

مطالعه تجربی و عددی فرآیند شکل دهی بیلوزهای فلزی

قادر فرجی^۱، محمود موسوی مشهدی^۲، حسین کاشانی زاده^۳ و محمدکاظم بشارتی^۴

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

چکیده

در ساخت بیلوزهای فلزی، نسبت قطر خارجی به قطر ریشه از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است، مخصوصاً زمانی که این نسبت بزرگ باشد. در این موارد خطر پارگی و یا چروکیدگی در این نوع قطعات بسیار بالا است. بنابراین، انتخاب و کنترل پارامترهای فرآیندی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بیلوز فلزی در این پژوهش در دو مرحله با استفاده از تیوب اولیه ساخته می‌شود که شامل بالچینگ و فولدینگ است. پس از مرحله فولدینگ، ابتدا فشار داخلی و سپس نیروی محوری برداشته شده، برگشت فنری باعث افزایش طول بیلوز می‌گردد. مشخصات اساسی بیلوز ساخته شده شامل قطر خارجی، برگشت فنری و توزیع ضخامت آن است. پارامترهای اصلی که روی مشخصه‌های مذکور اثر می‌گذارد شامل فشار داخلی، کورس اولیه و مقدار پیشروی محوری می‌باشد. در این مقاله، یک مطالعه عددی پارامتری انجام شده و تأثیر پارامترهای اصلی روی کیفیت بیلوزهای فلزی بررسی شده است. پارامترهای مشخصی برای رسیدن به بیلوز مطلوب از بررسی پارامتری به دست آمده و تست های تجربی با این پارامترها انجام شده است. نتایج به دست آمده به روشهای اجزاء محدود و تجربی مطابقت بسیار خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: بیلوز فلزی، متد اجزاء محدود، شکل دهی فلزات

Experimental and Finite Element Analysis of Metal Bellows Manufacturing

G. Faraji, H. Kashanizadeh, M. Mosavi, and M.K. Besharati
Mech. Eng. Group, Tehran Univ.

ABSTRACT

Manufacturing of metal bellows with high ratio of crown to root diameter is very sensitive to design parameters, because of bursting possibilities. In this work, a process is introduced in which metal bellows are manufactured from tubes using bulging and folding processes. After the folding process, internal pressure, axial force, and annular plate dies are removed and the length of the bellows is increased with spring back. The quality of the final product depends on spring back, crown diameter, and thickness distribution. The main design parameters, which affect the quality of the products, are internal pressure, die course, and axial feeding. In this work, a parametric study was performed, using a commercial explicit finite element code and the effects of the main design parameters on the quality of the product is studied. Then, the design parameters leading to a product with acceptable quality were obtained numerically. Finally, an experiment was conducted to produce the metal bellows. The numerical and the experimental result showed very close agreements.

Key Words: Metal Bellows, Finite Element Method, Metal Forming, Experimental Study

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد (نویسنده پاسخگو): gfaraji@engmail.ut.ac.ir

۲- استاد

۳- کارشناس ارشد

۴- استاد یار

۱- مقدمه

بیلوزهای فلزی در صنایع نظامی و میکروالکترومکانیک کاربردهای ویژه‌ای دارند و در برخی موارد نیز دارای کاربردهایی در صنایع یخچال‌سازی و تهویه مطبوع برای کنترل دما هستند. یکی از مهم‌ترین کارایی بیلوزها جذب انبساط و انقباضات ایجاد شده در سیستم‌ها است. کارهای تحقیقاتی اخیر بیشتر روی خصوصیات بیلوزها و عملکرد آنها است. برخی از محققان ترک‌های حاصل از خوردگی تنشی بیلوزهای فلزی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۷]. پژوهش‌های زیادی در ارتباط با بررسی و تخمین عمر خستگی و کماتش آنها و عوامل متأثر بر اینها صورت گرفته است [۳، ۴]. همچنین مشخصات دینامیکی آنها [۱، ۲] و تنش‌های ناشی از فشارهای داخلی، تغییر شکل‌های محوری و ارتعاشات [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. اما تعداد مقالات منتشر شده درباره فرآیندهای ساخت بیلوزهای فلزی بسیار کم است. به طور کلی بیلوزهای فلزی در چهار مرحله از ورق ساخته می‌شوند که عبارت‌اند از: کشش عمیق، اتوکشی، بالجینگ تیوب و فولدینگ [۶]. در این مقاله دو مرحله بالجینگ و فولدینگ مطالعه می‌شوند. در مرحله بالجینگ، صفحه‌های فلزی در فواصل مشخصی که همان کورس اولیه گفته می‌شود، دور تیوب قرار می‌گیرند و فشار داخلی تا یک مقدار مشخصی افزایش می‌یابد. در این مرحله هیچگونه حرکت محوری وجود ندارد و تیوب در این مرحله حالت بشکه‌ای پیدا می‌کند. زمانی که فشار به مقدار مشخصی می‌رسد مرحله فولدینگ شروع می‌شود. در این مرحله فشار داخلی ثابت مانده و حرکت محوری دو سر تیوب بشکه‌ای شده آغاز می‌شود. وقتی دو سر تیوب تا مقدار مشخصی به هم نزدیک شدند، قطعه نهایی شکل می‌گیرد. در نهایت فشار داخلی و نیروی محوری برداشته می‌شود و در نتیجه برگشت فنری اتفاق می‌افتد. برگشت فنری به خاطر توزیع دوباره تنش‌های داخلی در قطعه نهایی است. پارامترهای مؤثر در فرآیند شامل قطر اولیه تیوب، ضخامت تیوب، کورس اولیه (فاصله قیدهای صفحه‌ای)، مقدار پیشروی و فشار داخلی است. برای یک بیلوز مشخص مقادیر قطر و ضخامت تیوب تغییر نمی‌کنند، بنابراین سه پارامتر انتهایی بررسی شده است. این پارامترها روی قطر خارجی بیلوز، طول بیلوز بعد از برگشت فنری و توزیع ضخامت که کیفیت بیلوز تولید شده را مشخص می‌کند، تأثیر می‌گذارند. هدف این تحقیق شبیه‌سازی و مطالعه

پارامترهای شکل‌دهی بیلوزهای فلزی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit و استفاده از آنها برای ساخت بیلوز با ابعاد مشخص است. حساسیت فرآیند به لحاظ نسبت کشش زیاد، بالا است. در عمل کنترل پارامترهای فرآیند به سبب حساسیت بالای فرآیند، بسیار مشکل است.

اجزای محدود

شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS صورت گرفته است. به خاطر مسائل مربوط به واگرایی روش ضمنی^۱ از روش حل صریح^۲ استفاده شده است. مدل به صورت دوبعدی هم‌محور^۳ است و یکی از ده حلقه بیلوز به خاطر تقارن، مدل‌سازی شده است. تمام اندازه‌ها در شکل ۱ و جدول ۱ آمده است، که t , r و L به ترتیب شعاع، ضخامت و طول اولیه تیوب هستند. D_0 فاصله اولیه قیدهای صفحه‌ای و t_0 ضخامت قیدهای صفحه‌ای است. نمودار تنش کرنش به صورت $\sigma = K\epsilon^n$ می‌باشد که K و n در جدول ۱ بیان شده‌اند. خواص الاستیکی، چگالی و ضریب اصطکاک نیز در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. خواص مکانیکی از طریق انجام تست کشش روی سه عدد از لوله اولیه حاصل شده است. مراحل مختلف فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. فرآیند شامل سه مرحله بالجینگ، فولدینگ و برگشت فنری است. نمودار بارگذاری مربوط به فشار داخلی و پیشروی محوری در شکل ۲ نشان داده شده است. در مرحله بالجینگ فشار داخلی به صورت خطی با زمان افزایش می‌یابد و هیچگونه حرکت محوری وجود ندارد (۰-۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۵ ثانیه در شکل ۲). در مرحله فولدینگ پیشروی محوری به انتهای تیوب اعمال می‌شود؛ در حالی که فشار داخلی ثابت است (۰/۰۱-۰/۰۰۵ ثانیه در شکل ۲)، در مرحله برگشت فنری، نیروی محوری، فشار برداشته می‌شود و طول بیلوز افزایش می‌یابد. آزمایش‌های تجربی و تحلیل اجزای محدود شرایط به صورتی است که در مرحله بالجینگ هیچگونه حرکت محوری وجود ندارد و فشار داخلی به صورت خطی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در مرحله فولدینگ فشار ثابت می‌ماند و

1- Implicit

2- Explicit

3- Axisymmetric

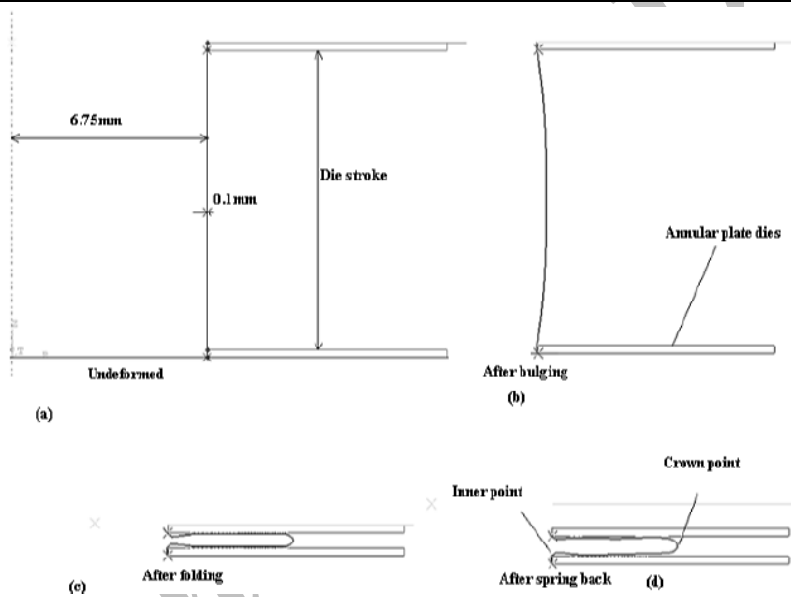
پیشروی محوری به انتهای تیوب اعمال می‌شود.

شده، زیرا تیوب اولیه قبل از تولید بیلوز کاملاً آنیل می‌شود. برای مش‌بندی تیوب از المان‌های پوسته‌ای دوبعدی با دو نود استفاده شده است. نوع مش‌بندی به صورت شبکه تبعیضی است.

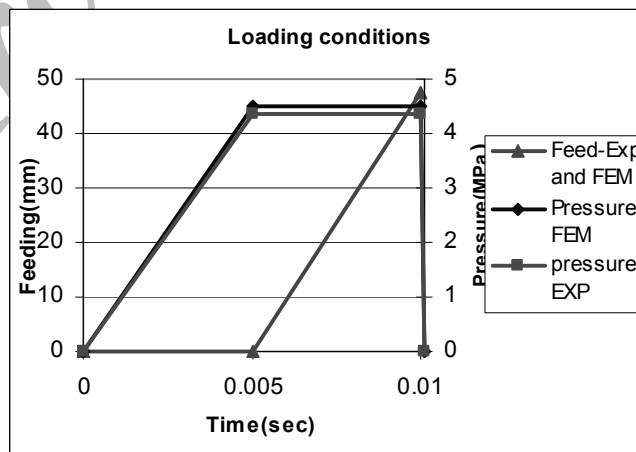
پیشروی محوری فقط به انتهای تیوب وارد می‌شود و حرکت صفحات فلزی به حرکت تیوب وابسته می‌باشد. در مرحله برگشت فنری ابتدا فشار داخلی و سپس نیروی محوری و صفحات فلزی برداشته می‌شوند. جنس تیوب، ایزوتروپیک فرض

جدول ۱- خواص مکانیکی، ابعاد و ضریب اصطکاک.

خواص مکانیکی						ابعاد					اصطکاک
n	K(Mpa)	UTS(Mpa)	E(Gpa)	ν	$\rho(Kg/m^3)$	r	t	D_c	t_d	L_0	μ
0.233	635	386	92	0.34	8000	6.75	0.1	10	0.5	105	0.1



شکل ۱- مراحل مختلف برای هر حلقه از بیلوز.



شکل ۲- شرایط بارگذاری برای آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی اجزای محدود.

Die course(mm)	Internal pressure(MPa)	Axial displacement(mm)
8	4.35	85%
10	4.5	95%
12	4.8	75%

صفحات فلزی (قیود) از جنس فولاد زنگ نزن با سختی حدود ۵۰ HRC و به ضخامت ۰/۵ mm می‌باشند. موقعیت صفحات فلزی و تیوب در شکل ۳ ب و قطعه نهایی در شکل ۳ ج نشان داده شده است.

بررسی نتایج

مطابق جدول ۴، با افزایش کورس قالب، رنج تغییرات فشار برای رسیدن به قطعه بدون چروک و پارگی کاهش می‌یابد و باعث افزایش حساسیت فرآیند به فشار می‌شود. بنابراین حد پایین فشار مقداری است که قطعه چروک نمی‌خورد و حد بالای آن زمانی است که قطعه پاره نمی‌شود و این مسئله با عث پیچیدگی و مشکل شدن ساخت بیلوز می‌شود. در این مقاله نسبت قطر خارجی بیلوز به قطر تیوب برای کورس قالب ۱۰ mm حدود ۱/۶۷ است که در مقایسه با مرجع [۶] که ۱/۵۲ است، نسبتاً بالا می‌باشد. هر چه این نسبت بالا باشد، حساسیت فرآیند افزایش می‌یابد. برای مثال: در مرجع [۶] محدوده تغییرات فشار برای رسیدن به قطعه مطلوب ۹٪ است که این مقدار در این تحقیق به کمتر از ۳٪ کاهش یافته است. بنابراین کنترل دقیق فشار بسیار مهم است و با افزایش این نسبت حساسیت آن افزایش می‌یابد. شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در قطعه نهایی کاهش ضخامت در ناحیه بیرونی ۱ (المان ۴۳) و افزایش آن در ناحیه داخلی ۲ (المان ۸۲) قابل مشاهده است. حداقل ضخامت اندازه‌گیری شده قطعه ساخته شده ۰/۰۷۳ mm بوده است شکل ۱۰.

در این نوع مش‌بندی هرچه به ناحیه مرکزی حلقه نزدیک می‌شویم المان‌ها ریزتر می‌شوند. برای مش‌بندی هر حلقه از ۸۰ المان استفاده می‌شود. صفحات فلزی، صلب فرض شده‌اند. تیوب و صفحات فلزی در ناحیه تماس با یکی قرار دادن درجه آزادیشان در جهت Z، به همدیگر وصل می‌شوند. بنابراین در مرحله فولدینگ، صفحات فلزی در ناحیه تماس با تیوب حرکت می‌کنند. حرکت صفحات فلزی در جهت X و Y محدود می‌شوند و شعاع تیوب در ناحیه تماس نمی‌تواند افزایش یابد. پارامترهای اصلی فرآیند شامل ضخامت اولیه تیوب، قطر تیوب، کورس قالب (فاصله اولیه صفحات فلزی)، فشار داخلی و جابجایی محوری هستند. به دلیل آنکه در این پژوهش بیلوز با ضخامت و قطر مشخصی در نظر است، در این کار اثر پارامترها روی توزیع ضخامت، قطر بیلوز و برگشت فنی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول ۲ پارامترهای طراحی و مقادیر آنها را نشان می‌دهد. کورس قالب ۱۰ mm، فشار داخلی ۴/۵ MPa و مقدار پیشروی ۹۵٪ به عنوان مقادیر پایه در بررسی پارامتری انتخاب می‌شوند جدول ۲.

در این مقاله هر بار دو پارامتر ثابت فرض شده و اثر تغییرات پارامتر سوم بررسی می‌شود.

آزمایشات تجربی

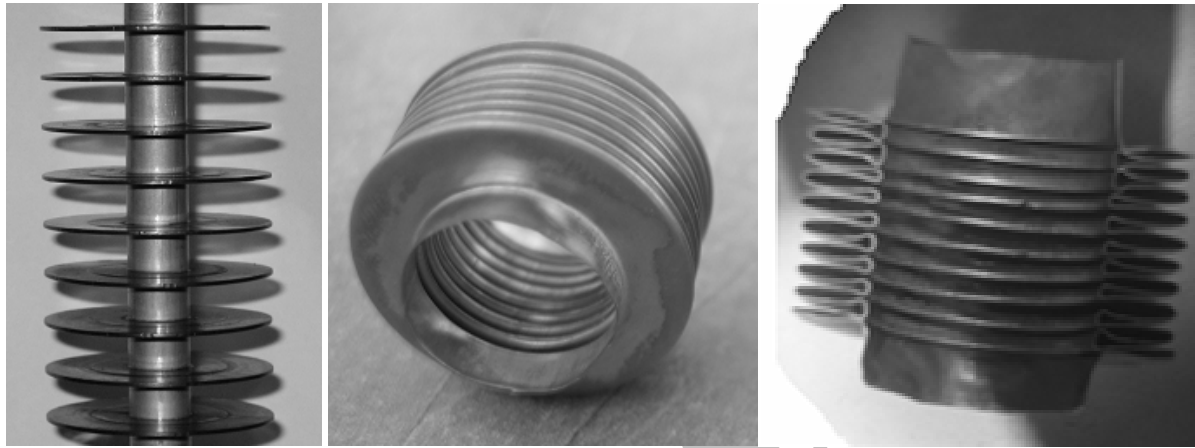
جنس تیوب، فسفر برنز CuSn6 آنیل شده است. عناصر موجود در جدول ۳ بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود به عنوان مقادیر اولیه برای آزمایش‌های تجربی استفاده می‌شوند که باعث کاهش سعی و خطا در عمل می‌شود. مقادیر کورس قالب، مقدار پیشروی و فشار داخلی به ترتیب ۱۰ mm، ۹۵٪ و ۴/۳۵ MPa انتخاب شده‌اند. برای ایجاد فشار داخلی از یک پمپ دنده‌ای استفاده شده است. با توجه به وجود نوسانات فشار و حساسیت زیاد این فرآیند به این نوسانات، استفاده از یک سیستم برای حذف نوسانات فشار ضروری است. با توجه به ضخامت کم تیوب، یکی از مشکلات فرآیند آب‌بندی انتهای تیوب بود.

1- Crown point

2- Inner point

جدول ۳- عناصر موجود در جنس تیوب اولیه

Zn	Cd	Mg	Si	Fe	Al	Cu	Sb	Sn	P	Cr	As	Na
0.0159	<0.01	<0.02	0.0123	0.0103	<0.01	BAL	<0.01	6.1164	0.0446	0.0168	<0.01	0.012



(ج)

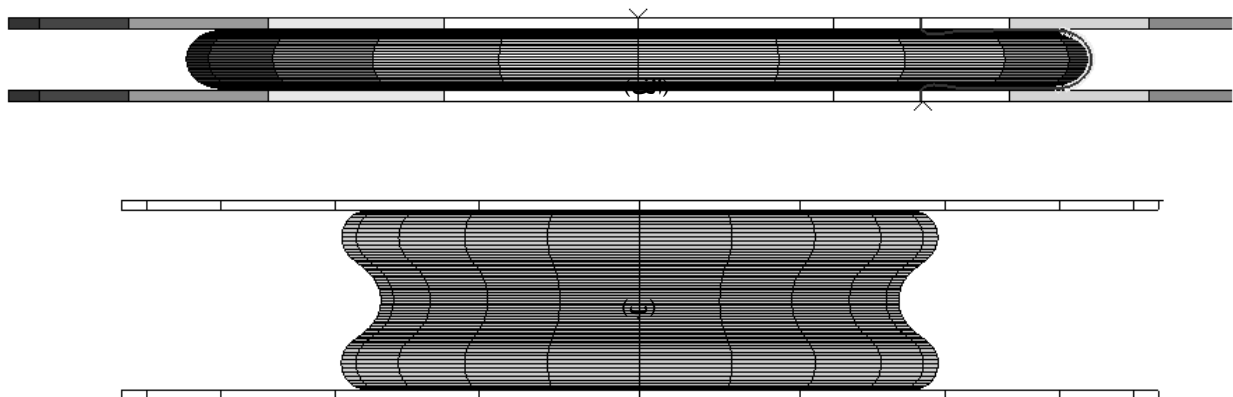
(ب)

(الف)

شکل ۳- (الف) مقطع برش خورده قطعه با استفاده از وایرکات (ب) موقعیت صفحات فلزی و تیوب (ج) بیبلوز نهایی.

جدول ۴- نتایج اجزای محدود فشار و کورس‌های مختلف (P=4.8-4.5-4.35-4.2, F=95%, ds=8,10mm).

فشار (Mpa)	4.2	4.35	4.5	4.8
8 کورس قالب	چروکیدگی	کیفیت مطلوب	کیفیت مطلوب	نازک شدگی بیش از حد
10 کورس قالب	چروکیدگی	چروکیدگی	کیفیت مطلوب	نازک شدگی بیش از حد



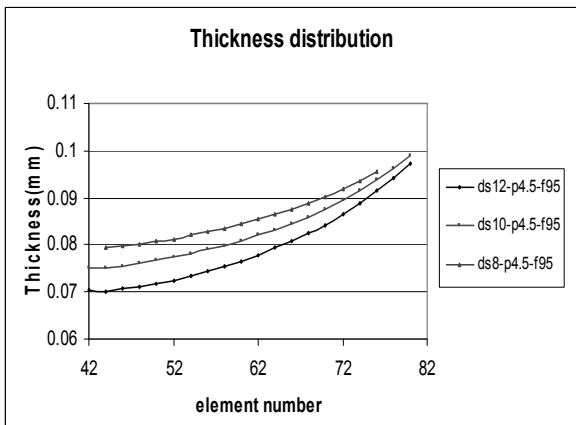
شکل ۴- قطعه قابل قبول (الف) و چروک شده (ب) حاصل از متد اجزای محدود.

کورس قالب بیشتر از پیشروی است. در کورس قالب ۱۲mm حداکثر کاهش ضخامت ۳۰٪ است که بیش از حد قابل قبول است. اما در کورس ۱۰mm توزیع ضخامت قابل قبول است. یکی از پارامترهای اساسی در تولید بیلوزهای فلزی فشار داخلی است. شکل ۷ تأثیر فشار داخلی را روی توزیع ضخامت بیلوز نشان می‌دهد. افزایش فشار داخلی باعث کاهش ضخامت بیشتر خصوصاً در ناحیه بیرونی (المان ۴۲) می‌شود. توزیع ضخامت در شبیه‌سازی اجزای محدود و قطعه ساخته شده در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس این شکل حداکثر اختلاف در ناحیه بیرونی بیلوز است و دارای ۸٪ خطا می‌باشد. شکل ۸ تأثیر کورس قالب را روی قطر خارجی بیلوز نشان می‌دهد. مطابق این شکل افزایش کورس باعث افزایش قطر خارجی بیلوز می‌شود. این افزایش به صورت خطی می‌باشد. شبیه‌سازی اجزای محدود نشان می‌دهد که افزایش فشار تأثیر کمی روی قطر بیلوز دارد. در شکل ۹ تأثیر کورس قالب روی برگشت فنری نشان داده شده است. با افزایش کورس قالب برگشت فنری افزایش می‌یابد و حساسیت برگشت فنری در کورس‌های بالاتر، بیشتر می‌باشد. تأثیر فشار روی برگشت فنری هم در شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش فشار باعث افزایش برگشت فنری می‌شود. همچنین افزایش کورس باعث افزایش قطر خارجی می‌شود ولی خطر چروکیدگی افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی در جدول ۵ بیان شده است. طبق جدول ۵، پس از حذف بار طول بیلوز ۷۰٪ در تست تجربی و ۷۵٪ در اجزای محدود افزایش می‌یابد. در آزمایش تجربی شعاع خارجی بیلوز ۰/۶٪ بعد از برگشت فنری و در اجزای محدود ۰/۵٪ کاهش می‌یابد. فشار در آزمایش تجربی برای رسیدن به قطعه مطلوب ۴/۳۵MPa و در شبیه‌سازی اجزای محدود ۴/۵MPa است که ۲/۴٪ خطا را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ تغییرات ضخامت بیلوز ساخته شده را نشان می‌دهد.

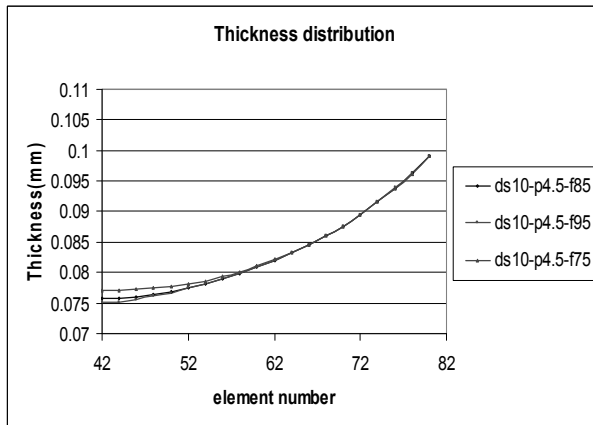
برای اندازه‌گیری توزیع ضخامت قطعه به خاطر هندسه پیچیده و کم بودن ضخامت، روش‌های اندازه‌گیری معمول قابل استفاده نمی‌باشند. بنابراین برای اندازه‌گیری توزیع ضخامت ابتدا قطعه نهایی با استفاده از دستگاه وایرکات^۱ در جهت قطری به دو قسمت بریده می‌شود، سپس مقطع قطعه برای از بین بردن پلیسه‌های حاصل از برش و افزایش دقت، پلیش‌کاری می‌شود. در انتها ضخامت قطعه در نواحی مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۱۰۰ اندازه‌گیری می‌شود.

بیلوز نهایی سالم و چروک خورده حاصل از اجزای محدود در شکل ۴ نشان داده شده است. از نتایج تجربی مشاهده می‌شود که کیفیت قطعات، شدیداً وابسته به فشار داخلی است. در فشار ۴/۲MPa چروکیدگی اتفاق می‌افتد در حالی که در فشار ۴/۵MPa پارگی در ناحیه بیرونی بیلوز روی می‌دهد و در فشار ۴/۳۵MPa بیلوز با کیفیت مطلوب حاصل می‌شود. بنابراین کنترل فشار در فرآیند تولید بیلوز بسیار ضروری است. فشار داخلی و پیشروی محوری که منجر به تولید بیلوز با کیفیت مطلوب می‌شود، در شکل ۲ نشان داده شده است.

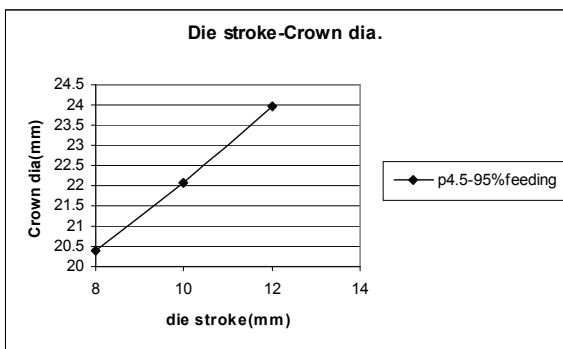
شکل ۵ تأثیر تغییرات پیشروی را روی توزیع ضخامت نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۵ با افزایش مقدار پیشروی مقدار کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. تأثیر پیشروی روی نازک‌شدگی در ناحیه بیرونی بیشتر از ناحیه داخلی است. تقریباً در ناحیه داخلی هیچگونه نازک‌شدگی اضافی با افزایش پیشروی مشاهده نمی‌شود. درصدهای پیشروی مقادیر ۷۵٪، ۸۵٪ و ۹۵٪ می‌باشند. محدوده قابل قبول برای تغییرات ضخامت حدود ۲۵٪ است. شکل ۶ تأثیر کورس قالب (فاصله اولیه صفات فلزی یا 'ds' در شکل ۵، ۶، ۸) را روی توزیع ضخامت نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش کورس قالب مقدار کاهش ضخامت بیلوز، افزایش می‌یابد. با مقایسه تأثیر پیشروی و کورس قالب روی توزیع ضخامت شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که تأثیر



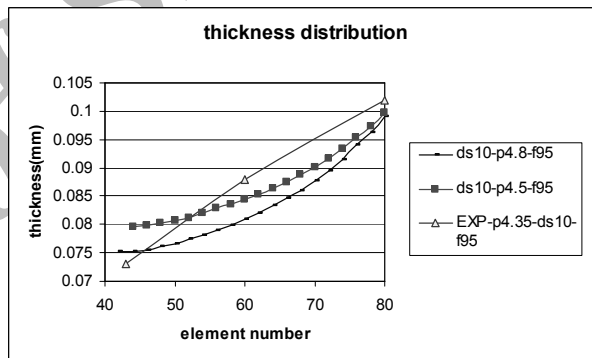
شکل ۶- توزیع ضخامت بیلوز در کورس‌های مختلف.



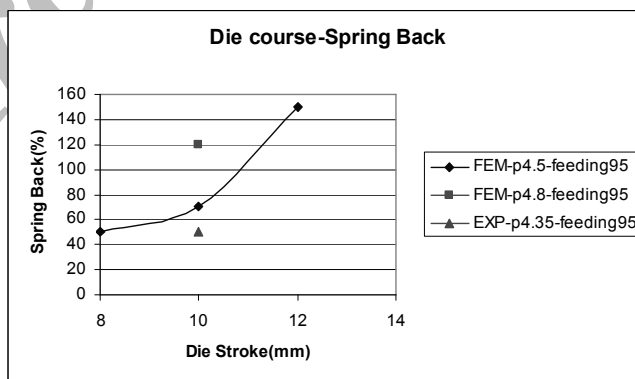
شکل ۵- توزیع ضخامت بیلوز در پیشروی‌های مختلف.



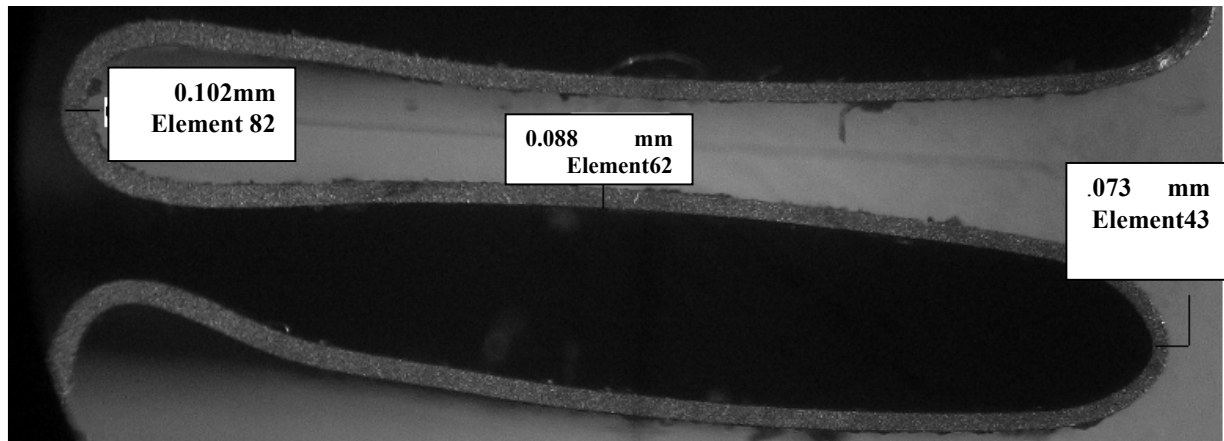
شکل ۸- تأثیر کورس قالب روی قطر خارجی بیلوز.



شکل ۷- توزیع ضخامت در فشارهای مختلف.



شکل ۹- تأثیر کورس قالب روی برگشت فنری.



شکل ۱۰- توزیع ضخامت بیلوز ساخته شده و مقایسه با اجزای محدود (پیشروی $p=4.35, 95\%$ Die Stroke=10mm).

جدول ۵- نتایج تجربی و المان محدود ($p=4.5\text{Mpa}$ - $d_s=10\text{mm}$ - Feeding=95%)

	قبل از (D_{crown} برگشت فنری)	بعد از (D_{crown} برگشت فنری)	t_{min}	طول بیلوز بعد از (L برگشت فنری)	طول بیلوز قبل از (L برگشت فنری)	قطر داخلی ($D_{\text{Inner Point}}$ بعد از برگشت فنری)
FEM	21.95	22.06	0.078	0.875	0.5	13.15
EXP	22.05	22.2	0.073	0.85	0.5	13.1

نتیجه گیری

۳- حساسیت فرآیند به فشار بیشتر از حساسیت آن به کورس می باشد. برای مثال، در کورس ۱۰mm محدوده تغییرات فشار ۶/۱٪ و در کورس ۸mm برابر ۱۳/۲٪ می باشد.

۴- افزایش کورس باعث افزایش قطر نهایی بیلوز و برگشت فنری می شود.

۵- با افزایش فشار، کاهش ضخامت بیشتر و افزایش برگشت فنری در بیلوز مشاهده می شود و حساسیت برگشت فنری نیز افزایش می یابد.

شایان ذکر است که ساخت بیلوزهای فلزی با نسبت کشش بالا برای اولین بار در ایران در این پژوهش انجام گرفته و نتایج آن باعث بومی شدن تکنولوژی ساخت این قطعات در کشور و جلوگیری از خروج ارز بسیار زیادی شده است.

تشکر و قدردانی

در پایان، نویسندگان از زحمات مدیر عامل و کارکنان شرکت مهندسی فناوری مقتدر و همچنین اساتید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران تشکر و قدردانی می نمایند.

در این مقاله پارامترهای اساسی فرآیند ساخت بیلوزهای فلزی با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود و آزمایش های تجربی مطالعه شده و تأثیر فشار داخلی، کورس قالب و پیشروی روی توزیع ضخامت، قطر خارجی و برگشت فنری تحلیل شده است. آزمایش های تجربی براساس نتایج اجزای محدود انجام شده و در نهایت نتایج زیر به دست آمده است:

۱- با بررسی تأثیر پیشروی مشاهده شده که با افزایش مقدار پیشروی، نازک شدگی بیشتری در ناحیه خارجی رخ می دهد، اما تأثیری در ناحیه داخلی بیلوز ندارد. حداکثر اختلاف در اجزای محدود و نتایج تجربی ۸٪ است که از دیدگاه مهندسی قابل قبول می باشد.

۲- افزایش کورس باعث کاهش ضخامت در تمام نواحی بیلوز می شود، ولی کاهش ضخامت در ناحیه خارجی بیشتر از داخلی است. با افزایش کورس قطر خارجی افزایش می یابد. رسیدن به قطر بهینه، با بهینه سازی و یا با افزایش تعداد سعی و خطا در اجزای محدود صورت می گیرد.

مراجع

1. Broman, G.I., Jonsson, A.P., and Hermann, M.P. "Determining Dynamic Characteristics of Bellows by Manipulated Beam Finite Elements of Commercial Software", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77, No.8, pp.445-453, 2000.
2. Igi, S., Katayama, H., and Kawahara, M. "Evaluation of Mechanical Behavior of New Type Bellows with Two Directional Convolutions; Nuclear Eng. & Design", Vol. 197, No. 2, pp. 107-114, 2000.
3. Becht, C., "Fatigue Bellows a New Design Approach, *Int. J. Pressure Vessels & Piping* ", Vol. 77, No.13, pp.843-850, 2000.
4. Zhu, Y.Z., Wang, H.F., and Sang, Z.F., "The effect of Environmental Medium on Fatigue Life for u-shaped Bellows Expansion Joints; *Int. J. Fatigue*", Vol. 28, No.1, pp.28-32, 2005.
5. Jakubauskas, V. and Werner, D.S., "Transverse Natural Frequencies and Flow Induced Vibrations of Double Bellows Expansion Joints", *J. Fluids and Structures*, Vol. 13, No.4, pp.461-479, 1999.
6. Lee, S.W., " Study on the Forming Parameters of the Metal Bellows", *J. Material Processing Tech.*, Vol. 130-131, pp.47-53, 2002.
7. Jha, A.K., Diwakar, V., and Sreekumar, K. "Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel Bellows of Satellite Launch Vehicle Propellant Tank Assembly", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 10, No.6, pp.699-709.

Archive of SID