

ارائه مدل رفتاری فولاد DIN 1.6959 و تعیین تنشها در لوله های جدار ضخیم اتوفرتاژ شده

غلامحسین فرهی (استاد)

عنایت اله حسینیان (دانشجوی دکتری)

احمد عاصم پور (دانشیار)

چکیده

فولادهای پر استحکامی نظیر DIN 1.6959 که در ساخت لوله های جدار ضخیم بکار می روند با وجود آنکه در بارگذاری رفتاری شبیه به رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک دارند ولی در باربرداری رفتار آنها کاملاً غیر خطی می باشد و استفاده از مدل های ساده ای نظیر سخت شوندگی همسانگرد و سینماتیک بجای مدل های دقیق تر با خطای زیادی همراه است. در این تحقیق، پروسه اتوفرتاژ با استفاده از مدل واقعی رفتار فولاد DIN 1.6959 برای شرایط مختلف انتهایی با استفاده از روش خواص متغیر مادی (VMP) بررسی شده است. نتایج نشان دهنده آنستکه اگر در تحلیل اتوفرتاژ از مدل ایده آل به جای رفتار واقعی آن استفاده شود تنش های پسماند مماسی که در افزایش عمر خستگی بسیار مهم میباشند بیش از اندازه واقعی آن تخمین زده میشود. بگونه ای که این اضافه تخمین برای درصدهای بالای اتوفرتاژ بیش از سی درصد می باشد همچنین شرایط مرزی مختلف نیز با هم مقایسه شده اند.

کلمات کلیدی: اتوفرتاژ، لوله های جدار ضخیم، تنشهای پسماند، روش VMP، فولاد DIN 1.6959

مقدمه

اتوفرتاژ هیدرولیکی پروسه ای است که با اعمال فشار داخلی بسیار زیاد در لوله های جدار ضخیم و باربرداری می توان تنش های پسماند مفیدی را در جداره لوله ایجاد کرد. این تنشهای پسماند مفید باعث افزایش ظرفیت فشار پذیری و عمر خستگی در این لوله ها می شوند. برای ساخت لوله های جدار ضخیم معمولاً از فولادهای پر استحکام استفاده می شود. این فولادهای پر استحکام هر چند در بارگذاری رفتاری تقریباً الاستیک-کاملاً پلاستیک دارند ولی در باربرداری رفتاری کاملاً غیر خطی و پیچیده دارند که این رفتار تابعی از کرنش پلاستیک در بارگذاری اولیه است. همچنین اثر باشینگر [1] در این مواد بروشنی ظاهر میشود به گونه ای که تنش تسلیم فشاری پس از بارگذاری اولیه بمیزان زیادی نسبت به تنش تسلیم کششی اولیه کاهش می یابد که کاهش آن نیز تابع کرنش پلاستیک اولیه است. بسیاری از محققان در سالهای اخیر سعی در مدلسازی دقیق رفتار این مواد در حالت بارگذاری و باربرداری دارند.

در تحلیل لوله های جدار ضخیم مدل های مختلفی از رفتار ماده بکاربرده شده است. Manning [2] در بارگذاری و باربرداری از مدل واقعی استفاده کرد Franklin و Morrison [3] در بارگذاری و باربرداری از رفتار واقعی ماده در آزمایش پیچش استفاده کردند. Chen [4] از رفتار سخت-شونده خطی استفاده کرد. Rees [5] در بارگذاری مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک و در باربرداری مدل سخت شونده همسانگرد و سینماتیک را بکار برد. Meghahed و Abbas [6] در بارگذاری از رفتار سخت شونده توانی و در باربرداری از مدل های سخت شونده توانی، همسانگرد و سینماتیک استفاده کردند. Kendal [7] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی Milligan و همکاران [8] مدل جدیدی را ارائه نمود که این مدل توسط Parker و همکاران [9,10] در تحلیل اتوفرتاژ بکار رفت. Parker و همکاران [11] نیز مدل واقعی دیگری را که بر اساس نتایج منتشر شده در مقاله [12] می باشد منتشر کردند. Jahed و همکاران [13] رفتار واقعی فولاد 4340 در آزمایش پیچش را برای تحلیل اتوفرتاژ بکار بردند. در این مقاله نتایج بدست آمده از آزمایشات کشش و فشار که بر روی نمونه های فولادی DIN 1.6959 انجام شده است مورد بررسی قرار گرفته است. آنگاه از بین مدل های مختلف ارائه شده برای توصیف فولادهای پر استحکام، مدل Kendal [7] برای توصیف رفتار فولاد DIN 1.6959 انتخاب شده است. آنگاه بر اساس این مدل، تنش های پسماند در سه حالت مختلف انتهایی (کرنش صفحه ای، انتها بازوانتها بسته) تحلیل شده است. برای حل مسئله روش VMP که توسط Jahed و Dubey [14] ارائه شده، بکار رفته است. اثبات شده است [8, 9, 14] که نتایج این روش تطابق خوبی با نتایج حل تحلیلی و اجزاء محدود دارد.

رفتار فولادهای پر استحکام

فولادهای بکار رفته در ساخت لوله های جدار ضخیم اتوفرتاژ شده معمولاً از نوع فولادهای موسوم به 4340 و یا معادلهای اصلاح شده آن نظیر A723 و DIN 1.6959 می باشند. رفتار این فولادها معمولاً با آزمایش کشش-فشار تعیین می شود. این فولادها با وجود آنکه در بارگذاری رفتاری تقریباً الاستیک-کاملاً پلاستیک دارند ولی در باربرداری رفتار آنها کاملاً غیر خطی و پیچیده می باشد، که این پیچیدگی رفتار بیشتر ناشی از تاثیر پدیده ای موسوم به اثر باشینگر [1] است. تاثیر این پدیده در مورد فولادهای پر استحکام بسیار زیاد می باشد بگونه ای که نسبت تنش تسلیم فشاری به تنش تسلیم کششی برای کرنشهای پلاستیک اولیه دو صدم، به حدود ۰/۲ کاهش می یابد. همچنین در این مواد مدول یانگ در هنگام باربرداری نسبت به بارگذاری نیز کاهش می یابد. المانهای مختلف رفتار این مواد و نیز مدل های رفتاری ارائه شده برای آنها در قسمتهای بعدی مورد بررسی قرار می گیرد.

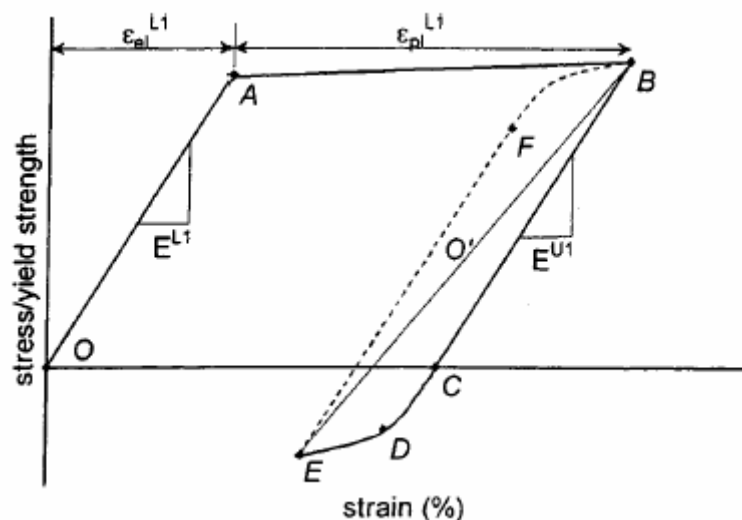
مولفه های مختلف آزمایش تک محوره کشش-فشار [11,12]

با مراجعه به شکل (۱) می توان مولفه های مختلف کشش-فشار را چنین توصیف کرد.

L1: بارگذاری کششی اولیه (O-A)، که در طی آن فولاد تا نقطه تسلیم σ_Y (متناظر با کرنش الاستیک ϵ_{el}^{L1}) رفتاری الاستیک دارد (این نقطه توسط روش offset تعیین می شود). مدول الاستیک در این محدوده برابر E^{L1} است. در مسیر (A-B) رفتار ماده پلاستیک است که همراه با مقدار کمی کرنش-سختی خطی در محدوده پلاستیک ϵ_{pl}^{L1} است که در انتهای مسیر به تنش کششی حداکثر σ_{Y*} منتهی میشود.

U1: بارگذاری معکوس (B-C-D-E)، که در طی آن تنش های کششی تا نقطه C کاهش یافته و پس از آن تا نقطه E فشاری میباشد. نقطه D، نقطه تسلیم در فشار است و در محدوده (B-D) رفتار ماده الاستیک با مدول یانگ E^{U1} و کرنش ϵ_{el}^{U1} می باشد. پس از نقطه D رفتار ماده غیر خطی میشود که به شکل مجانب گونه ای به تنش $(-\sigma_{Y*})$ میل می کند.

مقدار تنش در نقطه D برابر $(-\beta\sigma_y)$ است که β ضریب باشینگر گفته میشود (نسبت تنش تسلیم فشاری به تنش تسلیم کششی، پس از کشش اولیه) که هم اثر باشینگر و هم منحنی (D-E) بشدت تابع کرنش پلاستیک اولیه ϵ_{pl}^{L1} می باشند.

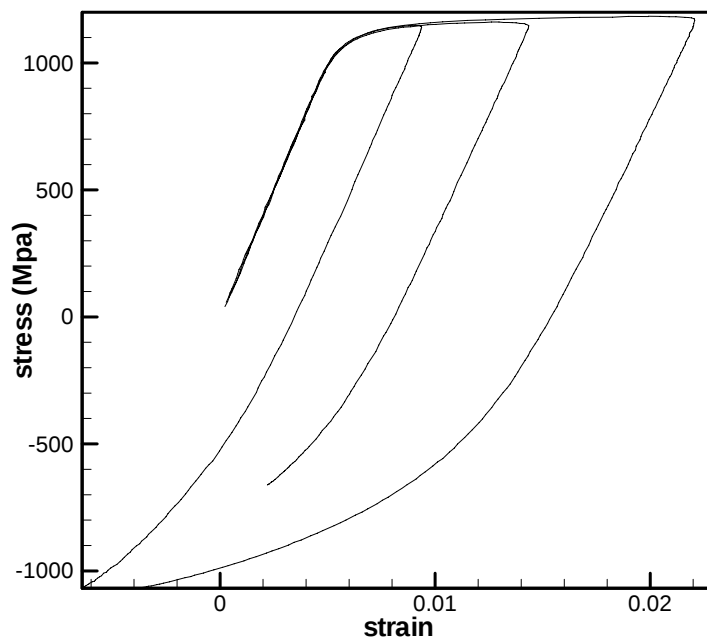


شکل (۱)- نمونه ای از آزمایش کشش-فشار فولادهای پراستحکام شامل کرنش سختی، مدول یانگ کاهش یافته در فشار و اثر باشینگر (سیکل اول) [11]

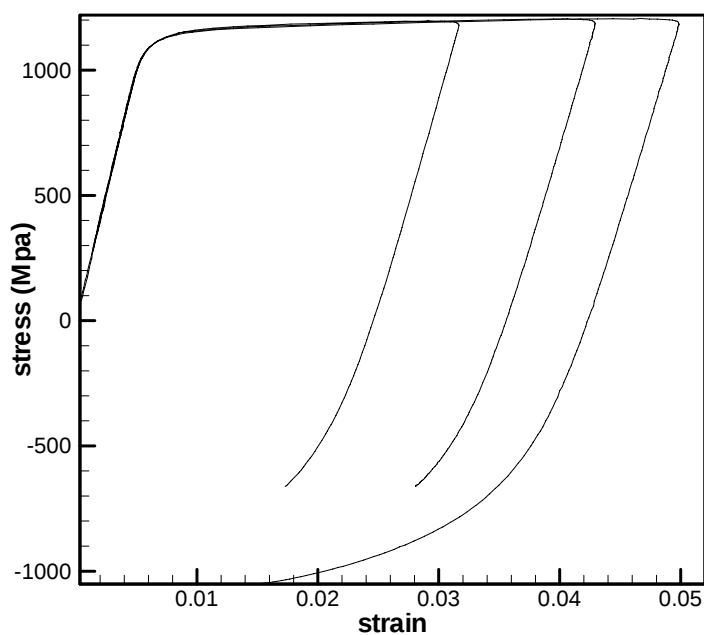
L2: بارگذاری مجدد (E-F-B)، که پس از باربرداری، ماده تحت بارگذاری کششی قرار میگیرد و طی آن مسیری طی میشود که تقریباً انتقال (homothetic) مسیر (B-C-D-E) میباشد که مرکز آن در O' ، نقطه میانی خط (E-B) و (F-D) می باشد. مقدار تنش در این نقطه گاهی 'back stress' خوانده می شود. وقتی لوله تحت پروسه اتوفرتاژ قرار می گیرد بهنگام فشارگذاری مسیر (O-A-B) و بهنگام فشاربرداری مسیر (B-C-D-E) را طی می کند بنابراین با توجه به اینکه هر عنصر مادی نسبت به موقعیت شعاعی خود کرنش پلاستیک اولیه متفاوتی دارد در نتیجه خانوادهایی از سیکلهای (O-A-B-C-D-E) طی خواهد شد. در این مقاله هدف اصلی ما مطالعه مدل های ارائه شده در مسیر L1 و U1 که مسیر بارگذاری و باربرداری در اتوفرتاژ است خواهد بود.

بررسی رفتار فولاد DIN1.6959

برای بررسی رفتار این فولاد نمونه های تست کشش-فشار بر اساس استاندارد ASTM E8 انتخاب و ساخته شد و مطابق روش ارائه شده در مقاله [12] آزمایش کشش-فشار انجام شد. قطر نمونه ۶ میلیمتر و طول سنجه آن ۳۰ میلیمتر انتخاب شد. شکل (۲) و (۳) نتایج آزمایش را برای چند درصد کرنش مختلف نشان می دهد. همچنانکه از شکلها مشخص است رفتار این ماده در بارگذاری رفتاری تقریباً الاستیک-کاملاً پلاستیک می باشد. ولی در باربرداری مدول الاستیک کاهش یافته، اثر باشینگر و رفتار غیر خطی پس از تسلیم مجدد بوضوح معلوم است. دقت شود که پس از تسلیم اولیه در حالت کشش، تنش تسلیم فشاری بخصوص برای نمونه هایی که کرنش های پلاستیک اولیه آنها زیاد بوده است بسیار کاهش یافته است



شکل (۲) - نتایج آزمایشات کشش-فشار برای فولاد DIN 1.6959
(کرنشهای کلی ۰/۰۱ ، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۲۲)



شکل (۳) - نتایج آزمایشات کشش-فشار برای فولاد DIN 1.6959
(کرنشهای کلی ۰/۰۳ ، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۵)

مدلهای رفتاری ارائه شده برای فولادهای پر استحکام

مدل های بسیاری برای رفتار فولادهای پر استحکام ارائه شده است. از بین مدل های ارائه شده دو مدل که بیشتر مورد توجه قرار گرفته است بررسی می نمایم.

۱- مدل رفتاری ارائه شده توسط Kendall [7]

Kendall [7] با استفاده از اطلاعات ارائه شده توسط Milligan [8] توانست پروفیل بارگذاری و باربرداری کاملی را بعنوان تابعی از درصد کرنش پلاستیک بارگذاری برای فولاد 4330 معرفی و بر داده ها منطبق نماید. مدل ریاضی ارائه شده توسط او بشکل زیر

$$\begin{aligned} \sigma_c^{U1} / \sigma_Y = & 0.064113 + 0.34816 \exp(-12.871 \varepsilon_{pl}^{L1}) \\ & + [1.1619 + 0.5975 \exp(-2.175 \varepsilon_{pl}^{L1})] \varepsilon_c^{U1} \\ & - [0.54959 + 0.74913 \exp(-9.637 \varepsilon_{pl}^{L1})] (\varepsilon_c^{U1})^2 \end{aligned} \quad (1)$$

که σ_c^{U1} و ε_c^{U1} ، تنش و کرنش فشاری در طی بارگذاری معکوس می باشند.

۲- مدل رفتاری ارائه شده توسط Parker و همکاران [11]

Parker و همکاران در مقاله مهمی سه نوع فولاد پر استحکام را مورد آزمایش قرار دادند و برای رفتار آنها مدل یکسانی را ارائه کردند که برای هر ماده تنها باید ضرائب ثابت در این مدل کالیبره شوند آنها این مدل را مدل سخت شوندگی سینماتیک غیرخطی تصحیح شده نامیدند. آنها مدل زیر را برای فولاد A723 ارائه کردند.

رفتار ماده در بارگذاری عبارت است از:

$$\sigma_{pl}^{L1} / \sigma_Y = 0.013 \varepsilon_{pl}^{U1} \quad (2)$$

رفتار ماده در باربرداری عبارت است از:

$$\sigma_c^{U1} / \sigma_Y = (1 + \beta) \tanh(\gamma \varepsilon_{pl}^{U1}) + \beta \quad (3)$$

که در رابطه فوق σ_c^{U1} از نقطه C و ε_c^{U1} از نقطه D اندازه گیری می شوند شکل (۱). همچنین β ضریب باشینگر می باشد که با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} \beta = 0.1684 [\tan(1 - \varepsilon_{pl}^{L1})]^{3.6} + 0.17 & \quad \varepsilon_{pl}^{L1} \leq 1 \\ \beta = 0.17 & \quad \varepsilon_{pl}^{L1} > 1 \end{aligned} \quad (4)$$

و نیز γ به شکل زیر تعریف می شود:

$$\gamma = 1.2858 (\varepsilon_{pl}^{U1})^{(-0.323)} \quad (5)$$

در روابط فوق کرنشها برحسب درصد می باشند. همچنین تنش تسلیم ماده نیز حدود ۱۱۰۰ مگاپاسکال است.

Parker و همکاران [11] بیان می کنند که در تحلیل اتوفرتاژ هیدرولیکی که حداکثر کرنش پلاستیک در آن حدود ۱/۵ تا ۲ درصد می باشد مدل های معرفی شده در بندهای ۳ و ۲ جوابهای یکسانی را بدست می دهند. همچنین دقت در نتایج بدست آمده از آزمایشات کشش-فشار فولاد DIN1.6959 نشان می دهد که مدل ارائه شده توسط تطابق خوبی با رفتار این ماده دارد

تحلیل تنش های پسماند در لوله های جدار ضخیم اتوفر تاژ شده با استفاده از مدل واقعی مواد

در این تحلیل از مدل رفتاری پیشنهاد شده توسط Kendall [7] که برای نوعی از فولاد تصحیح شده 4340 ارائه شده، برای مدلسازی رفتار فولاد DIN1.6959 استفاده شده است. همچنین معیار تسلیم فون مایز، نسبت قطر خارجی به داخلی ($\frac{b}{a} = 2$) و روش حل عددی VMP بکار رفته است. در تحلیل های انجام شده هر سه شرط مرزی انتهائی بیان شده در ذیل استفاده شده است.

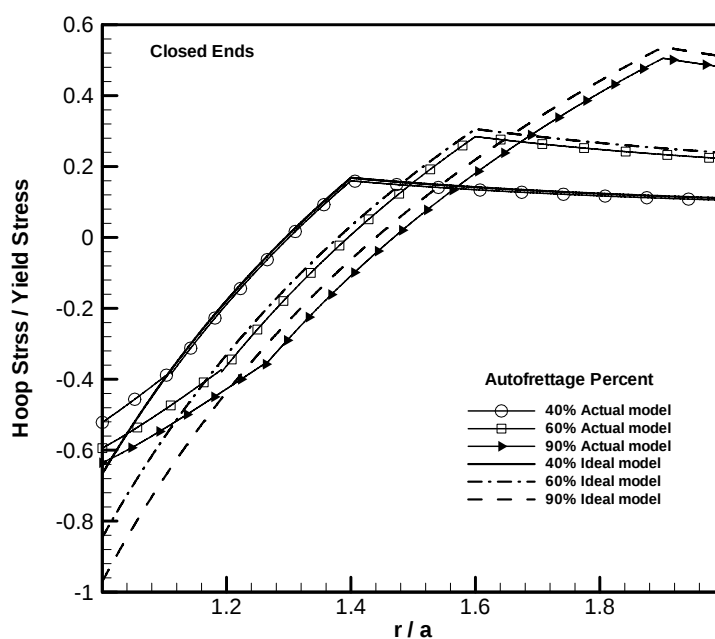
الف - کرنش صفحه ای، که کرنش محوری برابر صفر فرض میشود

ب - انتها باز، نیروی محوری صفر و کرنش محوری ثابت فرض می شود

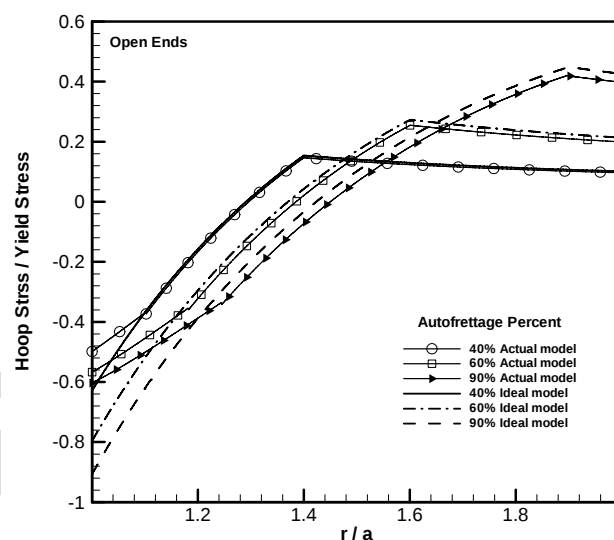
ج - انتها بسته، نیروی محوری برابر حاصلضرب فشار داخلی در مساحت سطح مقطع داخلی لوله بوده و کرنش محوری ثابت است در ابتدا مدل واقعی با مدل ایده آل مقایسه شده و آنگاه تنشها و کرنشهای پسماند برای هر سه حالت فوق الذکر بدست آمده است.

مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اتوفر تاژ با مدل واقعی و ایده آل رفتار ماده

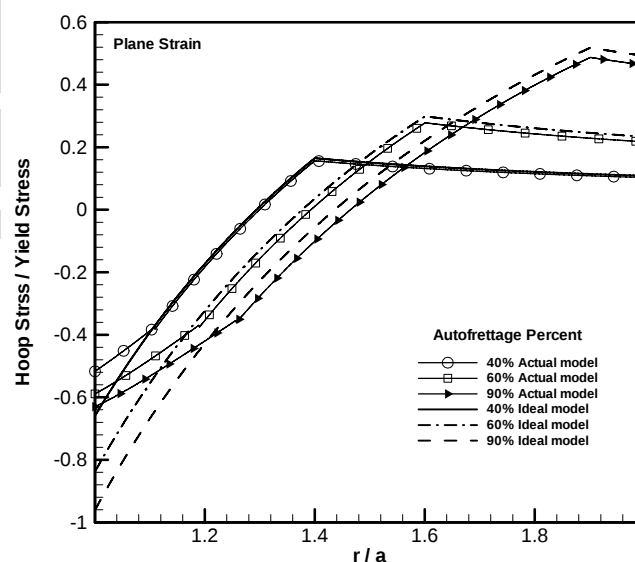
در مدل ایده آل، رفتار ماده در بارگذاری و همچنین باربرداری، الاستیک-کاملاً پلاستیک در نظر گرفته می شود و سخت شوندگی از نوع همسانگرد است. اشکال (۴-۶) نتایج بدست آمده از دو نوع رفتار را برای درصد های اتوفر تاژ ۴۰، ۶۰ و ۹۰ و نیز شرایط مرزی مختلف نشان می دهد. در این اشکال تنش های پسماند مماسی نرمالایز شده در ضخامت لوله نمایش داده شده است. دلیل بررسی تنشهای پسماند مماسی آنستکه این تنش ها در افزایش عمر خستگی لوله ها بسیار مهم می باشند. بررسی اشکال نشاندهنده آنستکه مدل ایده آل نسبت به مدل واقعی تنشهای پسماند بیشتری را پیش بینی مینماید. که مقدار آن برای درصد های بالای اتوفر تاژ بیش از سی درصد می باشد. بر این اساس استفاده از مدل ایده آل برای پیش بینی عمر خستگی خطر ناک می باشد.



شکل (۴)- تنش های پسماند مماسی برای درصد های مختلف اتوفر تاژ در حالت انتها بسته (مدل ایده آل و واقعی)



شکل (۵) - تنش های پسماند مماسی برای درصد های مختلف اتوفرتاژ در حالت انتها باز (مدل ایده آل و واقعی)

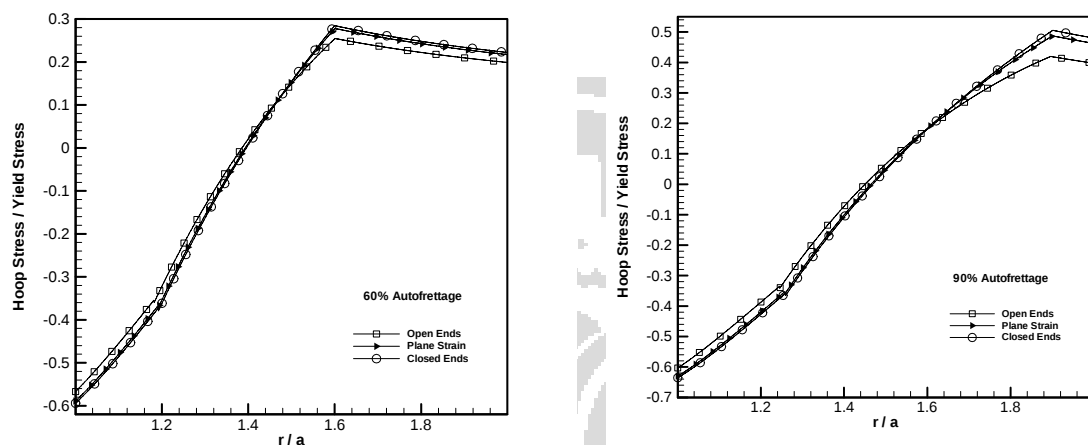


شکل (۶) - تنش های پسماند مماسی برای درصد های مختلف اتوفرتاژ در حالت کرنش صفحه ای (مدل ایده آل و واقعی)

مقایسه تنشهای پسماند مماسی در حالت های کرنش صفحه ای، انتها باز و انتها بسته (مدل واقعی فولاد)

شکل (۷) تنشهای مماسی را برای هر سه شرط مرزی مختلف، با استفاده از مدل واقعی رفتار فولاد و برای درصد های اتوفرتاژ ۶۰ و ۹۰ نشان میدهد. بررسی شکل نشان می دهد که دو شرط مرزی انتها بسته و کرنش صفحه ای تقریباً نتایج یکسانی را بدست

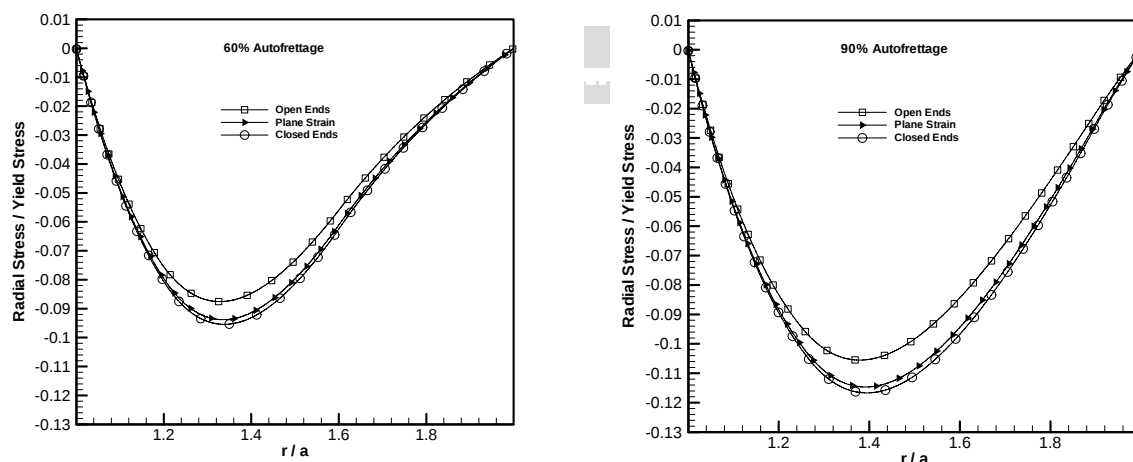
می دهند. همچنین شرط انتها بسته تنشهای پسماند مماسی کمتری را نسبت به دو شرط مرزی دیگر در حوالی سطح داخلی پیش بینی مینماید. از طرف دیگر پس از بار برداری در درصدهای اتوفرتاژ ۶۰ و ۹۰ درصد، به ترتیب ۲۰ و ۲۵ درصد از ضخامت داخلی لوله گرفتار تسلیم مجدد (Back Yielding) می گردد.



شکل (۷) - تنش های پسماند شعاعی برای هر سه حالت مرزی با در نظر گرفتن رفتار واقعی مواد
الف - ۹۰ درصد اتوفرتاژ (راست) ب - ۶۰ درصد اتوفرتاژ (چپ)

مقایسه تنشهای پسماند شعاعی در حالت های کرنش صفحه ای، انتها باز و انتها بسته (مدل واقعی فولاد)

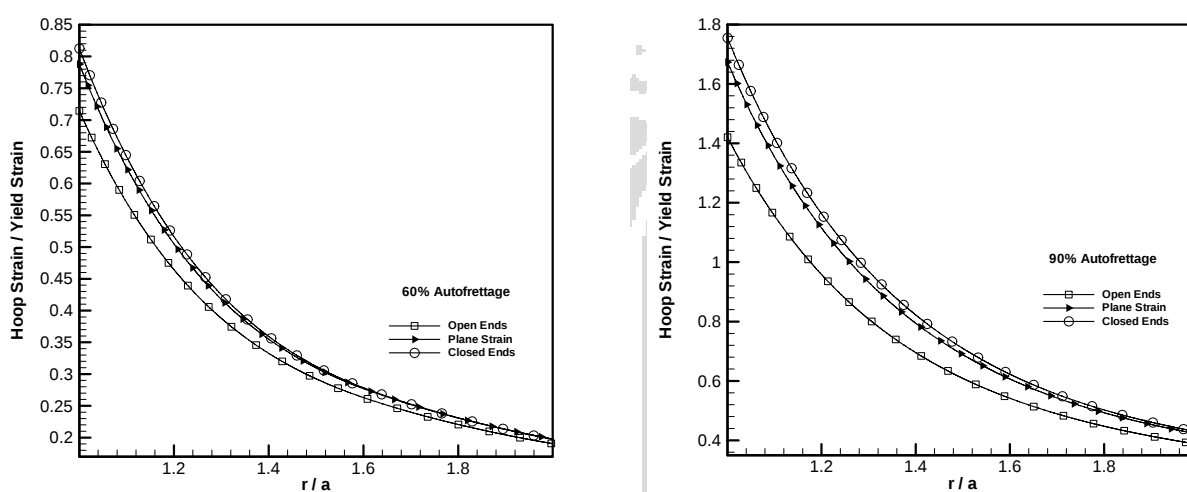
شکل (۸) تنشهای شعاعی را برای هر سه شرط مرزی مختلف، با استفاده از مدل واقعی رفتار فولاد و برای درصدهای اتوفرتاژ ۶۰ و ۹۰ نشان میدهد. بررسی شکل نشان می دهد که در این حالت نیز دو شرط مرزی انتها بسته و کرنش صفحه ای تقریباً نتایج یکسانی را بدست می دهند. حالت انتها بسته بیشترین و حالت انتها باز کمترین مقدار تنشهای پسماند شعاعی را پیش بینی می نماید.



شکل (۸) - تنش های پسماند شعاعی برای هر سه حالت مرزی با در نظر گرفتن رفتار واقعی مواد
الف - ۹۰ درصد اتوفرتاژ (راست) ب - ۶۰ درصد اتوفرتاژ (چپ)

مقایسه کرنش های پسماند مماسی در حالت های کرنش صفحه ای، انتها باز و انتها بسته (مدل واقعی فولاد)

شکل (۹) کرنش های پسماند مماسی را برای هر سه شرط مرزی مختلف، با استفاده از مدل واقعی رفتار فولاد و برای درصد های اتوفرتاژ ۶۰ و ۹۰ نشان میدهد. بررسی شکل نشان می دهد که در این حالت نیز دو شرط مرزی انتها بسته و کرنش صفحه ای تقریباً نتایج یکسانی را بدست می دهند. حالت انتها بسته بیشترین و حالت انتها باز کمترین مقدار کرنش های پسماند مماسی را پیش بینی می نمایند.



شکل (۹) - کرنش های پسماند مماسی برای هر سه حالت مرزی با در نظر گرفتن رفتار واقعی مواد
الف - ۹۰ درصد اتوفرتاژ (راست) ب - ۶۰ درصد اتوفرتاژ (چپ)

فشار لازم برای اتوفرتاژ برای سه حالت انتهایی مختلف

جدول (۱) فشار لازم برای اتوفرتاژ به میزان ۴۰، ۶۰ و ۹۰ درصد را برای حالت های مختلف مرزی نشان می دهد. بررسی این جدول نشان می دهد که برای درصد های یکسان اتوفرتاژ، در حالت های انتها بسته و کرنش صفحه ای تقریباً فشارهای یکسانی اعمال می شود.

جدول (۱) فشار لازم برای درصد های مختلف اتوفرتاژ و حالت های مختلف مرزی در پروسه اتوفرتاژ

حالت انتها	در صد اتوفرتاژ		
	۴۰	۶۰	۹۰
انتها باز	۷۳۵/۶	۸۰۴/۹	۸۵۰/۶۳
کرنش صفحه ای	۷۴۸/۸	۸۲۲/۳	۸۷۳/۲۵
انتها بسته	۷۵۰/۹	۸۲۴/۹۵	۸۷۶/۴۵

نتیجه گیری

مدل مناسبی برای مدلسازی رفتار فولاد DIN 1.6959 پیشنهاد شد آنگاه لوله های جدار ضخیم اتوفرتاژ شده از جنس این فولاد با استفاده از روش VMP و با استفاده از مدل های رفتار واقعی و ایده آل مواد و در حالت های مختلف مرزی تحلیل شد. بررسی نتایج نشان دهنده آنستکه مدل ایده آل تنش های پسماند بیشتری نسبت به مدل واقعی پیش بینی می نماید. بگونه ای که میزان خطا در این پیش بینیها در درصد های بالای اتوفرتاژ از سی درصد نیز تجاوز می نماید. همچنین برای دو حالت انتهایی کرنش صفحه ای و انتها بسته نتایج تقریباً یکسانی بدست آمد.

مراجع

1. Bauschinger, J. ,” Ueber die Veraderung der Elasticitatagrenze und dea Elasticitatamoduls verschiadener Metalle”,Zivilingenieur,Vol.27, 1881, columns 289-348.
2. Manning , W. R. D. ,”The overstrain of tubes by internal pressure,Engineering, 159, 1945, pp. 107-83
3. Franklin, G. J. and Morrison, J. M., “Autofrettage of cylinders : prediction of pressure / external expansion curves and calculation of residual stresses”, Instn Mech Engers, 174, 1960, PP. 974 - 974.
4. Chen, P.C.T., “The Bauschinger and Hardening Effect on Residual stresses in an Autofrettaged thick - walled cylinders”, J. of Pressure Vessel Technology, 108, 1986, PP. 108 - 112
5. Rees, D. W. A. ,’Autofrettage Theory and Fatigue Life of Open-Ended Cylinders’, J. Strain Analysis, Vol. 25, No.2, 1990, pp.109-121
6. Megahed, M. M. and Abbes A.T., “Influence of Reverse Yielding on Residual Stresses Induced by Autofrettage”, Int. J. Mech. Sci., 33, 1991, PP. 139 - 150.
7. Kendall ,D. P.,” Discussion of a Paper,”The Bauschinger effecting Autofrettage Tubes-A Comparison of Models Including the ASME Code,” By A.P. Parker and J. H.Underwood, Proc. ASME Pressure Vessels &Piping Conferences,San Diego, 1998
8. Milligan, R. V.,Koo,W. H. and Davidson,T. e. ,” The Bauschinger Effect in HighStrength Steel “, ASME J. basic Eng., 88, 1966, pp. 480-488
9. Parker,A.P, Underwood, J .H. and Kendall, D.P., “Bauschinger effect design procedures for autofrettaged tubes including material removal and sachs method”, Vol.121, No.4, 1999, PP. 430 - 437.
10. Parker, A. p., 2001, “Autofrettage of Open-End Tubes- Pressures, Stresses, Strains and Code Comparisons ”, ASME J. Pressure Vessel Technol., Vol.123, No.3, pp. 271-281
11. Parker .A . P, Troiano,E , Underwood, J.and Massey , C.,”Characterization of Steels using a Revised Kinematic Hardening Model Incorporating Bauschinger Effect”, J . pressure vessel Technology, 125, 2003, PP. 277-281
12. Troiano,E. Parker, A.P., Underwood, J., Massey, C., “Experimental data, Numerical fit and fatigue life calculations relating to the Bauschinger effect in high strength armament steels”, Gun Tubes conference 2002 (GT 2002) Keble College oxford, S2P11, PP. 1 – 7.
13. Jahed, H. ,Ghanbari, G., “ Actual Unloading Behavior and Its Significance on Residual Stress in Machined Autofrettage Tubes”, J. of Pressure Vessel Technology , Vol.12, 2003, pp. 321-325

14. Jahed, H. and Dubey R.N., "An axisymmetric method of elastic - plastic capable of predicting residual stress field", J. pressure vessel Technology. Vol.11, 1997, PP. 264 -273

