



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

**ICME
2018**

چهارمین کنفرانس بین المللی و پانزدهمین
همایش ملی مهندسی ساخت و تولید
۲-۳ آبان ۱۳۹۷، تهران، ایران



انجمن مهندسی
ساخت و تولید انگلستان

کواهی ارائه مقاله

بدینوسیله کواهی می شود که مقاله با عنوان:

«بررسی تاثیر پروفیل بادکردگی بر روی خواص مواد لوله ای به روش انرژی»

توسط نویسندگان:

«محمد سالارخانی، عبدالرحمن جامی الاحمدی»

در پانزدهمین همایش ملی و چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی ساخت و تولید (ICME2018) که در تاریخ ۲-۳ آبان ۱۳۹۷ در تهران و توسط انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران برگزار شده است.

کمیته علمی همایش از حضور این عزیزان قدردانی نموده و آرزوی توفیق روزافزون برای آنان دارد.

دکتر فخرالاحمد محمدی

دبیر همایش



پانزدهمین همایش ملی و چهارمین کنفرانس بین المللی
مهندسی ساخت و تولید
۲-۳ آبان ۱۳۹۷
تهران - ایران
Oct 24-25, 2018
Tehran, Iran
The 4th International & 15th National Conference on
Manufacturing Engineering



کد مجوز همایش

۹۷۱۸۰ - ۶۱۱۰۳

دکتر فخرالاحمد محمدی

دبیر علمی

بررسی تاثیر پروفیل بادکردگی بر روی خواص مواد لوله‌ای به روش انرژی

محمد سالارخانی، عبدالرحمن جامی الاحمدی*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

چکیده

هدف این مقاله بررسی و تعیین خواص مواد لوله‌ای فولاد ضد زنگ ۳۱۶ با استفاده از روش انرژی به صورت تحلیلی و به کمک آزمون بادکردگی آزاد لوله می‌باشد. مبنای روش انرژی بر توازن انرژی وارد شده به سیستم و انرژی صرف شده برای تغییر شکل لوله است. در این روش رابطه‌ای تحلیلی برای رفتار ماده (معادله ساختاری) به علاوه تخمین مناسب پروفیل (نیم‌رخ) برای بادکردگی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین به کمک روابط تحلیلی، مقادیر کرنش‌ها و سپس کرنش موثر در لوله بادکرده در حالت دوبعدی محاسبه می‌شوند. با مساوی قرار دادن مقادیر کار خارجی اعمال شده به سامانه و انرژی کرنشی ناشی از تغییر شکل لوله رابطه‌ای برحسب مجهولات ضریب استحکام و نمای کرنش‌سختی معادله تنش-کرنش به دست می‌آید. با حل دستگاه معادلات غیرخطی منتج از تئوری تقریب و کمینه‌کردن مجموع مربعات خطا، ضرایب مجهول تعیین می‌شوند. در انتها برای صحت‌گذاری، رابطه رفتار ماده بدست آمده به نرم‌افزار اجزاء محدود در شبیه‌سازی فرایند باد کردگی وارد شده و تغییر شکل‌ها با نتایج واقعی مقایسه شدند.

واژه های کلیدی: روش انرژی- مواد لوله ای ۳۱۶- نمودار تنش-کرنش-

هیدروفرمینگ-آزمون بادکردگی لوله

مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل نیاز صنعت به مواد سبک و در عین حال مستحکم، در زمینه‌های مانند صنعت هوایی، وسایل نقلیه، تجهیزات بهداشتی و... فرایند شکل‌دهی هیدروفرمینگ اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است [1]. این فناوری در مقابل دیگر فرایندهای شکل‌دهی نظیر کشش عمیق، مهرش^۱ و نورد و سایر روش‌ها نسبتاً جدید به شمار می‌رود. هیدروفرمینگ لوله‌ها نیز نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی مزیت‌های ویژه‌ای از قبیل ۱- کاهش وزن قطعات و هزینه‌های تولید ۲- افزایش استحکام قطعات ۳- کاهش عملیات ثانویه ۴- افزایش یکنواختی ضخامت قطعات را دارا می‌باشد [2]. از جمله معایب این روش نیز می‌توان به بازه زمانی طولانی تولید، هزینه‌ی بالای تجهیزات مورد نیاز فرایند و در دسترس نبودن پایگاه اطلاعاتی مناسب برای طراحی ابزارآلات اشاره کرد [3].

در دهه‌های گذشته هیدروفرمینگ لوله‌ها بخصوص هیدروفرمینگ لوله‌های فولادی با توجه به کاربردهای آن در صنایعی همچون صنایع

پزشکی، خودرو، غذایی، دارویی، نفت و گاز، مخازن تحت فشار و... افزایش یافته است. این لوله‌ها به دلیل کاربرد در محل‌های مستعد خوردگی و یا در صنایع دریایی که با آب شور در تماس هستند و همچنین کاربرد در تزئینات ساختمان‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار هستند [4].

آزمون کشش ساده به دلیل سهولت، رایج‌ترین و پرکاربردترین آزمون برای تعیین خواص مکانیکی مواد است. در مواد لوله‌ای نیز این آزمون بر روی ورق‌هایی که لوله‌ها از آن‌ها ساخته می‌شوند، انجام می‌شود. بدیهی است که به دلیل نورد و اعمال خمش روی ورق تخت و تبدیل آن به لوله، تغییراتی در خواص ماده بوجود می‌آید. در شرایط واقعی شکل‌دهی لوله‌ها، حالت تنش دوبعدی است در حالی که در آزمون کشش یک بعدی می‌باشد. لذا استفاده از نتایج آزمون کشش به عنوان رفتار ماده بجای حالت واقعی تنش دوبعدی منجر به ایجاد خطا در نتایج تحلیلی و یا شبیه‌سازی خواهد شد. از طرفی حداکثر کرنش قابل دستیابی در تست کشش ۳۰٪ بوده که در حالت آزمایش تنش دوبعدی این میزان به ۷۰٪ نیز می‌رسد [5] و [6]. از این‌رو ضروری است که رابطه تنش-کرنش در شرایطی هرچند نزدیک-تر به شرایط واقعی حالت تنش در فرایند، تعیین شود.

برای محاسبه‌ی مولفه‌های تنش و کرنش در فرایند بادکردگی لوله نیاز به دانستن پروفیل لوله شکل‌یافته است. بر این اساس محققان این پروفیل را بصورت‌های کماتی از دایره [7]، جزئی از یک بیضی [8] و یا دیگر پروفیل‌ها [9] در نظر گرفته‌اند.

بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

در این مقاله سعی شده است خواص مواد لوله‌ای بر اساس روش انرژی استخراج شوند. این روش مبتنی بر توازن انرژی و بر اساس مقدار انرژی یا کار خارجی وارد شده به سامانه و انرژی کرنشی صرف شده جهت تغییر شکل لوله است.

در این روش نیز پروفیل بادکردگی باید تقریب زده شود. برخی از محققان برای تقریب، پروفیل کسینوسی در نظر گرفته‌اند [10]. از آنجایی که این رویه وابسته به نوع پروفیل تقریبی برای بادکردگی لوله است، سعی شده چند پروفیل متفاوت برای بادکردگی لوله انتخاب شوند و نتایج هر تقریب با یکدیگر مقایسه شوند. علاوه بر این با استفاده از معادلات ساختاری تعیین شده در هر مورد، نتایج شبیه‌سازی با نتایج واقعی مقایسه شدند.

روش تحقیق

¹ Stamping



با مشخص شدن پروفیل‌ها، مقادیر کرنش‌ها نیز با معادلات (۱۰-۷) قابل محاسبه خواهند بود.

$$\varepsilon_r(z, t) = \ln\left(\frac{R_{out}(z, t) - R_{in}(z, t)}{th_0}\right) \quad (7)$$

$$\varepsilon_\theta(z, t) = \ln\left(\frac{R_{med}(z, t)}{R_{med}(0, 0)}\right) \quad (8)$$

$$\varepsilon_z(z, t) = -\varepsilon_r(z, t) - \varepsilon_\theta(z, t) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{zr}(z, t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial R_{med}(z, t)}{\partial z} \quad (10)$$

و با معلوم بودن مولفه‌های تانسور کرنش، کرنش موثر از معادله (۱۱) قابل محاسبه است.

$$\bar{\varepsilon}(z, t) = \sqrt{\frac{2}{3} [\varepsilon_\theta(z, t)^2 + \varepsilon_r(z, t)^2 + \varepsilon_z(z, t)^2 + 2 \cdot \varepsilon_{zr}(z, t)^2]} \quad (11)$$

در مرحله سوم، مقدار کار داخلی یا انرژی کرنشی با انتگرال‌گیری روی حجم شکل‌یافته لوله با رابطه‌ی (۱۲) بدست خواهد آمد.

$$W_d(t, K, n) = \frac{K}{n+1} \int_0^w \int_{R_{in}}^{R_{out}} \int_0^{2\pi} \{r [\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}(z, t)]^{n+1} - \varepsilon_0^{n+1}\} d\theta dr dz \quad (12)$$

و کار خارجی انجام شده روی لوله به‌جهت شکل دادن آن از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است.

$$W_{ext}(t, K, n) = \int_0^t P(\tau, K, n) \cdot \frac{\partial Vol_{wat}(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (13)$$

که در این رابطه، $Vol_{wat}(\tau)$ برابر مقدار حجم آبی سیالی است که می‌تواند در لوله جای بگیرد. همچنین $P(\tau, K, n)$ نیز فشار متناظر در همان لحظه است.

و در مرحله آخر، می‌توان با کمینه‌کردن مجموع مربعات خطا به‌صورت معادله (۱۴)، مقادیر پارامترهای مجهول ضریب استحکام، K و نمای کرنش‌سختی، n تنها مجهولات در معادله تنش-کرنش یا رابطه‌ی (۱) را به‌دست آورد.

$$LSF(K, n) = \sum_{i=0}^m [W_d(t_i, K, n) - W_{ext}(t_i, K, n)]^2 \quad (14)$$

همچنین در رابطه‌ی (۱۴)، m تعداد آزمایش‌های انجام گرفته شده در تست بادکردگی می‌باشد و واضح است که هرچه‌قدر تعداد این آزمایشات بیشتر باشد جواب‌ها نیز دقیق‌تر خواهند بود.

علاوه بر مورد اول تقریب، دو مورد تقریب‌های دیگری نیز برای پروفیل بادکردگی اعمال شد.

در مورد دوم تقریب، شعاع انحنای پروفیل‌های داخلی و خارجی لوله بادکرده که توابع بیضوی طبق معادلات (۱۵) و (۱۶) در نظر گرفته شده‌است، تعیین می‌شوند.

$$R_{out}(z, t) = BH_{out} \left(1 - \frac{z^2}{w^2}\right)^{\frac{1}{2}} + RO_0 \quad (15)$$

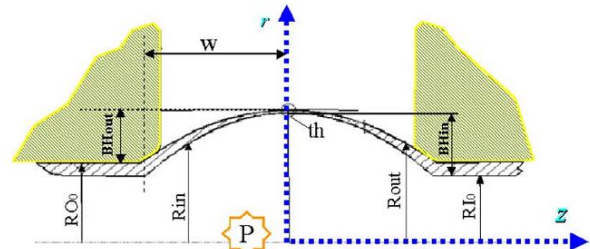
$$R_{in}(z, t) = BH_{in} \left(1 - \frac{z^2}{w^2}\right)^{\frac{1}{2}} + RI_0 \quad (16)$$

و مورد سوم، پروفیل خارجی و داخلی بادکردگی با تابع سهموی و به‌ترتیب با معادلات (۱۷) و (۱۸) تقریب زده می‌شوند:

$$R_{out} = RO_0 + BH_{out} - \frac{BH_{out}}{w^2} \cdot z^2 \quad (17)$$

$$R_{in} = RI_0 + BH_{in} - \frac{BH_{in}}{w^2} \cdot z^2 \quad (18)$$

در آزمون بادکردگی، لوله از داخل تحت فشار سیال قرار می‌گیرد در حالی که دو انتهای آن با رعایت حفظ آب‌بندی، بدون اعمال نیروی محوری آزاد است. در شکل ۱ نمای شماتیک پروفیل لوله بعد از بادکردگی نمایش داده شده است.



شکل ۱ نمایش شماتیک پروفیل لوله بعد از بادکردگی [10]

جنس لوله از فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و ابعاد آن طبق جدول ۱ در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۱- ابعاد لوله و قالب [4]

پارامتر	مقدار (mm)
طول لوله (L)	۱۲۰
قطر خارجی لوله (D_0)	۵۲/۲
ضخامت اولیه لوله (t_0)	۱/۴۵
شعاع فیلت قالب (R_d)	۱۵
طول دهانه قالب	۳۰

در این روش، در اولین مرحله لازم است رابطه‌ای بین تنش و کرنش در نظر گرفته شود، که از رابطه‌ای به‌صورت معادله (۱) استفاده می‌شود.

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (1)$$

که در این معادله، ε_0 به عنوان مقدار پیش کرنش ناشی از فرایند نورد لوله است که طبق روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شوند [11].

$$R_{med}(z, t) = \frac{1}{2} (R_{out}(z, t) + R_{in}(z, t)) \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\ln\left(\frac{RO_0}{R_{med}(0, 0)}\right) - \ln\left(\frac{RI_0}{R_{med}(0, 0)}\right) \right]} \quad (3)$$

در مرحله دوم، باید پروفیل مناسب برای منحنی بادکردگی تقریب زده شود. بدیهی است که این تقریب می‌بایست به‌گونه‌ای انتخاب شود که با پروفیل واقعی لوله بادکرده کمترین خطا را داشته باشد. در این مقاله سه نوع پروفیل (نیم‌رخ) با توابع کسینوسی، بیضوی و سهموی تقریب زده شد. که در ادامه معادلات و توضیحات لازم برای هر یک ذکر شده‌اند.

با توجه به شکل ۱، در مورد اول پروفیل داخلی و خارجی لوله با تابع کسینوسی با روابط (۴-۶) تقریب زده می‌شوند.

$$R_{out}(z, t) = R_{out_0} + BH_{out}(t) \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{2w}\right) \quad (4)$$

$$R_{in}(z, t) = R_{in_0} + BH_{in}(t) \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{2w}\right) \quad (5)$$

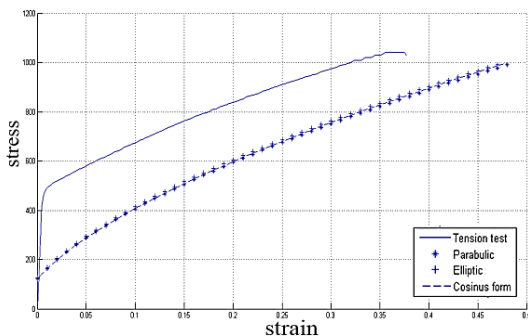
$$BH_{in}(t) = BH_{out}(t) + th_0 - th(t) \quad (6)$$

که در روابط بالا th_0 ضخامت اولیه لوله، $th(t)$ ضخامت در قطب بادکردگی و یا در کمترین ضخامت لوله است، که می‌توان آن را از برابر قرار دادن حجم لوله قبل و بعد از شکل‌دهی بدست آورد.

جدول ۲- نتایج حاصل از روش انرژی

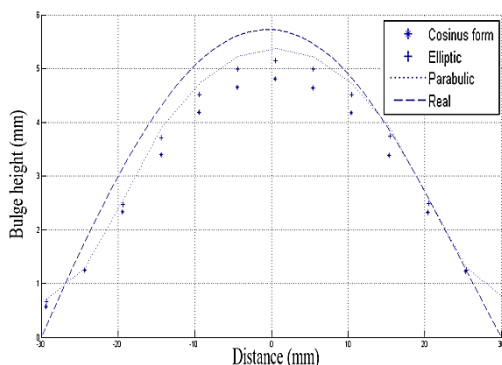
پارامترها	K(MPa)	n
کسینوسی	۱۵۴۱/۷۸	۰/۶۱۹
سهومی	۱۵۲۴	۰/۶۱۵
بیضوی	۱۵۳۹/۸۵	۰/۶۱

شکل ۳، نمودار رفتار ماده لوله‌ای بدست آمده از روش انرژی و رفتار حاصل از آزمون کشش ساده را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش فولاد ضدزنگ ۳۱۶ به روش انرژی و آزمون کشش ساده.

همان‌طور که در مرجع [10] هم آمده است، بدیهی است که نتایج حاصل از این روش با نتایج آزمون کشش ساده مقاداری تفاوت دارد. می‌توان از این نتایج در شبیه‌سازی استفاده کرد. شکل ۳ مقایسه بین پروفیل بادکردگی حاصل از کار تجربی مرجع [4] برای فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و نتایج شبیه‌سازی با پروفیل‌های تقریبی این پژوهش در فشار ۳۲/۵ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. آنچه از نمودار قابل مشاهده است، دقت قابل قبول و نزدیکی جواب تقریب پروفیل سهومی و اختلاف‌های به‌ترتیب زیادت‌تر برای پروفیل تقریب بیضوی و کسینوسی با نتیجه تجربی است.



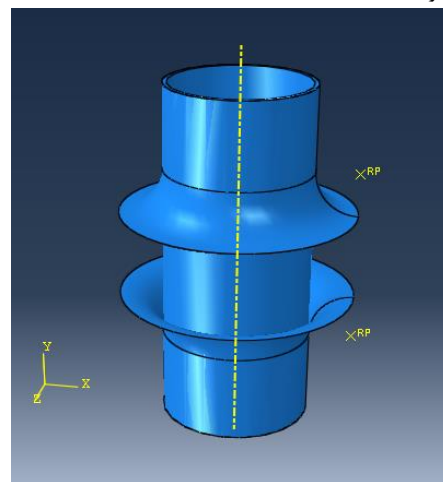
شکل ۴- پروفیل تجربی و شبیه‌سازی شده‌ی لوله در فشار ۳۲/۵ مگاپاسکال

در نهایت برای هر سه پروفیل با طی مراحل چندگانه حل ذکر شده در قبل و برقرار ساختن رابطه (۱۴)، با اعمال روش کمینه‌کردن مجموع مربعات خطا ضرایب n و k رابطه (۱) تعیین می‌شوند. در حالت کلی مشتق‌گیری از رابطه (۱۴) منجر به دستگاه چند معادله و چند مجهول غیر خطی می‌شود. با برنامه نویسی در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از الگوریتم نیوتن رافسون برای حل این دستگاه معادلات، روش گوس برای محاسبه انتگرال‌ها، مراحل رویه حل تحلیلی انجام شده‌است.

شبیه‌سازی اجزاء محدود

بعد از تعیین ضریب استحکام و نمای کرنش‌سختی ماده لوله‌ای طبق روالی که ذکر شد، برای اعتبارسنجی، نتایج به عنوان رفتار ماده به نرم‌افزار ABAQUS وارد شدند.

شکل ۲ الگوی شبیه‌سازی شده لوله به همراه لبه‌های بالایی و پایینی را نشان می‌دهد. به دلیل ضخامت کم دیواره، در شبیه‌سازی لوله به‌صورت جزء پوسته^۲ و قالب صلب^۳ در نظر گرفته شده‌اند. برای رسیدن به هم‌گرایی در جواب و رعایت اصل حساسیت به اندازه مش یا شبکه، در هر گام شبکه ریزتر شده تا این‌که مش‌های کوچک‌تر از اندازه‌ی ۵ میلی‌متر که منجر به همگرایی تغییر ضخامت دیواره لوله شد به عنوان اندازه‌ی مش مناسب انتخاب شد. هم‌چنین ضریب اصطکاک بین لوله و قالب ۰/۰۶ در نظر گرفته شده‌است [12]. فشار به‌صورت یکنواخت به دیواره‌ی داخلی لوله اعمال می‌شود و شرایط انتهایی لوله به صورت دو سر ثابت در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS

ارائه نتایج و بحث

با اعمال روش انرژی بر اساس ابعاد جدول ۱، مقادیر مجهولات رابطه‌ی ۱ بدست آمدند. جدول ۲ ضریب استحکام و نمای کرنش سختی حاصل از روش انرژی را برای توابع تقریب متفاوت پروفیل بادکردگی لوله نشان می‌دهد.

² Shell Element

³ Rigid body



۱/۲۶۰	۱/۲۱۷	۱/۲۲۳	۱/۱۸	۳۲/۵
-------	-------	-------	------	------

شکل ۵ نمونه‌ی شکل‌داده شده در مرجع [4] را نشان می‌دهد و نمونه‌ی شبیه‌سازی شده با همان ابعاد و تحت همان شرایط و با خواص ماده‌ای بدست آمده از روش انرژی در شکل (۶) مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش انرژی به بررسی و تعیین خواص مکانیکی مواد لوله‌ای فولادزد زنگ ۳۱۶ پرداخته شده‌است. این روش به دلیل نیاز به محاسبه‌ی تنش‌ها و کاهش حجم محاسبات و همچنین عدم نیاز به وسیله‌ی اندازه‌گیری فشار و پروفیل بادکردگی به صورت پیوسته حائز اهمیت است.

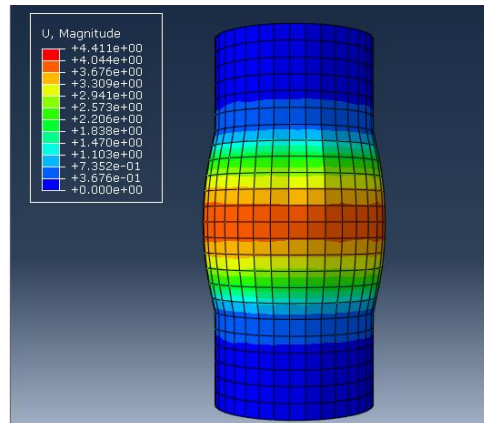
همان‌طور که انتظار می‌رود خواص مکانیکی مواد لوله‌ای حاصل از روش انرژی با نتایج آزمون کشش ساده متفاوت است. البته این اختلاف به‌نوع رابطه‌ی تنش- کرنش در نظر گرفته شده بستگی دارد و همچنین نوع تابع تقریب برای پروفیل بادکردگی لوله نیز تاثیرگذار است.

تعیین رفتار خواص ماده لوله‌ای با این روش، در شبیه‌سازی اجزاء محدود لوله نتایج قابل قبول و نزدیک‌تری را با نتایج تجربی از رفتار ماده در آزمون کشش ساده نشان می‌دهد



شکل ۵- نمونه‌ی آزمایش شده در فشار ۳۰ مگاپاسکال [4]

مراجع



شکل ۶- نمونه‌ی شبیه‌سازی شده در فشار ۳۰ مگاپاسکال

- [1] F. Dohmann and C. Hartl, "Hydroforming a method to manufacture light-weight parts," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 669-676, 1996.
- [2] M. Ahmetoglu and T. Altan, "Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 25-33, 2000.
- [3] M. Ahmetoglu, X. Sutter, J. Li and T. Altan, "Tube hydroforming: current research, applications and need for training," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 224-231, 2000.
- [4] فتوتی، بهزاد و جامی الاحمدی، عبدالرحمن، ۱۳۹۳. "ارزیابی پروفیل مناسب در آزمایش بادکردگی آزاد لوله فولاد ضدزنگ ۳۱۶ جهت تعیین خواص مواد لوله ای" فصل‌نامه مهندسی متالورژی، سال هفدهم، شماره ۵۴، صفحه ۴۵-۳۸.
- [5] S. Kaya, T. Altan, P. Groche and C. Klopsch, "Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet elevated temperatures using hydraulic bulge test," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, pp. 550-557, 2008.
- [6] A. Guner, A. Brosius and A. Tekkaya, "Analysis of the hydraulic bulge test with FEA concerning the accuracy of the determined flow curves," *Key Engineering Materials*, pp. 439-447, 2009.
- [7] S. Fuchizawa and M. Narazaki, "Bulge test for determining stress-strain characteristics of thin tubes," *Proceedings of advanced technology of plasticity*, vol. 1, pp. 448-493, 1993.
- [8] Y. Hwang, Y. Lin and A. T., "Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, pp. 343-351, 2007.

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش در جدول ۳ آمده است. این نتایج برحسب فشار و نوع تقریب اعمال شده برای کمترین ضخامت لوله (ضخامت در قطب لوله) دسته بندی شده‌اند. با توجه به جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت رابطه‌ی تنش-کرنش بدست آمده از روش انرژی می‌تواند با دقت خوبی در این گونه تحلیل‌ها بکار رود.

جدول ۳- ضخامت‌های بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش

فشار داخلی (MPa)	آزمایشگاهی	کسینوسی	بیضوی	سه‌موی
۲۲/۵	۱/۳۸	۱/۳۳۷	۱/۳۴۳	۱/۳۳۷
۲۵	۱/۳۴	۱/۳۱۰	۱/۳۱۴	۱/۳۰۴
۲۷/۵	۱/۲۴	۱/۲۸۷	۱/۲۸۲	۱/۲۷۲
۳۰	۱/۲۰	۱/۲۵۸	۱/۲۵۳	۱/۲۴۶



- [9] Y. Lianfa and G. Cheng, "Determination of stress-strain relationship of tubular material with hydraulic bulge test," *Thin-Walled Structures*, vol. 46, pp. 147-154, 2008.
- [10] M. Strano and A. T, "An inverse energy approach to determine the flow stress of tubular materials for hydroforming applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 146, pp. 92-96, 2004.
- [11] A. Tirosh, A. Neuberger and A. Shirizly, "Tube Expansion with Unlimited Strain," *J. Tirosh, A. Neuberger and A. Shirizly, "Tube Advanced Technology of Plasticity Annual ICTP*, pp. 527-530, 1999.
- [12] T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu and T. Altan, "Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes," *Journal of Material Processing Technology*, vol. 98, pp. 34-40, 2000.