

بررسی تجربی و عددی رفتار پوسته های استوانه ای دارای گشودگی تحت بارگذاری کرنش کنترلی محوری تناوبی

حسین حاتمی^۱، محمود شریعتی^۲، محمد دامغانی نوری^۳، حسین رحمانی^۴
^۱دانشگاه سمنان، دانشکده مکانیک، h64hatami@gmail.com
^۲دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مکانیک، mshariati44@gmail.com
^۳دانشگاه سمنان، دانشکده مکانیک، damghani63@gmail.com
^۴دانشگاه سمنان، دانشکده مکانیک، hrme80@gmail.com

چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی و عددی رفتار پوسته های استوانه ای ضد زنگ دارای گشودگی تحت بارگذاری کرنش کنترلی متقارن محوری پرداخته شده است. نتایج تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ بدست آمده است. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل پیشرفته غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک انجام گردیده است. تاثیر وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی روی پوسته های استوانه ای توسط نرم افزار شبیه سازی گردیده و سپس با نتایج تجربی مقایسه شده است. مشاهده می گردد که مدل سخت شوندهگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای را به خوبی شبیه سازی می کند. کرنش پلاستیک باقیمانده در منحنی های هیستریزس بدست آمده از نتایج عددی همواره بیشتر از نتایج تجربی می باشد. همچنین مشاهده گردید که وجود عیوبی مانند گشودگی، تاثیری در رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای شبیه سازی شده با استفاده مدل سخت شوندهگی غیر خطی ایزوتروپیک/ سینماتیک ندارد.

واژه های کلیدی

پوسته استوانه ای- بارگذاری محوری تناوبی- مدل سخت شوندهگی- منحنی هیستریزس- گشودگی

مقدمه

امروزه پوسته ها و ورقها بخش اعظمی از سازه های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده اند. پوسته ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد کاربرد وسیعی در صنایع دارند. از کاربردهای پوسته ها می توان در سازه های هوایی به بدنه هواپیماها، روکش بال و دم هواپیما، بدنه موشک و در صنایع دیگر نظیر خودرو سازی، شناور سازی، مخازن نفت و گاز، خطوط لوله، و غیره اشاره کرد [۱]. این سازه ها در طول عمر خود ممکن است تحت بارهای محوری تناوبی قرار بگیرند. به علاوه، این اجزا اغلب در بعضی قسمت ها ناپیوستگی هایی مانند گشودگی دارند که این ناپیوستگی ها می توانند در پایداری سازه ها تأثیرگذار باشند.

روی نمونه های استاندارد از جنس فولادهای ضد زنگ مانند SS304، SS304L، SS316 و SS316L مطالعات خستگی بسیاری انجام شده است. زیرا این نمونه ها تحت بارگذاری های سیکلی مقاومت بالایی دارند [۲-۳]. آوازینی به مطالعه خصوصیات مکانیکی

و مدل سازی اجزای محدود رفتار تنش-کرنش سیکلی پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق سنگین پرداخت. در این مقاله با استفاده از آزمایش های کرنش-کنترل کاملاً متقارن، ثابت های ماده توسط نرم افزار آباکوس استخراج شد [۴]. در سال ۲۰۱۱ شریعتی و همکارانش روی نمونه های استاندارد پلی استال، بارگذاری های محوری تناوبی انجام داده و تاثیر دامنه نیرو و نیروی متوسط را روی رفتار چرتینگ نمونه ها مورد بررسی قرار دادند. [۵]. ایشان در مقاله ای دیگر نتایج عددی و تجربی بدست آمده روی همین نمونه های پلیمری را مورد مقایسه قرار داده اند [۶]. به علت مشکلات تست تجربی موجود در بارگذاری محوری تناوبی روی پوسته های استوانه ای، تحقیقات اندکی روی آنها صورت گرفته است. یکی از این مطالعات در مقاله یوون می باشد که دامنه کرنش کمانشی پوسته ها تحت بارگذاری محوری تناوبی را کمتر از بارگذاری فشاری یکنواخت پیش بینی کرده است [۷]. مطالعات تجربی روی پوسته های استوانه ای بیشتر با بارگذاری های خمشی تناوبی انجام گرفته است 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 [۸-۹].

در این تحقیق به بررسی و مقایسه بین منحنی های هیستریزس نتایج عددی و تجربی روی پوسته های استوانه ای دارای گشودگی تحت بارگذاری کرنش کنترلی متقارن محوری پرداخته شده است و تاثیر وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی روی پوسته های استوانه ای تحت این نوع بارگذاری بررسی گردیده است.

دستگاه آزمایش

آزمایش های انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. برای بدست آوردن خواص مکانیکی، تست های کشش ساده روی نمونه های استاندارد توسط همین دستگاه و با استفاده از ابزار طول سنج انجام شده است (شکل ۱).

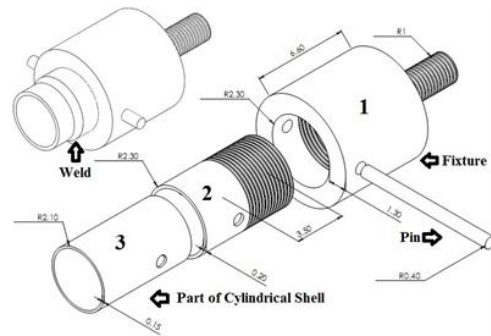
شرایط مرزی

برای بارگذاری محوری تناوبی روی پوسته های استوانه ای نیاز به فیکسچری است که بتواند بار کشش و فشار را بدون هیچ لغزشی روی پوسته اعمال کند. به علت اینکه پوسته ها از ضخامت کمی برخوردار هستند، رزوه کردن آنها امکان پذیر نمی باشد. لذا از سر دنده هایی برای تقویت دو سر پوسته ها استفاده شده است (شکل ۲) و

هر کدام از آنها از دو طرف به پوسته استوانه ای جوش داده شده اند تا در هنگام بارگذاری، پوسته از سردنده ها جدا نگردد [۱۰].



شکل ۱: دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲.



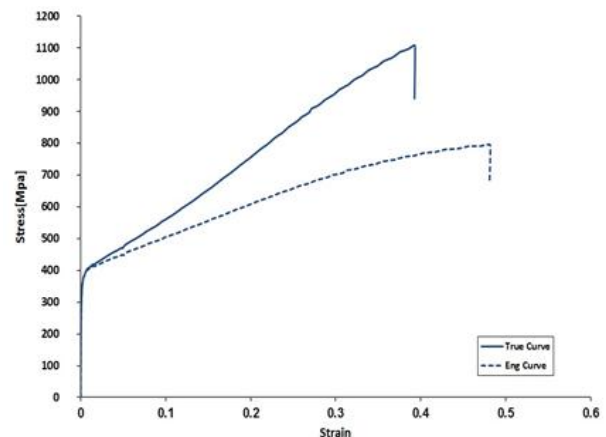
شکل ۲: شماتیکی از اتصال پوسته استوانه ای به فیکسچر با استفاده از جوش، رزوه و پین

هندسه و خواص مکانیکی

نمونه های مورد آزمایش پوسته های استوانه ای از جنس فولاد آلیاژی SS304L با ابعاد هندسی نشان داده شده در جدول ۱ می باشند. خواص مکانیکی ماده مورد آزمایش مطابق استاندارد ASTM E8 تعیین شده است [۱۱] و منحنی تنش- کرنش مربوطه در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS304L.

D(mm)	t(mm)	L(mm)	E(GPa)	σ_y (MPa)	S_u (MPa)	ν
۴۲	۱.۵	۲۵۰	۲۰۱	۳۳۱	۸۱۵	۰.۳۳

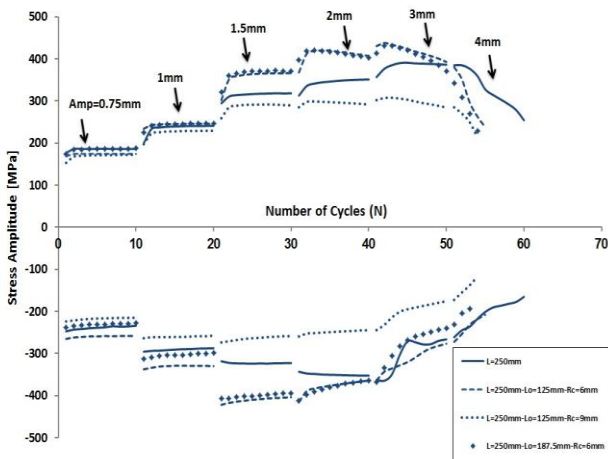


شکل ۳: منحنی تنش-کرنش تست کشش ساده برای نمونه SS304L.

نتایج تجربی روی پوسته استوانه ای SS304L

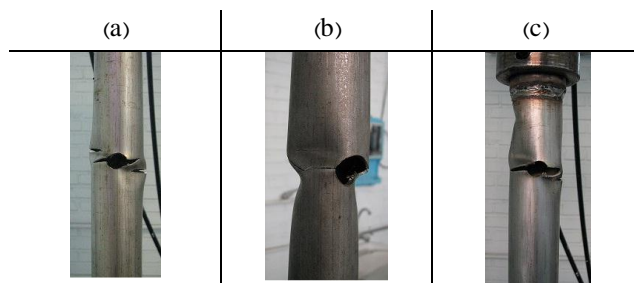
آزمایش های کرنش-کنترل با افزایش دامنه جابجایی از ۰.۷۵mm تا ۴mm روی پوسته های استوانه ای و با نرخ بارگذاری ۰.۱ mm/s انجام شده است. روی نمونه ها، گشودگی های دایروی شکل با شعاع ۶mm در $\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$ طول نمونه و گشودگی با شعاع ۹mm در $\frac{1}{2}$ طول نمونه ایجاد شده است تا تاثیر وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی روی پوسته استوانه ای با یک پوسته استوانه ای بدون گشودگی مقایسه گردد.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می گردد، پیک های تنش در ناحیه کششی و فشاری منحنی های هیستریزس برای چهار آزمایش مختلف بدست آمده است. پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، در دامنه جابجایی های پایین، دارای تحمل بار بیشتری از نمونه بدون گشودگی تحت بارگذاری تناوبی می باشد که این پدیده به علت ایجاد چین خوردگی هایی می باشد که در کناره های گشودگی ایجاد می گردد و تحمل بار را در هر دو ناحیه در ادامه بارگذاری افزایش می دهد. اما مشاهده می شود که در دامنه جابجایی های بالاتر به علت ترک های ایجاد شده در کناره های گشودگی تحمل بار در مقایسه با نمونه بدون گشودگی به شدت کاهش می یابد (شکل ۵). همچنین تحمل بار کششی و فشاری برای نمونه دارای گشودگی با شعاع گشودگی ۹mm نسبت به دو نمونه فوق الذکر، کمتر می باشد و مشاهده می شود که با وجود چین خوردگی های ایجاد شده در کناره های گشودگی در این نمونه، باعث افزایش تحمل بار در مقایسه با نمونه بدون گشودگی نمی باشد که این به دلیل افزایش شعاع گشودگی می باشد. در نهایت رفتار نمونه ای که گشودگی با شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول آن ایجاد گردیده، رفتار مشابهی در ناحیه کشش و فشار، نسبت به همان نمونه با همان شعاع گشودگی ولی در وسط طول نمونه دارد. هر چهار نمونه در دامنه جابجایی ۳mm در ناحیه فشاری، ناگهان تحمل بار فشاری آنها کاهش یافته و رفتار نرم شوندگی آنها افزایش می یابد. همچنین هر چهار نمونه در دامنه جابجایی ۴mm به فروپاشی می رسند.

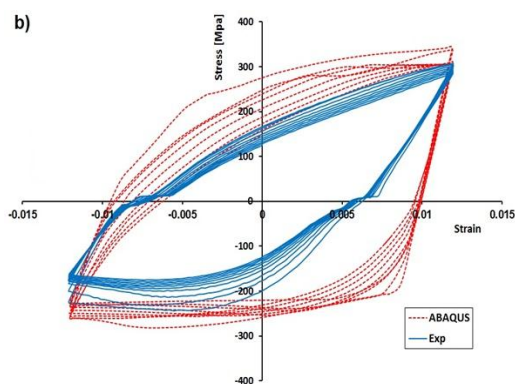
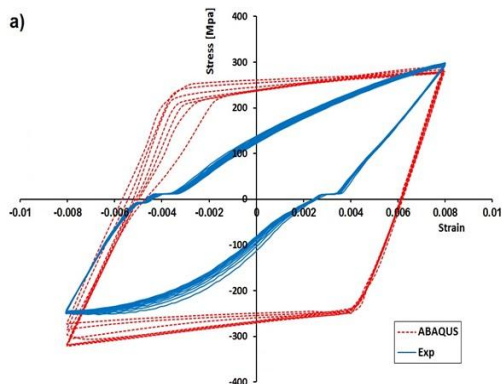


شکل ۴: نتایج تجربی تاثیر وجود گشودگی، شعاع و مکان گشودگی در پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری کرنش-کنترل.

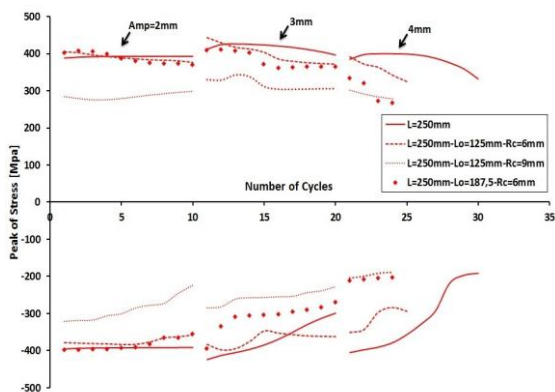
تسریع رفتار نرم شوندگی در مقایسه با نمونه بدون گشودگی نمی شود. همچنین در نتایج تجربی به دلیل ایجاد چین خوردگی در مجاورت گشودگی به شعاع ۶mm، تحمل بار در مقایسه با نمونه بدون گشودگی بیشتر می شود (شکل ۴). اما در نتایج عددی چین خوردگی های ایجاد شده تاثیری روی افزایش تحمل بار ندارد. به طور کلی با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک، وجود عیوبی مانند گشودگی تاثیری روی رفتار نرم شوندگی منحنی های هیستریزس ندارد.



شکل ۵: فروپاشی تحت بارگذاری کرنش-کنترل پوسته استوانه ای به شعاع گشودگی (a) در ۶mm در وسط طول نمونه، (b) در ۹mm در وسط طول نمونه و (c) در ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه



شکل ۶: مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه تحت بارگذاری کرنش-کنترل با دامنه (a) ۳mm (b) ۲mm



شکل ۷: پیک های تنش منحنی های هیستریزس نتایج عددی پوسته های استوانه ای تحت بارگذاری کرنش-کنترل در شکل ۸ مدل های شبیه سازی عددی با نتایج تجربی مقایسه شده اند که به ترتیب عبارت است از: نمونه قبل از بارگذاری، تحت

آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای توسط نرم افزار آباکوس

برای تحلیل عددی به روش المان محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. برای آنالیز این دسته از مسایل باید از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک استفاده کرد که کامل ترین و دقیق ترین مدل برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای می باشد. این مدل که بر اساس روابط ارایه شده توسط چاپووش که در سال ۱۹۹۰ تهیه شده است [۱۲]، با اضافه کردن یک ترم غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم بدست می آید 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 [۱۳]:

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

برای تعیین رشد سطح تسلیم از رابطه ی زیر استفاده شده است:

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_\infty (1 + e^{-b\bar{\epsilon}^{pl}}) \quad (2)$$

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 و به کمک دستور زیر وارد نرم افزار می کنیم:

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

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

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

...

مقایسه نتایج عددی و تجربی پوسته استوانه ای SS304L

به عنوان نمونه، در شکل ۶ نتایج عددی منحنی های هیستریزس پوسته استوانه ای با گشودگی به شعاع ۹mm در وسط طول نمونه، تحت دامنه جابجایی های ۲ و ۳mm با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. کرنش پلاستیک باقیمانده در هر دو ناحیه کششی و فشاری نتایج عددی بیشتر از نتایج تجربی می باشد.

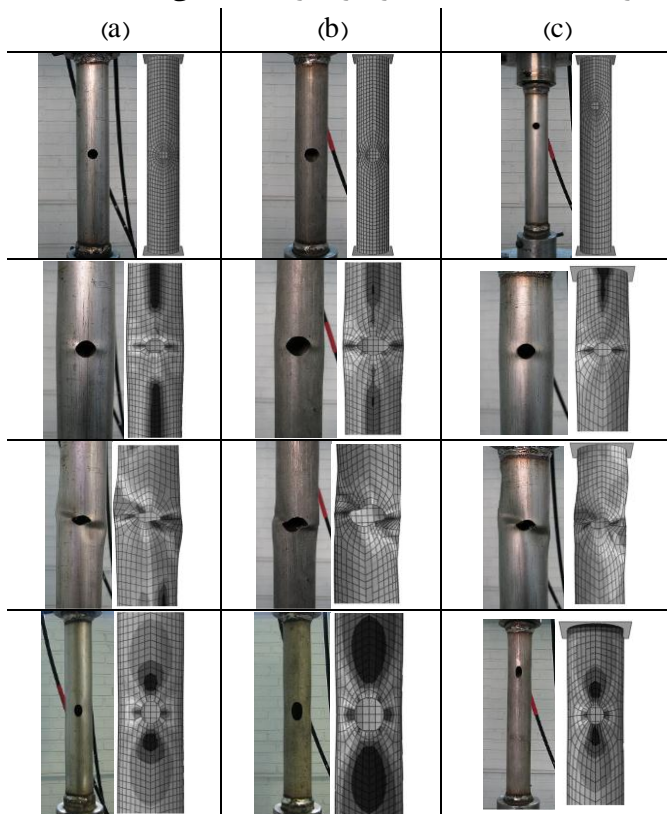
در شکل ۷ پیک های تنش منحنی های هیستریزس شبیه سازی شده توسط نرم افزار برای سه دامنه جابجایی نشان داده شده است. همانطور که از نتایج عددی مشاهده می شود، وجود گشودگی باعث

شوندگی نمی شود. همچنین ایجاد چین خوردگی ها در مجاورت گشودگی باعث افزایش تحمل بار در مقایسه با نمونه های بدون گشودگی نمی شود. لذا وجود عیوبی مانند گشودگی تاثیری در رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای شبیه سازی شده با استفاده از مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/اسینماتیک ندارد.

مراجع

- [1] Farshad, M. 1992, "Design and analysis of shell structures", Dordrecht: Kluwer.
- [2] Kang, G. et al, 2006, "Experimental study on ratchetting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing", Materials Science and Engineering A, vol. 435–436, pp. 396–404.
- [3] Colin, J. and Fatemi, A., 2009, "Variable amplitude cyclic deformation and fatigue behaviour of stainless steel 304L including step, periodic, and random loadings" Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, vol. 33, pp. 205-220.
- [4] Avanzini, A. 2008, "Mechanical characterization and finite element modeling of cyclic stress-strain behaviour of ultra high molecular weight polyethylene", Materials and Design, vol. 29, pp. 330–343.
- [5] Shariati, M., Hatami, H., Yarahmadi, H. and Eipakchi, H.R., 2011, "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading". Materials & Design, vol. 34, pp. 302-312.
- [6] Shariati, M., Hatami, H., Eipakchi, H.R., Yarahmadi, H. and Torabi, H., 2011, "Experimental and Numerical Investigations on Softening Behavior of POM Under Cyclic Strain-Controlled Loading". Polymer-Plastics Technology and Engineering, vol. 50, pp. 1576-1582.
- [7] Yoon, S., Hong, S.G., Lee, S.B. and Kim, B.S., (2003), "Low cyclic fatigue testing of 429EM stainless steel pipe", International journal of fatigue, vol. 8, no. 9-11, pp. 1301-1307.
- [8] Chang, K.H. and Pan, W.F., 2009, "Buckling life estimation of circular tubes under cyclic bending", International Journal of Solids and Structures, vol. 46, no. 2, pp. 254-270.
- [9] Zakavi, S.J., Zehsaz, M., and Eslami, M.R., 2010, "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.
- [10] Nip, K.H., Gardner, L. and Elghazouli, A.Y., 2010, "Cyclic testing and numerical modelling of carbon steel and stainless steel tubular bracing members", Engineering Structures, vol. 32, pp. 424_441.
- [11] ASTM A370-05, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.
- [12] Chaboche, J.L. and Lemaitre, j., 1990, "Mechanics of solid materials", Cambridge University Press.
- [13] ABAQUS Analysis User's manual, 2009, v6.9.1, section 19.2.2: models for metals subjected to cyclic loading.

بارگذاری در ناحیه فشاری با دامنه ۲mm، تحت بارگذاری در ناحیه فشاری با دامنه ۳mm، تحت بارگذاری در ناحیه کششی.



شکل ۸: مقایسه رفتار تجربی و عددی پوسته های استوانه ای در مجاورت گشودگی تحت بارگذاری کرنش-کنترل، دارای گشودگی با شعاع (a) ۶mm در وسط طول نمونه، (b) ۹mm در وسط طول نمونه، (c) ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه.

نتایج

با توجه به نتایج عددی بدست آمده توسط آباکوس و مقایسه با آزمایش های تجربی انجام شده می توان نتایج زیر را استخراج نمود:

- ۱- تحت بارگذاری کرنش-کنترل، به علت ایجاد چین خوردگی ها در مجاورت گشودگی در نمونه های SS304L با گشودگی به شعاع ۶mm در وسط طول نمونه، تحمل بار فشاری و کششی این نمونه بیشتر از نمونه بدون گشودگی می باشد. ولی با رشد ترک در مجاورت گشودگی، تحمل بار از نمونه بدون گشودگی کمتر می شود. نمونه با گشودگی به شعاع ۶mm در نیمه بالایی طول نمونه نیز دارای رفتاری مشابه می باشد. تحمل بار نمونه با گشودگی به شعاع ۹mm از تمامی نمونه ها کمتر می باشد.
- ۲- مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/اسینماتیک رفتار منحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای را به خوبی شبیه سازی می کند.
- ۳- کماتش موضعی ایجاد شده در ناحیه فشاری باعث تسریع رفتار نرم شوندگی می شود.
- ۴- کرنش پلاستیک باقیمانده در منحنی های هیستریزس بدست آمده از نتایج عددی همواره بیشتر از نتایج تجربی می باشد.
- ۵- نتایج عددی بدست آمده برای پوسته های استوانه ای همراه با گشودگی نشان داد که وجود گشودگی باعث افزایش سرعت نرم