

## بررسی رفتار نمونه‌های Al1050 تحت فرایند اتوفرتاژ به روش المان محدود و تجربی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران،  
hamedsafikhlanloo@gmail.com

حامد صفی خانلو

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران،  
ahmadin@aut.ac.ir

مهدی احمدی نجف‌آبادی\*

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران،  
alimirzaei69@aut.ac.ir

سجاد علی میرزایی

### چکیده

اتوفرتاژ فرایندی است که به منظور ایجاد تنش‌های پسماند مفید در استوانه‌های جدار ضخیم تحت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش تنش‌های پسماند فشاری در سطح داخلی موجب افزایش ظرفیت بار، بهبود عملکرد عمر خستگی و کاهش شروع ترک‌های خستگی می‌شود. فرایند اتوفرتاژ می‌تواند با استفاده از فشار هیدرولیکی یا مکانیکی به جداره داخلی سیلندرهای جدار ضخیم برای ایجاد تنش‌های پسماند انجام شود. در این پژوهش یک مجموعه اتوفرتاژ آزمایشگاهی بر مبنای عملکرد هیدرولیکی ساخته شد و سپس نمونه‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ در فشارهای مختلف تحت فرایند اتوفرتاژ قرار گرفت. هم‌چنین برای ارزیابی رفتار نمونه‌ها تحت فرایند اتوفرتاژ، نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شد و برای ارزیابی صحت داده‌های حاصل از روش المان محدود از کرنش‌سنج نصب شده بر روی نمونه‌ها در راستای مماسی استفاده گردید. در مدل‌سازی المان محدود نمونه‌ها تمامی پارامترهای تاثیرگذار بر فرایند اتوفرتاژ، همانند اصطکاک بین صفحات محفظه و نمونه‌ها و رفتار الاستیک-پلاستیک سخت شونده نمونه‌ها لحاظ گردید. نتایج حاصل از روش المان محدود و کرنش‌سنج، تطابق بسیار خوبی نسبت به هم پیدا کردند. نتایج حاصل از روش المان محدود، نشان‌دهنده وجود یک درصد اتوفرتاژ بهینه در هر فشار کاری می‌باشد. هم‌چنین ملاحظه شد که با اعمال درصد اتوفرتاژ بهینه، می‌توان بیشینه تنش‌های فون میسز در نمونه‌ها را تا حدود ۲۷٪ کاهش داد. با وجود اینکه در قطعات اتوفرتاژ نشده بیشینه تنش‌ها در جداره داخلی نمونه اتفاق می‌افتد، ولی با اعمال فرایند اتوفرتاژ علاوه بر کاهش بیشینه مقدار این تنش‌ها می‌توان بیشینه مقدار آن‌ها را به سمت جداره خارجی انتقال داد و این کار از جهت اینکه اکثر ترک‌های خستگی در جداره داخلی قطعه تشکیل می‌شوند، بسیار حائز اهمیت است. در نهایت نتایج حاصل از روش المان محدود نشان می‌دهد که عدم در نظرگیری پارامترهای موثر در فرایند اتوفرتاژ (اصطکاک و نیروی محوری) باعث ایجاد خطای زیادی در درصد اتوفرتاژ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اتوفرتاژ، درصد اتوفرتاژ، رفتار الاستیک-پلاستیک، لوله‌های جدار ضخیم، المان محدود، حساسیت مش.

### Investigation of autofrettage process in Al 1050 specimens by finite element and experimental method

H. Safikhlanlu

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

M. Ahmadi Najafabadi

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

S. Alimirzaei

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Autofrettage process can be used to introduce beneficial residual stress in the cylinder of thick-walled pressure vessels. In this technique, a compressive residual stress is formed at internal surface of the cylinder which, will increase pressure capacity, improve fatigue life and reduce fatigue cracks initiation. The autofrettage process can be accomplished by applying hydraulic or mechanical pressure to the bore of a thick cylinder to induce residual stresses. In this study, an experimental autofrettage was assembled based on hydraulic performance, and then aluminum alloy (Al1050) specimens were subjected to autofrettage under different pressures. Also, to evaluate the behavior of the specimens under the autofrettage process, the specimens were modeled into the finite element software ABAQUS and for evaluation of the accuracy of the data obtained from the finite element method (FEM), a strain gauge mounted tangentially on the outer surface of the specimen was used. In finite element modeling, all parameters affecting the autofrettage process, such as friction between plates if the chamber and specimens and elastic-plastic behavior of specimens was considered, so that the results obtained from the FEM and the strain gauge are in a good agreement. The results of FEM show that, there is one optimal autofrettage percentage in each working pressure. It was also observed that by applying optimal autofrettage percentage, the maximum of von-Mises stresses in specimens can be reduced by about 27%. Although in the non-autofrettaged specimens, the maximum stresses occur in the inner wall of the specimen, but by applying the autofrettage process, in addition to reducing the maximum amount of these stresses, the maximum amount can be transferred to the outer wall, which it is very important because the majority of fatigue cracks are formed in the inner wall of specimens. Finally, the results of FEM show that the lack of consideration of the effective parameters in the autofrettage process (friction and axial force) causes a large error in the Autofrettage percentage.

**Keywords:** Autofrettage, Autofrettage percentage, Elastic-plastic behavior, Thick-walled pressure vessels, Finite element, Mesh sensitivity.

گاز، هسته‌ای و غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیشتر این لوله‌ها و مخازن در معرض فشارهای داخلی بالایی قرار دارند، به همین دلیل بالا بردن استحکام این مخازن همراه با در نظر گرفتن پارامترهای کاهش

### ۱- مقدمه

لوله‌ها و مخازن جدار ضخیم در صنایع مختلف پتروشیمی، نفت،

وزن و مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت آن‌ها اهمیت زیادی دارد. روش‌های استحکام بخشی به مخازن و لوله‌ها به دو روش عمده سیم‌پیچی<sup>۱</sup> و اتوفرتاژ<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود [۱، ۲]. فرایند اتوفرتاژ با استفاده از دو روش سنبه<sup>۳</sup> و هیدرولیکی قابل اجرا می‌باشد که اتوفرتاژ هیدرولیکی به علت انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به اتوفرتاژ سنبه معمول‌تر می‌باشد [۳].

یکی از پارامترهای مورد بررسی در فرایند اتوفرتاژ درصد اتوفرتاژ<sup>۴</sup> می‌باشد، که به صورت نسبت ضخامت جداره تغییرشکل پلاستیک یافته به ضخامت کل جداره تعریف می‌شود. یکی از مشکلات اساسی فرایند اتوفرتاژ اندازه‌گیری درصد اتوفرتاژ، فشار مناسب و تنش‌های پسماند حاصل از این فرایند می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در لوله‌های اتوفرتاژ شده به سه روش عمده مکانیکی، عددی و تحلیلی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های تحلیلی طبق فرضیات مورد استفاده، مسائل به چند دسته از جمله الاستیک-پلاستیک خطی، الاستیک-پلاستیک سخت شونده و مسائلی که در آن‌ها اثرات باوشینگر و معیارهای مختلف تسلیم در نظر گرفته می‌شود، تقسیم‌بندی می‌شوند [۴]. در روش‌های عددی از نرم‌افزارهای عددی مختلفی همانند Abaqus & Ansys استفاده می‌شود که در صورت در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تاثیرگذار بر مساله از دقت بالایی برخوردارند. در مقابل روش‌های مکانیکی به سه گروه مخرب، نیمه‌مخرب و غیرمخرب تقسیم‌بندی می‌شوند که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مقطع‌زنی، سوراخ‌کاری، اشعه ایکس، نوترون و... اشاره کرد [۵]. با اینکه در اکثر سازه‌های بزرگ همانند پل‌ها و مخازن نیاز به اندازه‌گیری مداوم تنش‌های پسماند است ولی استفاده از روش‌های مخرب بسیار محدود بوده و بیشتر در موارد آزمایشگاهی از آن‌ها استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی کارهای انجام شده در زمینه اتوفرتاژ در چندین سال اخیر پرداخته می‌شود.

فراهی و همکاران [۶] به بررسی فرایند اتوفرتاژ چند مرحله‌ای در فولادهای استحکام بالا پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از فرایند اتوفرتاژ چند مرحله‌ای بدون عملیات حرارتی تنها در درصدهای بالای اتوفرتاژ موجب توزیع بهتر تنش پسماند در قطعات می‌شود و برای درصدهای پایین اتوفرتاژ موثر نیست. علاوه بر این انجام عملیات حرارتی در فرایند چند مرحله‌ای موجب توزیع بهتر تنش‌های پسماند هم در درصدهای بالا و هم در درصدهای پایین اتوفرتاژ می‌شود. صدیقی و جباری [۷] به بررسی اثرات استفاده همزمان از فرایندهای سیم‌پیچی (روشی است که در ابتدا دور لوله سیم‌پیچی می‌شود) و اتوفرتاژ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان از این دو فرایند موجب توزیع بهتر تنش‌های محیطی می‌شود. همچنین آن‌ها یک روش تحلیلی جدید با عنوان روش مستقیم<sup>۵</sup> برای محاسبه تنش در لوله‌های سیم‌پیچی اتوفرتاژ شده ارائه دادند. هورست برونت و همکاران [۸] روش المان محدود جدیدی را برای محاسبه

تنش‌های پسماند ایجاد شده در طول فرایندهای برقوکاری<sup>۶</sup> و اتوفرتاژ ارائه دادند. همچنین آن‌ها با اندازه‌گیری تنش‌های پسماند توسط اشعه ایکس نشان دادند که روش المان محدود ارائه شده از دقت بالایی برخوردار است. پوشش‌دهی<sup>۷</sup> داخلی لوله‌ها و مخازن یکی از روش‌های محافظت قطعات در مقابل سایش و جوانه زنی و رشد ترک‌های داخلی می‌باشد. یکی از مشکلات این پوشش‌ها ایجاد تنش‌های پسماند کششی در آن‌هاست. بنگالیا و وود [۹] تاثیرات فرایند اتوفرتاژ را بر روی فولاد ۴۳۳۰ پوشش‌دهی شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که انجام فرایند اتوفرتاژ بعد از پوشش‌دهی موجب تبدیل تنش‌های کششی به تنش‌های پسماند فشاری در پوشش‌ها، حذف کامل ناپیوستگی‌های حاصل از تنش‌ها در فصل مشترک پوشش و نمونه و در نهایت عملکرد بهتر نمونه می‌شود. زارع و داریجانی [۱۰] فرایند جدیدی را تحت عنوان اتوفرتاژ چرخشی معرفی کردند که مبنای آن تولید تنش پسماند در لوله‌های جدار ضخیم تحت سرعت‌های زاویه‌ای بالا می‌باشد. آن‌ها روش تحلیلی جدیدی را برای اتوفرتاژ چرخشی برای مواد با رفتار الاستیک-پلاستیک کامل<sup>۸</sup> با در نظرگیری اثر باوشینگر ارائه دادند. در پژوهشی دیگر [۱۱] آن‌ها با انجام فرایند بهینه‌سازی روابط مربوط به میزان اتوفرتاژ چرخشی بهینه را برای لوله‌های جدار ضخیم بدست آوردند. آن‌ها دریافتند که اتوفرتاژ چرخشی توزیع تنش بهتری را نسبت به اتوفرتاژ هیدرولیکی می‌دهد. ملائی و همکاران [۱۲] به ارائه روش تحلیلی برای بررسی فرایند اتوفرتاژ در موادی با رفتار الاستیک-پلاستیک غیرخطی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که عدم در نظرگیری رفتار الاستیک-پلاستیک غیرخطی<sup>۹</sup> مواد و اثر باوشینگر موجب ایجاد خطای زیاد در نتایج می‌شود. بگینی و همکاران [۱۳] با نصب تعدادی کرنش‌سنج بر روی نمونه‌های بریده شده از قطعه اتوفرتاژ شده و استفاده از روش ایجاد شکاف(درز)<sup>۱۰</sup> تنش‌های پسماند حاصل از کرنش‌های مماسی را در جداره قطعه محاسبه کردند.

در فرایند اتوفرتاژ با اعمال فشار داخلی بالاتر از فشار بحرانی (فشار لازم برای شروع تغییر شکل پلاستیک در جداره داخلی) در مجراهای جدار ضخیم، جداره داخلی شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند به طوری که بعد از برداشته شدن فشار داخلی اتوفرتاژ، جداره داخلی تحت تنش‌های پسماند فشاری قرار می‌گیرد. این تنش‌های پسماند فشاری باعث کاهش تنش در مراحل بعدی بارگذاری در حین کار می‌شود. در نهایت با کاهش تنش‌ها در قطعه سرعت رشد ترک‌های خستگی کاهش یافته و از شکست قطعه جلوگیری می‌شود. در لوله‌های اتوفرتاژ شده بیشترین مقدار ضریب شدت تنش در نقاط غیر سطحی رخ می‌دهد. قاجار و گوگرچین [۱۴] به بررسی اثرات گرادایان فشار بر ضریب شدت تنش در لوله‌های جدار ضخیم اتوفرتاژ شده، با استفاده از تابع وزنی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در لوله‌های تحت گرادایان فشار، بیشترین ضریب شدت تنش لزوماً در عمیق‌ترین نقطه و نقاط سطحی اتفاق نمی‌افتد. سیفی و دژم [۱۵] به بررسی تاثیر فرایند اتوفرتاژ بر روی پارامترهای ترک سطحی با استفاده از گسسته‌سازی عددی میدان

<sup>6</sup> Reaming

<sup>7</sup> Weld clad

<sup>8</sup> Elastic-perfect plastic

<sup>9</sup> Elastic-nonlinear (hardening) plastic

<sup>10</sup> Slitting method

<sup>1</sup> Wire-winding

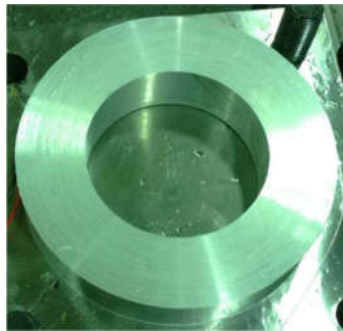
<sup>2</sup> Autofrettage

<sup>3</sup> Swage autofrettage

<sup>4</sup> Autofrettage percentage

<sup>5</sup> Direct Method

به منظور ارزیابی تاثیر فرایند اتوفرتاژ، نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم ۱۰۵۰ مطابق شکل ۱ با استفاده از دستگاه تراش ساخته و تحت فرایند اتوفرتاژ قرار داده شد. هدف از انتخاب قطعه آلومینیومی ۱۰۵۰ تغییر شکل بهتر آن نسبت به نمونه‌های آلومینیوم سری‌های بالاتر جهت بررسی بهتر فرایند اتوفرتاژ می‌باشد.



شکل ۱- نمونه آزمایش (آلومینیوم ۱۰۵۰)

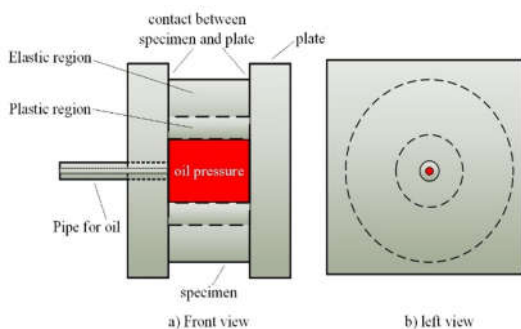
در جدول ۱ خواص (که با استفاده از آزمایش تست کشش به دست آمد) و ابعاد هندسی نمونه آلومینیوم مورد استفاده گزارش شده است. قابل ذکر است که در این پژوهش نسبت قطر خارجی به قطر داخلی ( $k$ ) که به عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار در فرایند اتوفرتاژ تلقی می‌شود برابر  $k = 1.734$  می‌باشد (دلیل انتخاب نسبت بالای قطر خارجی به قطر داخلی جلوگیری از نشت روغن و آب‌بندی دو انتهای لوله می‌باشد). در این پژوهش مولفه‌های  $r_b$ ،  $r_a$  و  $l$  به ترتیب شعاع خارجی، شعاع داخلی و طول نمونه می‌باشند.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم

$E$ (Gpa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\theta$	$r_b$ (mm)	$r_a$ (mm)	$l$ (mm)
۷۰	۳۷/۷	۰/۳۳	۷۴/۶۵	۴۳/۰۵	۳۰/۳۰

## ۲-۱- دستگاه اتوفرتاژ

در شکل ۲ طرح‌واره‌ای از فرایند اتوفرتاژ به روش هیدرولیکی نشان داده شده است. همانطوری که در شکل فوق مشاهده می‌شود، فشاری که روغن به سطح داخلی نمونه وارد می‌کند در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی باعث تغییر شکل پلاستیک جداره داخلی نمونه می‌شود.



شکل ۲- طرح‌واره‌ای از فرایند اتوفرتاژ هیدرولیکی

تنش در مواد مدرج تابعی<sup>۱</sup> پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات کسر حجمی مواد بیشترین اثر را بر روی ضریب شدت تنش دارد. رشد ترک خستگی در نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ اتوفرتاژ شده توسط سیفی و حکیمی [۱۶] بررسی شد. آن‌ها نشان دادند که تعداد سیکل‌های شکست نمونه ۶۰٪ اتوفرتاژ شده، کمتر از تعداد سیکل‌های شکست نمونه ۴۰٪ اتوفرتاژ شده می‌باشد. صدیقی و همکاران [۱۷] تاثیر پارامترهای موثر را بر روی عمر خستگی لوله‌های سیم‌پیچی-اتوفرتاژ شده در فولادهای استحکام بالا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که فشار بهینه اتوفرتاژ، تاثیر زیادی بر عمر خستگی دارد. همچنین با سیم‌پیچی لوله‌های اتوفرتاژ شده می‌توان عمر خستگی قطعه را بسیار بهبود بخشید. پرل و ساری [۱۸] تاثیرات اتوفرتاژ سنبه و هیدرولیکی را بر روی عمر خستگی لوله‌های توپ با در نظر گرفتن اثرات باوشینگر بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که محاسبه دقیق اثرات باوشینگر تاثیر زیادی بر عمر خستگی دارد.

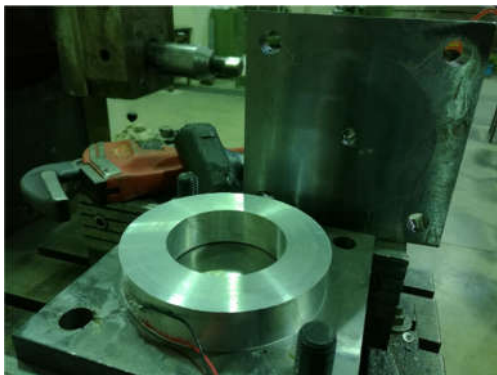
در این پژوهش ابتدا به طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی اتوفرتاژ هیدرولیکی با حداکثر فشار ۷۰۰ بار پرداخته شد. سپس نمونه‌ها ساخته شدند و تحت فرایند اتوفرتاژ قرار گرفتند. در نهایت برای ارزیابی رفتار نمونه‌ها تحت فرایند اتوفرتاژ، نمونه‌ها در نرم‌افزار Abaqus شبیه‌سازی شد و برای ارزیابی صحت داده‌های حاصل، از کرنش‌سنج نصب شده بر سطح خارجی نمونه در راستای مماسی و اندازه‌گیری ابعاد نمونه تغییر شکل یافته استفاده گردید. همچنین در شبیه‌سازی امان محدود برای نزدیک کردن نتایج حاصله به نتایج تجربی، تمامی پارامترهای موثر بر فرایند اتوفرتاژ از قبیل اصطکاک و رفتار الاستیک-پلاستیک سخت شونده ماده در نظر گرفته شد. هدف از این پژوهش بررسی تاثیر فرایند اتوفرتاژ بر روی تنش‌ها، ارائه فشار اتوفرتاژ مناسب برای هر فشار کاری، بررسی تاثیرات عدم در نظرگیری پارامترهای موثر در فرایند اتوفرتاژ بر روی درصد اتوفرتاژ و همچنین بررسی تغییرات ظاهری نمونه‌ها نظیر بشکه‌ای شدن و تغییرات ابعاد می‌باشد.

## ۲-۲- رویکرد تجربی

اتوفرتاژ فرایندی است که در آن سطح داخلی نمونه تحت فشار بالا قرار می‌گیرد به طوری که نمونه تا منطقه‌ای از جداره آن مطابق شکل ۱ دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. این تغییر شکل پلاستیک به نوبه خود بعد از باربرداری موجب افزایش تحمل فشار نمونه در مراحل بعدی بارگذاری و همچنین افزایش استحکام نمونه در برابر بارگذاری خستگی می‌شود.

قطعات اتوفرتاژ نشده حداکثر می‌توانند تا فشار بحرانی ( $P_c$  فشاری) که در آن سطح داخلی نمونه شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند) بارگذاری شوند بدون اینکه تغییر شکل پلاستیک در نمونه ایجاد شود. در حالی که در قطعات اتوفرتاژ شده می‌توان نمونه‌ها را تا فشار  $P_{at} > P_c$  (فشار اتوفرتاژ) بارگذاری کرد، بدون اینکه ناحیه تغییر شکل پلاستیک افزایش یابد. فشار کاری ( $P_w$ ) همواره باید از فشار اتوفرتاژ کمتر باشد، در غیر اینصورت فشار کاری باعث اتوفرتاژ نمونه می‌شود.

<sup>۱</sup> Functionally Graded Material



شکل ۴- تنظیمات مربوط به آبندی صفحات

## ۲-۲- فرایند اتوفرتاژ

فرایند اتوفرتاژ با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در جداره داخلی مخازن، لوله‌ها و یا هر قطعه دیگری که دارای مجرای باشد، باعث کاهش ماکزیمم فشار موثر در بارگذاری ثانویه نسبت به قطعه اتوفرتاژ نشده می‌شود. در هنگام اعمال فشار و تغییر شکل نمونه‌ها، جابجایی شعاعی بین نمونه‌ها و صفحات محفظه به وجود می‌آید که محاسبه ضریب اصطکاک ضروری می‌باشد. به همین دلیل ضریب اصطکاک بین نمونه‌ها و صفحات محفظه از طریق آزمایش اندازه‌گیری ضریب اصطکاک اندازه‌گیری شد و مقدار آن برابر با  $\mu = 0.23$  بدست آمد. برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، نمونه (لوله) بر روی صفحه فلزی قرار داده شده و سپس صفحه فلزی آنقدر زاویه داده می‌شود تا نمونه بلغزد و بدین ترتیب ضریب اصطکاک از طریق تعادل نیروها محاسبه می‌گردد. قابل ذکر است که در این پژوهش فرض بر این است که ضریب اصطکاک در حین آزمایش ثابت می‌ماند. در نهایت مدل تست شده در نرم افزار المان محدود Abaqus تحت فشارهای مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج تنش‌ها و کرنش‌های مماسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یکی از مهمترین دلایل بررسی تنش‌ها و کرنش‌های مماسی تاثیر قابل ملاحظه آنها بر رشد ترک خستگی در مقایسه با سایر تنش‌ها همانند تنش‌های شعاعی و محوری است.

برای اطمینان از صحت داده‌های المان محدود، نمونه‌ها تحت فشار هیدرولیکی قرار داده شدند و مطابق شکل ۵ با نصب کرنش‌سنج در راستای تنش‌های مماسی بر روی نمونه‌های آلومینیوم (کرنش‌سنج‌ها قبل از بارگذاری کالیبره شده بودند) مقادیر کرنش‌های مماسی در هر فشار اندازه‌گیری گردید.

## ۳- تحلیل المان محدود

در تحلیل فرایند اتوفرتاژ به روش المان محدود، برای دقیق‌تر شدن نتایج باید چند پارامتر مهم را لحاظ کرد. برخی از مهمترین این پارامترها عبارتند از: ۱- اندازه مش مناسب، ۲- رفتار الاستیک-پلاستیک سخت شونده نمونه که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

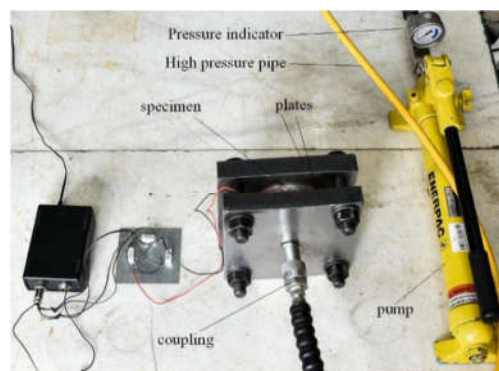
### ۱-۳- اندازه مش مناسب

برای بررسی اندازه مش مناسب از معیار بررسی بیشینه تنش فون میسر استفاده شد. در شکل ۶ تاثیر اندازه مش بر ماکزیمم تنش فون-میسر نشان داده شده است. مطابق این شکل با کاهش اندازه مش،

مطابق شکل ۳ مجموعه اتوفرتاژ مورد استفاده در این پژوهش متشکل از پمپ ۷۰۰ بار دستی انرپک<sup>۱</sup>، فشارسنج ۷۰۰ بار، پایه گیج، دو عدد صفحه آهنی با ابعاد  $300 \times 200 \times 200$  mm (به منظور آبنندی دو انتهای لوله)، لوله استحکام بالا با قابلیت تحمل فشارهای بالاتر از ۷۰۰ بار و کوپلینگ نری و مادگی (برای بستن صفحات به لوله و پمپ) و چهار عدد پیچ M20(2.5) می‌باشد.

برای آبنندی تمام اتصالات (همانند اتصالات کوپلینگ‌ها به صفحات) از پیچ‌های NPT(18)-3/8 استفاده شد. این پیچ‌ها با توجه به ساختار مخروطی شکل، تعداد دندانه‌های زیاد در هر اینچ و گام کم علاوه بر استفاده برای آبنندی در فشارهای کم در فشارهای بالا نیز قابلیت آبنندی خوبی دارند. برای سوراخ‌کاری صفحات از دستگاه فرز اف-پی-فور-ام<sup>۲</sup> با اندازه مته ۱۴ و جهت ایجاد رزوه مناسب برای پیچ‌ها از قلاویز مخروطی ان-بی-تی مطابق شکل ۴ استفاده گردید.

لازم به ذکر است که از آنجاییکه به علت لغزش قطعه بر روی صفحات امکان برش آن‌ها تحت فرایند اتوفرتاژ وجود دارد، برای آبنندی دو طرف نمونه‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ از هیچ‌گونه اورینگ<sup>۳</sup> و یا واشری استفاده نگردید. برای آبنندی اتصال بین صفحات و نمونه، دو طرف قطعه آلومینیوم و صفحات مطابق شکل ۴ با استفاده از سنگ مغناطیسی تخت جونس شیپمن<sup>۴</sup> سنگ زده شد. در نهایت با چهار عدد پیچ صفحات به هم بسته شدند و آبنندی به طور کامل انجام شد.



شکل ۳- مجموعه آزمایشی

<sup>1</sup> Enerpac

<sup>2</sup> FP4M

<sup>3</sup> O-ring

<sup>4</sup> Jones -Shipman

نشت روغن در تمام آزمایشات در فشار اندکی بالاتر از ۲۵۰ بار رخ می-داد. همچنین صفحات آهنی به صورت صلب مدل شده و در نهایت در فرایند شبیه سازی نمونه ها، ضریب اصطکاک ۰/۲۳ بین دو سطح آزاد نمونه ها با صفحات در نظر گرفته شد.

#### ۴- بحث روی نتایج

همانطوری که پیش تر اشاره شد، برای ارزیابی صحت داده های حاصل از المان محدود در فرایند اتوفرتاژ، کرنش سنجی در راستای مماسی، در سطح نمونه نصب شد و مقادیر کرنش های مماسی بدست آمد. سپس نمونه در نرم افزار المان محدود Abaqus مدل سازی شد. برای جلوگیری از تاثیر ضریب اصطکاک دو طرف نمونه، بر روی نتایج حاصل از کرنش سنج، کرنش سنج تا حد امکان در مرکز سطح خارجی نمونه نصب شد. همچنین برای تطبیق نتایج حاصل از روش المان محدود و نتایج تجربی تمامی پارامترهای موثر بر تحلیل المان محدود نمونه از قبیل اصطکاک، رفتار الاستیک-پلاستیک سخت شونده ماده و همچنین ابعاد دقیق اندازه مش در مدلسازی نمونه لحاظ شد. فرایند اتوفرتاژ در فشارهای مختلف انجام شد و در هر فشار کرنش مماسی از طریق کرنش سنج و روش المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی دقیق تر فرایند اتوفرتاژ، ۵ فشار داخلی مختلف ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵ و ۲۳۰ بار مورد بررسی قرار گرفت.

در جدول ۲ نتایج بدست آمده از روش المان محدود و کرنش-سنجی نشان داده شده است. همانطور که در این جدول قابل مشاهده است، حداکثر خطای ایجاد شده، بین نتایج حاصل از روش های المان محدود و کرنش سنجی ۸/۵۳٪ می باشد. همچنین قابل ذکر است که، مقادیر کرنش های اندازه گیری شده به وسیله کرنش سنج بیشتر از مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش المان محدود می باشد. از دلایل این امر، با توجه به حساسیت بالای کرنش سنج و مقاومت های پل و تستون به تغییرات دما، می توان به حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک بین نمونه و صفحات، حرارت جزئی ایجاد شده در اثر تغییر شکل پلاستیک نمونه و تغییرات دمای محیط در طول آزمایش اشاره کرد.

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایشگاه و روش المان محدود

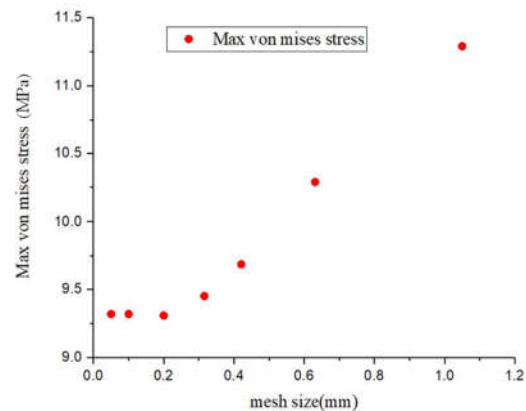
Inner Pressure (bar)	Tangential strain by strain gauge	Tangential strain by FEM	Error percentage (%)
۱۵۰	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۱۹۴	۷/۴۱
۱۷۵	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۲۳۸	۸/۵۳
۲۰۰	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۲۹۹	۶/۶۷
۲۲۵	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۴۰۸	۵/۲۰
۲۳۰	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۴۴۹	۶/۴۷

در جدول ۳ نتایج حاصل از تغییر ابعاد نمونه تحت فشار اتوفرتاژ ۲۵۰ بار با استفاده از اندازه گیری تجربی (با استفاده از میکرومتر با دقت ۰/۰۱ میلی متر) و نتایج حاصل از روش المان محدود آورده شده است. در جدول فوق  $l_i$  و  $l_o$ ، مطابق شکل ۷ به ترتیب نشان دهنده طول نمونه در جداره داخلی و خارجی می باشند. همانطور که از این جدول قابل مشاهده است، بعد از تغییر شکل نمونه قطرهای خارجی و داخلی به ترتیب ۰/۶ و ۰/۹ میلی متر افزایش پیدا می کنند. همچنین نتایج حاصل

بیشینه تنش فون-میسز کاهش پیدا کرده و در نهایت در یک اندازه مش معین همگرا می شود.



شکل ۵- کرنش سنج نصب شده بر روی سطح مماسی نمونه



شکل ۶- آنالیز حساسیت مش

در تحلیل فوق با توجه به منحنی حساسیت مش از اندازه مش ۰/۲ استفاده شد. به این ترتیب خطایی که ممکن است در نتیجه عدم انتخاب اندازه مش صحیح در نتایج ایجاد شود، حذف می شود.

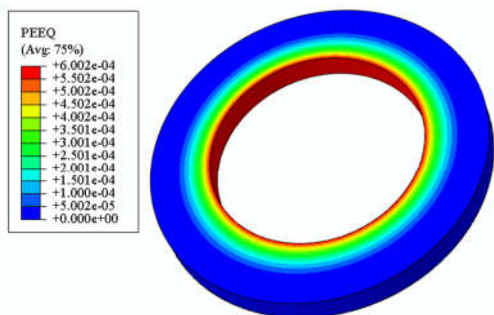
#### ۳-۲- رفتار الاستیک-پلاستیک سخت شونده نمونه

برای اجتناب از خطای حاصل از عدم در نظرگیری ماده به عنوان ماده الاستیک-پلاستیک سخت شونده نمودار تنش-کرنش نمونه با استفاده از آزمایش کشش به دست آمد و بعد از تبدیل آن به نمودار تنش-کرنش حقیقی و کم کردن تنش های الاستیک، تمام نقاط آن بدست آمده و به عنوان ورودی به آباکوس داده شد. با این رویکرد خطای ناشی از در نظر گرفتن خاصیت ماده به عنوان ماده پلاستیک کامل یا الاستیک-پلاستیک خطی<sup>۱</sup> رفع می شود.

به طور خلاصه در تحلیل فوق از عملگر استاتیک جنرال<sup>۲</sup>، اندازه مش ۰/۲ و نوع المان Hex-dominated استفاده شد. قابل ذکر است که نیروی محوری پیچها به صورت چهار نیروی متمرکز (۳۶/۳۷ کیلو نیوتن به ازای هر پیچ) در محل پیچها اعمال گردید. نیروی محوری پیچها از طریق تعادل نیروها در حین نشت روغن محاسبه گردید و

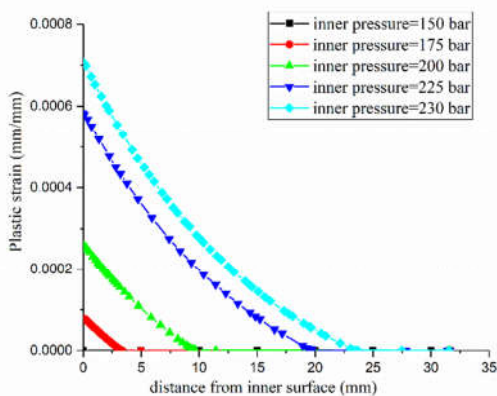
<sup>1</sup> Elastic-linear plastic

<sup>2</sup> Static general



شکل ۸- مدل المان محدود نمونه استوانه‌ای اتوفرتاژ شده و کرنش‌های پلاستیک معادل ایجاد شده در فشار اتوفرتاژ ۲۲۵ بار

همانطوری که در بخش‌های قبلی گفته شد، با اعمال فرایند اتوفرتاژ جداره داخلی نمونه دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود در حالی که جداره خارجی آن به صورت الاستیک باقی می‌ماند. در شکل ۹ منحنی‌های توزیع کرنش پلاستیک در جداره قطعه در پنج فشار مختلف نشان داده شده است. همانطوری که از این شکل مشاهده می‌شود، در فشار ۱۵۰ بار قطعه وارد منطقه پلاستیک نمی‌شود و مقادیر کرنش‌های پلاستیک در جداره آن برابر صفر می‌باشد. با افزایش فشار تا ۱۷۵ بار، جداره داخلی نمونه تا حدودی دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود و با افزایش بیشتر فشار داخلی، منطقه پلاستیک افزایش یافته و از مقدار منطقه الاستیک کاسته می‌شود.



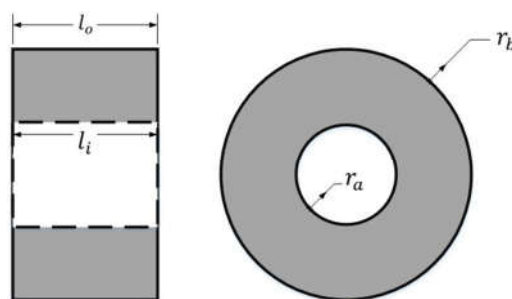
شکل ۹- اثرات فشار اتوفرتاژ بر روی کرنش پلاستیک

در جدول ۴ درصد اتوفرتاژ که به صورت ضخامت جداره وارد شده به منطقه پلاستیک به کل ضخامت جداره تعریف می‌شود، در فشارهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که در جدول زیر قابل مشاهده است، در فشار ۱۷۵ بار ۱۰٪ از جداره نمونه دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود، در صورتیکه که در فشار ۲۳۰ بار منطقه زیادی از جداره (۷۳/۵۵ درصد) دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود.

از نمونه تغییر شکل یافته حاکی از عدم بشکته‌ای شدن<sup>۱</sup> نمونه، علی‌رغم وجود اصطکاک می‌باشد. همانطور که از این جدول مشاهده می‌شود، طول نمونه در جداره خارجی ( $l_o$ ) حدود ۰/۰۷ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

جدول ۳- تغییرات ابعاد نمونه

Dimension	Experiment (before deformation)	Experiment (after deformation)	FEM
$r_a$	۴۳/۰۵	۴۳/۵	۴۳/۴۹۴۱
$r_b$	۷۴/۶۵	۷۴/۹۵	۷۴/۹۴۹۷
$l_i$	۳۰/۳۰	۳۰/۳۰	۳۰/۲۹۰۸
$l_o$	۳۰/۳۰	۳۰/۲۳	۳۰/۲۳۸۸

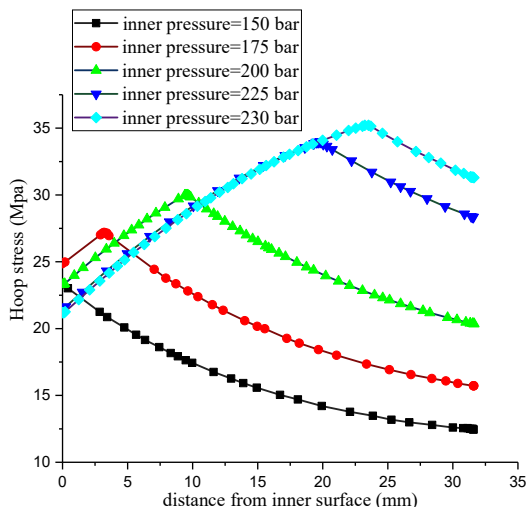


شکل ۷- نمونه استوانه‌ای اتوفرتاژ شده

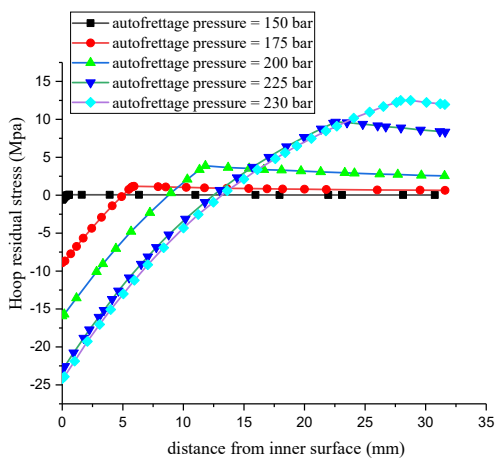
در شکل ۸ نتایج کرنش پلاستیک در نمونه‌ای که تحت فشار داخلی ۲۲۵ بار قرار دارد، نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در فشار داخلی ۲۲۵ بار کرنش پلاستیک در سطح خارجی نمونه صفر بوده در صورتی که جداره داخلی آن دچار تغییر شکل پلاستیک شده است.



<sup>۱</sup> Barreling



شکل ۱۰- اثرات فشار اتوفرتاژ بر روی تنش مماسی



شکل ۱۱- اثرات فشار اتوفرتاژ بر روی تنش پسماند مماسی

در صنعت بعد از ساخت مخازن و لوله‌ها، آن‌ها را تحت فشار بالا ( $P_{at}$  یا فشار اتوفرتاژ) اتوفرتاژ کرده و بعد از آن قطعه آماده بهره‌برداری در فشار کاری ( $P_w$ ) خواهد شد. به منظور بررسی اثرات فرایند اتوفرتاژ در حین عملکرد قطعه، منحنی‌های تنش فون میسر در امتداد جداره در فشار کاری ۱۴۰ بار در حالت‌های بدون اتوفرتاژ و با اتوفرتاژ در فشارهای مختلف در شکل ۱۲ رسم شده است. همانطوری که از این شکل قابل مشاهده است، در حالتی که نمونه اتوفرتاژ نشده باشد، بیشینه تنش فون میسر در جداره داخلی نمونه اتفاق می‌افتد. با اعمال اتوفرتاژ و با افزایش فشار داخلی نمونه بیشینه تنش فون-میسز کاهش پیدا می‌کند و بیشینه تنش فون میسر از جداره داخلی به سمت جداره خارجی نمونه حرکت می‌کند و باعث افزایش بارپذیری قطعه در حین عملکرد می‌شود. همچنین به علت ایجاد تنش‌های پسماند فشاری به وسیله فرایند اتوفرتاژ سرعت رشد ترک‌های خستگی کاهش می‌یابد. همانطور که از این منحنی‌های قابل مشاهده است، بیشینه تنش فون میسر در درصدهای پایین اتوفرتاژ زیاد بوده و با افزایش درصد اتوفرتاژ به یک مقدار تقریباً ثابتی میل می‌کند (در فشارهای ۲۰۰، ۲۲۵ و ۲۳۰

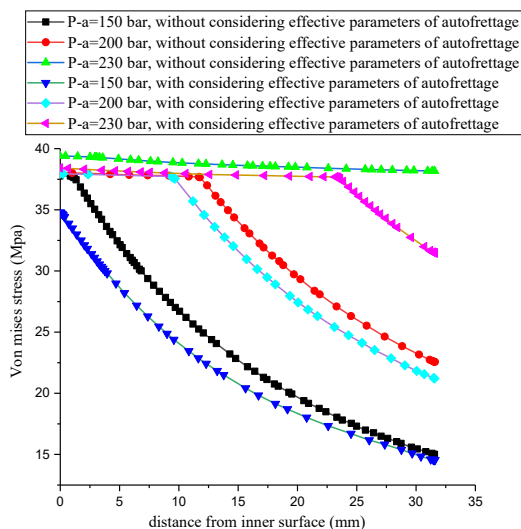
جدول ۴- تاثیرات فشار اتوفرتاژ بر روی درصد اتوفرتاژ

Autofrettage pressure (bar)	Autofrettage percentage (%)
۱۵۰	۰
۱۷۵	۱۰/۰۵
۲۰۰	۳۰/۱۰
۲۲۵	۶۲/۳۳
۲۳۰	۷۲/۵۵

در شکل ۱۰ نمودار تنش‌های مماسی در امتداد جداره نمونه (برحسب فاصله از جداره داخلی نمونه) نشان داده شده است. همانطوری که از این شکل مشاهده می‌شود، در شرایطی که نمونه دچار تغییر شکل پلاستیک نشده است (فشار ۱۵۰ بار، اتوفرتاژ نشده)، با افزایش فاصله از مرکز قطعه تنش مماسی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین در این فشار مقدار بیشینه تنش مماسی (موثرترین تنش در رشد ترک در مخازن) در جداره داخلی نمونه اتفاق می‌افتد و مقدار آن تقریباً برابر با ۲۲ مگاپاسکال می‌باشد. در اینجا این نکته قابل ذکر است که این مقدار تنش مماسی در جداره داخلی نمونه به علت تشکیل ترک در جداره داخلی مخازن بسیار خطرناک است. با افزایش فشار داخلی نمونه و در نتیجه با اعمال فرایند اتوفرتاژ بیشینه تنش مماسی از جداره داخلی نمونه دور شده و به قسمت‌های میانی جداره منتقل می‌شود. به این ترتیب با افزایش درصد اتوفرتاژ بیشینه تنش مماسی به جداره خارجی نمونه نزدیک می‌شود و این امر باعث کاهش سرعت رشد ترک‌های داخلی نمونه می‌شود.

در شکل ۱۱ نمودار تنش پسماند مماسی در فشارهای اتوفرتاژ مختلف ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵ و ۲۳۰ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود بعد از اعمال فرایند اتوفرتاژ، در جداره داخلی نمونه تنش پسماند فشاری و در جداره خارجی تنش پسماند کششی ایجاد می‌شود. قابل ذکر است که علت کاهش تنش مماسی در سطح داخلی نمونه حین افزایش فشار داخلی، قانون خود تعادلی تنش-های پسماند می‌باشد. به این صورت که انتگرال تنش پسماند در هر سطح مقطعی برابر با صفر می‌باشد و چون با افزایش فشار داخلی، تنش‌های پسماند کششی در سطح خارجی لوله زیاد می‌گردد به همین دلیل برای تعادل تنش پسماند، تنش‌های پسماند فشاری (تنش مماسی در سطح داخلی) در سطح داخلی نمونه کاهش پیدا می‌کند.

با در نظرگیری این پارامترها قسمت زیادی از جداره خارجی نمونه وارد منطقه پلاستیک نمی‌شود.



شکل ۱۳- اثر پارامترهای موثر در فرایند اتوفرتاژ (نیروی محوری، اصطکاک و رفتار الاستیک-پلاستیک سخت شونده ماده) بر روی تنش فون میسز

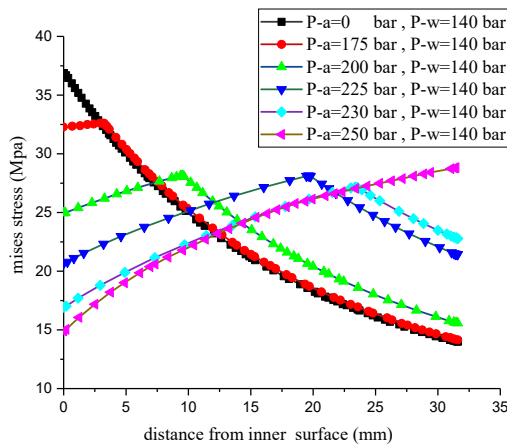
جدول ۶- اثر پارامترهای موثر در فرایند اتوفرتاژ بر روی تنش فون میسز

Inner Pressure (bar)	Autofrettage percentage (with effective parameters)	Autofrettage percentage (without effective parameters)	Error percentage (%)
۱۵۰	۰	۲/۶۶	-
۱۷۵	۱۰/۱	۲۰/۸	۵۱/۲
۲۰۰	۲۹/۶	۳۶/۹	۱۹/۸
۲۲۵	۶۱/۶	۷۱/۵	۱۴
۲۳۰	۷۳/۹	۱۰۰	۲۶/۱

### ۵- نتیجه‌گیری

اتوفرتاژ فرایندی است که برای افزایش بارپذیری مخازن و لوله‌های جدار ضخیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش مجموعه اتوفرتاژ هیدرولیکی ساخته شد و سپس نمونه‌ها در فشارهای مختلف تحت فرایند اتوفرتاژ قرار گرفت. برای ارزیابی رفتار نمونه‌ها تحت فرایند اتوفرتاژ، نمونه‌ها در نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی شد و برای ارزیابی صحت داده‌های حاصل از روش المان محدود از کرنش‌سنج نصب شده بر روی نمونه‌ها در راستای مماسی و هم‌چنین تغییرات ابعاد نمونه‌ها بعد از فرایند اتوفرتاژ استفاده شد. در مدل‌سازی المان محدود نمونه‌ها تمامی عوامل ایجاد خطا همانند اصطکاک بین صفحات و نمونه‌ها، رفتار الاستیک-پلاستیک سخت شونده نمونه‌ها و اندازه مش دقیق لحاظ گردید به طوری که نتایج حاصل از روش المان محدود و کرنش‌سنج در فشارهای اتوفرتاژ مختلف تطابق بسیار خوبی نسبت به هم پیدا کردند. نتایج حاصل از المان محدود بیانگر وجود یک درصد اتوفرتاژ بهینه در هر فشار کاری می‌باشد. هم‌چنین ملاحظه گردید که با اعمال درصد

بار بیشینه تنش فون میسز تقریباً ثابت و برابر با ۲۶ MPa است). با افزایش فشار (تا فشار ۲۵۰ بار) و در نتیجه در درصدهای اتوفرتاژ بالاتر از مقادیر ذکر شده، بیشینه تنش فون میسز روندی افزایشی پیدا می‌کند. بنابراین، نکات گفته شده بیانگر وجود یک فشار اتوفرتاژ بهینه برای هر فشار کاری می‌باشد.



شکل ۱۲- اثرات فشار اتوفرتاژ بر روی تنش فون-میسز در فشار کاری ثابت

در جدول ۵ درصد کاهش بیشینه تنش فون میسز بر حسب درصد اتوفرتاژ مختلف در فشار کاری ۱۴۰ بار نشان داده شده است. همانطور که از این جدول قابل مشاهده است، با اعمال درصدهای اتوفرتاژ ۳۰٪ و ۷۴/۲۶٪ تنش‌های فون میسز به ترتیب ۲۳/۷۱٪ و ۲۶/۳۸٪ کاهش می‌یابند.

جدول ۵- اثر نسبت اتوفرتاژ بر بیشینه تنش فون - میسز

Autofrettage percentage (%)	Maximum Von Mises stress reduction percentage (%)
۰	۰
۱۰/۱۸۲	۱۱/۶۴۸
۳۰/۰۴۰	۲۳/۷۱
۶۲/۳۱	۲۳/۷۵۶
۷۴/۲۶۵	۲۶/۳۸۱
۱۰۰	۲۱/۸۶۹

در شکل ۱۳ و جدول ۶ اثرات در نظر گرفتن و عدم در نظرگیری پارامترهای موثر بر فرایند اتوفرتاژ (نظیر اصطکاک و نیروی محوری) بر روی درصد اتوفرتاژ نشان داده شده است. قابل ذکر است که نیروی محوری از طریق تعادل نیروها در حین نشت روغن محاسبه گردید و نشت روغن در تمام آزمایشات در فشار اندکی بالاتر از ۲۵۰ بار رخ می‌داد. همانطور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، عدم در نظرگیری پارامترهای موثر بر فرایند اتوفرتاژ باعث ایجاد خطایی برابر ۵۱/۲٪ می‌شود. هم‌چنین همانطور که از شکل ۱۲ قابل مشاهده است در صورت در نظر نگرفتن پارامترهای موثر بر فرایند اتوفرتاژ در فشار ۲۳۰ بار، کل جداره نمونه دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود، در صورتیکه



- [7] Sedighi M., Jabbari A., Investigation of Residual Stresses in Thick-walled Vessels with Combination of Autofrettage and Wire-winding. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 111, pp. 295-301, 2013.
- [8] Brünnet H., Lyubenova N., Müller M., Hoffmann J. E., Bähre D., Verification and Application of a New 3D Finite Element Approach to Model the Residual Stress Depth Profile after Autofrettage and Consecutive Reaming. *Procedia CIRP*, Vol. 13, pp. 72-77, 2014.
- [9] Benghalia G., Wood J., Autofrettage of Weld Clad Components. *Procedia Engineering*, Vol. 130, No. 2015, pp. 453-465, 2015.
- [10] Zare H., Darijani H., A Novel Autofrettage Method for Strengthening and Design of Thick-walled Cylinders. *Materials & Design*, Vol. 105, pp. 366-374, 2016.
- [11] Zare H., Darijani H., Strengthening and Design of the Linear Hardening Thick-walled Cylinders Using the New Method of Rotational Autofrettage. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 124, pp. 1-8, 2017.
- [12] Molaie M., Darijani H., Bahreman M., Hosseini S., Autofrettage of Nonlinear Strain-hardening Cylinders Using the Proposed Analytical Solution for Stresses. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 141, pp. 450-460, 2018.
- [13] Beghini M., Loffredo M., Monelli B. D., Bagattini A., Residual Stress Measurements in an Autofrettagged Cylinder through the Initial Strain Distribution Method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 168, pp. 87-93, 2018.
- [14] Ghajar R., Saeidi Googarchin H., Investigation of Pressure Gradient Effect on Stress Intensity Factor Variations in Autofrettagged Cracked Thick-walled Tubes Using two Dimensional Weight Function Method. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 137-145, 2014.
- [15] Seifi R., Dejam A., Study the Effect of Autofrettaging of Functionally Graded Cylinder on the Surface Crack Parameters Using Numerical Discretizing of Stress Fields. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 255-264, 2015.
- [16] Seifi R., Hakimi H., Evaluation of Fatigue Crack Growth due to Bending on the Autofrettagged Cylinders with External crack. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 35-44, 2017.
- [17] Sedighi M., Jabbari A., Razeghi A., Effective Parameters on Fatigue Life of Wire-wound Autofrettagged Pressure Vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 149, pp. 66-74, 2017.
- [18] Perl M., Saley T., Swage and Hydraulic Autofrettage Impact on Fracture Endurance and Fatigue Life of an Internally Cracked Smooth Gun Barrel Part II-The Combined Effect of Pressure and Overstraining. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 182, pp. 386-399, 2017.
- [19] Perry J., Perl M., Shneck R., Haroush S., The Influence of the Bauschinger Effect on the Yield Stress, Young's Modulus, and Poisson's Ratio of a Gun Barrel Steel. *Journal of pressure vessel technology*, Vol. 128, No. 2, pp. 179-184, 2006.

اتوفرتاژ مناسب می‌توان مقادیر بیشینه تنش فون-میسز در نمونه‌ها را ۲۶/۳۸٪ کاهش داد. با اعمال فرایند اتوفرتاژ علاوه بر کاهش مقدار بیشینه تنش‌ها، می‌توان بیشینه مقدار آن‌ها را به سمت جداره خارجی قطعه انتقال داد و این نکته از جهت اینکه اکثر ترک‌های خستگی در جداره داخلی قطعه تشکیل می‌شوند بسیار حائز اهمیت می‌باشد. نتایج حاصل از روش المان محدود نشان می‌دهد که عدم در نظرگیری پارامترهای موثر در فرایند اتوفرتاژ (ضریب اصطکاک و نیروی محوری) می‌تواند موجب ایجاد خطای زیادی در درصد اتوفرتاژ گردد. بررسی نمونه اتوفرتاژ شده در فشار ۲۵۰ بار نشان می‌دهد که قطر داخلی و خارجی نمونه به ترتیب ۰/۹ و ۰/۶ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند. همچنین طول جداره داخلی نمونه ثابت می‌ماند، در حالی که طول جداره خارجی در حدود ۰/۰۷ میلی‌متر کاهش پیدا می‌کند.

## ۶- سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم تا از دست اندرکاران کارگاه ماشین افزار دانشگاه صنعتی امیرکبیر بویژه آقای مهندس مهدوی در طول این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را بنماییم.

## ۷- نمادها

فشار کاری	$P_w$
فشار اتوفرتاژ	$P_{at}$
شعاع داخلی نمونه	$r_a$
شعاع خارجی نمونه	$r_b$
طول نمونه در جداره داخلی	$l_i$
طول نمونه در جداره خارجی	$l_o$
شعاع فصل مشترک منطقه الاستیک-پلاستیک	$r_c$

## ۸- مراجع

- [1] Alegre J., Bravo P., Cuesta I., Fatigue Design of Wire-wound Pressure Vessels Using ASME-API 579 Procedure. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 17, No. 4, pp. 748-759, 2010.
- [2] Zhao M., Wu Z., Cai H., Stress Analyses of Compound Cylinders with Interlayer Pressure after Autofrettage. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 163, pp. 63-67, 2018.
- [3] Perl M., Saley T., Swage and Hydraulic Autofrettage Impact on Fracture Endurance and Fatigue Life of an Internally Cracked Smooth Gun Barrel Part I-The Effect of Overstraining. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 182, pp. 372-385, 2017.
- [4] Loffredo M., Measurement and Modelling of Bauschinger Effect for Low-level Plastic Strains on AISI 4140 Steel. *Procedia Structural Integrity*, Vol. 8, pp. 265-275, 2018.
- [5] Nickel J., Baak N., Biermann D., Walther F., Influence of the Deep Hole Drilling Process and Sulphur Content on the Fatigue Strength of AISI 4140 Steel Components. *Procedia CIRP*, Vol. 71, pp. 209-214, 2018.
- [6] Farrahi G., Voyiadjis G. Z., Hoseini S., Hosseini E., Residual Stress Analyses of Re-autofrettagged Thick-walled Tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 98, pp. 57-64, 2012.