

بررسی تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای فولادی SS316L یک سر گیردار تحت بارگذاری خمشی تناوبی

محمود شریعتی^۱، غلامرضا نوروزی^۲، کمال کلاسنگانی^۳

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مکانیک

چکیده

در این مقاله به بررسی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای فولادی یک سر گیردار تحت بارگذاری نیرو کنترلی خمشی تناوبی پرداخته شده است. تست تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام گردیده است که توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن را دارد. نمونه‌های مورد آزمایش، پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد SS316L می‌باشند. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس با استفاده از مدل سخت شونده‌گی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک انجام شده است. تحت بارگذاری نیرو-کنترل به علت وجود نیروی میانگین غیر صفر، کرنش پلاستیک در سیکل‌های متوالی در پوسته استوانه‌ای انباشته می‌گردد که همان رفتار رچتینگ در پوسته می‌باشد. کمترین جابجایی ابتدای پوسته در هر سیکل به عنوان جابجایی رچتینگ تعریف می‌شود. مدل سخت شونده‌گی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک نسبت به مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی تناوبی را بهتر شبیه سازی می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزایش سیکل‌ها جابجایی رچتینگ زیاد و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد. در تحلیل عددی نسبت به نتایج تجربی نرخ جابجایی رچتینگ سریعتر کاهش می‌یابد. سطح حلقه‌های هیستریزس نتایج تجربی، بزرگ‌تر از سطح حلقه‌های هیستریزس منحنی عددی است و شیب جابجایی رچتینگ در نتایج عددی به سرعت کاهش می‌یابد؛ اما جابجایی رچتینگ در نتایج تجربی در حال افزایش است. در سیکل‌های ابتدایی، نتایج عددی، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش-بینی می‌کند؛ اما در سیکل‌های بالاتر به سرعت پایدار شده و مقداری کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد. در بارگذاری خمشی سیکلی، شکست نمونه از انتهای آن و متصل به گیره ثابت اتفاق می‌افتد و مسیر ایجاد و رشد ترک به صورت محیطی می‌باشد.

واژه های کلیدی: پوسته استوانه‌ای یک سر گیردار- رچتینگ- بارگذاری خمشی تناوبی- مدل سخت‌شونده‌گی- تحلیل عددی و تجربی

مقدمه

پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد، کاربرد گسترده‌ای در صنایع دارند که این خواص ناشی از طبیعت هندسی و مادی پوسته است. کاربردهای پوسته‌ها در صنایع هوافضا مانند روکش بال و دم هواپیما، بدنه ی موشک‌ها، صنایع خودروسازی، شناورسازی، صنایع پتروشیمی مانند مخازن نفت و گاز، خطوط لوله، مخازن نگهداری مایعات و سیلوهای انبار دانه‌های نباتات و غلات، مخازن تحت فشار، سرپوش‌ها یا کله‌گی‌ها، سازه های دریایی بسیار فراوان می‌باشد. از مشکلات مهمی که باعث می‌شود بارگذاری تناوبی روی پوسته‌های استوانه‌ای به ندرت مورد مطالعه تجربی قرار گیرد، ساخت فیکسچرهای مخصوص به آنها می‌باشد و به علت مشکلات تست تجربی مانند هزینه زیاد، نبود دستگاه آزمایش، تحقیقات

اندکی روی آنها صورت گرفته است. در این زمینه ژو (Zhu) و همکاران به طور تجربی به مطالعه رفتار رچتینگ میله فولادی تحت بارگذاری خمشی تناوبی پرداخته و افزایش نرخ کرنش رچتینگ را با افزایش نیروی دامنه پیش بینی کرده اند [۱]. زکویا (Zakavia) نیز به بررسی رفتار رچتینگ لوله های فولادی ضدزنگ و لوله های فولادی کربنی پرداخته که نسبت ممان خمشی به ممان تسلیم را در دو نمونه مقایسه کرده است [۲]. از دیگر مطالعات بررسی رفتار کرنش رچتینگ شعاعی و محیطی لوله فولادی تحت بار خمشی تناوبی و فشار داخلی می‌باشد [۳]. لذا تحقیقات اندکی روی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی تناوبی صورت گرفته است و رفتار منحنی‌های هیستریزس این نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های نیرو کنترلی به ندرت یافت می‌شود.

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 استوانه‌ای

پوسته استوانه‌ای فولادی از جنس SS316L با ضخامت ۱mm، طول ۲۳۵mm و قطر خارجی ۳۴mm تحت بارگذاری خمشی تناوبی قرار گرفته است. خواص مکانیکی، طبق استاندارد ASTM-E8 [۴] به کمک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ بدست آمده است که توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن را دارد. فولاد مورد آزمایش SS316L با مدول الاستیسیته ۱۸۷.۷GPa و تنش تسلیم اولیه ۲۹۰MPa و تنش نهایی ۸۵۹.۶۱MPa می‌باشد. منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش استاندارد در شکل ۱ نشان داده شده است. برای محاسبه ی تنش و کرنش حقیقی با توجه به تنش و کرنش مهندسی حاصل از تست کشش استاندارد، از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\epsilon_{rel} = \ln(1 + \epsilon_{Eng}) \quad (1)$$

$$\sigma_{rel} = \sigma_{Eng} (1 + \epsilon_{Eng}) \quad (2)$$

که در روابط بالا، پارامترها σ_{Eng} ، ϵ_{Eng} ، σ_{rel} ، ϵ_{rel} به ترتیب کرنش حقیقی، تنش حقیقی، کرنش مهندسی و تنش مهندسی می‌باشند. ضریب پواسون نیز برابر ۰.۳۳ در نظر گرفته شده است.

تست تجربی

برای انجام این تست از دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ استفاده شده است. سمت چپ پوسته استوانه‌ای توسط فیکسچر به دستگاه محکم

دهنده تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است و Q_{∞} و b نیز ثابت های ماده می باشند.

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_{\infty}(1 + e^{-b\epsilon^{pl}}) \quad (4)$$

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*

$$\sigma_1, \epsilon_1^{pl}$$

$$\sigma_2, \epsilon_2^{pl}$$

...

در شبیه سازی عددی از المان عددی S8R5 استفاده شده است که یک المان پوسته ای ۸ گره ای می باشد که نوع آن غیر خطی و درجه آزادی آن ۵ می باشد. دو طرف پوسته استوانه ای با قید گره به دو صفحه صلب مقید شده است. هر صفحه صلب دارای یک نقطه مرجع می باشد. نقطه مرجع در یک صفحه صلب با شرایط مرزی از نوع جابجایی / چرخشی در تمامی جهات مقید گردیده 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 حول محور افقی عمود بر محور استوانه مقید شده است ($U1=UR2=UR3=0$). برای بارگذاری به پارامتر CF2 مقداری اختصاص داده ($CF1=CF3=0$) و از پارامتر دامنه استفاده شده است. در شکل ۵ نتایج تجربی نیرو- جابجایی ابتدای پوسته در چند سیکل ابتدایی با نتایج عددی مقایسه شده است و در تحلیل عددی مشابه تحلیل تجربی جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می یابد (شکل ۶).

بحث در نتایج

در آزمایش نتایج تجربی نیرو- جابجایی ابتدای پوسته تحت بارگذاری خمشی سیکلی، در چند سیکل ابتدایی برای بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن با نتایج حاصل از تحلیل عددی مقایسه شده است. سطح حلقه- های هیستریزس نتایج تجربی، بزرگ تر از سطح حلقه های هیستریزس منحنی عددی است و این به دلیل اتلاف انرژی در آزمایش تجربی است؛ اما به طور کلی رفتار رچتینگ در شبیه سازی عددی به خوبی مشاهده می شود

مشاهده می شود که پس از هر سیکل، تغییر شکل پلاستیک در پوسته استوانه ای انباشته می گردد و حلقه های ایجاد شده در سیکل های بالاتر به هم نزدیک می گردد؛ یعنی تغییر جابجایی رچتینگ در سیکل های بالاتر کاهش می یابد.

همچنین مشاهده می شود که شیب جابجایی رچتینگ در نتایج عددی به سرعت کاهش می یابد؛ اما جابجایی رچتینگ در نتایج تجربی در حال افزایش است. در سیکل های ابتدایی، نتایج عددی، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند؛ اما در سیکل های بالاتر به سرعت پایدار شده و مقداری کمتر از مقدار واقعی را نشان می دهد.

می شود و به سمت راست پوسته بارگذاری توسط فک متحرک پایین به پوسته اعمال می گردد. برای به دست آوردن رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای، بارگذاری به صورت نیرو کنترلی با نیروی متوسط ۰.۸kN و دامنه نیرو ۰.۸kN روی نمونه اعمال می گردد (شکل ۲). تحت بارگذاری نیرو-کنترل به علت وجود نیروی میانگین غیر صفر، کرنش پلاستیک در سیکل های متوالی در پوسته استوانه ای انباشته می گردد که همان رفتار رچتینگ در پوسته می باشد. کمترین جابجایی ابتدای پوسته در هر سیکل به عنوان جابجایی رچتینگ تعریف می شود [۱]. منحنی تنش خمشی انتهای پوسته بر حسب جابجایی ابتدای پوسته تحت این نوع بارگذاری در شکل ۳ نشان داده شده است که مشاهده می شود که با افزایش سیکل، حلقه ها حرکت کرده و به هم نزدیک می شوند که در نتیجه باعث افزایش جابجایی رچتینگ و کاهش نرخ جابجایی رچتینگ می شود. دستگاه اینسترون طوری تنظیم شده است که به فاصله ۵ سیکل، داده های یک سیکل را ذخیره می کند. در شکل ۴ دو نمونه پوسته استوانه ای تحت بارگذاری خمشی تناوبی نشان داده شده است که به موجب آن ترک در نمونه ایجاد شده و به صورت محیطی رشد می کند که منجر به شکست نمونه می شود.

تحلیل عددی

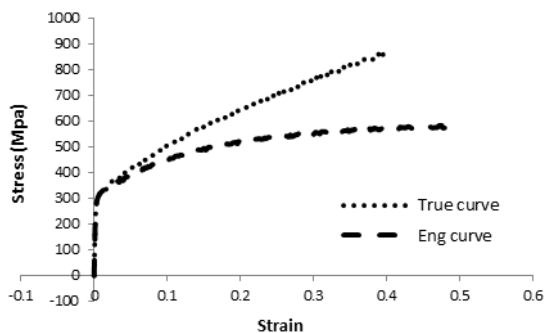
برای تحلیل عددی به روش المان محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این نرم افزار در تحلیل مدل های پوسته ای بسیار قوی می باشد. همچنین در کنار بسیاری از توانایی های خود قادر به آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای^۱ نیز می باشد. برای آنالیز از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک استفاده کرده ایم که کامل ترین و دقیق ترین مدل برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری تناوبی می باشد [۵]. این مدل که بر اساس روابط ارایه شده توسط چابوچه (Chaboche) در سال ۱۹۹۰ تهیه شده، در برگیرنده حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار α به عنوان تنش زمینه (Back-stress) 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 $\bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل می باشد:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\epsilon}^{pl} + \frac{1}{C} \alpha_{ij} \dot{C} \quad (3)$$

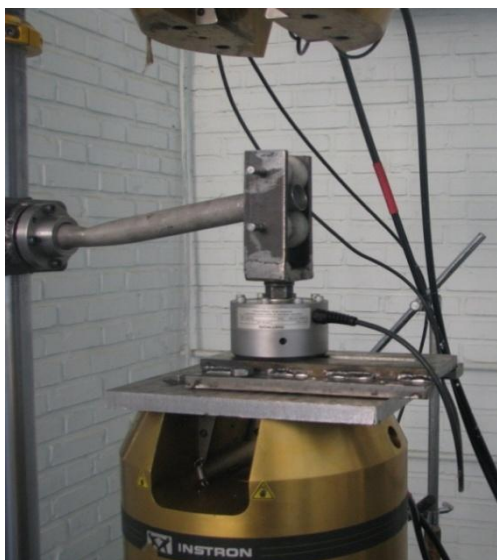
علامت نقطه در بالای هر پارامتر به معنی نرخ پارامتر در نظر گرفته شده است، البته با استفاده از این مدل امکان آنالیز مسایل پلاستیسیته که در آنها تسلیم وابسته به نرخ کرنش است از کاربر گرفته می شود. به منظور معرفی این مدل به نرم افزار لازم است بخش ایزوتروپیک (رشد سطح تسلیم در فضای تنش) و بخش سینماتیک (حرکت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

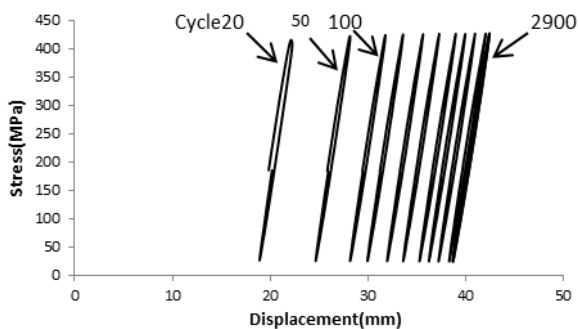
¹ Cyclic loading



شکل ۱- منحنی تنش - کرنش بدست آمده از تست کشش ساده



شکل ۲- پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو کنترل خمشی



شکل ۳- رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای تحت بارگذاری نیرو کنترلی با نیرو میانگین غیر صفر



شکل ۴- شکست تعدادی پوسته استوانه ای بعد از انجام آزمایش بارگذاری خمشی تناوبی

نرخ انباشت کرنش پلاستیک در نتایج عددی سریعتر از نتایج تجربی کاهش می یابد. اگر مقدار تنش میانگین به صفر نزدیک شود انباشت کرنش پلاستیک بعد از چند سیکل به پایداری^۲ می رسد.

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^۳ 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.

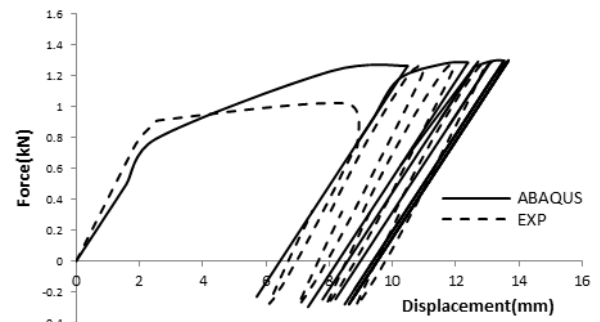
از مقایسه نتایج تجربی و عددی مشاهده می شود که چند سیکل ابتدایی به خوبی بر هم منطبق هستند و در ادامه چون تنش میانگین اعمالی بر روی پوسته مقداری انتخاب گردیده است تا پوسته تعداد سیکل بیشتری را تا گسیختگی طی نماید باعث گردیده رفتار رچتینگ در نتایج عددی سریعتر به حالت پایداری برسد و این اختلاف در تنش های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

جمع بندی

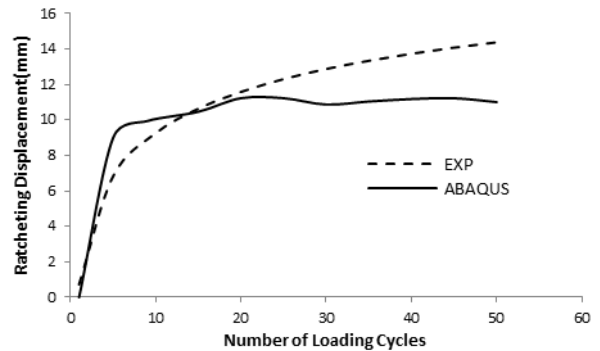
۱- نتایج تجربی و عددی نشان می دهد که با افزایش سیکل ها جابجایی رچتینگ زیاد و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می یابد. ۲- تحت بارگذاری نیرو- کنترل نامتقارن محوری در بارگذاری خمشی سیکلی انباشتگی جابجایی رچتینگ یا پدیده رچتینگ مشاهده می شود ۳- به دلیل اتلاف انرژی، سطح حلقه های هیستریزس نتایج تجربی بزرگ تر از سطح حلقه های هیستریزس منحنی عددی است. ۴- در مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک، جابجایی رچتینگ در حال افزایش است؛ اما شیب جابجایی رچتینگ کاهش می یابد و در سیکل های بالاتر به سرعت پایدار می شود. ۵- مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک موجود در نرم افزار آباکوس به خوبی رفتار رچتینگ پوسته را شبیه سازی می کند. ۶- نتایج عددی در سیکل های ابتدایی جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند. ۷- در شبیه سازی عددی نسبت به نتایج تجربی نرخ جابجایی رچتینگ سریعتر کاهش می یابد. ۸- در بارگذاری خمشی سیکلی، شکست نمونه از انتهای آن و متصل به گیره ثابت اتفاق می افتد و مسیر ایجاد و رشد ترک به صورت محیطی می باشد.

² Shakedown

³ Mises



شکل ۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه ای



شکل ۶- مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی

مراجع

1. Zhu J., Chen X., Xue F., Yu W., ending ratcheting tests of Z2CND18.12 stainless steel, *International Journal of Fatigue*, v. 35, 2012, pp. 16-22.
2. Zakavia S.J., Zehsaza M., Eslamib M.R., The ratchetting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model, *Nuclear Engineering and Design*, v. 240, 2010, pp.726-737.
3. Syed M.R., Tasnim H., Edmundo C., Evaluation of cyclic plasticity models in ratchetting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure, *International Journal of Plasticity*, v. 24, 2008, pp. 1756-1791.
4. ASTM A370-05, *Standard test method and definitions for mechanical testing of steel products*.
5. ABAQUS Theory manual, 2009, v6.9.1, section 4.3.5: models for metals subjected to cyclic loading.
6. Chaboche J.L., Lemaitre j., *Mechanics of solid materials*, Cambridge University Press, 1990.