

**بررسی هندسه و توزیع ضخامت در یک قالب جدید هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌های شکل\***مجید الیاسی<sup>(۱)</sup> پویا ذوقی پور<sup>(۲)</sup> محمد بخششی<sup>(۳)</sup> عبدالحمید گرجی<sup>(۴)</sup>

**چکیده** قطعات لوله‌ای بدون درز با مقاطع گوناگون مانند لوله‌های پله‌ای استوانه‌های، مخروطی و با مقطع مربعی عموماً با فرآیند هیدروفرمینگ لوله تولید می‌شوند. در شکل‌دهی آن قطعات با این فرآیند، دستیابی به شکل‌هایی با گوشه‌های تیز، مستلزم افزایش فشار است. این افزایش فشار، موجب نازک شدن و پارگی احتمالی در گوشه قطعه خواهد شد. نویسندگان مقاله، طراحی یک قالب جدیدی را ارائه نموده‌اند که منجر به بهبود پرشدگی گوشه‌ی قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌های گردیده است. در قالب جدید، شکل‌دهی لوله، شامل دو مرحله‌ی بالج و نهایی است. در این مقاله، اثر مسیر فشار بر هندسه و توزیع ضخامت لوله در قالب جدید به‌طور تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده، نشان داد که شکل هندسی مطلوب نهایی، وابسته به فشار مرحله‌ی بالج و نحوه‌ی اعمال فشار و تغذیه‌ی محوری در مرحله‌ی نهایی است و انتخاب مناسب این پارامترها بر روی شکل هندسی قطعه‌ی به‌دست آمده‌ی تأثیر دارد. همچنین نشان داده شد که در قالب جدید می‌توان به محصولی با توزیع ضخامت یکنواخت در طول دیواره دست یافت.

**واژه‌های کلیدی** شکل‌دهی فلزات، هیدروفرمینگ لوله، لوله‌های پله‌ای، شبیه‌سازی اجزای محدود

**Analysis of Geometry and Thickness Distribution in a New Hydroforming Die for Cylindrical Stepped Tubes**

M. Elyasi P. Zoghypour M. Bakhshi A. H. Gorji

**Abstract** Seamless tubular components with various cross sections, such as cylindrical, conical, and square cross section stepped tubes, are mainly produced in a tube hydroforming process. In forming those parts with this process, achieving shapes with sharp corners, requires an increase in the internal pressure. This may cause local thinning and bursting at the tube corners. The authors propose a new hydroforming die set in which the die corner filling is improved for cylindrical stepped tubes. In the new die, the forming of tube consists of two steps of bulging and final forming. In this paper, the effect of pressure path on thickness distribution and geometry of stepped tubes are studied by finite element simulation and experiment. The results in this paper illustrate that the bulging pressure and the pressure-axial feeding of the final forming stage influence the desired final geometry and that the proper selection of these parameters affects on the deformed part geometry. It is also shown that in the new die set it is possible to produce a sound part with uniform thickness distribution along the wall side.

**Key Words** Tube Hydroforming, Stepped Tube, FE Simulation

\* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۸/۲/۲۸ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۴/۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

(۳) استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

(۴) دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

## مقدمه

شکل نمی‌گیرد. بعلاوه این گوشه‌ها نسبت به دیگر ناحیه‌های لوله، دارای ضخامت کم‌تری هستند. ایجاد گوشه‌های با توزیع ضخامت مناسب در این قطعات، یکی از موضوعات مهم در روش هیدروفرمینگ است که حداکثر فشار داخلی را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد.

برای دستیابی به گوشه‌های تیز در روش‌های متداول هیدروفرمینگ لوله، ممکن است به فشار داخلی بالایی نیاز باشد. فشارهای بالا ممکن است منجر به پاره شدن لوله گردد. استفاده از فشار پایین علاوه بر شکل نیافتن کامل گوشه‌های لوله، ممکن است باعث بوجود آمدن چروکیدگی شود [2-5].

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی پرشدگی گوشه‌ی قالب توسط محققان انجام شده است.

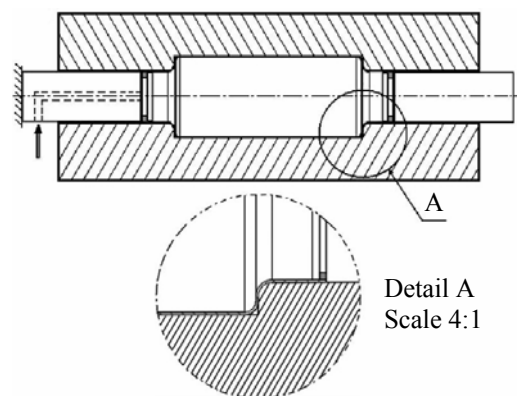
کریدلی و همکاران [۲] تغییرات ضخامت و پر شدگی گوشه‌ی قالب را برای لوله با ضرایب کرنش سختی و ضخامت‌های اولیه‌ی گوناگون، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش نمای کرنش سختی، می‌توان به قطعه با شعاع گوشه‌ی کوچک‌تر، دست یافت. آن‌ها همچنین نشان دادند که ضخامت لوله، رابطه‌ی مستقیم با فشار شکل‌دهی دارد؛ یعنی هر چه ضخامت لوله کم‌تر باشد، برای جلوگیری از پاره شدن آن، باید فشار نیز کاهش یابد. این محققان برای هر ضخامت اولیه لوله، یک حداکثر فشار به دست آوردند؛ اما در آن فشار، گوشه‌های قالب به‌طور کامل پر نگردید و نازک شدگی در نزدیکی محدوده گوشه به‌دست آمد.

هوانگ و چن [3] نحوه‌ی پر شدن یک قالب لوله پله‌ای با مقطع چهارگوش را با روش‌های تجربی، تحلیلی و اجزای محدود، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نیز نتیجه گرفتند که هر چه شعاع گوشه قالب کوچکتر گردد، به فشار بیشتری نیاز است تا لوله، گوشه‌های قالب را پر نماید و اگر فشار از یک مقدار بیشتر شود، منجر به پاره شدن لوله می‌شود. همچنین آنان ابراز

لوله‌های بدون درز یکپارچه، عموماً با روش هیدروفرمینگ تولید می‌شوند. این لوله‌ها برای کاربردهایی نظیر سیستم‌های انتقال سیال تحت فشار، سیستم‌های تهویه مطبوع و خطوط انتقال نفت و گاز به کار می‌روند. تولید لوله‌های پله‌ای با فرآیند هیدروفرمینگ در مقایسه با روش‌های سنتی تولید آن‌ها مانند فرآیندهای اسپینینگ و جوشکاری، دارای مزایای متعددی است. این مزایا شامل افزایش مقاومت به خوردگی به سبب عدم استفاده از عملیات جوشکاری، کاهش وزن، بهبود استحکام و سختی، کاهش هزینه ابزار، کاهش عملیات ثانویه، افزایش دقت و افزایش بهره‌وری استفاده از مواد است [1].

روش متداول شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای، استفاده از قالب‌های بسته‌ی هیدروفرمینگ می‌باشد. در شکل (۱)، شماتیک یک نوع از این قالب‌ها نشان داده شده است.

یکی از اهداف مهم در این نوع قالب‌ها، توزیع یکنواخت ضخامت در طول دیواره و حداقل کردن کاهش ضخامت قطعه می‌باشد [2-5].



شکل ۱ شماتیک قالب متداول هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌های [5]

تولید لوله‌های پله‌ای در قالب‌های متداول هیدروفرمینگ دارای این محدودیت است که گوشه‌های تیز آن‌ها در انتهای فرآیند، به‌طور کامل

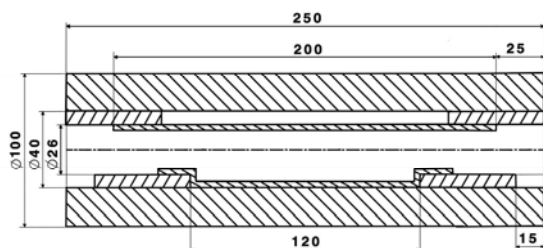
الیاسی و همکارانش [6-8] یک قالب جدید هیدروفرمینگ را برای لوله‌های پله‌ای استوانه‌های ارائه کردند که در آن مشکل پر نشدگی گوشه قالب‌های متداول رفع گردید. در این قالب جدید، می‌توان به محصولی با گوشه‌های کاملاً تیز رسید. پیچیده نبودن مکانیزم قالب و پایین بودن فشار شکل‌دهی از دیگر مزایای قالب ارائه شده بود. شکل (۲) شماتیک این قالب و مراحل پر شدن لوله را در آن نشان می‌دهد.

در این مقاله، اثر مسیر فشار بر هندسه و توزیع ضخامت قطعات در مراحل بالج و پایانی فرآیند شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای استوانه‌های در قالب جدید با روش‌های تجربی و اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است.

### مشخصات هندسی قطعه و خواص مواد

شکل (۳)، مشخصات هندسی قالب جدید هیدروفرمینگ و قطعه را قبل و بعد از شکل‌دهی نشان می‌دهد. لوله دارای ضخامت ۰/۵mm بوده و مطابق پارامترهای نشان داده شده، نسبت انبساط برابر است با  $\frac{53}{84} = 100 \times \frac{26}{26-40}$ . لوله‌ی مورد استفاده از جنس فولاد زنگ نزن SS316L بوده و ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) نشان داده شده است. برای تعیین خواص مکانیکی لوله، از آزمایش بالج استفاده شد. نمودار تنش- کرنش به دست آمده از این آزمایش، در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین این منحنی با معادله زیر برازش شده است:

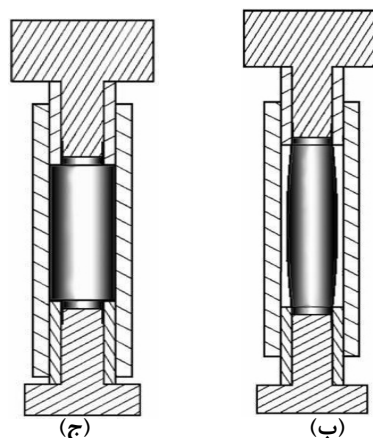
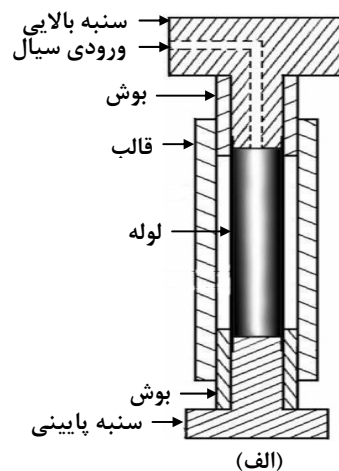
$$\bar{\sigma} = 1650 \bar{\epsilon}^{0.58} [\text{MPa}] \quad (1)$$



شکل ۳ هندسه قالب جدید هیدروفرمینگ و قطعه، ابعاد به میلی‌متر

داشتند که هر چقدر اصطکاک میان لوله و دیواره قالب افزایش یابد، نازک شدگی بیشتری در محدوده‌ی گوشه‌ها رخ می‌دهد.

لوح موسوی و همکارانش [4,5] بر روی پرشدگی گوشه‌های قالب در قطعات پله‌ای شکل با مقطع چهارگوش و سه‌راهی مطالعاتی را انجام دادند. آن‌ها سعی کردند تا با ایجاد یک مسیر فشار نوسانی بهینه، پر شدگی گوشه قالب را بهبود ببخشند. این محققان به نتایج مطلوبی دست یافتند؛ اما در کار آن‌ها، حتی با داشتن مسیر فشار نوسانی نیز گوشه‌های قالب برای قطعات مورد نظر به‌طور کامل پر نگردید. از سوی دیگر، ایجاد مسیر فشار نوسانی نسبت به مسیرهای ثابت یا خطی آن بسیار مشکل‌تر است.



شکل ۲ شماتیک مراحل شکل‌دهی لوله در قالب جدید، الف- مرحله قرارگیری، ب- مرحله بالج، ج- مرحله شکل‌گیری نهایی [6]

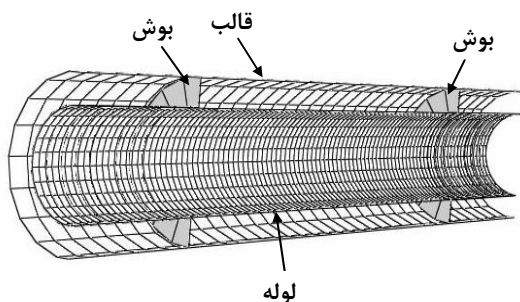
کردن اصطکاک بین سطوح در حال تماس لوله با بوش‌ها و قالب از قانون کولمب، استفاده شد.

بر اساس مراحل ذکر شده در مرجع [۹]، مقدار ضریب اصطکاک کولمب میان سطوح قالب و قطعه کار در شبیه‌سازی برابر ۰/۰۶ در نظر گرفته شد.

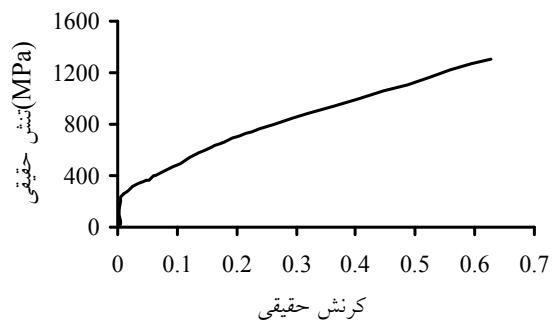
جهت تحلیل مراحل بالچ و شکل‌گیری نهایی لوله که در شکل (۲) نشان داده شد، در نرم‌افزار دو گام تعریف شد. مقدار تغذیه‌ی محوری اعمالی در تحلیل اجزای محدود به صورت متقارن و از دو طرف به‌طور مساوی برابر ۱۵ mm و با نرخ پیشروی ۲۰ mm/min اعمال گردید. مسیر فشار استفاده شده از نوع ثابت بوده که یک نمونه آن در شکل (۶) نشان داده شده است. در آن شکل، مسیر قایم برای مرحله‌ی بالچ آزاد است که در طی این مرحله، با ثابت ماندن سنبه‌ها، فشار افزایش می‌یابد. سپس با ثابت ماندن فشار و حرکت سنبه‌ها، مرحله‌ی نهایی در طول خط افقی صورت می‌گیرد و قطعه‌ی کار، شکل نهایی خود را به‌دست می‌آورد.

پنج منحنی فشار متفاوت ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ MPa که در شکل (۷) نشان داده شده است، در شبیه‌سازی و بررسی تجربی مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۲)، پارامترهای اعمال شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

زمان محاسبات برای پردازش هر مدل اجزای محدود در حدود ۴ ساعت بود. سپس، خروجی‌های حاصل از حل عددی هر شبیه‌سازی، شامل هندسه‌ی تغییرشکل، تغییرات ضخامت، مؤلفه‌های کرنش و تنش در محیط نمایش نتایج برنامه، بررسی گردید.



شکل ۵ مدل شبکه بندی شده‌ی لوله و اجزای قالب در نرم‌افزار



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش لوله فولادی زنگ نزن SS316L

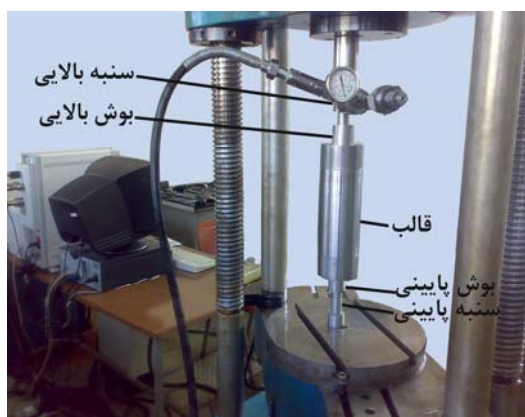
جدول ۱ ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ نزن SS316L

Element	%(wt)
C	0.022
Cr	17.45
Ni	12
Mo	2.01
Mn	0.88
Cu	0.41
Si	0.45
Fe	Base

### شبیه‌سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی فرآیند، از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS/Explicit 6.7 استفاده شده است. با توجه به تقارن هندسی، فقط نیمی از لوله و قالب، مدل شده است. مدل شبکه بندی شده در شکل (۵) نشان داده شده است. قالب به صورت صلب سه بعدی، مدل گردید و فقط سطوحی از قالب و بوش‌ها که در تماس با لوله قرار می‌گیرند، مدل‌سازی شدند. در شبیه‌سازی، ابزارها شامل قالب و بوش‌های دو طرف قالب، به صورت صلب مدل شدند و لوله به صورت شکل‌پذیر، مدل گردید. برای ایجاد مدل سه بعدی لوله در محیط نرم‌افزار، از المان پوسته‌ای (Shell) با روش دورانی (Revolve) حول محور تقارن استفاده شده است. برای مدل‌سازی لوله از المان در راستای محوری و ۲۰ المان در راستای محیطی استفاده گردید. ماده‌ی مدل شده، دارای خاصیت الاستیک پلاستیک بوده و از قانون هولومون تبعیت می‌کند و در مدل‌سازی، از ناهمسان‌گردی آن چشم‌پوشی شده است. برای مدل

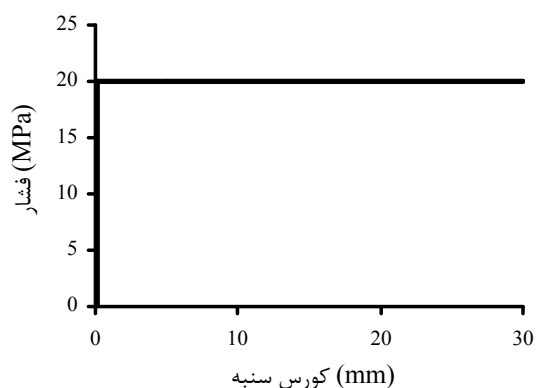
می باشد. این پرس، توسط یک مجموعه‌ی کامپیوتری قابل کنترل و دارای امکانات کامل برای ثبت اطلاعات خروجی بوده است. سرعت پرس در تمامی آزمایش‌ها  $20 \text{ mm/min}$  بوده است. همچنین در آزمایش‌ها از یک سیستم هیدرولیکی بعنوان دستگاه تولید فشار استفاده شد که قابلیت ایجاد فشار تا  $35 \text{ MPa}$  را داشته و مقدار فشار کاری با یک شیر محدود کننده‌ی فشار، قابل کنترل بود. روغن استفاده شده در آزمایش‌ها، روغن هیدرولیک و با نام تجاری روغن هیدرولیک بابک ۶۸ بود که از آن برای اعمال فشار داخلی لوله و به عنوان روانکار نیز استفاده شد. جهت بررسی تکرارپذیری، هر آزمایش سه بار انجام شد. برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات شکل داده شده از یک دستگاه ضخامت سنج اولتراسونیک با دقت  $0.001 \text{ mm}$  استفاده شد.



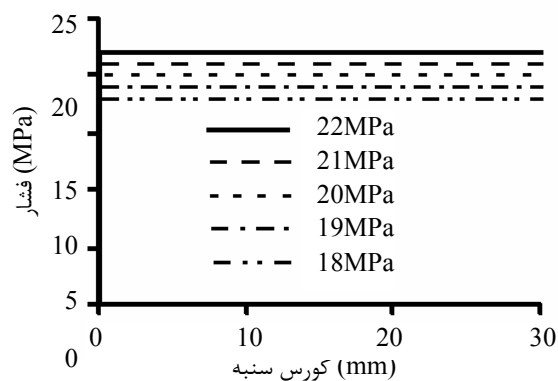
شکل ۸ مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده

### نتایج و بحث

فرآیند شکل‌دهی در مرحله‌ی بالج، برای فشارهای ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و  $22 \text{ MPa}$  انجام گردید که در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نتایج مربوط به فشارهای ۱۸، ۲۰ و  $22 \text{ MPa}$  نشان داده شده است. با مقایسه‌ی این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد که افزایش فشار، باعث افزایش قطر ناحیه‌ی بالج شده است.



شکل ۶ یک نمونه از مسیر فشار مورد استفاده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی



شکل ۷ مسیرهای مختلف فشار استفاده شده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

جدول ۲ پارامترهای اعمال شده در شبیه‌سازی

مدول یانگ	نوع جزء	ضریب پواسان	تنش تسلیم	ضریب اصطکاک
۲۱۰ GPa	S4R	۰/۳	۲۴۰ MPa	۰/۰۶

### مراحل آزمایشگاهی

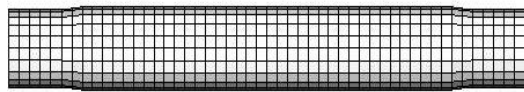
به منظور تأیید نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، آزمایش‌های تجربی انجام گرفت. تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. دستگاه استفاده شده در آزمایش‌ها، یک پرس اونیورسال هیدرولیکی DMG با ظرفیت  $600 \text{ kN}$

در نتیجه شبیه سازی شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است که در فشار ۲۲ MPa مقدار ضخامت قطعه در مرکز ناحیه بالج شده به ۰/۴۱۱۴ رسیده است؛ در این حالت، پارگی در لوله رخ داده است زیرا با توجه به جنس لوله، حدود ۱۸٪ کاهش ضخامت، به دست آمده است. همان گونه که از شکل پیداست، با افزایش فشار داخلی لوله، تنش های محیطی لوله افزایش پیدا می کند. این در حالی است که به دلیل عدم وجود تغذیه محوری در این مرحله، هیچ مؤلفه ی تنش محوری وجود ندارد و این باعث می شود که لوله در حالت کرنش صفحه ای در منطقه انبساط، تغییر شکل دهد. این تغییر شکل، به طور اساسی در منطقه ی بالج، یعنی منطقه آزاد بین دو بوش انجام می گیرد. افزایش فشار داخلی به ۲۲ MPa باعث شده که در مرکز لوله، پارگی رخ دهد. شکل (۱۱-ب) قطعه شکل یافته تجربی در این فشار را نشان می دهد. با ملاحظه این شکل، دیده می شود که در این فشار پارگی در لوله رخ داده است.

شکل (۱۲) منحنی تغییرات قطر بیشینه ی ناحیه ی بالج را بر حسب فشار داخلی سیال نشان می دهد. با ملاحظه ی این شکل، دیده می شود که افزایش فشار از ۱۸ MPa تا ۲۱ MPa به طور تقریباً خطی منجر به افزایش قطر ناحیه بالج می شود. در فشار ۲۲ MPa، در قطعه پارگی رخ داده است؛ از این رو، اندازه گیری دارای دقت نبوده و منحنی در محدوده ۲۱ MPa تا ۲۲ MPa با خط چین نشان داده شده است.

پس از مرحله بالج، در مرحله ی نهایی با ثابت نگه داشتن فشار در همان سطح، فشار بالج برای هر مسیر معرفی شده در شکل (۷)، سنبه ها و بوش ها به طور همزمان حرکت می کنند. این مرحله برای فشارهای ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ MPa انجام شد اما برای فشار ۲۲ MPa به دلیل پارگی قطعه در مرحله قبلی بالج، انجام نگردید. شکل های (۱۳) تا (۱۶) قطعاعات شکل داده شده در مراحل نهایی را نشان می دهد.

همان گونه که در شکل (۱۳-الف) دیده می شود، در نتیجه ی به دست آمده از شبیه سازی، چروک هایی ملاحظه می گردد. علت این امر آن است که جابه جایی

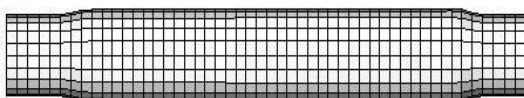


(الف)



(ب)

شکل ۹ قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۱۸ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

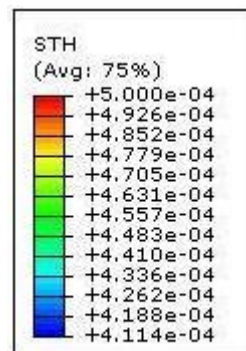
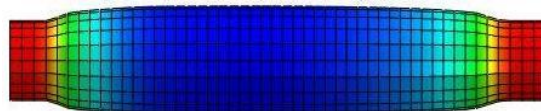


(الف)



(ب)

شکل ۱۰ قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۲۰ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

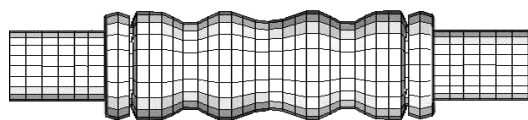


(الف)



(ب)

شکل ۱۱ قطعه شکل داده شده در مرحله ی بالج با فشار ۲۲ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

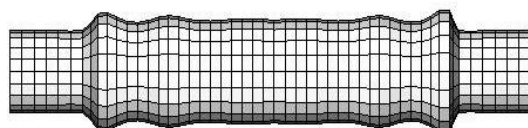


(الف)



(ب)

شکل ۱۳ قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۱۸ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

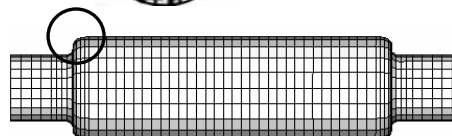


(الف)



(ب)

شکل ۱۴ قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۱۹ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی



(الف)

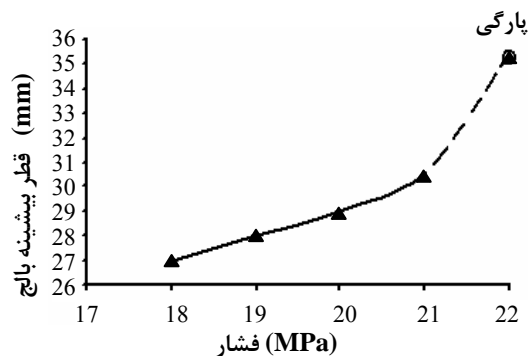


(ب)

شکل ۱۵ قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۲۰ MPa با گوشه گرد، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

محوری با فشار داخلی ۱۸ MPa متناسب نیست؛ عبارت دیگر، ماده تغذیه شده نمی تواند در راستای محیطی جریان یابد. بنابراین ماده در راستای محوری انباشته شده و چروک ایجاد می شود. شکل (۱۳-ب) نشان می دهد که نتیجه ی تجربی، نتیجه ی شبیه سازی را تایید می کند.

برای متناسب تر کردن تغذیه ی محوری با فشار داخلی، در شبیه سازی، مقدار فشار داخلی به ۱۹ MPa افزایش داده شد. شکل (۱۴-الف) نشان می دهد که این امر موجب کاهش تعداد و اندازه چروک ها گردیده است. شکل (۱۴-ب) نیز مؤید نتایج شبیه سازی بر اساس نتایج تجربی می باشد.

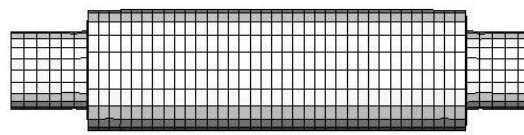


شکل ۱۲ منحنی تغییرات قطر بیشینه ناحیه بالغ بر حسب فشار داخلی سیال

در فشار داخلی ۲۰ MPa مطابق شکل (۱۵) قطعه ی تولید شده بدون چروکیدگی و هر گونه پارگی می باشد و تمام مقدار ماده ای که در راستای محوری تغذیه شده است، به طور یکنواخت در راستای محیطی توزیع شده و قطعه کاملاً سالم است.

همان گونه که در شکل (۱۵) نشان داده شده، گوشه ی قطعه کاملاً پر نشده است. این امر می تواند بر اثر کم بودن سطح فشار انتخاب شده و یا کورس اعمالی باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی، برای تولید قطعه ی سالم و با گوشه های کاملاً تیز، فشار از ۲۰ MPa به ۲۱ MPa افزایش داده شد. مطابق شکل (۱۶) مشاهده شد که هم با شبیه سازی و هم با نتایج تجربی قطعه ی سالم و با گوشه های کاملاً تیز به دست آمد.

شکل (۱۷) پروفیل سطح لوله را برحسب فشار در مرحله‌ی نهایی نشان می‌دهد که از شبیه‌سازی به دست آمده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، با افزایش فشار سطح لوله به دیواره‌ی قالب نزدیک شده و نهایتاً در فشار ۲۱ MPa، به‌طور کامل و در سرتاسر لوله به آن چسبیده است. برای بررسی تغییرات ضخامت لوله، می‌توان لوله تغییر شکل یافته را به سه ناحیه تقسیم کرد. این نواحی به همراه یک منحنی نمونه توزیع ضخامت در شکل (۱۸) نشان داده شده است که در آن منطقه I؛ ناحیه‌ی انتهای لوله، منطقه II؛ ناحیه‌ی گذار یا منطقه پیشانی بوش‌ها و منطقه III؛ ناحیه‌ی اصلی انبساط می‌باشد.

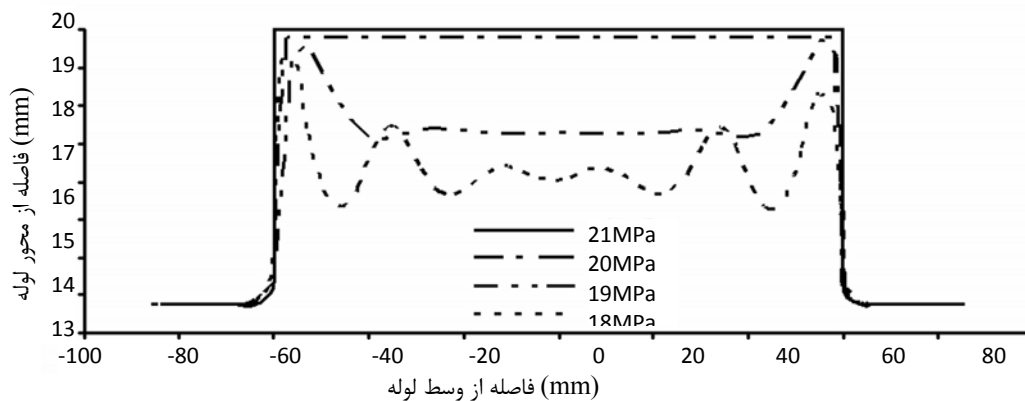


(الف)

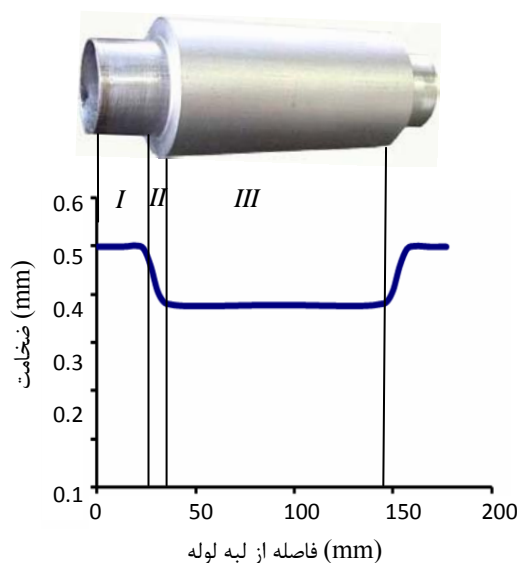


(ب)

شکل ۱۶ قطعه شکل داده شده در مرحله‌ی نهایی با فشار ۲۱ MPa با گوشه تیز، الف- شبیه سازی، ب- تجربی



شکل ۱۷ پروفیل پر شدگی قالب در مرحله نهایی

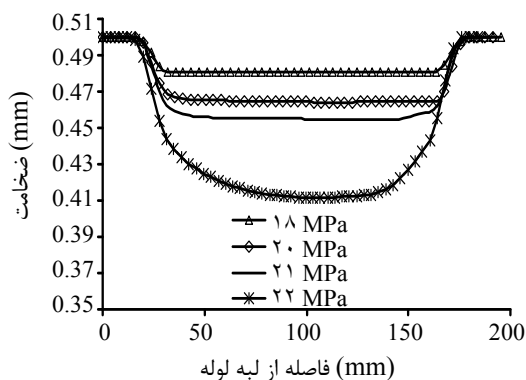


شکل ۱۸ نواحی مختلف منحنی توزیع ضخامت لوله



ضخامت همواری در ناحیه‌ی انبساط به دست آمده است؛ اما با افزایش فشار از ۱۸ MPa به ۲۰ MPa میزان نازک شدگی بیشتر شده است. در فشار ۲۲ MPa اختلاف میزان نازک شدگی با دو فشار قبلی بسیار زیاد شده و توزیع ضخامت در ناحیه‌ی انبساط ناهموار شده است. همان‌گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، دلیل این امر این است. پس از فشار ۲۱ MPa، نازک شدگی بیش از حد در قطعه رخ داده است و در نهایت در فشار ۲۲ MPa در قطعه پارگی رخ داده است.

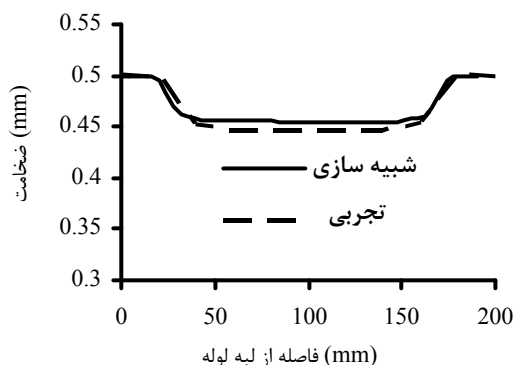
در مرحله‌ی نهایی، مطابق شکل (۲۲) دیده می‌شود که مقدار تغذیه‌ی محوری نیز بر توزیع ضخامت قطعات تأثیر گذاشته و تأثیر همزمان و متناسب فشار و تغذیه محوری است که باعث می‌گردد توزیع ضخامت همواری در ناحیه‌ی انبساط به دست آید. این توزیع هموار در فشارهای ۲۰ MPa و ۲۱ MPa مشاهده می‌گردد. با مقایسه‌ی مقادیر نازک شدگی شکل‌های (۲۱) و (۲۲) در فشارهای یکسان، کاملاً واضح است که منحنی توزیع ضخامت قطعات در مرحله‌ی بالج هموارتر و یکنواخت‌تر از حالت نهایی است.



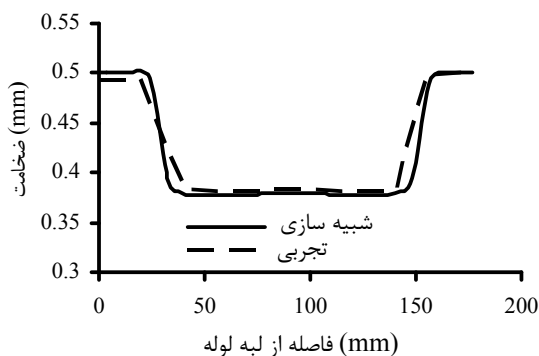
شکل ۲۱ منحنی‌های توزیع ضخامت در مرحله‌ی بالج برای فشارهای ۱۸، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ MPa، به دست آمده از شبیه‌سازی

با مقایسه‌ی منحنی‌های توزیع ضخامت برای

منحنی‌های توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده برای فشار ۲۱ MPa در مرحله‌های بالج و نهایی به ترتیب در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی تطابق خوبی وجود دارد.



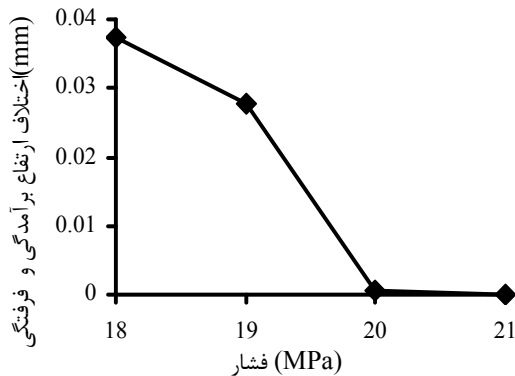
شکل ۱۹ توزیع ضخامت لوله شکل داده شده در مرحله بالج برای فشار ۲۱ MPa



شکل ۲۰ توزیع ضخامت لوله‌ی شکل داده شده در مرحله‌ی نهایی برای فشار ۲۱ MPa

شکل‌های (۲۱) و (۲۲) منحنی‌های توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی را برای فشارهای مختلف و به ترتیب برای مراحل بالج و نهایی نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که میانگین توزیع ضخامت برای مرحله‌ی بالج و مرحله‌ی نهایی با افزایش فشار داخلی کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که ضخامت ناحیه‌ی انبساط، کمتر شود. با توجه به شکل (۲۱) ملاحظه می‌گردد که در فشارهای ۱۸ و ۲۰ MPa توزیع

۲۱ MPa مقدار این اختلاف بسیار ناچیز شده و این به معنی حذف چروک خوردگی در سطح قطعه می‌باشد.



شکل ۲۳ اختلاف مقدار برآمدگی و فرورفتگی در ناحیه‌ی انبساط

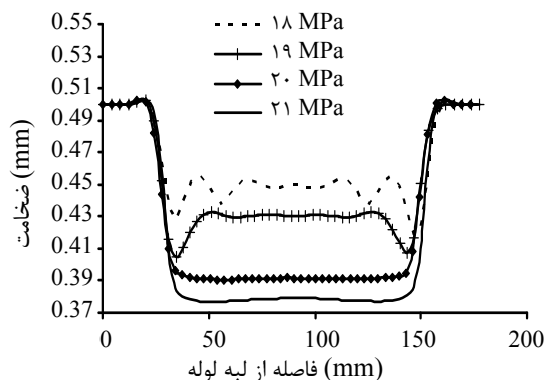
### نتیجه‌گیری

۱- به دست آوردن شکل هندسی اولیه‌ی مناسب در مرحله‌ی بالچ، تأثیر بسزایی در رسیدن به پروفیل مطلوب نهایی از لوله در مرحله نهایی دارد. شکل هندسی مطلوب نهایی، وابسته به فشار مرحله‌ی بالچ و نحوه‌ی اعمال فشار و تغذیه در مرحله‌ی نهایی است و انتخاب مناسب این پارامترها بر شکل هندسی قطعه‌ی به دست آمده، تأثیر دارد.

۲- با اعمال مسیر فشار و تغذیه محوری متناسب در قالب جدید، می‌توان به محصولی سالم و با گوشه‌های کاملاً تیز دست یافت. به عبارت دیگر، پرشدگی قالب در این حالت، صد در صد می‌باشد.

۳- در بررسی تغییرات ضخامت لوله، ناحیه‌های لوله تغییر شکل یافته به سه ناحیه تقسیم گردید. نشان داده شد که مسیر فشار و تغذیه محوری انتخاب شده در توزیع ضخامت این سه ناحیه و به ویژه ناحیه انبساط لوله، تأثیر بسزایی داشته و با انتخاب مسیر متناسب می‌توان به توزیع ضخامت هموار و

فشارهای ۲۰ و ۲۱ MPa در شکل (۲۲) و قطعات به دست آمده در این فشارها که به ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به دست آمده، دیده می‌شود که قطعات شکل داده شده در هر دو فشار، سالم و بدون عیب بوده و تنها اختلاف آن‌ها در گوشه‌های قطعه است. در صورتی که گوشه تیز در قطعه مهم نباشد تولید قطعه با فشار ۲۰ MPa نسبت به فشار ۲۱ MPa بهتر است؛ زیرا کاهش ضخامت در آن کمتر می‌باشد. همچنین در شکل (۲۲) دیده می‌شود که در فشار ۱۸ MPa توزیع ضخامت ناهمواری در مرحله‌ی نهایی به دست آمده است که در این نمودار، به صورت برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌هایی دیده می‌شود. شکل (۲۳) اختلاف ماکزیمم و مینیمم مقدار برآمدگی و فرورفتگی مربوط به نمودار توزیع ضخامت را برای فشارهای تست شده در مرحله‌ی نهایی با شبیه‌سازی نشان می‌دهد.



شکل ۲۲ منحنی‌های توزیع ضخامت در مرحله‌ی نهایی برای فشارهای ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ MPa، به دست آمده از شبیه‌سازی

با توجه به این شکل، می‌توان دریافت که با افزایش سطح فشار داخلی در مرحله‌ی بالچ و نهایی، اختلاف ارتفاع بین برآمدگی و فرورفتگی کاهش می‌کند و رفته رفته شبیه به هم می‌شوند. این کاهش اختلاف برآمدگی و فرورفتگی در ناحیه‌ی انبساط، به معنی یکنواخت‌تر شدن توزیع ضخامت می‌باشد. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، در فشارهای ۲۰ و

ضخامت به دست آمده در مراحل بالج و نهایی، می‌توان نتیجه گرفت که در فشارهای یکسان منحنی توزیع ضخامت قطعات در مرحله بالج هموارتر و یکنواخت تر از حالت نهایی است.

یکنواختی رسید. همچنین نشان داده شد در صورتی که بتوان از گوشه‌ی تیز قطعه چشم‌پوشی کرد، قطعه‌ی به دست آمده در فشار ۲۰ MPa نسبت به ۲۱ MPa ترجیح دارد؛ زیرا کاهش ضخامت در آن کمتر است. بعلاوه، با مقایسه منحنی‌های توزیع

## مراجع

1. Lang, L., Yuan S., Wang, X., Wang, Z.R., Fu, Z., Danckert, J., Nielsen, K.B., "A study on numerical simulation of hydroforming of aluminum alloy tube", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 377-388, (2004).
2. Kridli, G.T., Bao, L., Mallick, P.K., Tian, Y., "Investigation of thickness variation and corner filling in tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 133, pp. 287-296, (2003).
3. Hwang, Y.-M., Chen, W.-C., "Analysis of tube hydroforming in a square cross-section die", *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, pp. 1815-1833, (2005).
4. Loh-Mousavi, M., Mori, K., Hayashi, K., Bakhshi-Jooybari, M., "Improvement of filling die corners in box-shaped tube hydroforming by control of wrinkling", *Key Engineering Materials*, Vol.334, pp.461-467, (2007).
5. Loh-Mousavi, M., Bakhshi-Jooybari, M., Mori, K., Hayashi, K., "Improvement of formability in T-shape hydroforming of tubes by pulsating pressure", *Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture*, Vol. 222, pp. 1139-1146, (2008).
6. Elyasi, M., Gorji, A.H., Bakhshi-Jooybari, M., Alinejad, G., Hossinipor, S. J., Nourouzi, S., "A new die design for improvement of die corner filling in hydroforming of cylindrical stepped tubes", *Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture*, Vol. 30, pp. 3824-3830, (2009).
7. Elyasi, M., Gorji, A.H., Bakhshi-Jooybari, M., Alinejad, G., "A new die design for the hydroforming of stepped tubes", *In Advances in Materials and Processing Technology*, (Editors B.S. Yilbas and I. Alzahrani), (Manama, Kingdom of Bahrain) CD-ROM, (2008).
8. Bakhshi-Jooybari, M., Elyasi, M., Gorji, A., Alinejad, G., Hosseinipour, S.J., Nourouzi, S., "Investigation of die corner filling in hydroforming of cylindrical stepped tubes using finite element simulation and experiment", *Key Engineering Materials*, Vol. 410-411, pp. 335-343, (2009).
9. Ngaile, G., Jaeger, S., Altan, T., "Lubrication in tube hydroforming (THF) Part I. Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition

and expansion zones", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 108-115, (2004).