمودی انتهای پوسته را نشان داده و مطابق شکل به دستگاه متصل می شود. حرکت افقی انتهای پوسته نیز توسط یک ساعت عقربه ای اندازه گیری شد که جابه جایی افقی اندازه گیری شده در مقایسه با جابه جایی عمودی ناچیز بوده و بنابراین در این بخش فرض می شود که پوسته فقط حرکت عمودی و چرخشی گرد محور خود دارد.



شکل 1 دستگاه سرووهیدرولیک اینسترون

2- Fixed Clamp 3- Guide 4- Wedged Ring

<sup>1-</sup> Armstrong-Frederick

<sup>5-</sup> Pressure Ring



تنش(مگایاسکال



2 (mm) طول (mm) طول (mm) طول (mm) فريب الاستيسيته 187/7 (GPa) مريب الاستيسيته 290 (MPa) 290 تنش نهايي (MPa) تنش نهايي (MPa) 559/61 (MPa) مريب پواسون 0/33

مقدار تنش تسلیم بهدست آمده برای فولاد SS316 از ترسیم خط 2/0% تعیین شده است. هندسه و خواص مکانیکی پوسته مورد آزمایش در جدول 1 نشان داده شدهاند. ضریب پواسون نیز برابر 0/33 در نظر گرفته شده است.

#### 4- تحليل عددي و مقايسه با نتايج تجربي

نرم افزار آباکوس، در کنار بسیاری از تواناییهای خود قادر به واکاوی مسایل با بارگذاری چرخهای نیز میباشد. برای بررسی این دسته از مسایل باید از الگوی سخت شوندگی سینماتیکی استفاده کرد که دارای دو قسمت به نامهای الگوی سخت شوندگی سینماتیک خطی و دیگری سخت شوندگی غیرخطی همگن/سینماتیک است. الگوی نخست میتواند با سطح تسلیم میسز<sup>1</sup>یا هیل به کار برده شود، در حالی که الگوی دوم را تنها با سطح تسلیم میسز میتوان به كار برد. در واقع تفاوت اين دو سطح تسليم در آن است كه با استفاده از سطح تسلیم میسز، در هر لحظه تنش تسلیم برای ماده در تمام جهات یکسان است؛ اما با استفاده از سطح تسلیم هیل می توان تنش تسلیم را در جهات مختلف، متفاوت با یکدیگر تعریف کرد. هر چند الگوی سخت شوندگی غیرخطی همگن ا سینماتیک دارای محدودیتهای بیشتری نسبت به الگوی نخست است که از آن جمله همانگونه که گفته شد امکان استفاده از سطح تسلیم هیل را به کاربر نمىدهد يا اينكه واكاوى مسالههاى جفتى تنش حرارتى به كمك اين الگو امکان پذیر نمی باشد؛ اما با این وجود برای واکاوی مسایل با بارگذاری چرخهای كامل ترین و دقیق ترین الگو است. در الگوی سخت شوندگی سینماتیک خطی فرض می شود که سطح تسلیم متناسب با مقدار lpha به عنوان تنش زمینه در فضای تسلیم حرکت میکند؛ اما تغییر شکل نمیدهد. نرم افزار آباکوس از الگوی خطی زیگلر<sup>د</sup> برای شبیهسازی عددی مسالهها استفاده میکند که معادله آن به صورت رابطه (8) بيان مي شود [16].

$$\alpha = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \overline{\varepsilon}^{\mu} + \frac{1}{C} C \alpha_{ij}$$
(8)



(ب) **شکل 2** نمایی از فیکسچر استفاده شده در بارگذاری الف) خمشی تناوبی، ب)مرک*د* (خمشی-ییچشی) تناوبی



شکل 3 فیکسچر مورد استفاده در بارگذاری مرکب تناوبی

#### 3-2- هندسه و خواص مكانيكي پوسته استوانهاي

در این تحقیق، خواص مکانیکی پوسته فولادی از آزمایش کشش استاندارد و بر طبق استاندارد ASTM-E8 بهدست آمده است[15]. نمودار تنش-کرنش بهدست آمده از آزمایش کشش استاندارد در شکل 4 برای فولاد SS316L نشان داده شده است.

<sup>1-</sup> Mises 2- Hill 3- Ziegler



شکل 5 پدیده بیضی شدن در انتهای پوسته استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی الف) نتایج تجربی، ب) نتایج عددی

که در آن C ضریب سخت شوندگی سینماتیک و  $\dot{C}$  نرخ تغییرات C بر حسب دما است. در این الگو  $\sigma^{\bullet}$  (اندازه سطح تسلیم) ثابت میماند، به بیان دیگر همواره مساوی  $\sigma_{\bullet}$  که تنش تسلیم به ازای کرنش مومسان صفر است، باقی میماند.

الگوی سخت شوندگی غیرخطی همگن/ سینماتیک که بر اساس روابط ارائه شده توسط چابوچه در سال **1990** تهیه شده، در بر گیرنده حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار  $\alpha$  در فضای تنش بوده و همچنین، تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار کرنش مومسان است. برای معرفی چنین الگویی، یک جمله غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به رابطه (8) اضافه می شود. الگوی ارائه شده در آباکوس به صورت رابطه (9) است[16].

$$\dot{\alpha} = \mathbf{C} \frac{1}{\sigma^{0}} (\sigma_{ij} \cdot \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{\mathbf{p}i} \cdot \gamma \alpha_{ij} \dot{\varepsilon}^{\mathbf{p}i} + \frac{1}{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{C}} \alpha_{ij}$$
(9)

که در آن C و  $\gamma$  ثابتهای ماده است. البته باید به این نکته اشاره کرد که نرم افزار توانایی در نظر گرفتن نرخ تغییرات  $\gamma$  نسبت به دما را ندارد. این الگو هنگامی که C و  $\gamma$  مساوی صفر فرض شوند به الگوی سخت شوندگی همگن و هنگامی که  $\gamma$  به تنهایی مساوی صفر فرض شود به الگوی خطی زیگلر تبدیل خواهد شد. به منظور معرفی این الگو برای نرم افزار لازم است بخش همگن (رشد سطح تسلیم در فضای تنش) و بخش سینماتیک (حرکت سطح تعیین رشد سطح تسلیم در نرم افزار آباکوس از رابطه (10) با معرفی اندازه م<sup>0</sup> به صورت تابعی نمایی استفاده می شود که در آن  $\sigma$  نشان دهنده تنش تسلیم به ازای کرنش مومسان صفر است. مقادیر d و  $\Omega_{\infty}$  نیز ثابت های ماده هستند[16].

#### $\sigma^{0} = \sigma_{0} + \boldsymbol{Q}_{\alpha} (\mathbf{1} - \mathbf{e}^{-\boldsymbol{a}_{c}^{-\boldsymbol{\mu}}})$ (10)

در این بخش مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی روی پوسته استوانهای SS316L با بارگذاری خمشی بهصورت تناوبی گزارش شده است. در شکل 5 پدیده بیضی شدن در انتهای پوسته استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی برای نتایج تجربی و عددی نشان داده شده است. بارگذاریها بهصورت نیرو-کنترل و جابهجایی- کنترل شبیه سازی شده است و نتایج بهدست آمده با نتایج تجربی روی پوسته استوانهای با هم مقایسه شده است. از جزء S8R5 در شبیه سازی عددی استفاده شده است که یک جزء پوستهای 8 گرهای میباشد که نوع آن غیر خطی و درجه آزادی آن

5 میباشد. دو طرف پوسته استوانهای به دو صفحه صلب مقید شده است (شکل 5-ب). هر صفحه صلب دارای یک نقطه مرجع میباشد. نقطه مرجع در یک صفحه صلب با شرایط مرزی از نوع جابهجایی/چرخشی در تمامی جهات مقید شده است (U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0). نقطه مرجع صلب دیگر در تمامی جهات به غیر از جهت بارگذاری، جهت محور استوانه و چرخش گرد محور افقی عمود بر محور استوانه مقید شده است(U1=UR2=UR3=0). برای بارگذاری از نوع جابهجایی-کنترل به عامل U2 مقدار اختصاص می یابد که برای بارگذاری نوع تناوبی از گزینهی دامنه استفاده شده که به آن یک موج سینوسی اختصاص می یابد. برای بار گذاری از نوع نیرو-کنترل به عامل CF2 مقدار اختصاص می یابد و مانند بارگذاری جابه جایی-کنترل در این بارگذاری نیز از گزینه دامنه برای بارگذاری تناوبی استفاده شده است. در سطح مقطع انتهای نمونهها در نتایج عددی و تجربی با توجه به شکل 5 افزون بر وجود گشتاور خمشی بزرگتر، پدیده بیضی شدن<sup>1</sup> مشاهده میشود که باعث كاهش لنگر اينرسی و افزايش تنشها میشود. بنابراين نقاط انتهايی پوستههای استوانهای بهعنوان ناحیه بحرانی شناخته شده و آغاز رشد ترک و شکست نیز از این نقاط میباشد.

#### 4-1- مقایسه نتایج عددی و تجربی در شرایط بارگذاری جابهجایی -کنترل

در شکل 6، نتایج تجربی نمودارهای هیسترزیس پوسته استوانهای با بار گذاری خمشی در شرایط جابهجایی-کنترل متقارن با دامنه جابهجایی 6 میلیمتر رسم شده است که با نتایج عددی حاصل از نرمافزار آباکوس مقایسه شده است. در این نمودار از الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن/ سینماتیک کرنش مومسان باقیمانده در ناحیه کشش و فشار با هم برابر است. با توجه به شکل 6 کرنش مومسان باقی مانده پیش بینی شدهی حاصل از نتایج عددی، شکل 7 کرنش مومسان باقی مانده پیش بینی شدهی حاصل از نتایج عددی، فشار یا به موسان باقی مانده پیش بینی شدهی حاصل از نتایج عددی، و فشاری به صورت تجربی و عددی بر حسب تعداد چرخه نشان داده است و مشاهده می شود که الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن/ سینماتیک نسبت به نتایج تجربی، رفتار نرم شوندگی را به خوبی نمایش می دهد اگرچه نسبت به نتایج تجربی، نرم شوندگی سریعتر می باشد و تنشهای حداکثر نسبت به نتایج تجربی، نرم شوندگی می بر می باشد و تنشهای حداکثر نسبت به نتایج تجربی، نرم شوندگی در تعداد چرخه های

<sup>1-</sup> Ovalization



**شکل 6** منحنیهای هیسترزیس با استفاده از الگوی سخت شوندگی غیرخطی همگن/سینماتیک در پوسته استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط جابهجایی-کنترل متقارن با دامنه جابهجایی **6** میلیمتر



**شکل 7** حداکثر نیروی کششی و فشاری با استفاده از الگوی سخت شوندگی غیرخطی همگن/سینماتیک در پوسته استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط جابهجایی-کنترل متقارن با دامنه جابهجایی **6** میلیمتر



**شکل 8** حداکثر نیروی کششی و فشاری با استفاده از الگوی سخت شوندگی همگن در پوسته استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط جابهجایی-کنترل متقارن با دامنه جابهجایی 6 میلیمتر

در شکل 8، برای تحلیل عددی از الگوی سخت شوندگی همگن استفاده شده است. در این الگو، سطح تسلیم به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می کند بدون آنکه مرکز سطح تسلیم انتقال یابد. مشاهده میشود که این الگو رفتار نرم شوندگی را خیلی سریعتر از نتایج تجربی نشان میدهد و همچنین، این الگو برای یک دامنه جابهجایی ثابت، تنشهای حداکثر کششی و فشاری بزرگتری را نسبت به نتایج تجربی نشان داد.

#### 4-2- مقایسه نتایج عددی و تجربی در شرایط بارگذاری نیرو -کنترل

در شکل 9، نتایج تجربی نیرو جابهجایی ابتدای پوسته در چند چرخه آغازین برای بارگذاری نیرو -کنترل نامتقارن با نتایج حاصل از تحلیل عددی مقایسه شده است.





شکل 9 نمودار هیسترزیس پوسته استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط نیرو-کنترل غیرمتقارن



در این قسمت از الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن *ا*سینماتیک استفاده شده است. با توجه به شکل 9، سطح حلقههای هیسترزیس نتایج تجربی بزرگتر از سطح حلقههای هیسترزیس نمودار عددی است و این بهدلیل اتلاف انرژی در آزمایش تجربی است؛ اما به طور کلی انباشتگی کرنش در

شبیهسازی عددی به خوبی مشاهده میشود.

در این تحقیق، کمترین جابهجایی ابتدای پوسته در هر چرخه بهعنوان جابهجایی انباشته شده تعریف می شود [17]. در شکل 10 مشاهده می شود که شیب جابهجایی انباشته شده در نتایج عددی به سرعت کاهش می یابد و انباشتگی تغییر شکلهای مومسان متوقف می شود؛ اما جابهجایی انباشته شده در نتایج تجربی در حال افزایش است. در چرخههای آغازین، نتایج عددی، جابهجایی انباشته شده را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند اما در چرخههای بالاتر به سرعت پایدار شده و مقداری کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند.

#### 5- نتايج تجربي

#### 5-1- بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط نیرو -کنترل

در شکل 11 جابهجایی انباشته شده چهار پوسته استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط نیرو-کنترل با دامنه نیرو ثابت 8/0کیلونیوتن و نیروی میانگین 5/0، 6/0، 7/0 و 8/0کیلونیوتن بر حسب تعداد چرخه رسم شده است. با توجه به شکل 11 با افزایش نیروی میانگین میزان جابهجایی انباشته شده و نرخ آن افزایش مییابد. همچنین، برای یک نمونه آزمایش، با افزایش تعداد چرخه، جابهجایی انباشته شده افزایش و نرخ آن کاهش مییابد تا اینکه مقدار جابهجایی انباشته شده مقداری ثابت شود و انباشتگی تغییرشکل مومسان متوقف شود.



**شکل 11** جابهجایی انباشته شده بر حسب تعداد چرخه برای پوستههای استوانهای با بارگذاری خمشی تناوبی

چنین انباشتگی تغییرشکل در مرجع [18] برای لولههای جدار نازک با بارگذاری خمشی نیز مشاهده شد که در چرخههای نخستین، سرعت بیضی شدن سطح مقطع زیاد میباشد و در ادامه با افزایش تعداد چرخه، سرعت پدیده بیضی شدن کاهش مییابد.

در شکل 12، رابطهی خطی بین انرژی مومسان در هر چرخه با نرخ جابهجایی انباشته شده برای نمونههای با بارگذاری خمشی با دامنهی نیروی ثابت و نیروی میانگین متغیر نشان داده شده است. مشاهده میشود که با کاهش انرژی مومسان، نرخ جابهجایی انباشته شده بهصورت خطی کاهش مییابد که این با رابطهی (7) مطابقت دارد و میتوان نتیجه گرفت که فیکسچرهای مورد استفاده در این آزمایشها تا حد قابل قبولی صلب میباشند و تغییرشکلهای قابل ملاحظهای که باعث ایجاد خطا در نتایچ میشود، وجود ندارد. همچنین، با افزایش نیروی میانگین شیب نمودار افزایش میشود، واین نشان دهندهی آنست که به ازای افت نرخ معین جابهجایی انباشته شده، کاهش در انرژی مومسان نمونه های با نیروی میانگین بالاتر، بیشتر است.

#### 5-2- بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط جابهجایی -کنترل

شکل 13 حلقه هیسترزیس را برای یک نمونه از پوسته استوانهای SS316L با بارگذاری جابهجایی- کنترل متقارن با دامنه جابهجایی 6 میلیمتر نشان میدهد که تا شکست نمونه اعمال میشود. مشاهده میشود که جز در چرخههای نخستین پس از هر چرخه تحمل بار کششی و فشاری پوسته استوانهای کاهش مییابد، یعنی پوسته استوانهای با بارگذاری جابهجایی-کنترل، رفتار نرم شوندگی از خود نشان میدهد. در نمودار بار - جابهجایی، کرنش مومسان باقیمانده در ناحیه فشاری و کششی تا حد قابل قبولی با هم برابر است و رفتار نمونه در کشش و فشار یکسان میباشد.

در شکل 14، مقادیر حداکثر نیروهای کششی و فشاری در هر چرخه نسبت به تعداد چرخهها تا شکست نمونه ترسیم شده است. مشاهده می شود که با افزایش دامنه جابهجایی، شیب نمودار نرم شوندگی در هر دو ناحیه کششی و فشاری بیشتر می شود و نمونه در تعداد چرخه کمتری می شکند. کاهش شدید نیرو در انتها به علت ایجاد و رشد ترک است که منجر به شکست نمونه در چرخههای 3015، 1680، 1400 و 310 در دامنههای جابهجایی به ترتیب 5، 6، 7 و 10میلیمتر می شود.

### 5-3- بارگذاری مرکب تناوبی در شرایط جابهجایی-کنترل در این تحقیق منظور از گشتاور پیچشی مثبت، حرکت فک دستگاه به سمت بالا و گشتاور پیچشی منفی، حرکت فک دستگاه به سمت پایین است.



شکل 12 انرژی مومسان بر حسب نرخ جابهجایی انباشته شده برای پوسته های استوانه ای با بارگذاری خمشی تناوبی با دامنه نیروی 8/0کیلونیوتن و نیروی میانگین الف) 5/0 کیلونیوتن، ب) 6/0 کیلونیوتن، ج) 7/7 کیلونیوتن، د) 8/0کیلونیوتن

در شکل 15، تغییرات گشتاور پیچشی بر حسب تعداد چرخه در دو حالت مثبت و منفی با دامنه جابهجایی ثابت 20 میلیمتر نشان داده شده است. با توجه به شکل 15، با افزایش جابهجایی میانگین از 5 به 8 و 10 میلیمتر بهدلیل افزایش نامتقارنی در بارگذاری، سرعت نرم شوندگی کاهش و مقدار تقریبا به صفر میرسد؛ ولی در حالت منفی تا حدودی نرم شوندگی نمونه مشاهده میشود که این بهدلیل تغییر علامت جابهجایی از مثبت به منفی در لحظه حرکت فک دستگاه به سمت پایین میباشد که باعث افزایش در مقدار نرم شوندگی پوسته میشود.



**شکل 1**3 نمودار هیسترزیس پوسته استوانه ای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط جابهجایی-کنترل متقارن با دامنه جابهجایی **6** میلیمتر



شکل 15 حداکثر گشتاور پیچشی بر حسب تعداد چرخه برای پوستههای استوانهای با بارگذاری مرکب تناوبی



**شکل 1**6 ترک محیطی و مایل در پوسته های استوانه ای با بارگذاری خمشی و مرکب تناوبی

در شکل 16، دو نمونه از پوستههای استوانهای از جنس SS316L که بعد از انجام آزمایش و با بارگذاری خمشی و مرکب دچار شکست شدهاند، نشان داده شده است. مشاهده میشود که در نمونههای با بارگذاری خمشی، ترک بهصورت محیطی رشد کرده حال آنکه در نمونههای با بارگذاری مرکب خمشی-پیچشی بهدلیل وجود گشتاور پیچشی افزون بر گشتاور خمشی، ترک بهصورت مایل رشد کرده و باعث شکست پوسته شده است.

#### 6- نتیجه گیری

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

1- در بارگذاری جابهجایی-کنترل، نرمافزار آباکوس رفتار نرمشوندگی پوسته استوانهای را با استفاده از الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن سینماتیک بهتر از الگوی سخت شوندگی همگن شبیهسازی میکند و کرنش مومسان باقیمانده در تحلیل عددی بیشتر از نتایج تجربی میباشد. همچنین، سرعت نرم شوندگی در نتایج عددی نسبت به نتایج تجربی سریعتر است و تنشهای حداکثر ضعیفتری را پیشبینی میکند.

2- الگوی سخت شوندگی همگن نیز رفتار نرم شوندگی را خیلی سریعتر از نتایج تجربی نشان میدهد و تنشهای حداکثر کششی و فشاری بزرگتری را نسبت به نتایج تجربی پیش بینی می کند.

3- در بارگذاری نیرو-کنترل، سطح حلقههای هیسترزیس نمودار تجربی بهدلیل اتلاف انرژی، بیشتر از نتایج عددی است. الگوی سخت شوندگی غیرخطی همگن/سینماتیک در چرخههای آغازین، جابهجایی انباشته شده را بیشتر از مقدار واقعی پیشربینی میکند اما در چرخههای بالاتر به سرعت پایدار شده و مقداری کمتر از مقدار واقعی پیشربینی میکند.

4- با بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی چرخهای انباشتگی تغییرشکل مومسان یا پدیده رچتینگ مشاهده میشود و در دامنه نیروی ثابت با افزایش نیروی میانگین،جابهجایی انباشته شده و نرخ آن افزایش میابد. همچنین، برای یک نمونه آزمایش با افزایش تعداد چرخه، جابهجایی انباشته شده افزایش و نرخ آن کاهش مییابد تا اینکه انباشتگی تغییرشکل مومسان متوقف شود.

5- در بارگذاری نیرو-کنترل با بارگذاری خمشی، رابطه خطی بین انرژی مومسان و نرخ جابهجایی انباشته شده مشاهده شد که نشانگر سفتی فیکسچرهای مورد استفاده است. همچنین، با افزایش نیروی میانگین در دامنه نیروی ثابت، شیب نمودار انرژی مومسان بر حسب نرخ جابهجایی انباشته شده افزایش مییابد به سخن دیگر به ازای افت نرخ معین جابهجایی انباشته شده، کاهش در انرژی مومسان نمونههای با نیروی میانگین بالاتر بیشتر است.

6- با بارگذاری جابهجایی-کنترل متقارن در بارگذاری خمشی چرخهای رفتار نرمشوندگی مشاهده میشود و با افزایش دامنه جابهجایی، سرعت نرم شوندگی افزایش مییابد و نمونه در تعداد چرخه کمتری میشکند.

7- در بارگذاری مرکب خمشی-پیچشی در شرایط جابهجایی-کنترل نامتقارن، نرم شوندگی مشاهده میشود و با افزایش جابهجایی میانگین در دامنه جابهجایی ثابت، بهدلیل افزایش نامتقارنی در بارگذاری، سرعت نرم شوندگی کاهش و مقدار حداکثر گشتاور پیچشی افزایش مییابد.

8- رشد ترک و شکست پوستهها در هر دو حالت بارگذاری خمشی و مرکب

49

- [6] M. Zehsaz, S. J. Zakavi, H. Mahbadi, M. R. Eslami, Cyclic strain accumulation of plain stainless steel pressurized cylinders subjected to dynamic bending moment, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, pp. 3129-3138, 2008.
- [7] B. Gao, X. Chen, G. Chen, Ratchetting, Ratchetting boundary Study of Pressurized straight low carbon steel pipe under reversed Bending, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp. 96-106, 2006.
- [8] B. Gao, Modeling of material multiaxial ratcheting and ratcheting prediction of pressure piping, Ph.D. dissertation. Tianjin University of Technology; 2005 (in Chinese).
- [9] S. C. Kulkarnia, Y. M. Desaia, T. Kanta, G. R. Reddy, P. Prasad, K. K. Vaze, Uniaxial and biaxial ratchetting in piping materials experiments and analysis, *International Journal Pressure Vessel Piping*, Vol. 81, pp. 609-617, 2004.
- [10] S. Kulkarni, Y. Desai, T. Kant, G. Reddy, Y. Parulekar, K. Vaze, 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, 2003.
- [11] E. Corona, S. Kyrialides, An experimental investigation of the degradation and buckling of circular tubes under cyclic bending and external pressure, *Thin-Walled Structures*, Vol. 12, pp. 229-263, 1991.
- [12] S. J. Zakavia, M. Zehsaza, M. R. Eslamib, 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, 2010.
- [13] S. Bari, T. Hassan, Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, pp. 381-409, 2000.
- [14] 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, pp. 3009-3017, 2009.
- [15] ASTM A370-05, Standard test method and definitions for mechanical testing of steel products.
- [16] ABAQUS Analysis User's manual, v6.10.1, section 20.2.2: models for metals subjected to cyclic loading, 2010.
- [17] J. Zhu, X. Chen, F. Xue, W. Yu, Bending ratcheting tests of Z2CND18.12 stainless steel, *International Journal of Fatigue*, Vol. 35, pp. 16-22, 2012
- [18] S. Kyrialides, P.K. Shaw, An experimental investigation of the degradation and buckling of circular tubes under cyclic bending and external pressure, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 109, pp. 169-178, 1987.

از انتهای گیردار آنها میباشد که این بهدلیل ایجاد گشتاور خمشی بزرگتر و کاهش لنگر اینرسی ناشی از بیضی شدن و در نتیجه افزایش تنشها میباشد با این تفاوت که رشد ترک در نمونههای با بارگذاری خمشی بهصورت محیطی و در نمونههای با بارگذاری مرکب بهصورت مایل است.

#### 7- نمايەي نشانەھا

انرژی کرنشی مومسان 🛛

(mm) جابهجایی میانگین (

- (mm) دامنه جابهجایی (
  - (kN) نیروی میانگین **F**
  - (kN) دامنه نيرو (kN)
    - N شماره چرخه

#### 8- مراجع

- D. Moreton, K. Yahiaoui, D. Moffat, H. Machin, L. Amesbury, The behaviour of pressurised plain pipework subjected to simulated seismic loading, *Strain*, Vol. 30, pp. 63-72, 1994.
- [2] D. Kramer, S. Krolop, A. Scheffold, R. Stegmeyer, Investigations into the ratchetting behaviour of austenitic pipes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 171, pp. 161-172, 1997.
- [3] M. Shariati, K. Kolasangiani, H. Chavoshan, An experimental study on ratcheting behavior of stainless steel 304L cylindrical shells under cyclic axial and combined loadings, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 69-76, 2013. (In Persian)
- [4] S. M. Rahman, T. Hassan, E. Corona, 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, 2008.
- [5] D. Moreton, K. Yahiaoui, D. Moffat, M. Zehsaz, The effect of diameter/thickness ratio on the ratchetting behaviour of pressurised plain pipework subjected to simulated seismic loading, *Strain Journal BSSM*, Vol. 32, pp. 91-96, 1996.