

ارزیابی پروفیل مناسب در آزمایش بادکردگی آزاد لوله فولاد ضد زنگ ۳۱۶ جهت تعیین خواص مواد لوله‌ای

بهزاد فتوتی^۱، عبدالرحمان جامی‌الاحمدی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، behzad.fotovvati@stu.um.ac.ir

۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، jaami-a@um.ac.ir

Evaluating a proper profile in free hydraulic bulging test on stainless steel type 316 for determination the tubular material properties

B. Fotovvati¹, A. Jaamialahmadi²

1- Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, E-Mail: behzad.fotovvati@stu.um.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, E-Mail: jaami-a@um.ac.ir

چکیده

هدف این مقاله ارزیابی خواص مواد لوله‌ای با استفاده از آزمایش هیدرولیکی بادکردگی آزاد لوله به همراه روشی تحلیلی است. برای انجام آزمایشات دستگاهی ساخته شد و پنج قطعه لوله از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ مورد آزمون قرار گرفتند فشار داخلی، کمترین ضخامت لوله در ناحیه‌ی بادکردگی و بیشترین ارتفاع بادکردگی برای هر پنج نمونه اندازه‌گیری شدند. با تخمین پروفیل بادکردگی به وسیله‌ی اس پی لاین* و محاسبه‌ی شعاع انحنا این پروفیل، و داشتن کمیت‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش، برای هر نمونه‌ی آزمایش یک تنش موثر و کرنش موثر متناظر آن تعیین شدند. با استفاده از روش کمترین مربعات و رابطه‌ی تنش-کرنش لودویک** پارامترهای مجهول این رابطه و در نتیجه رابطه‌ی تنش-کرنش ماده لوله‌ای فولاد ضد زنگ ۳۱۶ به دست می‌آید. برای مقایسه با نتایج آزمون بادکردگی بر روی نمونه‌های بریده شده از جهت طولی لوله، آزمایش تست کشش انجام گردید. با استفاده از رفتار مکانیکی ماده‌ی لوله‌ای که از آزمایش بادکردگی لوله به دست آمد، شبیه‌سازی این آزمایش در آباکوس انجام شد و از نتایج آن برای صحت‌گذاری بر نتایج تجربی استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش ارائه شده در این مقاله برای به دست آوردن رفتار مکانیکی مواد لوله‌ای از دقت بالایی برخوردار است. واژه‌های کلیدی: آزمایش بادکردگی لوله، خواص مواد لوله‌ای، پروفیل بادکردگی آزاد، اس پی لاین

Abstract

This paper aims to evaluate the properties of tubular materials by hydraulic bulge tests combined with an analytical model. A setup is built for these tests and stainless steel type 316 tubes are used as specimens. Five specimens are tested in five different internal pressures and the tube thickness and bulge height are measured at the pole for each tube. A digitizer is used to measure the profile of the free bulge region and the result profiles are estimated by using Spline for each specimen. Using this profile and calculating its radius of curvature, and from above experimental data, one effective stress and effective strain can be derived for each specimen by the analytical method. Using these data points and the least square method, the constants of the effective stress-effective strain relation based on Ludwik equation for stainless steel type 316 tubular materials can be achieved. The flow stresses of the tubular materials by this approach are compared with those obtained by the tensile test. The samples are cut from the same tube used in bulge test. The finite element simulation of hydraulic bulge forming is carried out, using mechanical behavior of tubular materials and flow stresses obtained by the above-mentioned approach. The simulation results of forming pressures versus bulge heights and pole thicknesses are compared with the experimental results to validate the approach proposed in this paper.

Keywords: Hydraulic bulging test, Tubular material properties, Free bulging profile, Spline

* Spline

** Ludwik

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

در کرنش‌های پلاستیک به ۷۰٪ می‌رسد [۱۳ و ۱۴]. بنابراین برای استخراج خواصی که قابل اطمینان باشند آزمایشی باید ترتیب داده شود که شرایط کشش دو محوری را روی مواد لوله‌ای شبیه‌سازی کند. برای این منظور از تست بادکردگی استفاده می‌شود.

تا کنون روش‌ها و دستگاه‌های مختلفی برای انجام این آزمایش، و به دست آوردن منحنی تنش-کرنش مواد لوله‌ای، یا صفحه‌های فلزی تحت بارگذاری دو محوری، به کار گرفته شده است. در تمام آزمایش‌ها چهار نوع شرایط تکیه‌گاهی، شامل انتها آزاد [۱۲ و ۱۸]، انتها بسته [۶]، انتها ثابت [۳ و ۹ و ۱۱ و ۱۷] و با اعمال نیرو در دو انتها [۱۴ و ۱۵]، برای انتهای لوله در نظر گرفته شده است. از میان تمام این شرایط مرزی، حالت انتها ثابت بهترین روابط را برای تنش-کرنش ماده نتیجه داده است [۸]. با این وجود، رابطه‌ی مشخصی به طور مستقیم برای مولفه‌های تنش در این نوع آزمون ارائه نشده است و معمولاً از تقریب استفاده می‌شود [۳ و ۹ و ۱۱ و ۱۴ و ۱۵].

برای محاسبه‌ی مولفه‌های تنش و کرنش شعاع انحنای بادکردگی در راستای محیطی و طولی لوله مورد نیاز هستند. تا کنون فرض‌هایی برای پروفیل بادکردگی لوله در نظر گرفته شده است. پژوهشگران این پروفیل را کمانی از دایره [۶]، یا قسمتی از بیضی [۱۰] در نظر گرفته‌اند و یا پروفیل آن را با استفاده از منحنی‌های دیگر تخمین زده‌اند [۱۶].

در این مقاله، پروفیل بادکردگی لوله با منحنی اسپیرالین تقریب زده شده است که با نتایج تجربی همخوانی بسیار خوبی دارد. شرایط مرزی دو انتهای لوله ثابت در نظر گرفته شده است. آزمایش بادکردگی نیز روی لوله‌های فولاد ضد زنگ ۳۱۶ انجام شد و این آزمایش با نرم افزار المان محدود آباکوس^۲ شبیه‌سازی گردید. همچنین، خواص مکانیکی ماده تشکیل دهنده لوله با تهیه نمونه‌هایی در راستای طولی لوله و انجام آزمایش کشش ساده بر روی آن‌ها، تعیین گردید.

مواد و روش تحقیق

نمای شماتیک پروفیل لوله، قبل و بعد از بادکردگی در شکل ۱ نشان داده شده است.

به دلیل ضخامت کم لوله نسبت به شعاع آن، فرض می‌شود تنش در راستای ضخامت برابر صفر است. با این فرض رابطه‌ی تعادل را برای المان نشان داده شده در شکل ۲ می‌توان به صورت

$$\frac{\sigma_{\varphi}}{\rho_{\varphi}} + \frac{\sigma_{\theta}}{\rho_{\theta}} = \frac{P_i}{t_p} \quad (۱)$$

در رابطه‌ی ۱، P_i فشار داخلی، t_p ضخامت لوله در نقطه‌ی P

فرآیندهای هیدروفرمینگ در سال‌های اخیر، به خاطر نیاز بیشتر به قطعات سبک در بسیاری از زمینه‌ها مثل صنعت هواپیمایی، وسایل نقلیه، صنایع بهداشتی و ... بسیار پرکاربرد شده‌اند [۵ و ۶]. این تکنولوژی در مقایسه با نورد، مهرش^۱ و سایر فرآیندهای شکل‌دهی، نسبتاً جدید به شمار می‌آید. بنابراین اطلاعات زیادی برای کمک به طراحان در این زمینه وجود ندارد. هیدروفرمینگ لوله‌ها، مزیت‌های زیادی نسبت به روش‌های مرسوم شکل‌دهی فلزات دارد، از جمله: ۱- کاهش نسبی در هزینه‌های تولید و وزن قطعات؛ ۲- ارتقاء پایداری سازه‌ای و افزایش مقاومت و سختی قطعات شکل‌دهی شده؛ ۳- یکنواختی بیشتر در ضخامت قطعات؛ ۴- نیاز کمتر به عملیات ثانویه و غیره. با این وجود این فناوری معایبی هم دارد، مانند بازه‌ی زمانی طولانی تولید، تجهیزات گران قیمت و نبودن پایگاه اطلاعاتی برای طراحی ابزار و فرآیندها [۷ و ۸]. طی دهه‌های گذشته هیدروفرمینگ لوله، مخصوصاً لوله‌های فولادی، کاربرد وسیعی در صنعت پیدا کرده است. در بین فولادهای ضد زنگ، فولاد ضد زنگ ۳۱۶ دارای مقاومت بیشتری نسبت به خوردگی است. این نوع فولاد فاقد خاصیت مغناطیسی است. کاربرد این فولاد بیشتر در مواقعی است که نیاز به جوشکاری‌های گسترده وجود دارد. از فولاد ضد زنگ ۳۱۶ در صنایعی همچون صنایع غذایی، هسته‌ای، پزشکی و دارویی، نفت و گاز، مخازن تحت فشار و ... استفاده می‌شود. لوله‌های ساخته شده از این نوع فولاد در کاربردهای تحت فشاری که امکان خوردگی لوله وجود داشته باشد، از جمله فرآیندهای اسیدی، تجهیزات تصفیه‌ی زباله و کاربردهای دریایی که با آب شور سر و کار دارند، استفاده می‌شود. این لوله کاربردهای ساختمانی نیز دارد مانند نرده‌ها و تجهیزات حفاظتی. بخاطر سادگی آزمایش کشش یک محوره، این آزمایش برای به دست آوردن خواص مکانیکی مواد کاربرد بسیاری دارد. با این وجود استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمون کشش یک محوره، ممکن است نتایج اشتباهی را، در فرآیندهای هیدروفرمینگ لوله‌ای که ورق از آن تهیه شده، به دست دهد. این اختلاف در نتایج بیان‌گر تغییر در خواص ماده است که این تغییر خواص به خاطر فرآیندهایی است که روی ورق تخت انجام می‌شود تا آن را به لوله تبدیل کند. همچنین حالت تنش، ناهمسانگردی، خطاهای آزمایش، شرایط دمایی و غیره، اختلاف نتایج تست کشش یک محوره با تنش جاری در مواد لوله‌ای را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر بیشترین کرنش قابل دستیابی در آزمایش کشش یک محوره ۳۰٪ گزارش شده است، در حالی که این رقم در آزمایش با حالت تنش دو محوره

جدول ۱ - ابعاد لوله و قالب

پارامتر	مقدار (mm)
طول لوله (L)	۱۲۰
قطر خارجی لوله (D_o)	۵۲/۲
ضخامت اولیه لوله (t_0)	۱/۴۵
شعاع فیلِت قالب (R_f)	۱۵
طول دهانه قالب	۳۰

روند انجام آزمایش

لوله‌های مورد آزمایش از جنس استیل ۳۱۶ در ابعاد مشخصی، که در جدول ۱ آمده است، تهیه شدند و از روغن هیدرولیک به عنوان سیال برای ایجاد فشار استفاده گردید.

در ابتدا آزمایش‌هایی برای تعیین دو فشار بحرانی، یعنی فشار تا مرحله تسلیم و شروع تغییر شکل و فشاری که در آن ترکیدگی اتفاق می‌افتد، انجام شد. با افزایش فشار تا ۲۰ MPa تغییر شکلی در لوله مشاهده نگردید، و در فشار ۳۰ MPa در لوله ترکیدگی رخ داد. ۵ نمونه‌ی آزمایش در ۵ فشار مختلف بین این دو فشار بحرانی مورد آزمایش قرار گرفتند و پروفیل آن‌ها برای به دست آوردن مجهولات K و n و σ_0 توسط دستگاه دیجیتالیزر اندازه‌گیری شدند. مختصات چند نقطه از هر پروفیل انتخاب شدند و یک اس‌پی‌لاین از آن‌ها عبور داده شد. با استفاده از مختصات منحنی در نقطه‌ای که بیشترین بادکردگی را دارد شعاع انحنا به دست آمد. بنابراین با داشتن چهار مجهول فشار داخلی (P_i)، ضخامت لوله (t)، شعاع لوله در قسمت بیشترین بادکردگی (ρ_{op}) و شعاع در جهت طولی (ρ_θ)، می‌توان تنش موثر و کرنش موثر مربوط به هر فشار را تعیین و منحنی تنش-کرنش را با استفاده از روش کمترین مربعات به دست آورد.

پس از ثبت پروفیل نمونه‌های آزمایش در هر فشار، هر لوله در راستای طولی برش داده شد و کمترین ضخامت آن اندازه‌گیری گردید. برای رسیدن به دقت بالاتر در فرآیند برش از دستگاه برش با سیم استفاده شد. شکل ۵ دستگاه دیجیتالیزر را در حال اندازه‌گیری پروفیل داخلی و خارجی لوله‌ی برش خورده نشان می‌دهد.

برای مقایسه نتایج با آزمون کشش ساده، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نمونه‌هایی از لوله بریده و مورد آزمون قرار گرفتند. بدیهی است که خواص ماده ورق‌ی که لوله از آن ساخته

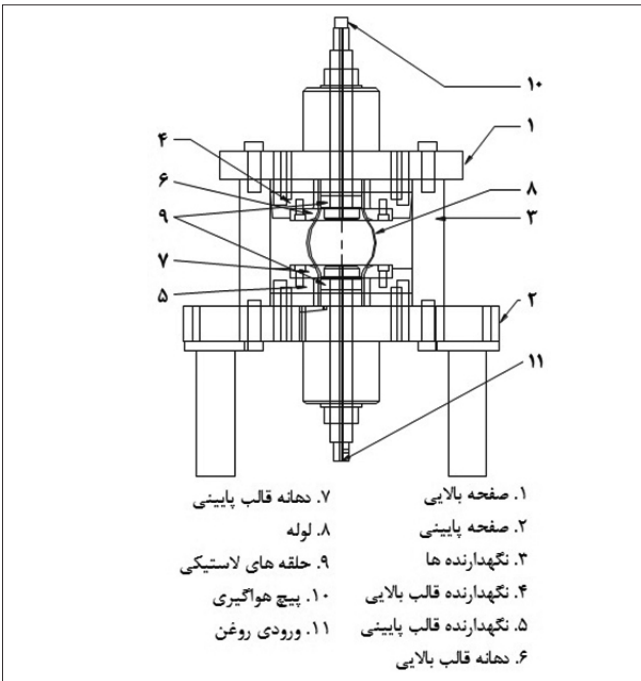
داده شد که معادله‌ی منحنی هر کدام از بازه‌ها را می‌توان با $y(x)$ نشان داد. با گرفتن مشتق اول و دوم از معادله‌ی منحنی شامل نقطه‌ی P و قرار دادن در رابطه‌ی زیر می‌توان شعاع در جهت طولی در نقطه‌ی P را برای هر فشار محاسبه کرد.

$$\rho_\theta = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (10)$$

اکنون با بکارگیری معادلات (۲) تا (۸)، برای هر فشار داخلی، یک تنش موثر و کرنش موثر محاسبه می‌شود. در نهایت، این جفت داده‌ها در صفحه‌ی محورهای تنش-کرنش رسم شده و با استفاده از روش کمترین مربعات، یک منحنی بر روی این نقاط تطبیق داده می‌شود. به این صورت پارامترهای K و n و σ_0 برای ماده‌ی مورد آزمایش به دست می‌آیند. در آخر برای بررسی صحت این روش، نتایج، با نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود مقایسه شده‌اند.

دستگاه آزمایش

یک دستگاه آزمایش بر اساس دستگاهی که در مرجع [۱۷] بکار گرفته شده است، ساخته شد و برای انجام آزمایش‌ها از آن استفاده گردید (شکل ۳). این دستگاه شامل دو بخش اصلی است: پکیج هیدرولیک، که شامل پمپ هیدرولیک، موتور الکتریکی و درجه‌ی تنظیم فشار است، و بخش دیگر تجهیزات نگهدارنده لوله است. حداکثر فشار کاری دستگاه ۷۰ MPa است که برای آزمایش لوله‌های فولادی و مسی و آلومینیومی با ابعاد استفاده شده در این آزمایش کافی است. شکل شماتیک قسمتی که لوله در آن قرار می‌گیرد در شکل ۴ نشان داده شده است. صفحات بالایی و پایینی به وسیله‌ی نگهدارنده‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند. دو نگهدارنده‌ی قالب که به صفحه‌های بالایی و پایینی متصل شده‌اند، دو دهانه‌ی قالب، که از بالا و پایین لوله در آن‌ها قرار می‌گیرد، را نگه می‌دارند. با این روش، با عوض کردن فلنج‌های دهانه‌های قالب، آزمایش بر روی لوله‌های با قطرهای متفاوت ممکن خواهد بود. داخل قسمتی از لوله که با قالب در تماس است، دو حلقه‌ی لاستیکی قرار گرفته است که با سفت کردن مهره‌های تعبیه شده در بالا و پایین باعث آب بندی و محکم کردن لوله در داخل قالب می‌شود. یک فشار سنج دیفرانسیلی در خروجی پمپ نصب شده است که با استفاده از آن می‌توان حداکثر فشار را به دلخواه تنظیم کرد. هم‌چنین، این نوع فشار سنج در صورت ترکیدن لوله بیشترین فشار وارد شده را ثبت می‌کند. پس از اتمام آزمایش، پروفیل لوله‌های باد کرده توسط دستگاه دیجیتالیزر اندازه‌گیری و ثبت گردید. لازم به ذکر است که برای کم کردن خطای احتمالی به سبب عدم تقارن محوری ناحیه‌ی بادکردگی، پروفیل از دو ناحیه از لوله ثبت و میانگین نتایج در نظر گرفته شد.



شکل ۴- دستگاه آزمایش بادکردگی آزاد لوله

به دلیل ضخامت کم لوله و تغییرات ناچیز پارامترها در راستای ضخامت، این قطعه پوسته^۱ و دو قطعه قالب جسم صلب^۲ در نظر گرفته شد. به جهت انجام عمل حساسیت به اندازه مش، نتایج شبیه سازی با مش های به اندازه های مختلف، مورد بررسی قرار گرفتند و اندازه ی مش بهینه برای این مدل ۱/۷۵ میلیمتر به دست آمد. ضریب اصطکاک بین لوله و قالب ۰/۰۶ در نظر گرفته شد [۱۷]. در نرم افزار، خواص ماده ای که با استفاده از آزمایش بادکردگی آزاد لوله به دست آمده است، برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفت.

شرایط تکیه گاهی لوله به صورت دو سر ثابت در نظر گرفته شد و بار به صورت فشار یکنواخت به داخل لوله اعمال گردید.

نتایج و بحث

داده های آزمایش بادکردگی آزاد لوله، شامل بیشترین قطر لوله و ضخامت آن در محل بادکردگی در ۵ فشار مختلف ثبت شد. جدول ۲ این داده ها را به ازاء هر فشار داخلی اعمال شده نشان می دهد. قطر اولیه ی لوله ۵۲/۲ میلیمتر و ضخامت اولیه ی آن ۱/۴۵ میلیمتر می باشد.

در جدول ۳ بیشترین ارتفاع بادکردگی و کمترین ضخامت لوله که از آزمایش به دست آمده اند، با نتایج حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود، در هر فشار مقایسه شده اند.



شکل ۳- نمای شماتیک دستگاه آزمایش



شکل ۵ دستگاه دیجیتالیزر در حال اندازه گیری پروفیل لوله

شده با خواص ماده ی لوله در آزمون کشش ساده به سبب تاثیر اثرات کار سرد ناشی از فرآیندهای شکل دهی لوله با هم متفاوت خواهد بود. لذا تهیه نمونه آزمون کشش از لوله مطابق آنچه ذکر شد، سبب حذف تاثیر عملیات شکل دهی روی ورق که به شکل لوله درآمده است، می گردد. در نتیجه، اختلاف نتایج تست کشش با تست بادکردگی می تواند عمدتاً ناشی از حالت تنش اعمالی (یک محوره یا دو محوره) روی ماده باشد.

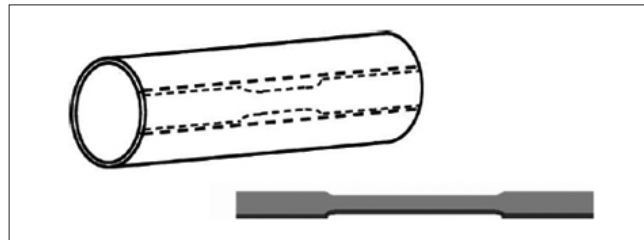
شبیه سازی المان محدود

برای تحقیق درستی نتایج تجربی، فرآیند آزمایش بادکردگی آزاد لوله با شرایطی مشابه شرایط واقعی، شبیه سازی شد. برای شبیه سازی از نرم افزار آباکوس استفاده گردید. هندسه ی لوله ی مدل شده در نرم افزار به همراه لبه های قالب بالایی و پایینی در شکل ۷ نشان داده شده است.

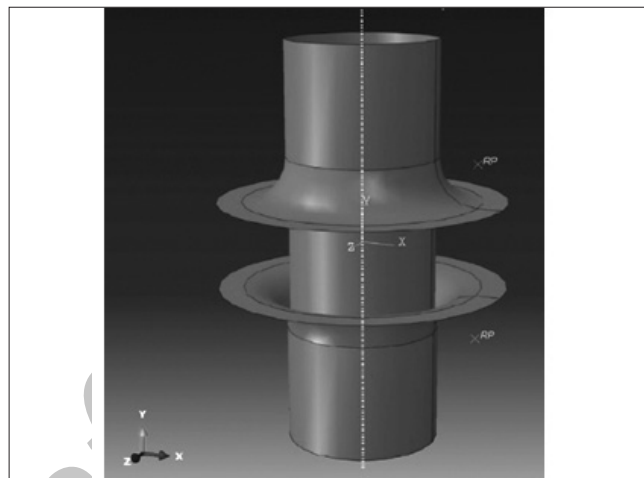
6- Shell
7- Rigid Body



شکل ۸- لوله‌ی آزمایش شده در فشار ۳۰ MPa



شکل ۶- نمونه‌ی آزمایش کشش بریده شده از لوله [۱۰]



شکل ۷- مدل طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس

جدول ۲- داده‌های برداشت شده از آزمایش در فشارهای مختلف

فشار داخلی (MPa)	بیشترین قطر لوله (mm)	ارتفاع برآمدگی (mm)	کمترین ضخامت لوله (mm)
۲۲/۵	۵۶/۳۷	۲/۰۷	۱/۳۸
۲۵	۵۷/۳۳	۲/۵۵	۱/۳۴
۲۷/۵	۶۰/۶۱	۴/۱۹	۱/۲۴
۳۰	۶۲/۹۷	۵/۳۷	۱/۲۰
۳۲/۵	۶۴/۱۲	۵/۹۵	۱/۱۸

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج آزمایش و شبیه‌سازی اجزاء محدود

فشار داخلی (MPa)	ارتفاع برآمدگی (mm)		کمترین ضخامت لوله (mm)	
	آزمایش	شبیه‌سازی	آزمایش	شبیه‌سازی
۲۲/۵	۲/۰۷	۲/۱۵۲	۱/۳۸	۱/۳۸۲
۲۵	۲/۵۵	۲/۴۶۳	۱/۳۴	۱/۳۶۵
۲۷/۵	۴/۱۹	۳/۸۴۲	۱/۲۴	۱/۲۹۰
۳۰	۵/۳۷	۵/۳۱۴	۱/۲۰	۱/۲۱۳
۳۲/۵	۵/۹۵	۶/۰۵۰	۱/۱۸	۱/۱۷۳

پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه‌ی تنش و کرنش متناظر با هر فشار داخلی به دست می‌آیند که با قرار دادن آن‌ها در روابط ۲ تا ۹، به ازای هر فشار یک نقطه از منحنی تنش-کرنش نتیجه می‌شود. شکل ۱۱ این نقاط را در صفحه‌ی مختصات تنش و کرنش به همراه یک منحنی که با روش تئوری تقریب باکمترین مربعات از آن‌ها عبور داده شده است را نشان می‌دهد.

رفتار تنش-کرنش مورد نظر ماده در روش تقریب، مبتنی بر معادله‌ی لودویک فرض شد، و پارامترهای مجهول (رابطه‌ی ۹) شامل n ، K و σ_0 به دست آمدند. این مقادیر برای آزمایش بادکردگی لوله و آزمایش شبیه‌سازی شده در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند.

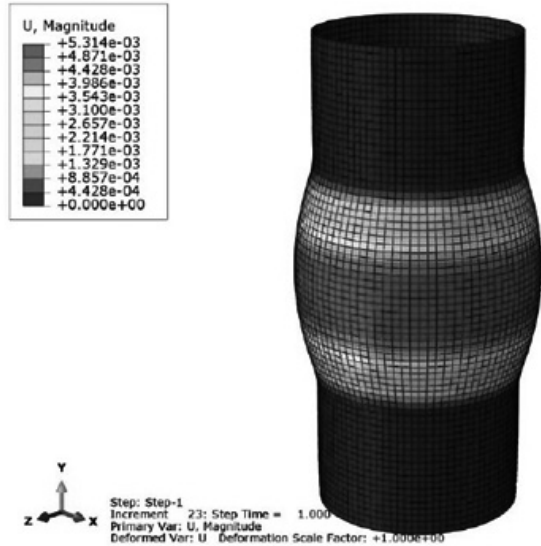
در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که منحنی به دست آمده از

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی هم‌پوشانی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارند.

شکل ۸ لوله‌ی شکل داده شده در آزمایش بادکردگی و شکل ۹ همان نمونه را به صورت شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد. این لوله، نمونه‌ای است که تحت فشار ۳۰ MPa مورد آزمایش قرار گرفت.

با داشتن لوله‌ی هیدروفرم شده و اندازه‌گیری مختصات چند نقطه بر روی آن، یک منحنی اسپری لاین از آن‌ها عبور داده شد. در شکل ۱۰ اسپری لاین گذرنده از نقاط به دست آمده از آزمایش و نقاط متناظر آنها از شبیه‌سازی در دو فشار متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

با استفاده از معادله‌ی منحنی اسپری لاین و رابطه‌ی ۱۰



شکل ۹- لوله‌ی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس تحت فشار ۲۰ MPa

مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمون، مشاهده می‌شود که برای شرایط انتخابی، شبیه‌سازی اجزاء محدود نتایج قابل قبولی را ارائه داده است.

در شکل ۱۲ از نزدیکی مقادیر به دست آمده برای پارامترهای n ، K و σ_0 ، برای آزمون بادکردگی لوله و شبیه‌سازی اجزاء محدود، صحت این رفتار برای ماده‌ی لوله‌ای فولاد ضد زنگ ۳۱۶ تأیید می‌گردد.

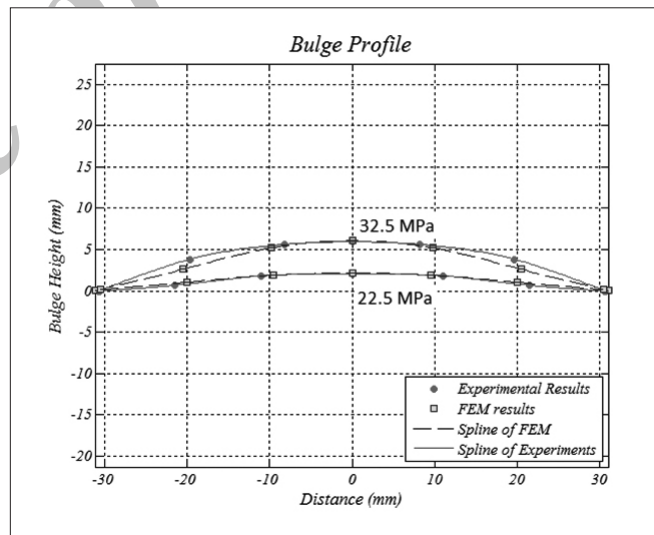
نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تحلیلی برای به‌دست آوردن خواص مواد لوله‌ای ارائه شد و آزمایش بادکردگی آزاد لوله بر روی لوله‌هایی از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ انجام گردید.

۱- در این روش پروفیل بادکردگی لوله به‌وسیله‌ی منحنی اسپ‌پی لاین تقریب زده شد.

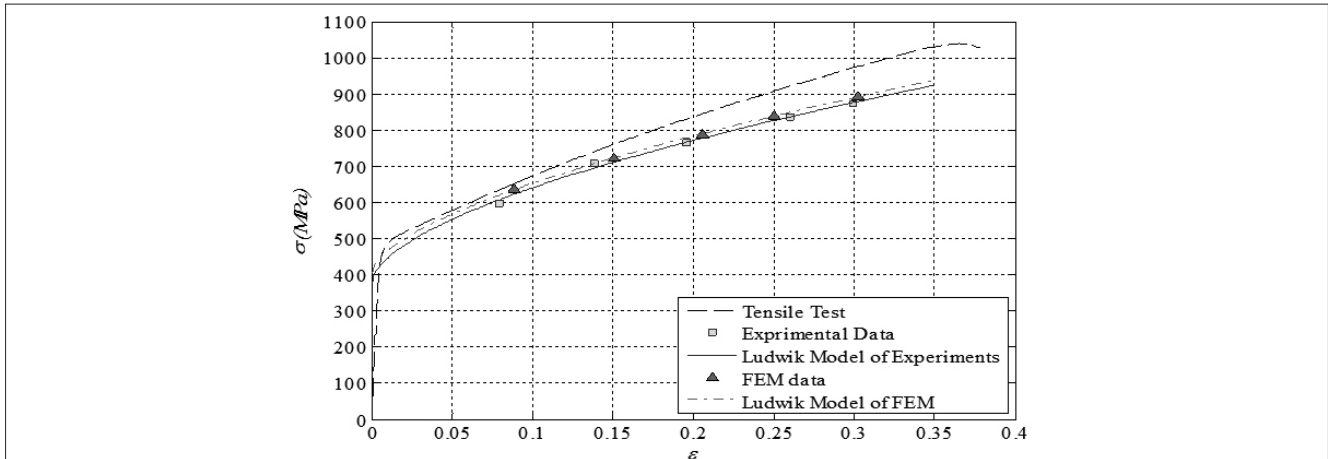
۲- با محاسبه‌ی شعاع انحناء پروفیل و اندازه‌گیری بیشترین ارتفاع برآمدگی و کمترین ضخامت لوله در قطب بادکردگی و فشار متناظر با آن، تنش موثر و کرنش موثر قابل محاسبه هستند.

۳- شبیه‌سازی اجزاء محدود این فرآیند نیز انجام شد و با مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج تجربی مشاهده گردید که با استفاده از این روش با دقت بالایی می‌توان رفتار مکانیکی مواد لوله‌ای را تعیین کرد.

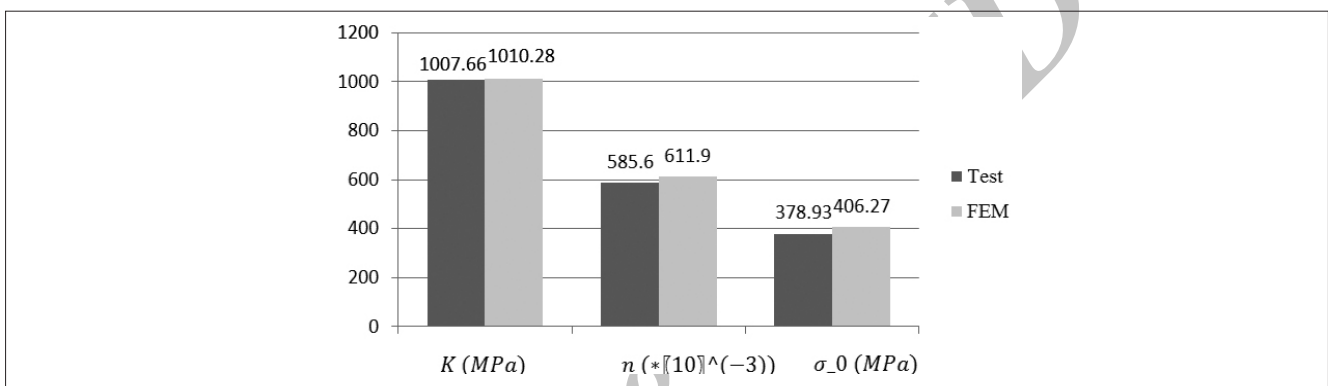


شکل ۱۰- اسپ‌پی لاین عبور داده شده از نقاط برداشت شده از روی پروفیل لوله در آزمایش و شبیه‌سازی برای فشارهای ۲۲/۵ MPa و ۳۲/۵ MPa

آزمایش بادکردگی لوله قدری پایین‌تر از منحنی تنش-کرنش آزمایش کشش یک‌محوره قرار گرفته است. این انحراف می‌تواند ناشی از تفاوت نحوه‌ی اعمال تنش در دو شرایط آزمون باشد. علاوه بر آن، ناهمسان‌گردی در جنس لوله که در دو شرایط متفاوت آزمون رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد و همچنین معیار تسلیم و معادله‌ی ساختاری انتخابی هم در آن تأثیر گذارند. با



شکل ۱۱- منحنی تنش- کرنش به دست آمده برای ماده‌ی لوله‌ای فولاد ضد زنگ ۳۱۶



شکل ۱۲- مقایسه‌ی پارامترهای رابطه‌ی لودویک که از آزمایش و شبیه‌سازی به دست آمده است

منابع و مراجع

- [10] Hwang, Y. M., Lin, Y. K., & Altan, T. (2007). Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 343-351.
- [11] Hwang, Y. M., & Wang, C. W. (2009). Flow stress evaluation of zinc copper and carbon steel tubes by hydraulic bulge tests considering their anisotropy. *Journal of Material Processing Technology*, 209, 4423-8.
- [12] Imaninejad, M., Subhash, G., & Loukus, A. (2004). Influence of end-conditions during tube hydroforming of aluminum extrusions. *International Journal of Mechanical Science*, 46, 1195-212.
- [13] Kaya, S., Altan, T., Groche, P., & Klöpsch, C. (2008). Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet elevated temperatures using hydraulic bulge test. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 550-577.
- [14] Kuwabara, T. (2007). Advances in experiments on metal sheets and tubes in support of constitutive modeling and forming simulations. *International Journal of Plasticity*, 23, 385-419.
- [15] Kuwabara, T., Yoshida, K., Narihara, K., & Takahashi, S. (2005). Anisotropic plastic deformation of extruded aluminum alloy tube under axial forces and internal pressure. *International Journal of Plasticity*, 21, 101-17.
- [16] Lianfa, Y., & Cheng, G. (2008). Determination of stress-strain relationship of tubular material with hydraulic bulge test. *Thin-Walled Structures*, 46, 147-154.
- [17] Sokolowski, T., Gerke, K., Ahmetoglu, M., & Altan, T. (2000). Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes. *Journal of Material Processing Technology*, 98, 34-40.
- [18] Woo, D. M., & Hawkes, P. J. (1968). Determination of stress/strain characteristics of tubular materials. *Journal of the Institute of Metals*, 96, 357-9.
- [1] Ahmetoglu, M., & Altan T. (2000). Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, 98, 25-33.
- [2] Ahmetoglu, M., Sutter, K., Li, X.J., & Altan, T. (2000). Tube hydroforming: current research, applications and need for training. *Journal of Materials Processing Technology*, 98, 224-231.
- [3] Boudeau, N., & Malécot, P. (2012). A simplified analytical model for post-processing experimental results from tube bulging test: theory, experimentations, simulations. *International Journal of Mechanical Science*, 65, 1-11.
- [4] Dohmann, F., & Hartl, Ch. (1994). Liquid bulge forming as a flexible production method. *Journal of Materials Processing Technology*, 45, 377-382.
- [5] Dohmann, F., & Hartl, Ch. (1996). Hydroforming a method to manufacture light-weight parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 60, 669-676.
- [6] Fuchizawa, S., & Narazaki, M. (1993). Bulge test for determining stress-strain characteristics of thin tubes. *Proceedings of Advanced Technology of Plasticity*, 1, 488-493.
- [7] Güner, A., Brosius, A., & Tekkaya, A. E. (2009). Analysis of the hydraulic bulge test with FEA concerning the accuracy of the determined flow curves. *Key Engineering Materials*, 410, 439-447.
- [8] Hea, Z., Yuan, Sh., Lin, Y., Wang, X., & Hu, W. (2014). Analytical model for tube hydro-bulging test, part I: Models for stress components and bulging zone profile. *International Journal of Mechanical Sciences*, 87, 297-306.
- [9] Hwang, Y. M., & Lin, Y. K. (2007). Evaluation of flow stresses of tubular materials considering anisotropic effects by hydraulic bulge tests. *Journal of Engineering Materials Technology*, 129, 414-21.