



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

محمود شریعتی^{1*}، کمال کلاسنگیانی²، خلیل فرهنگ دوست³

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

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 31 فروردین 1393

پذیرش: 01 شهریور 1393

ارائه در سایت: 28 مهر 1393

کلید واژگان:

پوسته استوانه‌ای

بارگذاری خمشی تناوبی

بارگذاری مرکب تناوبی

انباشتگی کرنش مومسان و نرم شوندگی

الگوی سخت شوندگی

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی انباشتگی کرنش مومسان و رفتار نرم شوندگی پوسته‌های استوانه‌ای یک سرگیردار فولادی SS316L با بارگذاری خمشی و مرکب (خمشی-پیچشی) به صورت تناوبی پرداخته شده است. بارگذاری‌های خمشی به صورت نیرو-کنترل و جابه‌جایی-کنترل است؛ اما در بارگذاری‌های مرکب، اعمال نیرو فقط به صورت جابه‌جایی-کنترل است. آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون 8802 انجام شده است که با بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر تغییر شکل مومسان در چرخه‌های پیاپی انباشته 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 آزمایش‌های تجربی است. در بارگذاری جابه‌جایی-کنترل رفتار نرم شوندگی به دلیل پدیده بیضی شدن در پوسته‌ها مشاهده می‌شود و با افزایش دامنه جابه‌جایی، سرعت نرم شوندگی افزایش می‌یابد. رشد ترک در بارگذاری مرکب به دلیل وجود نیروی پیچشی و خمشی به صورت مایل رشد می‌کند؛ در حالی که در بارگذاری خمشی رشد ترک به صورت محیطی است. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس انجام شده است و با مقایسه‌ی الگوی سخت شوندگی همگن و الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن/ سینماتیک مشاهده می‌شود که الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن/ سینماتیک، رفتار نرم شوندگی و انباشتگی کرنش مومسان پوسته‌های استوانه‌ای با بارگذاری خمشی تناوبی را بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

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

Mahmoud Shariati^{1*}, 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

Original Research Paper
Received 20 April 2014
Accepted 23 August 2014
Available Online 20 October 2014

Keywords:
Cylindrical Shell
Cyclic Bending Load
Cyclic Combined Load
Accumulation of plastic strain and Softening
Hardening Model

ABSTRACT

In this research, accumulation of plastic strain and softening behavior of stainless steel SS316L 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 displacement-control. Experimental tests were performed using an INSTRON 8802 servo-hydraulic machine. Under force-control loading with non-zero mean force, plastic strain was accumulated in continuous cycles called ratcheting. Based on experimental results, linear relation was observed between plastic energy and rate of plastic deformation, which shows the rigidity of fixtures used in experimental tests. Under displacement-control loading, softening behavior was observed due to growth of ovalization and the rate of softening increased by use of the higher 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.

1- پیشگفتار

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

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

Please cite this article using:

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)

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. به دلیل 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 به صورت چرخه‌ای¹ اعمال شود. رچتینگ² یکی از پاسخ‌های خمشی کم چرخه، به‌عنوان انباشتگی کرنش مومسان که با افزایش چرخه‌ها رخ می‌دهد، تعریف شده است. سازه‌های متعددی وجود دارند که بارگذاری‌های تناوبی اعمال شده بر آن‌ها موجب می‌شود وضعیت تنش از حد کشسان ماده فراتر رود. از آنجا که انباشتگی کرنش مومسان می‌تواند منجر به واماندگی‌های فاجعه آمیز در این سازه‌ها شود، برای طراحی و واکاوی اینگونه سازه‌ها پیش بینی دقیق پاسخ انباشتگی کرنش 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 X10 CrNiNb18 9 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 استوانه‌ای SS304L را با بارگذاری مرکب و محوری تناوبی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در پوسته استوانه‌ای مایل در مقایسه با پوسته استوانه‌ای 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 انباشتگی 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 شبیه‌سازی انباشتگی کرنش مومسان 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 مومسان می‌شود و فشار داخلی تأثیر اندکی بر بیضی شدن سطح مقطع لوله‌ها دارد. مورتون و همکاران [5] پوسته‌های استوانه‌ای با نسبت قطر میانگین به ضخامت در محدوده 9 و 28 را مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌ها با فشار داخلی ثابت و گشتاور خمشی متناوب قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بیشترین کرنش خمشی بر روی سطوح بیرونی پوسته اتفاق می‌افتد و همچنین، انباشتگی کرنش مومسان نیز در همین نواحی ایجاد می‌شود. چنین نتایجی توسط زه ساز و همکاران [6] نیز به دست آمده است. گائو و همکاران [7] با استفاده از فیکسچر خمش شبه سه نقطه‌ای به مطالعه تجربی

3- Finite Element
4- ANSYS
5- Chaboche
6- Stabilize

1- Cyclic
2- Ratcheting

3- تحلیل تجربی

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 اندازه‌گیری جابه‌جایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج نیز استفاده شده است.

3-1- شرایط مرزی

برای بارگذاری خمشی تناوبی نیاز به فیکسچری است که بتواند در دو جهت رفت و برگشت نیروی عمودی به ابتدای پوسته اعمال کند. برای انجام این کار از دو قرقره‌ی تفلونی فشرده شده جهت اعمال بارهای عمودی استفاده شده است که ابتدای پوسته در میان دو قرقره قرار گرفته و به‌طور کامل به قرقره‌ها چسبیده است و انتهای پوسته از طریق یک گیره‌ی ثابت² به ستون دستگاه متصل شده است (شکل 2-الف). در این فیکسچر، از یک راهنمای³ استوانه‌ای در انتها استفاده شده است که از له‌شدگی پوسته جلوگیری می‌کند. برای نگه داشتن انتهای پوسته از یک حلقه گوه‌ای⁴ و یک حلقه فشاری⁵ استفاده شده است که با پیچ به گیره ثابت متصل می‌شود.

در شکل 2-الف، اجزای فیکسچر خمش به‌صورت 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 استوانه‌ای، حلقه گوه‌ای و حلقه فشاری استفاده شده است با این تفاوت که این اجزا در دو طرف پوسته استوانه‌ای قرار می‌گیرند؛ در حالی که در بارگذاری خمشی تنها به انتهای ثابت پوسته متصل می‌شوند. اعمال نیروی فک به وسیله‌ی یک بازوی عمودی انجام می‌شود که توسط یک پین به بازوی افقی شیاردار متصل می‌باشد.

در بارگذاری مرکب، برای اندازه‌گیری جابه‌جایی انتهای پوسته از یک ساعت دیجیتال مطابق شکل 3 استفاده شده است که جابه‌جایی عمودی انتهای پوسته را نشان داده و مطابق شکل به دستگاه متصل می‌شود. حرکت افقی انتهای پوسته نیز توسط یک ساعت عقربه‌ای اندازه‌گیری شد که جابه‌جایی افقی اندازه‌گیری شده در مقایسه با جابه‌جایی عمودی ناچیز بوده و بنابراین در این بخش فرض می‌شود که پوسته فقط حرکت عمودی و چرخشی گرد محور خود دارد.



شکل 1 دستگاه سروهیدرولیک اینسترون

- 2- Fixed Clamp
- 3- Guide
- 4- Wedged Ring
- 5- Pressure Ring

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

در این رابطه s تانسور تنش انحرافی، α 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 سخت‌شوندگی آرمسترانگ-فریدریش¹ (AF)، به‌عنوان یکی از الگوهای نخستین با اضافه کردن یک جمله، مورد استفاده پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است و به‌صورت رابطه (2) می‌باشد [14].

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

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

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

همچنین، رابطه (4) نیز برقرار می‌باشد [14]:

$$\alpha_y = \alpha_z = -\frac{1}{2}\alpha_x \quad (4)$$

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

$$\left| \sigma_x - \frac{3}{2}\alpha_x \right| = \sigma_0 \quad (5)$$

بنابراین مطابق رابطه (6)، [14]:

$$\sigma_x = \sigma_0 + \left[\frac{\beta}{\gamma} + \frac{3}{2}(\alpha_{x0} - \frac{2}{3}\beta) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^p - \varepsilon_{x0}^p)] \right], d\varepsilon_x^p \geq 0$$

$$\sigma_x = \sigma_0 + \left[\frac{\beta}{\gamma} + \frac{3}{2}(\alpha_{x0} - \frac{2}{3}\beta) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^p - \varepsilon_{x0}^p)] \right], d\varepsilon_x^p < 0 \quad (6)$$

تنش‌های آغازین و پایانی 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 آغازین و پایانی به ترتیب $\sigma_m + \sigma_a$ و $\sigma_m - \sigma_a$ می‌باشند و در این شرایط و با استفاده از رابطه‌ی (6)، کرنش‌های آغازین در حالت بارگذاری (ε_1) و باربرداری (ε_3) و کرنش‌های پایانی در حالت بارگذاری (ε_2) و باربرداری (ε_4) قابل محاسبه می‌باشند. انرژی کرنشی موم‌سان در هر چرخه طبق رابطه‌ی (7) محاسبه می‌شود:

$$W_p = \int_{\text{cycle}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p$$

$$= \int_{\sigma_m - \sigma_a}^{\sigma_m + \sigma_a} (\sigma_x)_{\text{Loading}} d\varepsilon_x^p + \int_{\sigma_m + \sigma_a}^{\sigma_m - \sigma_a} (\sigma_x)_{\text{Unloading}} d\varepsilon_x^p =$$

$$-\frac{1}{\gamma} [2\sigma_a + (\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma}) \ln(\sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}) -$$

$$\ln(\sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma})] + \frac{1}{\gamma} [-2\sigma_a + (-\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma})$$

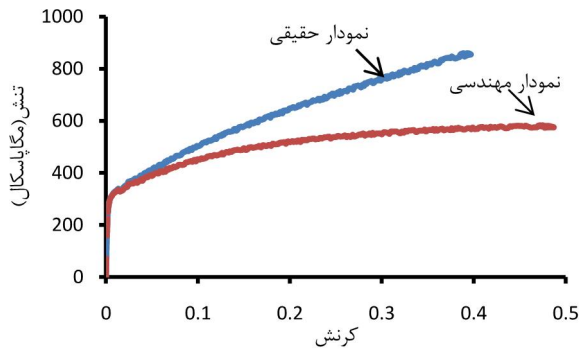
$$[\ln(\sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}) - \ln(\sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma})] =$$

$$-\frac{4\sigma_a}{\gamma} + (\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma}) [(\varepsilon_2 - \varepsilon_{x0}^p) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_{x0}^p)]$$

$$+ (-\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma}) [(\varepsilon_4 - \varepsilon_{x0}^p) - (\varepsilon_3 - \varepsilon_{x0}^p)] \quad (7)$$

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.

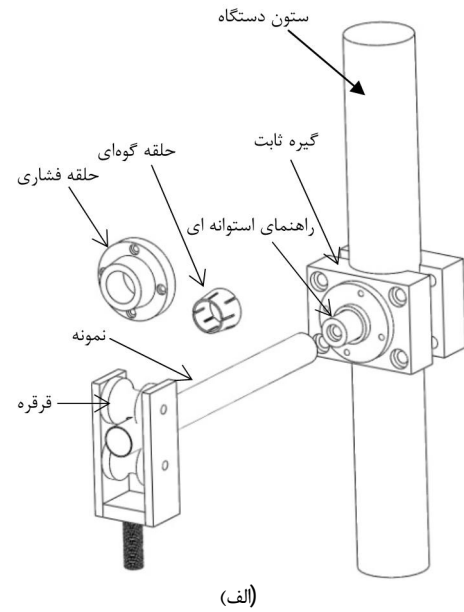
1- Armstrong-Frederick



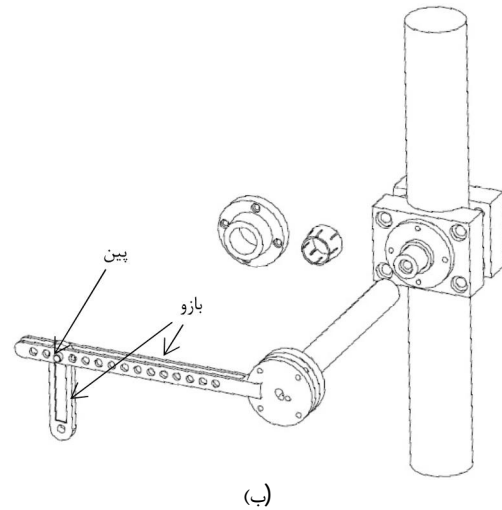
شکل 4 نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش استاندارد

جدول 1 هندسه و خواص مکانیکی پوسته استوانه‌ای SS316L

مقدار	مشخصات
34	قطر خارجی (mm)
2	ضخامت (mm)
235	طول (mm)
187/7	ضریب الاستیسیته (GPa)
290	تنش تسلیم (MPa)
859/61	تنش نهایی (MPa)
0/33	ضریب پواسون



(الف)



(ب)

شکل 2 نمایی از فیکسچر استفاده شده در بارگذاری (الف) خمشی تناوبی، (ب) مرکب (خمشی-پیچشی) تناوبی



شکل 3 فیکسچر مورد استفاده در بارگذاری مرکب تناوبی

2-3- هندسه و خواص مکانیکی پوسته استوانه‌ای

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.

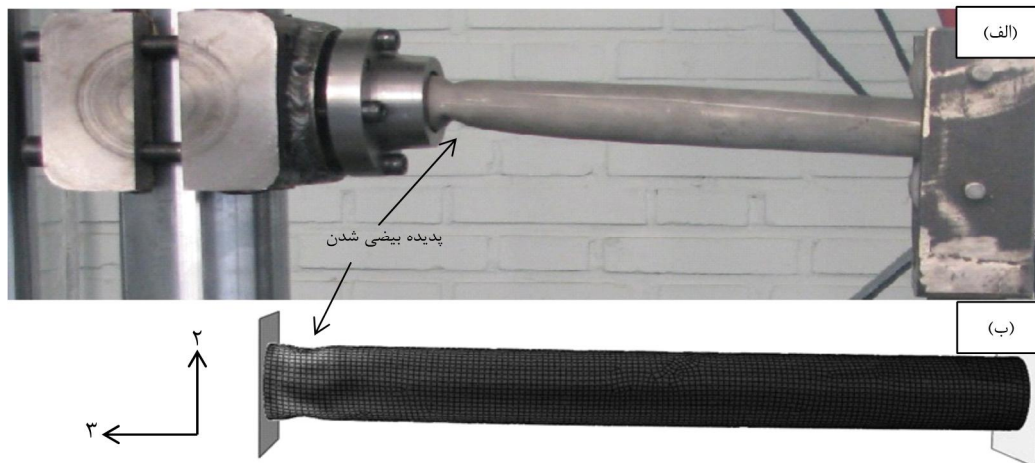
مقدار تنش تسلیم به‌دست آمده برای فولاد SS316 از ترسیم خط 0/2% تعیین شده است. هندسه و خواص مکانیکی پوسته مورد آزمایش در جدول 1 نشان داده شده‌اند. ضریب پواسون نیز برابر 0/33 در نظر گرفته شده است.

4- تحلیل عددی و مقایسه با نتایج تجربی

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 شونده‌گی سینماتیک استفاده کرد که دارای دو قسمت به نام‌های الگوی سخت شونده‌گی سینماتیک خطی و دیگری سخت شونده‌گی غیرخطی همگن/سینماتیک است. الگوی نخست می‌تواند با سطح تسلیم میسر¹ یا هیل² به کار برده شود، در حالی که الگوی دوم را تنها با سطح تسلیم میسر می‌توان به کار برد. در واقع تفاوت این دو سطح تسلیم در آن است که با استفاده از سطح تسلیم میسر، در هر لحظه تنش تسلیم برای ماده در تمام جهات یکسان است؛ اما با استفاده از سطح تسلیم هیل می‌توان تنش تسلیم را در جهات مختلف، متفاوت با یکدیگر تعریف کرد. هر چند الگوی سخت شونده‌گی غیرخطی همگن/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 نمی‌دهد یا اینکه واکاوی مساله‌های جفتی تنش حرارتی به کمک این الگو امکان پذیر نمی‌باشد؛ اما با این وجود برای واکاوی مسایل با بارگذاری چرخه‌ای کامل‌ترین و دقیق‌ترین الگو است. در الگوی سخت شونده‌گی سینماتیک خطی فرض می‌شود که سطح تسلیم متناسب با مقدار α به‌عنوان تنش زمینه در فضای تسلیم حرکت می‌کند؛ اما تغییر شکل نمی‌دهد. نرم افزار آباکوس از الگوی خطی زیگلر³ برای شبیه‌سازی عددی مساله‌ها استفاده می‌کند که معادله آن به‌صورت رابطه (8) بیان می‌شود [16].

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\epsilon}^{pl} + \frac{1}{C} \dot{C} \alpha_{ij} \quad (8)$$

1- Mises
2- Hill
3- Ziegler



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

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 ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$). 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 ($U_1=UR_2=UR_3=0$). برای بارگذاری از نوع جابه‌جایی-کنترل به عامل U_2 مقدار اختصاص می‌یابد که برای بارگذاری نوع تناوبی از گزینه‌ی دامنه استفاده شده که به آن یک موج سینوسی اختصاص می‌یابد. برای بارگذاری از نوع نیرو-کنترل به عامل CF_2 مقدار اختصاص می‌یابد و مانند بارگذاری جابه‌جایی-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 شدن¹ مشاهده می‌شود که باعث کاهش لنگر اینرسی و افزایش تنش‌ها می‌شود. بنابراین نقاط انتهایی 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 هیستریزس پوسته استوانه‌ای با بارگذاری 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 شونده‌ی غیر خطی همگن/سینماتیک استفاده شده است که رفتار نرم شونده‌ی به خوبی نمایش داده شده است و کرنش مومسان باقی‌مانده در ناحیه کشش و فشار با هم برابر است. با توجه به شکل 6 کرنش مومسان باقی‌مانده پیش‌بینی شده‌ی حاصل از نتایج عددی، بیشتر از نتایج تجربی است. در شکل 7، نمودار حداکثر نیرو در حالت کششی و فشاری به‌صورت تجربی و عددی بر حسب تعداد چرخه نشان داده است و مشاهده می‌شود که الگوی سخت شونده‌ی غیر خطی همگن/سینماتیک نسبت به نتایج تجربی، رفتار نرم شونده‌ی را به خوبی نمایش می‌دهد اگرچه ضعیف‌تری را نشان می‌دهد. در نتایج تجربی نرم شونده‌ی در تعداد چرخه‌های بیشتری اتفاق می‌افتد.

که در آن C ضریب سخت شونده‌ی سینماتیک و \dot{C} نرخ تغییرات C بر حسب دما است. در این الگو σ^0 (اندازه سطح تسلیم) ثابت می‌ماند، به بیان دیگر همواره مساوی σ_0 که تنش تسلیم به ازای کرنش مومسان صفر است، باقی می‌ماند.

الگوی سخت شونده‌ی 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 α 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 می‌شود. الگوی ارائه شده در آباکوس به‌صورت رابطه (9) است [16].

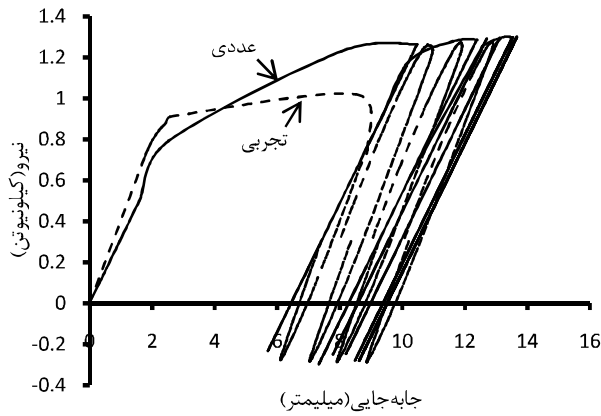
$$\alpha = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \varepsilon - \gamma \alpha_{ij} \varepsilon + \frac{1}{C} \dot{C} \alpha_{ij} \quad (9)$$

که در آن C و γ ثابت‌های ماده است. البته باید به این نکته اشاره کرد که نرم افزار توانایی در نظر گرفتن نرخ تغییرات γ نسبت به دما را ندارد. این الگو هنگامی که C و γ مساوی صفر فرض شوند به الگوی سخت شونده‌ی همگن و هنگامی که γ 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 تسلیم در فضای تنش)، به‌صورت جداگانه برای نرم افزار تعریف شوند. برای تعیین رشد سطح تسلیم در نرم افزار آباکوس از رابطه (10) با معرفی اندازه σ^0 به‌صورت تابعی نمایی استفاده می‌شود که در آن σ_0 نشان دهنده تنش تسلیم به ازای کرنش مومسان صفر است. مقادیر b و Q_∞ نیز ثابت‌های ماده هستند [16].

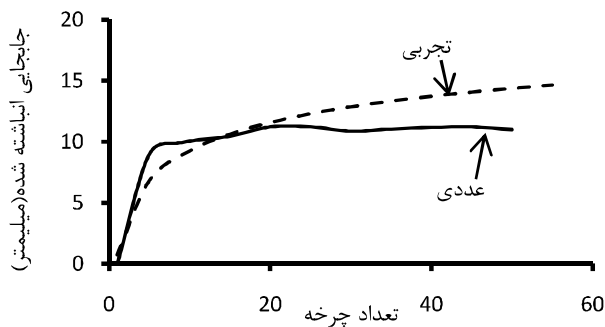
$$\sigma^0 = \sigma_0 + Q_\infty (1 - e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad (10)$$

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

1- Ovalization



شکل 9 نمودار هیستریزس پوسته استوانه‌ای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط نیرو-کنترل غیرمقارن



شکل 10 جابه‌جایی انباشته شده بر حسب تعداد چرخه برای پوسته استوانه‌ای با بارگذاری خمشی تناوبی

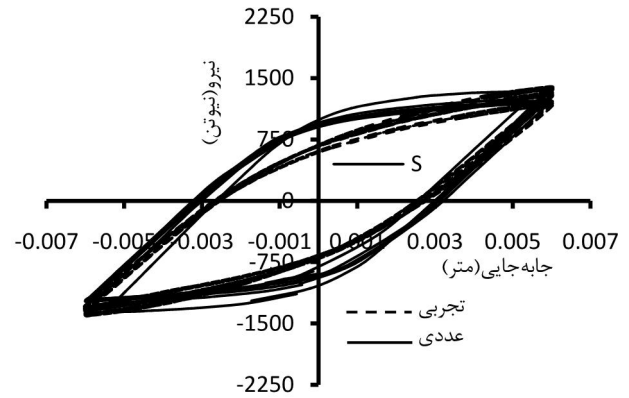
در این قسمت از الگوی سخت شوندگی غیر خطی همگن/ سینماتیک استفاده شده است. با توجه به شکل 9، سطح حلقه‌های هیستریزس نتایج تجربی بزرگ‌تر از سطح حلقه‌های هیستریزس نمودار عددی است و این به دلیل اتلاف انرژی در آزمایش تجربی است؛ اما به طور کلی انباشتگی کرنش در شبیه‌سازی عددی به خوبی مشاهده می‌شود.

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

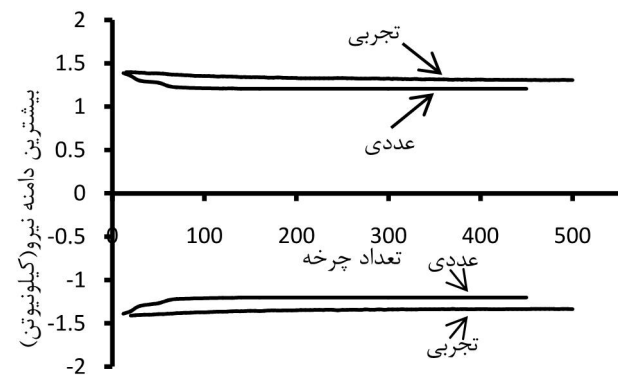
5- نتایج تجربی

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

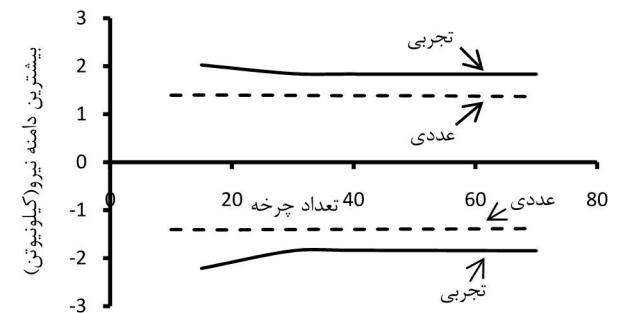
در شکل 11 جابه‌جایی انباشته شده چهار پوسته استوانه‌ای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط نیرو-کنترل با دامنه نیرو ثابت 0/8 کیلو نیوتن و نیروی میانگین 0/5، 0/6، 0/7 و 0/8 کیلو نیوتن بر حسب تعداد چرخه رسم شده است. با توجه به شکل 11 با افزایش نیروی میانگین میزان جابه‌جایی انباشته شده و نرخ آن افزایش می‌یابد. 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 تغییر شکل موم‌سان متوقف شود.



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

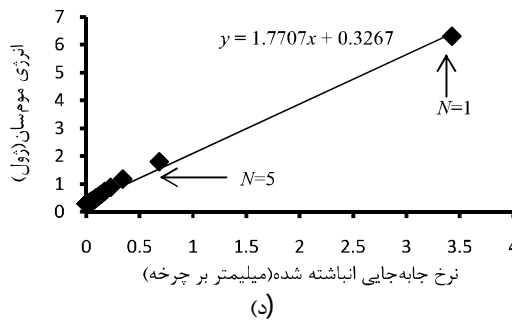
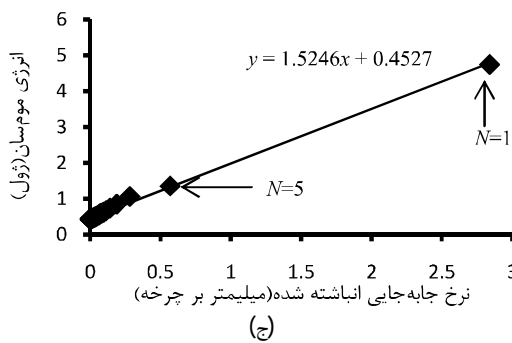
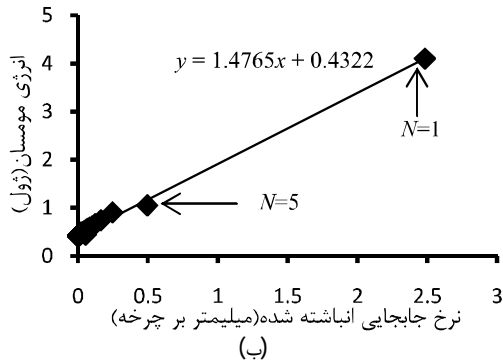
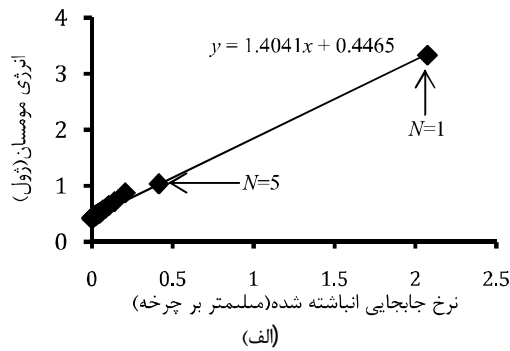


شکل 8 حداکثر نیروی کششی و فشاری با استفاده از الگوی سخت شوندگی همگن در پوسته استوانه‌ای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط جابه‌جایی-کنترل مقارن با دامنه جابه‌جایی 6 میلی‌متر

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 می‌کند 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.

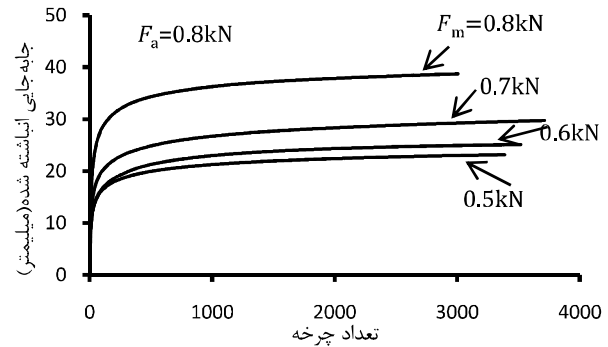
4-2- مقایسه نتایج عددی و تجربی در شرایط بارگذاری نیرو-کنترل

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



شکل 12 انرژی مومسان بر حسب نرخ جابه‌جایی انباشته شده برای پوسته‌های استوانه‌ای با بارگذاری خمشی تناوبی با دامنه نیروی 0/8 کیلو نیوتن و نیروی میانگین (الف) 0/5 کیلو نیوتن، (ب) 0/6 کیلو نیوتن، (ج) 0/7 کیلو نیوتن، (د) 0/8 کیلو نیوتن

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 به دلیل افزایش نامتقارنی در بارگذاری، سرعت نرم شوندگی کاهش و مقدار حداکثر گشتاور پیچشی افزایش می‌یابد. در حالت مثبت، سرعت نرم شوندگی تقریباً به صفر می‌رسد؛ ولی در حالت منفی تا حدودی نرم شوندگی نمونه مشاهده می‌شود که این به دلیل 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 11 جابه‌جایی انباشته شده بر حسب تعداد چرخه برای پوسته‌های استوانه‌ای با بارگذاری خمشی تناوبی

چنین انباشتگی تغییر شکل 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 به صورت 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 تغییر شکل‌های قابل ملاحظه‌ای که باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود، وجود ندارد. همچنین، با افزایش نیروی میانگین شیب نمودار افزایش می‌یابد و این نشان دهنده‌ی آنست که به ازای افت نرخ معین جابه‌جایی انباشته شده، کاهش در انرژی مومسان نمونه‌های با نیروی میانگین بالاتر، بیشتر است.

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

شکل 13 حلقه هیستریزس 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 می‌شود که با افزایش دامنه جابه‌جایی، شیب نمودار نرم شوندگی در هر دو ناحیه کششی و فشاری بیشتر می‌شود و نمونه در تعداد چرخه کمتری می‌شکند. 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 10 میلی‌متر می‌شود.

3-5- 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.

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 به صورت محیطی رشد کرده حال آنکه در نمونه‌های با بارگذاری مرکب خمشی-پیچشی به دلیل وجود گشتاور پیچشی افزون بر گشتاور خمشی، ترک به صورت مایل رشد کرده و باعث شکست پوسته شده است.

6- نتیجه گیری

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی روی پوسته‌های استوانه‌ای SS316L یک سرگیردار با بارگذاری‌های خمشی و مرکب خمشی-پیچشی و همچنین، مقایسه نتایج تجربی حاصل از بارگذاری خمشی با نتایج عددی به دست 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 شبه‌سازی 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 پیش‌بینی می‌کند.

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

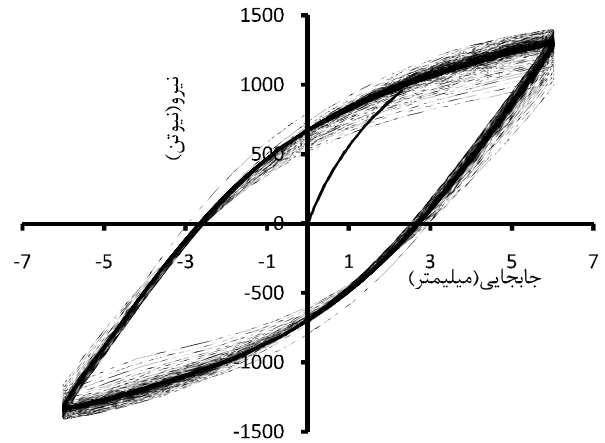
4- با بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی چرخه‌ای انباشتگی تغییرشکل موم‌سان یا پدیده رچتینگ مشاهده می‌شود و در دامنه نیروی ثابت با افزایش نیروی میانگین، جابه‌جایی انباشته شده و نرخ آن افزایش می‌یابد. همچنین، برای یک نمونه آزمایش با افزایش تعداد چرخه، جابه‌جایی انباشته شده افزایش و نرخ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

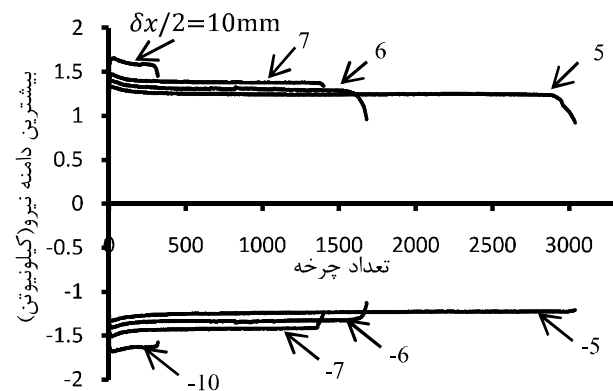
6- با بارگذاری جابه‌جایی-کنترل متقارن در بارگذاری خمشی چرخه‌ای رفتار نرم‌شوندگی مشاهده می‌شود و با افزایش دامنه جابه‌جایی، سرعت نرم شوندگی افزایش می‌یابد و نمونه در تعداد چرخه کمتری می‌شکند.

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

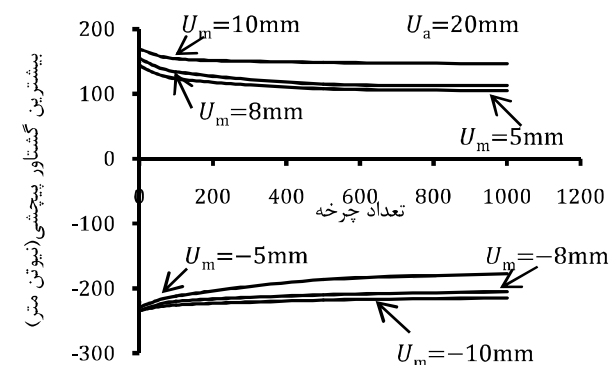
8- رشد ترک و شکست پوسته‌ها در هر دو حالت بارگذاری خمشی و مرکب



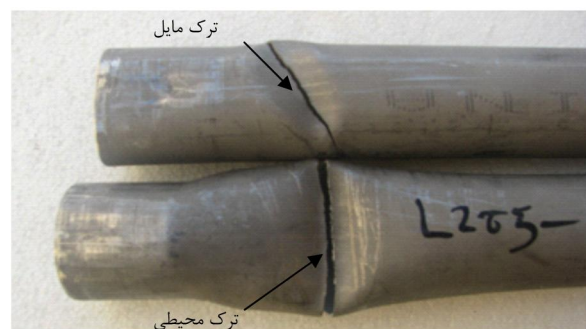
شکل 13 نمودار هیستریزس پوسته استوانه ای با بارگذاری خمشی تناوبی در شرایط جابه‌جایی-کنترل متقارن با دامنه جابه‌جایی 6 میلی‌متر



شکل 14 حداکثر نیروی کششی و فشاری بر حسب تعداد چرخه برای پوسته های استوانه ای با بارگذاری خمشی تناوبی



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



شکل 16 ترک محیطی و مایل در پوسته های استوانه ای با بارگذاری خمشی و مرکب تناوبی

- [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 multi-axial ratcheting and ratcheting prediction of pressure piping*, Ph.D. dissertation. Tianjin University of Technology; 2005 (in Chinese).
- [9] S. C. Kulkarnia, Y. M. Desai, 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 به دلیل 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 به صورت محیطی و در نمونه‌های با بارگذاری مرکب به صورت مایل است.

7- نمایه‌ی نشانه‌ها

انرژی کرنشی مومسان	W_p
جاب‌جایی میانگین (mm)	U_m
دامنه جاب‌جایی (mm)	U_a
نیروی میانگین (kN)	F_m
دامنه نیرو (kN)	F_a
شماره چرخه	N

8- مراجع

- [1] 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.