

مطالعه تحلیلی فشار مجاز در شکل دهی بیلوزهای فلزی به روش هیدروفرمینگ

حامد دیلمی عضدی

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

عادل آزاد

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علوم و تحقیقات واحد مرکزی، اراک، ایران

مهدی سلمانی تهرانی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

زهره دهقانیان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

بیلوزهای فلزی کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، هسته‌ای و پتروشیمی دارند. یکی از روش‌های تولید بیلوز، هیدروفرمینگ لوله است. پارامترهای زیادی در ساخت این قطعه تاثیرگذار هستند که می‌توان اصلی‌ترین پارامتر جهت ساخت این قطعات به روش هیدروفرمینگ لوله را فشار اعمالی سیال به لوله دانست. فشار اعمالی کم، موجب بروز عیوبی همچون چروکیدگی می‌شود و فشار زیاد سبب نازک‌شوندگی و در نهایت به پارگی می‌انجامد. در پژوهش‌های منتشرشده گذشته این فشار برای مواد مختلف به روش تجربی محاسبه و گزارش شده است. اما پایه نظری و کاربردی برای محاسبه فشار، بدون انجام آزمایش تجربی، پیشنهاد نشده است. در این مقاله برای به دست آوردن فشار مورد نیاز شکل دهی جهت مدل سازی تحلیلی، از نظریه مخزن‌های جداره نازک و همچنین از مدل مادی سوئیفت استفاده شده است. مقایسه با نتایج تجربی موجود نشان می‌دهد فشار نهایی مجاز پیشنهاد شده از دقت خوبی در پیش بینی فشار شکل دهی مناسب برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: بیلوز فلزی، هیدروفرمینگ لوله، فشار مجاز، مطالعه تحلیلی.

An Analytical Study of Allowable Pressure in Hydroforming of Metal Bellows

H. Deilami Azodi

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

A. Azad

Department of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

M. Salmani Tehrani

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Z. Dehghanian

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

There are many industrial applications, such as in aerospace, nuclear and petrochemical industries, that involve using metal bellows. Tube hydroforming is the major process by which the metal bellows are produced. Although many parameters may affect the final product, the fluid pressure can be regarded as the most important parameter in hydroforming a metal bellows. Low pressure may result in some defects such as wrinkling. On the other hand a high pressure may lead to a highly thinning and even rupture. In the previous researches, no theoretical criterion has been proposed to predict the allowable forming pressure. In this paper, an analytical equation is proposed for determining the allowable pressure, based on thin-walled cylindrical vessels. Neglecting the elastic deformation, Swift equation along with von-mises yield criterion was used to model tube deformation. The analytically computed pressure compared with the existing experimental results and a close agreement was observed. This evidently shows the validity of the propose model.

Keywords: Metal Bellows, Tube Hydroforming, Allowable Pressure, Analytical Study.

تولید جهت رسیدن به دقت‌های ابعادی بالا در تولید بیلوزها است.



شکل ۱- نمونه یک بیلوز تولید شده به روش هیدروفرمینگ [۱]

۱-مقدمه

بیلوزهای فلزی لوله‌های کنگره‌ای شکل هستند که کاربردهای فراوانی، به ویژه به عنوان اتصال‌های انبساطی، در صنایع مختلف مانند نفت، گاز و پتروشیمی دارند (شکل ۱). به همین دلیل تحلیل شرایط ساخت آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با مطالعه پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که فرآیند هیدروفرمینگ^۲ مناسب‌ترین روش

^۱Bellows

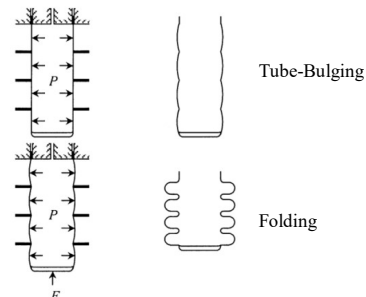
^۲Hydroforming

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: tehrani@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۸

تاشدگی^۲ با دو روش شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. در عین حال در تحقیق آن‌ها برای اولین بار تاثیر نوع ماده بررسی شد.



شکل ۲- مراحل هیدروفرمینگ بیلوز فلزی از لوله [۷]

عرب‌بینی و همکاران [۱۰] اثر فشار بر شکل‌دهی بیلوزها را به‌صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. الیاسی و همکاران [۱۱] امکان شکل‌دهی بیلوزهای فلزی را در قالب بسته به‌روش هیدروفرمینگ با استفاده از شبیه‌سازی عددی، مطالعه کردند. اصنافی [۱۲] به بررسی تحلیلی هیدروفرمینگ لوله پرداخته است. پیرس و ایوانز [۱۳] به تحلیل شکست بیلوزهایی فلزی انعطاف‌پذیر در فشارهای تنابویی پرداختند. آن‌ها به‌جای اینکه فشار را یک‌مرتبه وارد کنند، در طول آزمون سه‌بار بارگذاری را انجام دادند. از آن‌جایی که این تحلیل منجر به شکست ناگهانی می‌شود، از نتایج هر آزمون برای بهبود آزمون‌های بعدی استفاده می‌شود.

شکل‌دهی بیلوزهای فلزی از لوله را می‌توان مطابق شکل ۲ به دو مرحله به نام‌های بادکردگی و تاشدگی تقسیم کرد. در فرآیند تولید ابتدا فشار داخلی سیال افزایش پیدا می‌کند تا لوله به مقدار بیشینه تغییرشکل پلاستیک مجاز برسد. این میزان فشار باید در حدی باشد که تنش ناپایداری رخ ندهد. لازم به‌ذکر است فشار کم موجب بروز عیوبی همچون چروکیدگی شده و فشار زیاد نازک‌شدگی و در نهایت پارگی را نتیجه می‌دهد. این مرحله، بادکردگی لوله نامیده می‌شود. پس از آن قالب ویژه شکل‌دهی تحت نیرو و سرعت مشخصی جمع می‌شود. در این مرحله، فشار کاری ثابت است و لوله مطابق قالب شکل می‌گیرد. این مرحله، تاشدگی نام دارد. پس از باز شدن قالب و برداشتن فشار هیدرولیک به‌دلیل برگشت فنری قطر بیلوز کم شده و طول آن افزایش می‌یابد. یادآوری می‌شود در هیدروفرمینگ بیلوز، بر خلاف بادکردن (انبساط) آزاد لوله، تغذیه محوری به لوله اعمال نمی‌شود. این تفاوت در تحلیل حاضر با فرض بسته بودن استوانه (رابطه‌های (۲) و (۶) که در ادامه خواهند آمد) در نظر گرفته شده است.

در این مقاله پس از تعیین شدن مراحل شکل‌دهی و نحوه بارگذاری و اعمال فشار، به تحلیل جهت محاسبه فشار مناسب شکل‌دهی بیلوز فلزی پرداخته شده است. میزان این فشار که در روابط P_f معرفی شده است باید از فشار معادل تسلیم P_y بیشتر باشد و به حد فشار معادل با ناپایداری، P_{cr} ، نرسد. جهت بررسی این مورد نیز روابط مد نظر برای محاسبه فشارهای حد تسلیم و ناپایداری با روش‌های

اگرچه روش‌های دیگری مانند فرآیند شکل‌دهی غلتکی^۱ و جوشکاری دیسک هم پیشنهاد شده است. اما ماهیت فرآیند جوشکاری به‌گونه‌ای است که امکان رسیدن به دقت‌های ابعادی بالا تضمین نمی‌شود. فرآیند شکل‌دهی غلتکی نیز معمولاً برای تولید بیلوزهای با قطر بالا استفاده می‌شود. آن‌گونه بیلوزها کاربردهای ویژه‌ای دارند و تیرانس‌های بزرگتری برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود.

دو جنبه در ساخت بیلوزهای فلزی دارای اهمیت است. نخست توجه به عوامل مؤثر بر ایجاد جریان مناسب ماده در قالب شکل‌دهی، به‌گونه‌ای که از بروز عیوبی همچون چروکیدگی، نازک‌شدگی و نهایتاً پارگی جلوگیری شود. از سوی دیگر تولید قطعه با کیفیت بالا، توزیع ضخامت مناسب، قطر مورد نظر و فنریت کافی مورد توجه است. در این راستا پارامترهایی مانند نوع و خواص مکانیکی ماده، قطر اولیه و ضخامت لوله، کورس اولیه، میزان پیشروی، میزان فشار داخلی، نحوه اعمال فشار بر روی مشخصاتی مانند قطر خارجی بیلوز، طول بیلوز بعد از برگشت فنری و توزیع ضخامت نهایی اثرگذار هستند. از این‌رو باید اندازه و چگونگی این اثرگذاری به‌درستی شناخته و کنترل شود. اگرچه ممکن است پارامترهایی همچون خواص مکانیکی ماده و ابعاد اولیه از پیش مشخص باشند. اما می‌توان با تنظیم اندازه و نحوه اعمال فشار به هدف مورد نظر نزدیک شد.

پژوهش‌های انجام شده در گذشته بیشتر بر روی کاربردها و عملکرد بیلوز متمرکز بوده است. فعالیت‌های انجام شده در مورد بررسی فرآیند شکل‌دهی این قطعات بسیار اندک است. همچنین اندک پژوهش‌های مرتبط با فرآیند شکل‌دهی به‌روش‌های تجربی و عددی بوده و راه کلی جهت تحلیل برای همه مواد مورد آزمون به‌دست نیامده است. جاکوباسکاس و همکاران [۲] تنش‌های ناشی از فشارهای داخلی، تغییرشکل‌های محوری و ارتعاشات را مورد بررسی قرار داده‌اند. ساتوشی و همکاران [۳] مشخصات دینامیکی بیلوزها را بررسی کردند. بت [۴] پژوهش‌های زیادی در ارتباط با بررسی و تخمین عمر خستگی و کماتش بیلوزها صورت داده است.

ژو و همکاران [۵] اثرات نسبی محیط روی عمر خستگی بیلوزهای U-شکل اتصال انبساطی را بررسی کردند. کانگ [۶] تحقیقاتی در مورد فرآیند شکل‌دهی بیلوزهای لوله‌ای به شکل‌های مختلف و با استفاده از یک مرحله فرآیند لوله هیدروفرمینگ انجام داد. مقالات منتشرشده در زمینه شکل‌دهی بسیار محدود است. لی [۷] پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی بیلوز را بررسی کرد. کانگ [۸] تحقیقاتی در مورد فرآیند شکل‌دهی بیلوزهای لوله‌ای به شکل‌های مختلف و با استفاده از یک مرحله فرآیند هیدروفرمینگ لوله انجام داد. او در آزمایش‌های خود از روش تک‌مرحله‌ای هیدروفرمینگ لوله استفاده نمود. این امر با کنترل هم‌زمان فشار داخلی و حرکت محوری قالب صورت گرفت. فرجی و همکارانش [۹] به مطالعه بر روی ساخت بیلوزها پرداختند. آن‌ها از ۴ مرحله مورد اشاره در تحقیق لی، دو مرحله نخست (کشش عمیق و اتوکاری) را حذف کرده و در عوض از لوله بدون درز در تولید بیلوز استفاده کردند. در تحقیق آن‌ها دو مرحله پایانی (بادکردگی^۲ و

^۱Roll forming

^۲Bulging

^۳Folding

در این مقاله از رابطه تنش- کرنش سوییفیت که به وسیله معادله (۱۰) بیان می‌گردد [۱۴]، استفاده می‌شود.

$$\bar{\sigma} = k(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n \quad (10)$$

با مشتق‌گیری از رابطه تنش- کرنش سوییفیت، رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = kn(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^{(n-1)} \quad (11)$$

در این قسمت، با توجه به فرض‌ها و رابطه‌های قسمت قبل، ادامه تحلیل بر مبنای معیار تسلیم ون میسرز کامل می‌شود. تنش مؤثر بر اساس معیار تسلیم فون میسرز از رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۱۴].

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (12)$$

همچنین نمو کرنش مؤثر بر حسب مؤلفه‌های نمو کرنش اصلی از رابطه (۱۳) به دست می‌آید [۱۴].

$$d\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 + (d\epsilon_1 - d\epsilon_3)^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2} \quad (13)$$

با ترکیب رابطه‌های (۱)، (۲)، (۳) با رابطه (۱۲)، تنش مؤثر بر حسب فشار داخلی به صورت رابطه (۱۴) نتیجه می‌شود.

$$P = \frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{t}{r} \frac{\bar{\sigma}}{r} \quad (14)$$

با جایگذاری تنش تسلیم اولیه، σ_y (تنش به‌ازای $\bar{\epsilon} = 0$ در رابطه (۱۰))، به جای تنش مؤثر در رابطه (۱۴)، فشار متناظر با شروع تسلیم، P_y به صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$P_y = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\frac{t_0}{r_0} \sigma_y \right) = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\frac{t_0}{r_0} \right) k(\epsilon_0)^n \quad (15)$$

فشار ناپایداری، از شرط ایستا شدن فشار محاسبه می‌شود [۱۴]. ابتدا با استفاده از رابطه (۱۴)، مشتق فشار به صورت رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$dP = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\frac{t}{r} \frac{d\bar{\sigma}}{dr} + \frac{\bar{\sigma}}{r} \frac{dt}{dr} - \frac{t}{r^2} \frac{d\bar{\sigma}}{dr} \right) = P \left(\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} + \frac{dt}{t} - \frac{dr}{r} \right) \quad (16)$$

در نتیجه شرط ایستا شدن فشار به رابطه (۱۷) می‌انجامد.

$$dP = 0 \rightarrow \frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} + \frac{dt}{t} - \frac{dr}{r} = 0 \quad (17)$$

رابطه (۱۷) با توجه به رابطه‌های (۵)، (۷) و (۹)، رابطه (۱۸) را نتیجه می‌دهد.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = -d\epsilon_3 + d\epsilon_1 = 2d\epsilon_1 \quad (18)$$

از سوی دیگر، با جایگذاری رابطه‌های (۶) و (۹) در رابطه (۱۳) و با توجه به مثبت بودن $d\epsilon_1$ ، رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$d\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{6(d\epsilon_1)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} d\epsilon_1 \quad (19)$$

از ترکیب رابطه‌های (۱۸) و (۱۹)، رابطه (۲۰) نتیجه می‌شود.

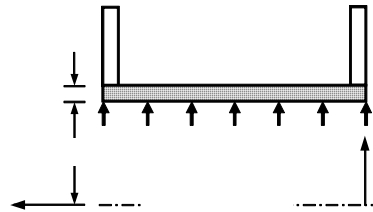
$$\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = \sqrt{3} d\bar{\epsilon} \rightarrow \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \sqrt{3} \bar{\sigma} \quad (20)$$

با جایگذاری رابطه (۲۰) در رابطه (۱۱) در کارگیری رابطه (۱۰)، کرنش بحرانی به صورت رابطه (۲۱) به دست می‌آید.

$$\bar{\epsilon}_{cr} = n \frac{\sqrt{3}}{3} - \epsilon_0 \quad (21)$$

با ترکیب رابطه‌های (۵) و (۱۹) و انتگرال‌گیری تا کرنش بحرانی که در رابطه (۲۱) ارائه شده، شعاع بحرانی مطابق رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

تحلیلی برای شکل‌دهی بیلوز فلزی ارائه شده است. فشار مناسب شکل‌دهی، برای هر نوع ماده، به صورت تابعی از ضخامت، قابل محاسبه است. جهت تأیید تحلیل ارائه شده، نتایج آن با نتایج تجربی موجود در مراجع دیگر مقایسه شده است. در این مقاله هدف، تعیین فشار مجاز شکل‌دهی است. با توجه به مراحل شکل‌دهی که به آن اشاره شد، فقط مرحله بادکردگی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳- مقطع یک نیم‌حلقه اولیه از بیلوز قرار گرفته در قالب

۲- معادلات حاکم و حل تحلیلی

برای مطالعه تحلیلی فرآیند ساخت بیلوز فلزی جهت یافتن بیشینه فشار مجاز شکل‌دهی، ابتدا با انجام فرض‌هایی، معادله‌های حاکم کلی ارائه می‌شوند. پس از آن بر اساس معیار تسلیم فون میسرز، روند تحلیل و رابطه‌ای برای فشار مجاز استخراج خواهد شد.

با توجه به تقارن قطعه و تکرار حلقه‌ها، جهت تحلیل، یک حلقه مطابق شکل ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این شکل می‌توان با تخمین خوبی از نظریه مخازن جداره-نازک برای تحلیل این مرحله استفاده کرد. بر اساس این نظریه، تنش‌های اصلی از رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) تعیین می‌شوند [۱۴].

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{Pr}{t} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = \frac{Pr}{2t} \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_r = 0 \quad (3)$$

در رابطه‌های (۱) تا (۳)، راستاهای r ، θ و z به ترتیب راستاهای شعاعی، محیطی و محوری استوانه و راستاهای اصلی مسأله هستند. راستاهای r و z در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. راستای محیطی θ نیز عمود بر صفحه نشان داده در شکل ۳ است. از رابطه‌های (۱) و (۲)، رابطه (۴) نتیجه می‌شود.

$$\sigma_1 = 2\sigma_2 \quad (4)$$

با چشم‌پوشی از بخش الاستیک کرنش، نموهای کرنش کل اصلی از رابطه‌های (۵)، (۶) و (۷) تعیین می‌شوند [۱۴].

$$d\epsilon_1 = d\epsilon_\theta = \frac{dr}{r} \quad (5)$$

$$d\epsilon_2 = d\epsilon_z = \frac{dz}{z} = 0 \quad (6)$$

$$d\epsilon_3 = d\epsilon_r = \frac{dt}{t} \quad (7)$$

در نتیجه ثابت بودن حجم به رابطه (۸) منجر می‌شود [۱۴].

$$d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3 = 0 \quad (8)$$

ترکیب رابطه‌های (۶) و (۸)، رابطه (۹) را نتیجه می‌دهد.

$$d\epsilon_3 = -d\epsilon_1 \quad (9)$$

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد 316L [۱۴]

$\rho(\text{Kg/m}^3)$	$E(\text{GPa})$	ν	$\sigma_{\text{Yield}}(\text{Mpa})$	$\sigma_{\text{UTS}}(\text{Mpa})$	$k(\text{Mpa})$	n
۸۰۰۰	۲۰۰	۰/۳۳	۲۳۲	۸۸۵	۱۲۷۷	۰/۴۵۶

جدول ۲- شعاع و ضخامت لوله اولیه مورد بررسی

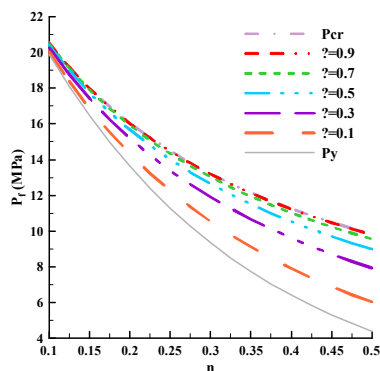
$r_0(\text{mm})$	$t_0(\text{mm})$
۶/۱	۰/۱۲

۳-۱- تعیین فشار نهایی مجاز بر اساس معیار ضخامت

همان گونه که اشاره شد، بر اساس معیار ضخامت، فشار مجاز نهایی به گونه ای محاسبه می شود که تفاضل ضخامت اولیه و ضخامت نهایی مجاز، $(t_0 - t_f)$ ، برابر کسری از تفاضل ضخامت اولیه و ضخامت بحرانی ناپایداری، $(t_0 - t_{cr})$ ، باشد. بر این اساس رابطه (۲۶) برای تعیین ضخامت نهایی مجاز شکل دهی پیشنهاد می شود.

$$t_f = t_0(1 - \xi) + \xi(t_{cr}) \quad , \quad 0 < \xi < 1 \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، شرط $\xi \leq 1$ تضمین می کند ضخامت نهایی مجاز از ضخامت بحرانی کوچکتر باشد $(t_f < t_{cr})$. برای بررسی و ارزیابی این معیار، فشار نهایی مجاز شکل دهی به ازای مقادیر مختلف ξ ، بر حسب تغییرات توان کارسختی، n ، در شکل ۴ رسم شده است. در رسم این نمودارها، به جز توان کارسختی که به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است، مشخصه های هندسی و مکانیکی برای لوله از جدول های ۱ و ۲ انتخاب شده اند.

شکل ۴- نمودار P_f بر حسب n به ازای مقادیر مختلف ضریب ξ ، بر اساس معیار ضخامت

همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، با افزایش ξ از صفر به ۱، نمودار فشار از نمودار مربوط به شروع تسلیم به نمودار مربوط به حالت ناپایداری نزدیک می شود. این نتیجه مطابق انتظار است. اما نکته ای که باید به آن توجه شود آن است که به ازای $\xi \geq 0.5$ نمودارها به نمودار مربوط به حالت ناپایداری بسیار نزدیک می شوند. تعیین شرایط نهایی مجاز بر اساس معیار ضخامت به مفهوم آن است که ضخامتی مانند t_f در محدوده $t_0 \leq t_f \leq t_{cr}$ ، به عنوان پارامتر تعیین شرایط نهایی مجاز شکل دهی، پیشنهاد شود. برای مثال شرایط به ازای $n=0.4$ بررسی می شود. مشاهده می شود به ازای $n=0.4$ ، برای آن که ضخامت از t_0 به $0.5(t_0 + t_{cr})$ کاهش یابد (معادل $\xi=0.5$ در رابطه (۲۶))، فشار باید از $6P_y/4(\text{MPa})$ به $10P_y/5(\text{MPa})$ افزایش یابد. از سوی دیگر برای $n=0.4$ فشار آستانه ی ناپایداری $11P_{cr}/3(\text{MPa})$

$$r_{cr} = r_0 \exp\left(\frac{n - \sqrt{3} \varepsilon_0}{2}\right) \quad (22)$$

به صورت مشابه با ترکیب رابطه های (۷) و (۱۹) و انتگرال گیری تا کرنش بحرانی (۲۱)، ضخامت بحرانی مطابق رابطه (۲۳) به دست می آید.

$$t_{cr} = t_0 \exp\left(-\frac{n - \sqrt{3} \varepsilon_0}{2}\right) \quad (23)$$

با استفاده از کرنش بحرانی (۲۱) در رابطه سویفت، تنش مؤثر بحرانی از رابطه (۲۴) به دست خواهد آمد.

$$\bar{\sigma}_{cr} = k \left(\frac{\sqrt{3}}{3} n\right)^n \quad (24)$$

اکنون با جایگذاری شعاع بحرانی، ضخامت بحرانی و تنش مؤثر بحرانی از رابطه های (۲۲)، (۲۳) و (۲۴) در رابطه (۱۴)، فشار بحرانی به صورت رابطه (۲۵) نتیجه می شود.

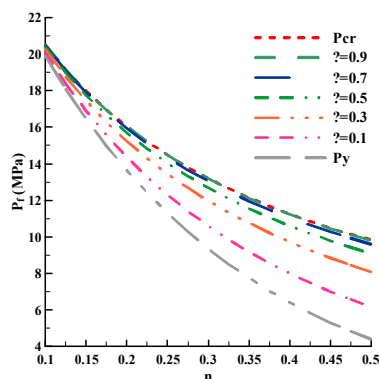
$$P_{cr} = \left(\frac{2\sqrt{3}}{3}\right) \frac{k t_0 \exp\left(-\frac{n - \sqrt{3} \varepsilon_0}{2}\right)}{r_0 \exp\left(\frac{n - \sqrt{3} \varepsilon_0}{2}\right)} \left(n \frac{\sqrt{3}}{3}\right)^n \quad (25)$$

باید توجه داشت که در عمل تنش مؤثر نباید به مقدار بحرانی خود برسد. به عبارت دیگر فشار باید به گونه ای تنظیم شود که تنش مؤثر بین تسلیم و ناپایداری باشد.

۳- انتخاب معیار مناسب برای محاسبه فشار نهایی

فشار نهایی مجاز باید به گونه ای محاسبه شود که بیشترین تغییر شکل ممکن انجام شود، بدون آن که شرایط ناپایداری نهایی رخ دهد. در رابطه های بخش پیشین مشاهده شد که فشار، ضخامت دیواره و کرنش مؤثر، سه کمیت اساسی هستند که می توانند وضعیت تغییر شکل لوله را تعیین و مشخص نمایند. در این مقاله برای تعیین و محاسبه فشار نهایی مجاز سه فرض پیشنهاد و بررسی می شوند. در هر یک از این فرض ها، یکی از سه کمیت اشاره شده به صورت کسری از مقدار خود در وضعیت ناپایداری نهایی در نظر گرفته می شوند. در فرض اول تفاضل ضخامت اولیه و ضخامت نهایی مجاز، $(t_0 - t_f)$ ، برابر کسری از تفاضل ضخامت اولیه و ضخامت بحرانی ناپایداری، $(t_0 - t_{cr})$ ، در نظر گرفته می شود. در فرض دوم، کرنش مؤثر نهایی مجاز، $\bar{\varepsilon}_f$ ، برابر کسری از تفاضل کرنش مؤثر بحرانی ناپایداری، $\bar{\varepsilon}_{cr}$ ، در نظر گرفته می شود. در فرض سوم تفاضل فشار نهایی مجاز و فشار تسلیم، $(P_f - P_y)$ ، برابر کسری از تفاضل بحرانی ناپایداری و فشار تسلیم، $(P_{cr} - P_y)$ ، در نظر گرفته می شود. اساس هر یک از این فرض ها آن است که شرایط شکل دهی با یک ضریب اطمینان بزرگتر از واحد، با شرایط متناظر با حالت ناپایداری نهایی فاصله داشته باشد.

با توجه به کاربردهای بیولوژی، یکی از پرمصرف ترین مواد برای انتخاب به عنوان جنس این قطعه یکی از انواع آلیاژهای 316L است. این آلیاژ در دسته بندی فولادها به عنوان فولاد زنگ نزن آستینیتی شناخته می شود. خواص مکانیکی این فولاد در جدول ۱ و مشخصات اندازه لوله اولیه در جدول ۲ آمده است. شعاع و ضخامت در جدول ۲ از مرجع [۱۵] جهت مقایسه با نتایج تجربی این مرجع برگرفته شده اند.



شکل ۵- نمودار P_f بر حسب n به ازای مقادیر مختلف ضریب ξ ، بر اساس معیار کرنش

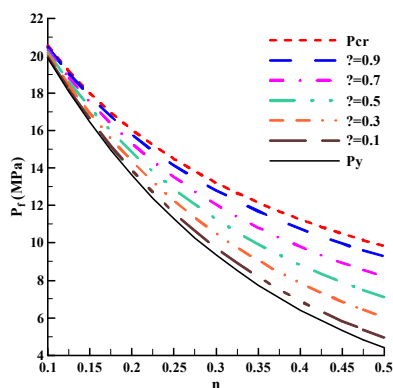
به عبارت دیگر بر اساس معیار کرنش نیز برای آن که شکل‌دهی کافی و مناسبی انجام شده باشد، فشار متناظر (فشار نهایی مجاز) خیلی نزدیک به فشار بحرانی ناپایداری خواهد بود. از این رو معیار کرنش مؤثر نیز نمی‌تواند معیار مناسبی برای تعیین فشار نهایی مجاز باشد.

۳-۳- تعیین فشار نهایی مجاز بر اساس معیار فشار

با توجه به مشکلی که در بررسی دو معیار ضخامت و کرنش مشاهده شد، طبیعی به نظر می‌رسد که خود فشار شکل‌دهی مبنای تعیین شرایط مربوط به شکل‌دهی مجاز نهایی قرار داده شود. مشابه آن‌چه برای دو معیار پیشین گفته شد، بر اساس معیار فشار، شرایط متناظر با وضعیت شکل‌دهی نهایی مجاز به گونه‌ای پیشنهاد می‌شود که تفاضل فشار نهایی مجاز و فشار تسلیم، $(P_{cr}-P_y)$ ، برابر کسری از تفاضل بحرانی ناپایداری و فشار تسلیم، $(P_{cr}-P_y)$ ، باشد. برای این منظور رابطه (۲۸) برای تعیین فشار نهایی مجاز پیشنهاد می‌شود.

$$P_f = P_y(1 - \xi) + \xi(P_{cr}) \quad , \quad 0 < \xi < 1 \quad (28)$$

همانند دو معیار گذشته روشن است که شرط $\xi \leq 1$ در رابطه (۲۷) تضمین می‌کند فشار نهایی مجاز از فشار بحرانی کوچکتر باشد $(P_f < P_{cr})$. برای ارزیابی معیار فشار، مانند دو معیار پیشین، نمودار فشار نهایی مجاز شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف ξ در رابطه (۲۸)، بر حسب تغییرات توان کارسختی، n ، در شکل ۶ رسم شده است.



شکل ۶- نمودار P_f بر حسب n به ازای مقادیر مختلف ضریب ξ ، بر اساس معیار فشار

است. بنابراین برای آن که ξ از صفر به ۰.۵ افزایش یابد، فشار باید به اندازه ۴/۱ (MPa) افزایش یابد. در حالی که برای افزایش ξ از ۰.۵ به ۱ که متناظر با رسیدن به آستانه‌ی ناپایداری است، تنها ۰.۸ (MPa) افزایش فشار کافی است. به بیان دیگر برای تغییر ضخامت در ۵۰٪ نخست از بازه‌ی مجاز $(t_0 - t_{cr})$ به ۴/۱ (MPa) افزایش فشار نیاز است. در حالی که برای تغییر ضخامت در ۵۰٪ دوم از بازه‌ی مجاز $(t_0 - t_{cr})$ فشار تنها باید ۰.۸ (MPa) افزایش یابد. به همین دلیل است که در شکل (۴) به ازای $\xi \geq 0.5$ نمودارها بسیار به هم نزدیک شده‌اند. این موضوع از جهت دیگری نیز می‌تواند بررسی شود. برای شرایطی که در بالا بررسی شد، ضخامت آستانه‌ی ناپایداری $t_0 = t_{cr}/8$ است. بنابراین برای کاهش حدود ۱۰٪ ضخامت اولیه در این حالت، لازم است فشار به حدود ۱۰.۵ (MPa) افزایش یابد که این فشار تنها ۰.۸ (MPa) کمتر از فشار آستانه‌ی ناپایداری است. این موضوع به معنی آن است که بر اساس معیار میزان کاهش ضخامت، برای آن که شکل‌دهی کافی و مناسبی انجام شده باشد، فشار مجاز نهایی خیلی نزدیک به فشار بحرانی ناپایداری خواهد بود. به گونه‌ای که خطای کوچکی در کنترل فشار می‌تواند سبب بروز ناپایداری و در نتیجه شکست در قطعه شود. بر این اساس معیار ضخامت نمی‌تواند معیار مناسبی برای تعیین فشار نهایی مجاز باشد.

۳-۲- تعیین فشار نهایی مجاز بر اساس معیار کرنش مؤثر

مشابه معیار ضخامت، بر اساس معیار کرنش، فشار مجاز نهایی به گونه‌ای محاسبه می‌شود که کرنش مؤثر نهایی مجاز، $\bar{\epsilon}_f$ ، برابر کسری از کرنش مؤثر بحرانی ناپایداری، $\bar{\epsilon}_{cr}$ ، باشد. به این ترتیب رابطه (۲۷) برای تعیین کرنش مؤثر نهایی مجاز پیشنهاد می‌شود.

$$\bar{\epsilon}_f = \xi(\bar{\epsilon}_{cr}) \quad , \quad 0 < \xi < 1 \quad (27)$$

در اینجا نیز شرط $\xi \leq 1$ در رابطه (۲۷) تضمین می‌کند کرنش مؤثر نهایی مجاز از کرنش مؤثر بحرانی کوچکتر باشد $(\bar{\epsilon}_f < \bar{\epsilon}_{cr})$. به صورت مشابه، برای بررسی و ارزیابی معیار کرنش، فشار نهایی مجاز شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف ξ ، بر حسب تغییرات توان کارسختی، n ، در شکل ۵ رسم شده است. در رسم این نمودارها نیز به جز توان کارسختی که به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است، مشخصه‌های هندسی و مکانیکی برای لوله از جدول‌های ۱ و ۲ انتخاب شده‌اند.

همان‌گونه که انتظار می‌رود و در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود، با افزایش ξ از صفر به ۱، نمودار فشار از نمودار مربوط به شروع تسلیم به نمودار مربوط به حالت ناپایداری نزدیک می‌شود. اما همانند معیار ضخامت، برای معیار کرنش نیز به ازای $\xi \geq 0.5$ نمودارهای فشار به نمودار مربوط به حالت ناپایداری بسیار نزدیک می‌شوند. در نتیجه درباره‌ی نامناسب بودن کرنش مؤثر به عنوان معیاری برای تعیین شرایط نهایی مجاز شکل‌دهی، استدلال مشابهی می‌توان ارائه کرد.

نمودارهای شکل ۶ نیز به‌ازای مشخصه‌های هندسی و مکانیکی برای لوله از جدول‌های ۱ و ۲ محاسبه و رسم شده‌اند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با توجه به رابطه خطی فشار بر حسب ضریب ξ ، مشاهده می‌شود که فشار نهایی مجاز، متناسب با افزایش ضریب ξ ، به فشار بحرانی ناپایداری نزدیک می‌شود. به همین دلیل، بر خلاف روند نمودارها در شکل‌های ۴ و ۵، فاصله بین نمودارها با ضریب ξ متناسب است. از این رو می‌توان فشار را به‌عنوان پارامتری که شرایط نهایی مجاز شکل‌دهی بر اساس آن تعیین می‌شود، انتخاب نمود. با توجه به نتایج شکل ۶، رعایت حاشیه اطمینان ۲۰٪ تا ۳۰٪ تا فشار ناپایداری (متناظر با ضریب اطمینان ۱/۲۵ تا ۱/۴)، انتخاب مناسبی برای فشار نهایی مجاز است. بر این اساس فشار نهایی مجاز، متناظر با ضریب $0.7 \leq \xi \leq 0.8$ و مطابق رابطه (۲۹)، به‌عنوان فشار نهایی مجاز پیشنهاد می‌شود.

$$(0.3P_y + 0.7P_{cr}) \leq P_f \leq (0.2P_y + 0.8P_{cr}) \quad (29)$$

۴- بررسی اثر پارامترها بر فشار نهایی مجاز

پس از انتخاب معیار مناسب برای محاسبه فشار نهایی مجاز شکل‌دهی، در این بخش ابتدا معیار معرفی شده ارزیابی و اعتباریابی می‌شود. سپس اثر پارامترهای مختلف مادی در مدل سوییفت بر فشار نهایی مجاز بررسی می‌شوند.

۴-۱- ارزیابی و اعتبارسنجی معیار پیشنهادی فشار مجاز

برای ارزیابی و اعتبارسنجی معیار پیشنهاد شده در این مقاله برای محاسبه فشار نهایی مجاز، از نتایج آزمایش تجربی انجام شده در مرجع [۱۵] استفاده می‌شود. مشخصه‌های مکانیکی و هندسی لوله به‌کار رفته در آزمایش مرجع [۱۵] در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شدند. عرب‌بیگی و همکارانش [۱۵] در آزمایش‌های خود، فشار مناسب برای مرحله بادرگدی به‌منظور شکل‌دهی مناسب بیلوز از لوله با مشخصه‌های جدول ۱ و ۲ را به‌دست آورده‌اند. با توجه به تعریف فشار نهایی مجاز در این مقاله، در حقیقت فشار تجربی پیشنهاد شده در مرجع [۱۵] همان فشار نهایی مجاز است. در جدول ۳ فشار تجربی پیشنهادی مرجع [۱۵] با فشار مجاز نهایی محاسبه شده بر اساس معیار تحلیلی رابطه (۲۹)، مقایسه شده‌اند. خطای حدود ۸٪ بین نتیجه تجربی و تحلیلی، نشان می‌دهد معیار تحلیلی پیشنهادی در رابطه (۲۹) برای فشار نهایی مجاز در شکل‌دهی بیلوز، از اعتبار مناسبی برخوردار است.

جدول ۳- فشار نهایی مجاز تحلیلی با نتیجه تجربی مرجع [۱۵]، برای

لوله با مشخصه‌های جدول ۱ و ۲

روش محاسبه فشار	تحلیلی (رابطه (۲۹))	تجربی [۱۵]
بازه پیشنهادی برای فشار (MPa)	۸٫۹-۷۳٫۲۲	۹٫۱-۵

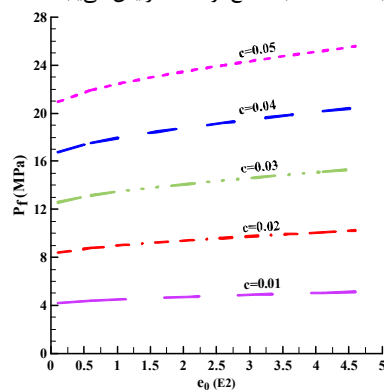
۴-۲- بررسی اثر پارامترهای مادی بر فشار نهایی مجاز

پس از تأیید اعتبار مدل تحلیلی ارائه شده برای پیش‌بینی فشار نهایی مجاز، در این بخش اثر پارامترهای مادی مدل سوییفت و نسبت ضخامت به شعاع لوله، بر فشار نهایی مجاز بررسی می‌شوند. پارامترهای مادی شامل کرنش جبرانی، ϵ_0 ، توان کرنش-سختی، n ، و ضریب

استحکام، k ، می‌شوند. برای این منظور، به‌جز پارامتر مادی که متغیر در نظر گرفته می‌شود، دو پارامتر مادی دیگر بر اساس داده‌های مادی جدول ۱ انتخاب می‌شوند. برای بررسی اثر هندسه لوله بر فشار نهایی مجاز، نسبت ضخامت دیواره به شعاع لوله مطابق رابطه (۳۰) تعریف می‌شود.

$$c = \frac{t_0}{r_0} \quad (30)$$

با معرفی این نسبت، در هر مرحله نمودار فشار به‌ازای مقدارهای مختلف نسبت هندسی c رسم می‌شوند. شکل ۷ نمودار فشار نهایی مجاز را بر حسب کرنش جبرانی، به‌ازای مقدارهای مختلف نسبت ضخامت به شعاع لوله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش کرنش جبرانی در یک بازه به‌نسبت بزرگ که برای فلزها متداول است، سبب افزایش کمی در فشار نهایی مجاز می‌شود. اما این افزایش قابل توجه نیست. هم‌چنین فشار نهایی مجاز متناسب با افزایش نسبت ضخامت به شعاع لوله، c ، افزایش می‌یابد.



شکل ۷- نمودار فشار نهایی مجاز، P_f ، بر حسب کرنش جبرانی، ϵ_0 ، به‌ازای مقدارهای مختلف نسبت ضخامت به شعاع، c

این موضوع به‌دلیل آن است که مطابق رابطه‌های (۱۵) و (۲۵)، هم فشار تسلیم و هم فشار ناپایداری متناسب نسبت هندسی c هستند. در نتیجه فشار نهایی مجاز نیز که ترکیب خطی از این دو فشار است با نسبت هندسی c متناسب است.

در شکل ۸ نمودار فشار نهایی مجاز بر حسب توان کرنش-سختی، به‌ازای مقدارهای مختلف نسبت ضخامت به شعاع لوله نشان داده شده است. نمودارهای شکل ۸ نشان می‌دهند با افزایش توان کرنش-سختی، فشار نهایی مجاز کاهش می‌یابد. این کاهش به‌دلیل آن است که کرنش‌ها از ۱ کوچکتر هستند. در نتیجه هنگامی که توان کرنش-سختی افزایش می‌یابد، کرنش‌ها به توان بزرگتری می‌رسند و حاصل، مقداری کوچکتر خواهد بود. در این نمودار نیز افزایش تناسبی فشار نهایی مجاز با افزایش نسبت هندسی c دیده می‌شود.

جبرانی، ϵ_0 ، کمترین اثر را بر فشار نهایی مجاز دارد. هم‌چنین فشار نهایی مجاز به‌صورت خطی با ضریب استحکام، k ، و هم‌چنین نسبت هندسی، C ، افزایش می‌یابد.

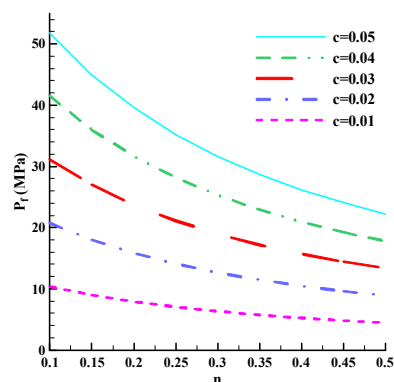
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی تحلیلی برای تعیین و پیش‌بینی فشار نهایی مجاز در مرحلهٔ بادکردگی در فرآیند ساخت بیلوزها به‌روش هیدروفورمینگ ارائه شده است. این روش بر اساس نظریهٔ مخزن‌های استوانه‌ای جداره-نازک در بسته، تحت فشار داخلی، است. فرض می‌شود با افزایش فشار، شکل استوانه حفظ شود. به‌گونه‌ای که تنها شعاع و ضخامت آن تغییر کند. از تغییر شکل الاستیک چشم‌پوشی شده و رابطهٔ سوییفت برای منحنی تنش-کرنش ماده انتخاب شده است. با استفاده از شرط ناپایداری در کشش، فشار بحرانی و کرنش مؤثر بحرانی در لحظهٔ ناپایداری تعیین شده‌اند. در ادامه سه معیار برای محاسبهٔ فشار نهایی مجاز پیشنهاد و بررسی شده است. پس از انتخاب معیار مناسب، فشار نهایی مجاز به‌صورت تحلیلی برای شرایط یک آزمون تجربی از پژوهش‌های پیشین محاسبه و با نتیجهٔ تجربی پیشنهادی مرجع مقایسه شد. خطای نزدیک به ۸٪ نشان‌دهندهٔ اعتبار تحلیل و معیار ارائه شده است. در پایان اثر پارامترهای مادی در رابطهٔ سوییفت و هم‌چنین نسبت هندسی ضخامت به شعاع لوله، بر فشار نهایی مجاز بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد توان کرنش-سختی بیشترین اثر را بر تغییر فشار نهایی مجاز دارد. به‌گونه‌ای که هر چه این توان کوچکتر باشد، فشار نهایی مجاز بزرگتر خواهد بود. در مقابل کرنش جبرانی، ϵ_0 ، کمترین اثر را بر فشار نهایی مجاز دارد. هم‌چنین فشار نهایی مجاز به‌صورت خطی با ضریب استحکام، k ، و هم‌چنین نسبت هندسی، C ، افزایش می‌یابد.

لازم به یادآوری است که همهٔ مقدارهای در نظر گرفته شده برای پارامترهای مادی، لزوماً ممکن است متناظر با مشخصهٔ فیزیکی یک مادهٔ واقعی نباشد. اما تغییر پیوسته این کمیت‌ها در هنگام بررسی اثر پارامترها، این امکان را فراهم می‌سازد که اثر تغییر آن پارامتر بر خصوصیت یا ویژگی مورد بررسی به‌صورت کامل‌تر درک شود. ضمن آن‌که تعیین دقیق مقدارهای یک پارامتر که نشان‌گر مشخصهٔ مکانیکی یک مادهٔ واقعی و حقیقی باشد، در عمل امکان‌پذیر نیست. بر اساس جستجوی نگارندگان، در پژوهش‌های پیشین مطالعهٔ تحلیلی برای تعیین فشار مجاز در شکل‌دهی بیلوزهای فلزی به‌روش هیدروفورمینگ انجام نشده است.

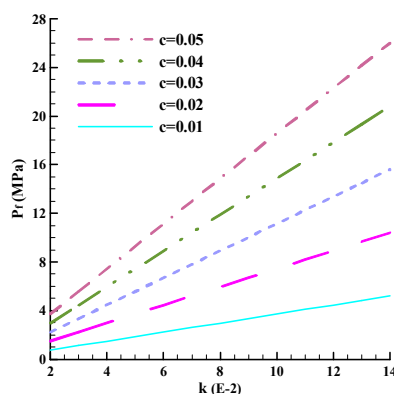
۶- نمادها

C	نسبت ضخامت به شعاع
E	مدول الاستیسیته (MPa)
k	ضریب استحکام ماده در رابطهٔ سوییفت (MPa)
n	توان کرنش-سختی در معادلهٔ سوییفت
P_y	فشار در لحظهٔ شروع تسلیم (MPa)
P_f	فشار نهایی مجاز شکل‌دهی (MPa)
P_{cr}	فشار بحرانی در لحظهٔ ناپایداری (MPa)



شکل ۸- نمودار فشار نهایی مجاز، P_f ، بر حسب توان کرنش-سختی، n ، به‌ازای مقدارهای مختلف نسبت ضخامت به شعاع، C

به‌عنوان پارامتر مادی سوم، اثر افزایش ضریب استحکام در رابطهٔ سوییفت، k ، بر فشار نهایی مجاز در شکل ۹ نمایش داده شده است. نمودارهای شکل ۹ نشان می‌دهند با افزایش ضریب استحکام، فشار نهایی مجاز نیز به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. دلیل خطی بودن این افزایش این است که بر اساس رابطه‌های (۱۵) و (۲۵)، هم فشار آغاز تسلیم و هم فشار ناپایداری متناسب با ضریب استحکام هستند.



شکل ۹- نمودار فشار نهایی مجاز، P_f ، بر حسب ضریب استحکام، k ، به‌ازای مقدارهای مختلف نسبت ضخامت به شعاع، C

در نتیجه فشار نهایی مجاز نیز که به‌صورت ترکیب خطی این دو فشار تعریف شده است (رابطهٔ (۲۸)) با افزایش ضریب استحکام به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

لازم است یادآوری شود که بازهٔ تغییرات هر یک از سه پارامتر مادی ϵ_0 ، n و k به‌گونه‌ای انتخاب شده که بر اساس گزارش متن‌های علمی موجود، دربرگیرندهٔ مقدار این پارامترها برای فلزهای مختلف، باشد. بازهٔ تغییر نسبت هندسی C نیز به‌گونه‌ای انتخاب شده که فرض جداره-نازک بودن مخزن اعتبار داشته باشد.

در مقایسهٔ نمودارها در سه شکل ۷، ۸ و ۹، می‌توان نتیجه گرفت که بین سه پارامتر مادی در رابطهٔ سوییفت، توان کرنش-سختی، n ، بیشترین اثر را بر فشار نهایی مجاز دارد. به‌گونه‌ای که هر چه این توان کوچکتر باشد، فشار نهایی مجاز بزرگتر خواهد بود. در مقابل کرنش

[13] Pierce O. and Evans S. L., Failure Analysis of a Metal Bellows Flexible Hose Subjected to Multiple Pressure Cycles, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 2, No.1, pp. 11-20, 2012.

[14] ASM Metals Handbook, *Forming and Forging*, ASM International, Vol. 14, 9th Edition, pp. 324-342, 1998.

[۱۵] عرب‌بیگی م، مرادی م، قاسمی ب. و خلیلیان م، بررسی تغییر ضخامت بی‌لوزهای فلزی به‌روش هیدروفرمینگ از لوله‌های جدارنازک فولاد زنگ‌نزن 316L، نشریه علم مواد، د. ۲، ش. ۳، ص ۴-۱۳، ۱۳۸۹.

r_0	شعاع اولیه لوله (mm)
r_{cr}	شعاع لوله در لحظه ناپایداری (mm)
t_0	ضخامت اولیه لوله (mm)
t_{cr}	ضخامت لوله در لحظه ناپایداری (mm)
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	کرنش‌های اصلی
$\bar{\epsilon}$	کرنش مؤثر (معادل)
$\bar{\epsilon}_f$	کرنش نهایی مجاز
σ_y	تنش تسلیم (MPa)
σ_{UTS}	تنش در نقطه گلوپی (MPa)
$\bar{\sigma}$	تنش مؤثر (معادل) (MPa)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	تنش‌های اصلی

۷- مراجع

- [1] Expansion Joints, <http://www.usbellows.com>, Accessed Nov 15, 2015.
- [2] Jakubauska V. and Weaver D. S., Transverse Natural Frequencies and Flow Induced Vibrations of Double Bellows Expansion Joints, *Fluids and Structures*, Vol. 13, No. 1, pp. 461-479, 1999.
- [3] Satoshi I., Hiroshi K. and Masanori K., Evaluation of Mechanical Behavior of New Type Bellows with Two Directional Convolutions, *Nuclear Engineering & Design*, Vol. 19, No.1, pp. 107-114, 2000.
- [4] Becht C., Fatigue of Bellows a New Design Approach, *Pressure Vessels & Piping*, Vol. 77, No. 1, pp. 842-850, 2000.
- [5] Zhu Y. Z., Wang H. F. and Sang Z. F., The Effect of Environmental Medium on Fatigue Life for U-Shaped Bellows Expansion Joints, *Fatigue*, Vol. 28, No. 1, pp. 28-32, 2006.
- [6] Kang B. H., Lee M. Y., Shon S. M. and Moon Y. H., Forming Various of Tubular Bellows Using a Single-Step Hydroforming Process, *Materials processing Technology*, Vol. 194, No. 1-3, pp. 1-6, 2007.
- [7] Lee S. W., Study on the Forming Parameters of the Metal Bellows, *Material Processing Technology*, Vol. 130-131, No. 1, pp. 47-53, 2002.
- [8] Kanga B. H., Lee M. Y., Shon S. M. and Moon Y. H., Forming Various Shapes of Tubular Bellows Using a Single-Step Hydroforming Process, *Material Processing Technology*, Vol. 194, No. 1, pp. 1-6, 2007.
- [9] Faraji G., Mosavi Mashhadi M. and Norouzfard V., Evaluation of Effective Parameters in Metal Bellows Forming Process, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 7, pp. 63-71, 2009.

[۱۰] عرب‌بیگی م، مرادی م، قاسمی ب. و ستار م، بررسی تحلیلی، تجربی و شبیه‌سازی تأثیر فشار داخلی فرآیند هیدروفرمینگ، بر بی‌لوزهای تولیدشده از لوله‌های جدارنازک فولاد ضدزنگ 316L فصل‌نامه فرآیندهای نوین ساخت و تولید، د. ۱، ش. ۲، ص ۴۵-۵۱، ۱۳۸۹.

[۱۱] الیاسی م، بخشی م، گرجی ع. و علی‌نژاد ق. م، بررسی امکان شکل‌دهی لوله های کنگره‌ای (Bellows) در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب بسته با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، دومین کنفرانس بین‌المللی و هشتمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، تهران، ایران، ۱۳۸۶.

[12] Asnafi N., Analytical Modeling of Tube Hydroforming, *Thin-Walled Structures*, Vol. 34, No. 4, pp. 295-330, 1999.