ISME2011-XXXX

بررسی تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری محوری تناوبی

محمود شریعتی[۱]، حمید رضا ایپک چی[۲]، حسین حاتمی[۳]

[۱]دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، msharіati44@gmail.com
[۲]استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، hamidre2000@gmail.com
[۳]دانشجوی کارشناسی ارشد،دانشگاه صنعتی شاهرود، h64hatami@gmail.com

چکیده

در این مقاله به بررسی رفتار رچتینگ[۱] پوسته استوانه ای تحت بارگذاری تنش کنترلی محوری تناوبی پرداخته شده است. تست تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون[۲] ۸۸۰۲ انجام گردیده است. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک[۳] انجام شده و دقت این مدل با نتایج تجربی سنجیده شده است. تحت این نوع بارگذاری به علت وجود تنش میانگین غیر صفر، کرنش پلاستیک در سیکل های متوالی در پوسته استوانه ای انباشت می گردد یا همان رفتار رچتینگ در پوسته اتفاق می افتد. مدل سخت شوندگی ترکیبی به خوبی رفتار رچتینگ پوسته را شبیه سازی می کند. نتایج تجربی نشان می دهد که نرخ انباشت کرنش پلاستیک در چند سیکل ابتدایی زیاد می باشد و در سیکل های بعدی کاهش می یابد. در شبیه سازی عددی نیز نرخ انباشت کرنش پلاستیک در چند سیکل ابتدایی منطبق بر نتایج تجربی می باشد و در سیکل های بعدی انباشت کرنش پلاستیک نسبت به نتایج تجربی سریعتر کاهش می یابد.

واژه های کلیدی

پوسته استوانه ای، رچتینگ، بارگذاری محوری تناوبی، مدل المان محدود

مقدمه

کاربردهای پوسته ها در صنایع هوافضا مانند هواپیماها و موشکها، خطوط لوله و سازه های دریایی بسیار فراوان می باشد. این پوسته ها در طول عمر خود تحت بارگذاری های محوری تناوبی قرار می گیرند که در کاهش عمر آنها تاثیر فراوانی دارند. از مشکلات مهمی که باعث می شود بارگذاری چرخه ای روی پوسته های استوانه ای به ندرت مورد مطالعه تجربی قرار گیرد ساخت فیکسچرهای مخصوص به آنها برای اعمال بارگذاری مذکور می باشد. به علت مشکلات تست تجربی موجود در بارگذاری محوری تناوبی پوسته های استوانه ای، تحقیقات اندکی روی آنها صورت گرفته است. یکی از این مطالعات روی پوسته هایی از جنس فولاد ضد زنگ می باشد که دامنه کرنش کمانشی پوسته ها تحت بارگذاری محوری تناوبی را کمتر از بارگذاری فشاری یکنواخت پیش بینی کرده، ولی به رفتار نرم شوندگی و یا سخت شوندگی نمونه ها اشاره ای نکرده است[۱]. به دلیل مشکلات انجام آزمایش های تجربی، مطالعه تجربی روی پوسته های استوانه ای بیشتر با بارگذاری های خمشی تناوبی انجام می گیرد که دارای تست های تجربی ساده تری می باشند و نتایج تجربی بسیاری با این نوع بارگذاری روی پوسته های استوانه ای بدست آمده است[۲]. اما از مشکلات این نوع بارگذاری روی پوسته ها عدم توزیع یکنواخت بار روی دهانه پوسته ها می باشد[۱].

اخیرا مطالعه ای روی تیوب ها انجام گرفته است و تعداد سیکلها به همراه تنش میانگین و دامنه تنش از پارامترهای تاثیر گذار برای فروپاشی این نمونه ها تحت بارگذاری محوری تناوبی به همراه فشار داخلی بوده است[۳]. رفتار نرم شوندگی لوله های استوانه ای نیز تنها با استفاده از روش عددی مورد مطالعه قرار گرفته است[۴]. لذا تحقیقات اندکی روی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری های محوری تناوبی صورت گرفته است و رفتار منحنی های تنش- کرنش این نمونه ها تحت بارگذاری های تنش کنترلی به ندرت یافت می شود.

در این مقاله پوسته استوانه ای تحت بارگذاری تنش کنترلی محوری تناوبی به صورت تجربی قرار گرفته است. برای اینکه رفتار رچتینگ پوسته مشاهده گردد بارگذاری به صورت تنش کنترلی با تنش میانگین غیر صفر روی نمونه اعمال گردیده است. جهت استفاده از خواص مکانیکی برای شبیه سازی عددی، تست کشش ساده روی چند نمونه استاندارد به صورت تجربی انجام گردیده است. همچنین نتایج شبیه سازی عددی به دست آمده از نرم افزار آباکوس با نتایج تجربی مقایسه شده است و مطابقت خوبی بین نتایج عددی با نتایج تجربی وجود دارد.

هندسه و خواص مکانیکی پوسته استوانه ای

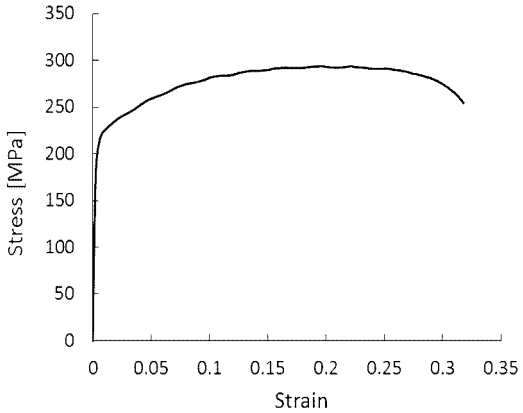
پوسته استوانه ای با ضخامت ۰.۸۵mm ، طول ۱۲۵mm و قطر خارجی ۴۲mm تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته است. خواص مکانیکی پوسته استوانه ای مورد آزمایش، بر طبق استاندارد ASTME8 با کمک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون۸۸۰۲ بدست آمده است (شکل ۱). فولاد مورد آزمایش St37 با مدول یانگ ۲۱۰GPa و تنش تسلیم اولیه ۱۹۸MPa می باشد. منحنی تنش-

---

[۱] Ratcheting
[۲] INSTRON
[۳] Nonlinear isotropic/kinematic hardening

کرنش بدست آمده از تست تجربی در شکل ۲ نشان داده شده است. ضریب پواسون نیز برابر ۰.۳ در نظر گرفته شده است.

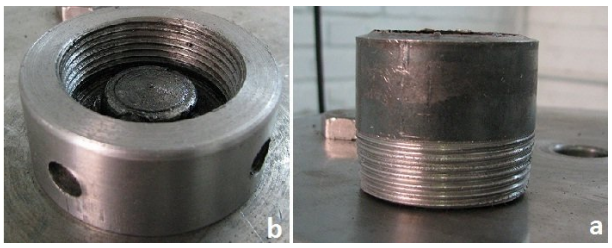
شکل۱: تست کشش ساده بر طبق استاندارد ASTME8



شکل۲: منحنی تنش- کرنش بدست آمده از تست کشش ساده

شرایط مرزی

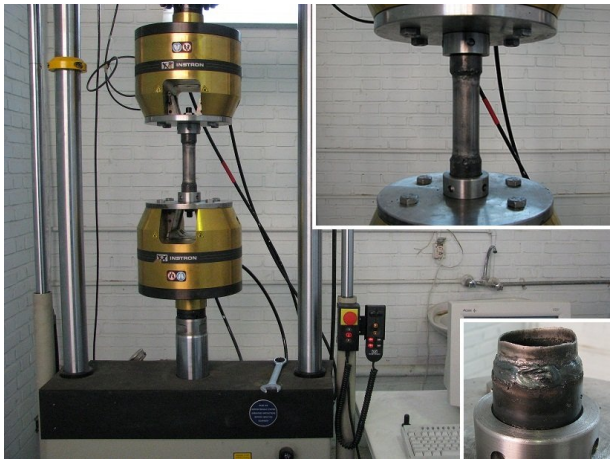
برای بارگذاری چرخه ای روی پوسته های استوانه ای نیاز به فیکسچری می باشد که بتواند بار کشش و فشار را بدون هیچ لغزشی روی پوسته اعمال کند. به علت اینکه پوسته ها از ضخامت نازکی برخوردار هستند رزوه کردن دو طرف آنها امکان پذیر نمی باشد. لذا از سر دنده هایی برای تقویت دو سر پوسته ها استفاده شده است و این سردنده ها رزوه شده اند(شکل a-۳) و هر کدام از آنها از دو طرف به پوسته استوانه ای جوش کاربید داده شده اند تا در هنگام بارگذاری، پوسته از سردنده ها جدا نگردد. فیکسچرهای نشان داده شده در شکل b-۳، نمونه آماده شده را به فک های ثابت و متحرک دستگاه متصل می کند. برای شبیه سازی عددی یک طرف پوسته از تمامی جهات مقید می باشد و طرف دیگر فقط در جهت راستای طولی پوسته آزاد می باشد.



شکل۳: a- سر دنده جهت تقویت دو طرف پوسته استوانه ای، b- فیکسچر

تست تجربی

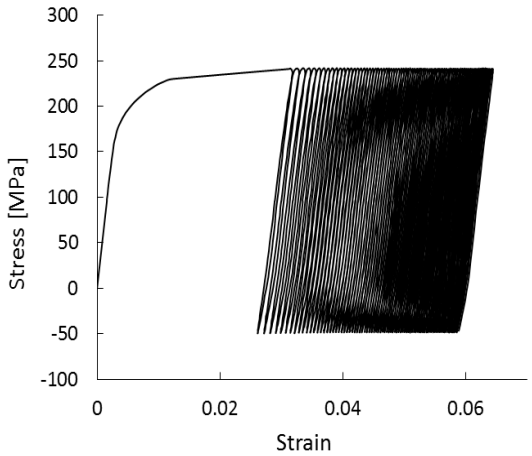
برای انجام این تست از دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون۸۸۰۲ استفاده شده است. پوسته استوانه ای توسط فیکسچرها بین دو فک دستگاه محکم می گردد و بارگذاری توسط فک متحرک پایین به پوسته اعمال می گردد(شکل۴).



شکل۴: تست تجربی پوسته استوانه ای تحت بارگذاری تنش کنترلی تا گسیختگی نمونه

برای به دست آوردن رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای، بارگذاری به صورت تنش کنترلی با تنش متوسط ۹۶MPa و دامنه تنش ۱۴۶MPa روی نمونه اعمال می گردد. هر چه از دامنه تنش بزرگتری استفاده گردد نرخ انباشت کرنش پلاستیک بیشتر می شود و رفتار رچتینگ بهتر نمایش داده می شود اما چون نمونه مورد آزمایش پوسته استوانه ای می باشد برای اینکه در فشار به کمانش نرسد و کمانش روی رفتار رچتینگ تاثیری نداشته باشد، دامنه تنش بزرگی به نمونه اعمال نشده است. همچنین با افزایش تنش میانگین گسیختگی سریعتر منجر می شود لذا تنش میانگین مقداری انتخاب گردیده است تا گسیختگی نمونه در تعداد سیکل بیشتری رخ دهد.

منحنی تنش-کرنش بدست آمده تحت این نوع بارگذاری در شکل ۵ نشان داده شده است. در سیکل های بالاتر زمانی که بارگذاری به حداکثر تنش کششی می رسد در نزدیکی دو سر نمونه، حالت گلویی شدن ایجاد می شود و در سیکل های بعدی با انباشت کرنش پلاستیک منجر به گسیختگی پوسته می گردد.



شکل۵: رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری تنش کنترلی با تنش میانگین غیر صفر

تحلیل عددی به کمک نرم افزار آباکوس

برای تحلیل عددی به روش المان محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این نرم افزار در تحلیل مدل های پوسته ای بسیار قوی می باشد و همچنین در کنار بسیاری از توانایی های خود قادر به آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای[۴] نیز می باشد. برای آنالیز این دسته از مسایل باید از مدل سخت شوندگی سینماتیکی[۵] استفاده کرد که دارای یک قسمت به نام سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک است که کامل ترین و دقیق ترین مدل برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای می باشد[۵]. این مدل که بر اساس روابط ارایه شده توسط Chaboche در سال ۱۹۹۰ تهیه شده، در برگیرنده حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار α به عنوان تنش زمینه[۶] در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار ε^{pl} به عنوان کرنش پلاستیک است[۶]. برای معرفی چنین مدلی، یک ترم غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به رابطه Ziegler اضافه می شود و معادله زیر نتیجه می شود[۷] که در آن C و γ ثابت های ماده بوده و c مدول سخت شوندگی سینماتیک می باشد. پارامتر σ^0 تنش تسلیم جاری و $\bar{\varepsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل می باشد:

$$\dot{\alpha} = C\frac{1}{\sigma^0}(\sigma_{ij}-\alpha_{ij})\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl} - \gamma\alpha\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl} + \frac{1}{c}\alpha_{ij}\dot{C} \qquad (۱)$$

علامت نقطه در بالای هر پارامتر به معنی نرخ پارامتر در نظر گرفته شده است، البته با استفاده از این مدل امکان آنالیز مسایل پلاستیسیته که در آنها تسلیم وابسته به نرخ کرنش است از کاربر گرفته می شود. به منظور معرفی این مدل به نرم افزار لازم است بخش ایزوتروپیک (رشد سطح تسلیم در فضای تنش) و بخش سینماتیک (حرکت سطح تسلیم در فضای تنش) به صورت جداگانه برای نرم افزار تعریف شود.

برای تعیین رشد سطح تسلیم از روش معرفی اندازه σ^0 به صورت تابعی نمایی برابر رابطه ی زیر استفاده شده است که در آن $\hat{\sigma}_0$ نشان دهنده تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است و Q_∞ و b نیز ثابت های ماده می باشند که در نرم افزار به ترتیب مقادیر ۲۰۵۰ و ۰.۴ قرار داده شده اند:

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_\infty(1+e^{-b\varepsilon^{pl}}) \qquad (۲)$$

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

*Cyclic Hardening, Parameters

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

برای تعیین حرکت سطح تسلیم در فضای تنش از آزمون کشش ساده استفاده شده است. داده های σ_i و ε_i^{pl} را از منحنی نیم سیکل کشش ساده به دست آورده و به کمک دستور زیر وارد نرم افزار کرده تا حرکت سطح تسلیم در فضای تنش نیز همزمان شبیه سازی گردد:

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

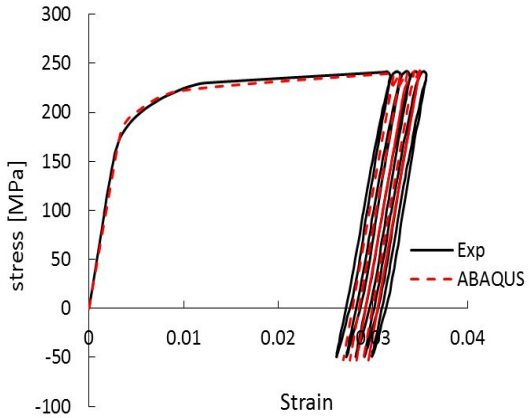
$\sigma_1, \varepsilon_1^{pl}$

$\sigma_2, \varepsilon_2^{pl}$

...

نتایج

در شکل۶ نتایج تجربی تنش- کرنش چند سیکل ابتدایی با نتایج عددی مقایسه شده است. مشاهده می شود که نتایج عددی به دست آمده انطباق خوبی با نتایج تجربی دارد و رفتار رچتینگ در شبیه سازی عددی به خوبی مشاهده می شود.



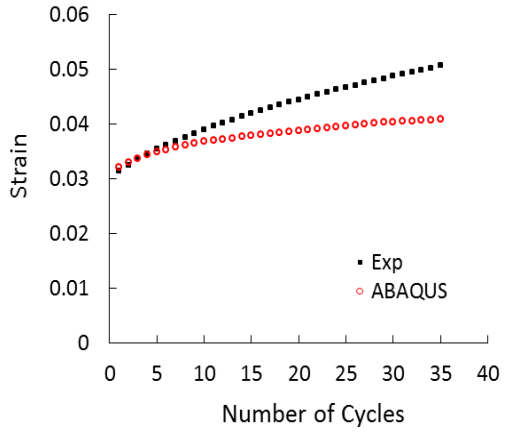
شکل۶: مقایسه نتایج تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای

هر چه مقدار تنش میانگین بیشتر باشد مقدار افزایش کرنش پلاستیک بیشتر شده و پوسته زودتر به گسیختگی می رسد. نرخ انباشت کرنش پلاستیک در نتایج عددی سریعتر از نتایج تجربی کاهش می یابد. در شکل ۷ مشاهده می شود که نرخ انباشت کرنش پلاستیک در نتایج عددی به سرعت کاهش می یابد. اگر مقدار تنش

---

[۴] Cyclic loading
[۵] Kinematic hardening
[۶] Back-stress

میانگین به صفر نزدیک شود انباشت کرنش پلاستیک بعد از چند سیکل به پایداری[۷] می رسد.



شکل۷: مقایسه مقادیر کرنش تجربی و عددی در حداکثر تنش موجود در هر سیکل

از مدل های سخت شوندگی موجود در نرم افزار آباکوس تنها مدلی که می تواند رفتار رچتینگ پوسته ها را شبیه سازی کند مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک می باشد که با سطح تسلیم وان- مایسز[۸] به کار برده می شود. دو مدل سخت شوندگی دیگر نیز در این نرم افزار به صورت جداگانه وجود دارد که هر دو با سطح تسلیم وان- مایسز به کار برده می شوند، هر دو مدل نمی توانند رفتار رچتینگ پوسته را شبیه سازی کنند و در نتیجه یک حلقه بسته بدون رچتینگ را شبیه سازی می کنند.

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

از مقایسه نتایج تجربی و عددی مشاهده می گردد که رفتار قسمت های بی باری نتایج تجربی با نتایج عددی انطباق قابل قبولی دارد و با در نظر گرفتن اینکه منحنی های قسمت بی باری رفتار کاملا غیر خطی دارند، روش عددی این رفتار را به خوبی شبیه سازی کرده است. به علت اینکه آزمایش انجام شده روی پوسته استوانه ای انجام گرفته است برای اینکه رفتار کمانشی در ناحیه فشاری رخ ندهد و تاثیری روی رفتار رچتینگ نداشته باشد دامنه تنش مقداری در نظر گرفته شده که به ناحیه کمانشی پوسته نزدیک نگردد لذا در شبیه سازی عددی مشاهده می گردد که منحنی های باربرداری و بارگذاری روی هم منطبق شده و در نهایت در تنش کششی حداکثر در هر سیکل افزایش کرنش پلاستیک را در پوسته مشاهده می کنیم.

جمع بندی

رفتار تنش- کرنش محوری تناوبی روی پوسته استوانه ای به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته است. پوسته استوانه ای تحت بارگذاری تنش کنترلی با تنش میانگین غیر صفر از خود رفتار رچتینگ نشان میدهد و انباشت کرنش پلاستیک در سیکل های متوالی تا گسیختگی پوسته ادامه می یابد. نرخ انباشت کرنش پلاستیک در سیکل های ابتدایی زیاد می باشد و در ادامه کاهش می یابد.

مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک موجود در نرم افزار آباکوس رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای را به خوبی شبیه سازی می کند و با نتایج تجربی انطباق خوبی دارد. انباشت کرنش پلاستیک شبیه سازی شده توسط این مدل کمتر از نتایج تجربی می باشد.

مراجع

[1] Samson Yoon, Seong-Gu Hong,Soon-Bok Lee, Bong-Soo Kim, 2003, Low cyclic fatiue testing of 429EM stainless steel pipe. *International journal of fatigue*, Volume 8, Issue 9-11, pages 1301-1307.

[2] Kao-Hua Chang, Wen-Fung Pan, 2009, Buckling life estimation of circular tubes under cyclic bending, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 46, Issue 2,Pages 254-270.

[3] Rong Jiao, Stelios Kyriakides, ,2009 ,Ratcheting, wrinkling and collapse of tubes under axial cycling, *International Journal of Solids and Structures*, *Volume 46, Issues 14-15*, *Pages 2856-2870*.

[4] Guo-Qin Sun, De-Guang Shang, 2010, Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis, *Materials & Design*, *Volume 31, Issue 1*, *Pages 126-133*.

[5] ABAQUS Theory manual, 2009, v6.9.1 section 4.3.5: models for metals subjected to cyclic loading.

[6] Chaboche JL, Lemaitre j. 1990, Mechanics of solid materials. Cambridge University Press.

[7] ABAQUS Analysis User's manual, 2009, v6.9.1 section 19.2.2: models for metals subjected to cyclic loading

[۷] Shakedown
[۸] Mises