



مجموعه قالب جدید هیدروفرمینگ برای بهبود پرشدگی گوشه‌های قالب در ساخت قطعات لوله‌ای پله‌ای

مجید الیاسی^۱، محمد بخشی جویباری^{۲*}، عبدالحمید گرجی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

*بابل، صندوق پستی ۴۸۴، bakhshi@nit.ac.ir

چکیده- قطعات لوله‌ای بدون درز مانند لوله‌های پله‌ای، لوله‌های با مقطع چهارگوش و لوله‌های مخروطی، معمولاً با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ لوله تولید می‌شوند. در شکلهای این قطعات، دستیابی به شکل‌های با گوشه‌های تیز بسیار در عمل مشکل یا ناممکن است. در این مقاله با ارائه مجموعه قالب جدیدی، پر شدن گوشه‌های قالب برای تولید لوله‌های پله‌ای در فرایند هیدروفرمینگ مطالعه شده است. برای قالب ارائه شده، به روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده، چگونگی پر شدن قطعه در درون حفره قالب مطالعه شده است. به‌منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی، این مجموعه قالب ساخته شده، مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده ضمن تأیید نتایج شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که در قالب جدید می‌توان به محصولاتی با گوشه‌های کاملاً تیز رسید. پیچیده نبودن ساختار قالب و پایین بودن فشار شکلهای برخی مزایای قالب ارائه شده است. همچنین، توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در قالب جدید نسبت به قطعات تولید شده در قالب متداول یکپارچه‌تر بوده است.

کلید واژگان: شکلهای فلزات، هیدروفرمینگ لوله، لوله‌های پله‌ای، شبیه‌سازی اجزای محدود.

A new Hydro forming Die Design for Improvement of Die Corner Filling of Stepped Tubes

M. Elyasi¹, M. Bakhshi-Jooybari^{2*}, A. H. Gorji³

1- Assis. Prof. Student, Faculty of Mechanical Eng., Babol Noshirvani Univ. of Tech.

2- Prof., Faculty of Mechanical Eng., Babol Noshirvani Univ. of Tech.

3- ph. D. Student, Faculty of Mechanical Eng., Babol Noshirvani Univ. of Tech.

*P. O. B. 484, Babol, bakhshi@nit.ac.ir

Abstract- Tubular components, such as stepped tubes, conical tubes and box-shape tubes, are mainly produced by tube hydroforming process. Obtaining a sharp corner is the main goal in some of these components. In this paper, corner filling in stepped tubes is studied using a new multistage hydroforming die. The proposed die was simulated and filling of the die cavity was investigated. The finite element software, ABAQUS 6.4, has been used for simulation. In order to verify the simulation results, the new die of stepped tube was manufactured and then experiments have been performed on it. The results of the experiments verified the simulation results. It was shown that by using the new die, parts with sharp corners could be produced. The simplicity of the die and the low internal pressure are among the advantages of this die. Thickness distribution was also examined by FE simulation and via experiments and it is shown that a better distribution could be obtained by the proposed die set.

Keywords: Metal Forming, Tube Hydroforming, Stepped Tube, Finite Element Method.

۱- مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله، امروز کاربرد وسیعی در صنایع خودروسازی، نظامی، اتصالات و سایر صنایع دارد. تولید قطعاتی متنوع با شکلهای پیچیده، سبک، با دقت ابعادی بالا و با استحکام، قطعات از جمله مزایایی است که باعث گسترش کاربرد این فرایند شده است. از میان پارامترهای مهم در این فرایند می‌توان هندسه قطعه کار و قالب، جنس، ابعاد اولیه و ناهمسانگردی لوله، نیروی بستن قالب‌ها، فشار داخلی سیال، کورس سنبه، نازک شدگی جدار لوله، شعاع گوشه قالب و روانکاری را نام برد [۱] تا [۳].

قالبهای هیدروفرمینگ لوله معمولاً از دو نیمه تشکیل می‌شوند که نمونه آن در شکل (۱) نشان داده شده است. در این قالبها پس از قرار گیری لوله بر روی یک نیمه قالب، نیمه دیگر بسته شده و سپس سنبه‌ها دو طرف لوله را فرا می‌گیرند. با اعمال همزمان فشار داخلی سیال و نیروی محوری سنبه‌ها، لوله، شکل حفرة قالب را به خود می‌گیرد.

ایجاد گوشه‌هایی دقیق و تیز در قطعات، یکی از مسائل مهم در روش هیدروفرمینگ است که حداکثر فشار داخلی را تعیین می‌کند. اگر فشار داخلی قبل از پرس شدن گوشه‌های قالب، به نازک شدگی در ناحیه گوشه‌های قطعه کار منجر شود، افزایش فشار به‌منظور پرس شدن گوشه قالب، باعث ایجاد عیب پارگی در قطعه کار خواهد شد. از سوی دیگر، بسته به پارامترهای فرایند، به مسیرهای فشار مختلفی نیاز است تا قطعاتی به‌طور مطلوب تولید شود. مسیرهای فشار متفاوت می‌تواند بر پرس شدن قالب و در نتیجه بر دقت ابعادی قطعه مؤثر باشد. بنابراین برای شرایط مختلف، باید مسیرهای فشار بهینه متفاوتی انتخاب شود [۴] تا [۷].

طراحی شکل مناسب قالب در فرایند هیدروفرمینگ،

یکی از پارامترهای مهم در شکل دادن قطعات است. در برخی موارد برای پرس شدن مناسب قالب، لازم است از گوشه تیز صرف‌نظر شده و شعاع بزرگتری برای آن در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، از نظر توزیع ضخامت، گوشه‌های قطعات نسبت به سایر ناحیه‌های آنها ضخامت کمتری دارند [۸].

در زمینه پرسدگی گوشه‌های قالب در فرایند هیدروفرمینگ لوله تحقیقاتی انجام شده است. کریبدلی و همکاران [۵] تغییرات ضخامت و پرسدگی گوشه قالب را برای لوله‌های با ضرایب کرنش - سختی متفاوت و ضخامت‌های اولیه مختلف بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش نمای کرنش - سختی می‌توان به قطعه‌ای با شعاع کوچکتر دست یافت. آنها همچنین نشان دادند که ضخامت لوله رابطه‌ای مستقیم با فشار شکلهی دارد؛ یعنی هر چه ضخامت لوله کمتر باشد، برای جلوگیری از پارگی، باید فشار نیز کاهش یابد، اما برای پرس کردن گوشه‌ها به بالا بردن فشار نیاز است. آنان برای هر ضخامت اولیه لوله، حداکثر فشاری را به‌دست آوردند که حتی در آن فشار، گوشه‌های قالب به‌طور کامل پرس نشده و نازک شدگی در محدوده گوشه به‌دست آمد.

هوانگ و چن [۷] نحوه پرس شدن قالب لوله پله‌ای با مقطع چهارگوش را به روشهای تجربی، تحلیلی و اجزای محدود مطالعه قرار کردند. آنها نیز نتیجه گرفتند که هر چه شعاع گوشه قالب کمتر شود، به فشار بیشتری نیاز است تا لوله، گوشه‌های قالب را پرس کند و اگر فشار از مقدار مشخصی بیشتر شود، به پارگی لوله منجر می‌شود. آنان همچنین عقیده داشتند که هر چه اصطکاک بین لوله و دیوار قالب بیشتر شود، نازک شدگی بیشتری در محدوده

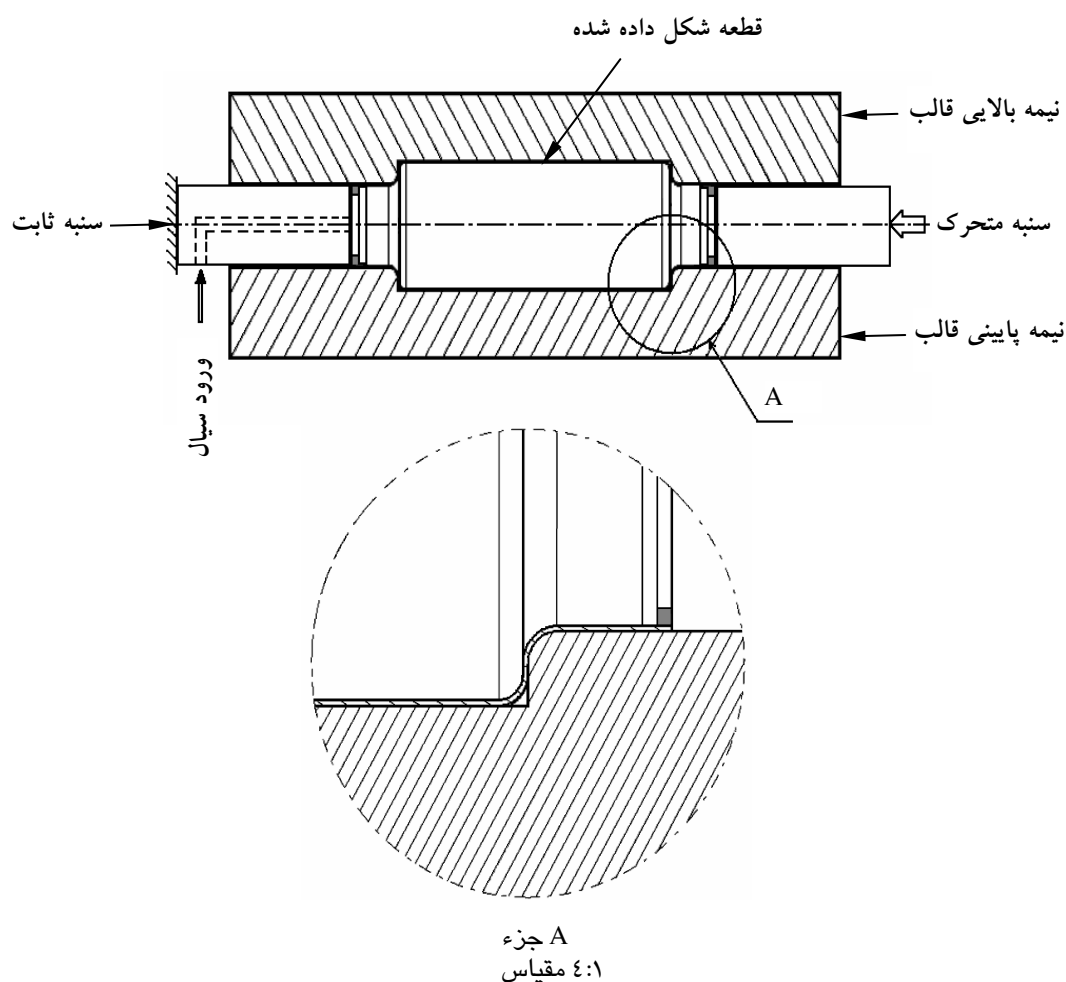
گوشه‌ها رخ می‌دهد.

شو و همکاران [۹] اثر ضریب اصطکاک، نمای کار- سختی و ضریب ناهمسانگردی را بر توزیع ضخامت در لوله‌های پله‌ای با مقطع چهارگوش به صورت تحلیلی، عددی و تجربی مطالعه کردند. و نتیجه گرفتند که افزایش ضریب اصطکاک، نایک‌نواختی را در توزیع ضخامت به وجود می‌آورد. و همچنین افزایش نمای کار- سختی و ضریب ناهمسانگردی باعث هموار شدن توزیع ضخامت می‌شود.

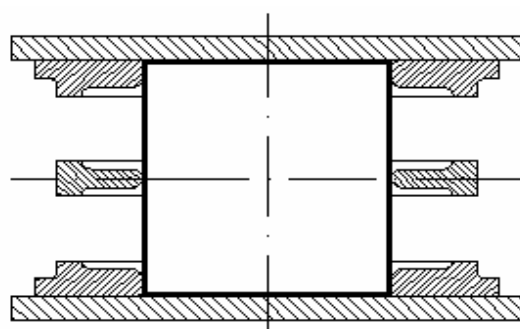
چن و همکاران [۱۰] تأثیر فشار شکلهی را در فرایند

هیدروفورمینگ لوله به روشهای تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند. و نتیجه گرفتند که فشار شکلهی به جنس لوله، ضخامت لوله و کمترین شعاع گوشه شکل نهایی محدود می‌شود.

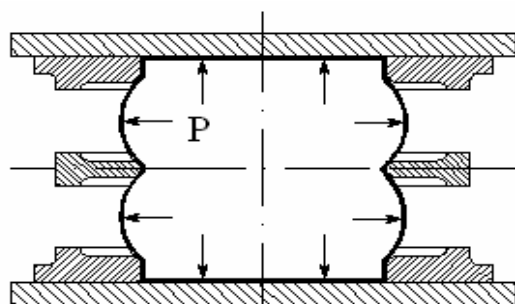
اربان و هو [۱۱] مدلی تحلیلی را بر اساس نازک شدگی دیوار لوله در حین پرشدگی گوشه قالب لوله‌های پله‌ای با مقطع چهارگوش ارائه کردند. آنها نتیجه گرفتند که افزایش اصطکاک بین لوله و دیوار قالب، به افزایش تغییرات ضخامت منجر و باعث نازک شدگی گوشه قطعه می‌شود. این تغییرات وقتی بین لوله و دیوار قالب اصطکاک چسبان



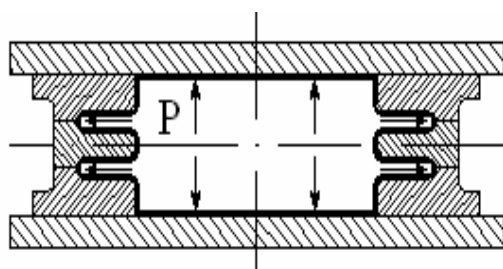
شکل ۱ طرحواره قالب متداول در هیدروفورمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ طرحواره مراحل شکلدهی لوله در قالب لوله‌های کنگره‌ای (الف) مرحله قرارگیری اولیه (ب) مرحله بشک‌ای شدن (ج) مرحله بسته شدن صفحات قالب و شکل‌گیری نهایی [۱۴]

شکل (۳) طرحواره قالب جدید و مراحل پر شدن قطعه را همراه با مدار هیدرولیکی استفاده شده در این قالب نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، این قالب

وجود داشته باشد افزایش بیشتری خواهد داشت.

لوح موسوی و همکاران [۱۲] و [۱۳] در زمینه پرشدگی گوشه‌های قالب در قطعات پله‌ای با مقطع چهارگوش و سه‌راهی مطالعاتی را انجام دادند و سعی کردند با ایجاد نوعی مسیر فشار نوسانی بهینه، پرشدگی گوشه قالب را بهبود بخشند. آنان به نتایج مطلوبی دست یافتند اما در کار آنها، حتی با داشتن مسیر فشار نوسانی نیز گوشه‌های قالب برای قطعات مورد نظر به طور کامل پر نشد. از سوی دیگر، ایجاد مسیر فشار نوسانی برای تولید محصولات نسبت به مسیرهای ثابت یا خطی بسیار مشکل‌تر است.

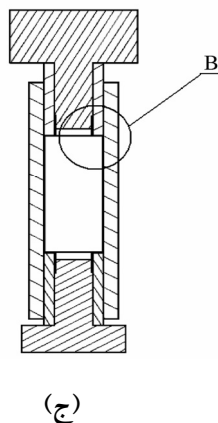
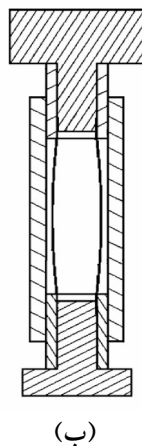
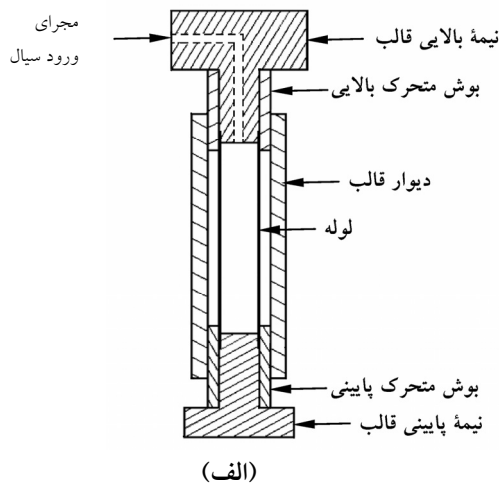
در این مقاله، نوعی مجموعه قالب جدید هیدروفرمینگ لوله به منظور پرشدن گوشه‌های قالب برای لوله‌های پله‌ای ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش حاضر علاوه بر بهبود پرشدگی گوشه‌های قالب، نسبت به روشهای قبلی مزیت‌های دیگری نیز دارد.

۲- معرفی روش جدید

ایده قالب جدید از قالب لوله‌های کنگره‌ای^۱ گرفته شده است. قالب لوله‌های کنگره‌ای از نوع قالب هیدروفرمینگ دو مرحله‌ای باز و بسته است که طرحواره آن در شکل (۲) نشان داده شده [۱۴]. لوله در اولین مرحله، مطابق شکل (۲-الف) در قالب قرار داده می‌شود. سپس با بالا بردن فشار داخلی، لوله به شکل بشک‌ای تغییر شکل می‌یابد (شکل ۲-ب). در مرحله بعدی، با ثابت ماندن فشار، صفحه‌های قالب مطابق شکل (۲-ج) جمع می‌شوند و سپس با بالا بردن فشار داخلی، لوله در قالب بسته شکل نهایی را به خود می‌گیرد.

1. Bellows

تمامی شرایط شبیه‌سازی مانند شرایط تماسی و اصطکاکی، نوع المان‌ها و مسیر بارگذاری یکسان تعریف شده و در تمامی شبیه‌سازی‌ها، ماده همسانگرد فرض شده است.

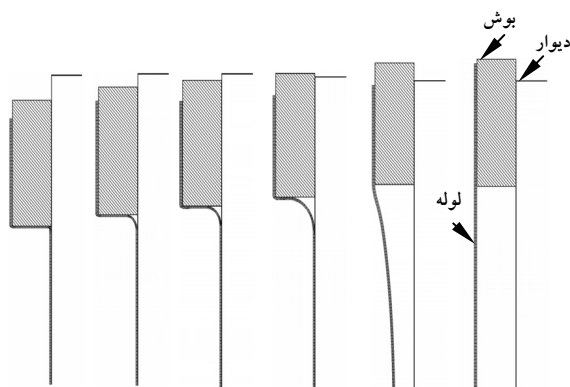


علاوه بر اجزای قالب‌های متداول [۴] تا [۸]، شامل دو بوش متحرک در بالا و پایین نیز هست. مشابه قالبهای لوله‌های کنگره‌ای، مراحل شکل‌گیری قطعه در قالب جدید چنین است که نخست مطابق شکل (۳-الف) لوله در داخل قالب قرار می‌گیرد، از سیال پر و محفظه آب‌بندی شده. سپس با بالا بردن فشار داخلی و ثابت ماندن بوش‌ها و سنبه‌ها، لوله در حفره قالب بشکته‌ای شده و به دیوار قالب که ثابت است، می‌چسبد (شکل ۳-ب). آنگاه با ثابت ماندن فشار داخلی، بوش‌ها سنبه‌ها همزمان با هم حرکت می‌کنند تا محفظه قالب پر شود (شکل ۳-ج). در واقع، مراحل شکلدهی لوله در قالب جدید مانند لوله‌ای یک کنگره‌ای است که طول کنگره آن زیاد و قطر آن کم باشد. در طی انجام آزمایشها دیده شد که درست در لحظه‌ای که محفظه قالب پر می‌شد، دستگاه افزایش نیرو را نشان می‌داد و در همین لحظه فرایند متوقف می‌شد.

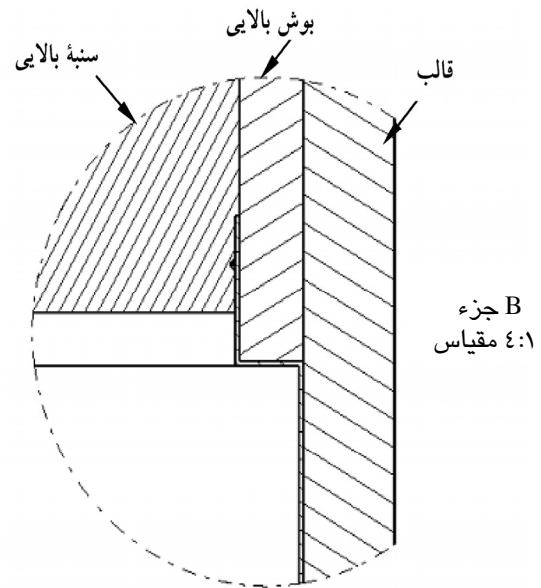
همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شد، در قالبهای متداول، نیروی محوری سنبه‌ها از دو انتهای لوله اعمال می‌شود. در قالب جدید، مانند قالب متداول، سنبه‌ها به دو انتهای لوله نیرو اعمال می‌کنند. به‌علاوه، همزمان با حرکت سنبه‌ها، بوش‌ها نیز به تدریج پایین آمده و با لوله تماس پیدا کرده و به آن نیرو اعمال می‌کنند. مراحل پر شدن گوشه قطعه‌کار در قالب جدید در شکل (۴) نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS/Explicit 6.4 استفاده شده است [۱۵]. به‌منظور مقایسه چگونگی پر شدن گوشه‌های قالبهای متداول هیدروفورمینگ و قالب پیشنهادی، این دو مجموعه قالب شبیه‌سازی شده. هر دو مجموعه قالب از نظر اندازه یکسان بوده و برای شکلدهی لوله پله‌ای با مقطع گرد به‌کار برده شد.



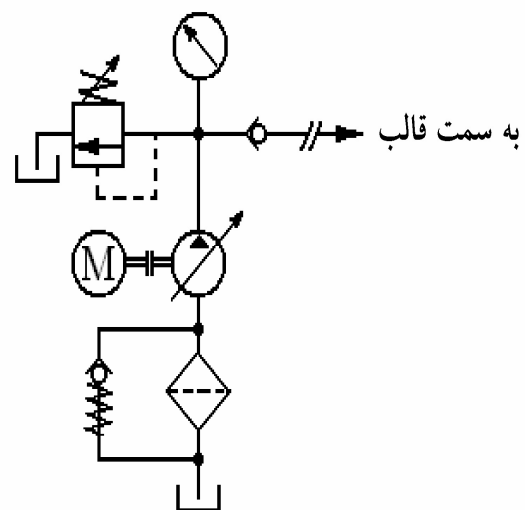
شکل ۴ از راست به چپ، مراحل پر شدن گوشه لوله در قالب جدید



شکل (۵) مشخصات ابعادی قالب متداول هیدروفرمینگ استفاده شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن محوری هندسه قالب و قطعه کار، از مدل‌های دوبعدی برای شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل (۶) قالب شبیه‌سازی شده را در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

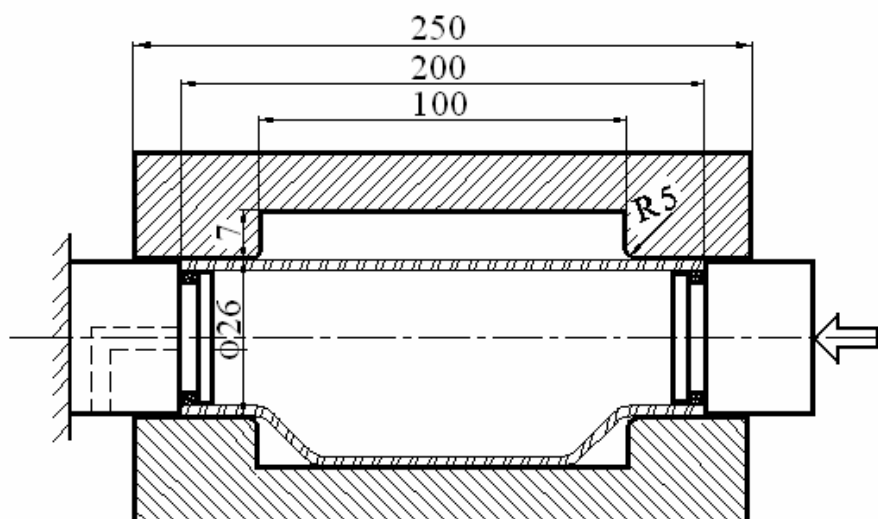
لوله‌ها به صورت دوبعدی شکل‌پذیر و با المان CAX4R مدل‌سازی شد. قالب‌ها به صورت صلب دوبعدی مدل‌سازی شد که به دلیل انتخاب نوع المان، بر اساس مراحل آورده شده در [۱۶]، ضریب اصطکاک کلمب میان سطوح قالب و قطعه کار در شبیه‌سازی برابر ۰/۰۶ در نظر گرفته شد.

شکل (۷) قالب جدید شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد؛ شبیه‌سازی شامل دو مرحله است. در مرحله اول، فشار داخلی لوله تا جایی افزایش می‌یابد که لوله بشکهای شود. در مرحله دوم با حرکت سنبه‌ها و بوش‌های قالب به سمت هم و با ثابت ماندن فشار داخلی لوله، ناحیه بشکهای شده به طور کامل به دیوار قالب می‌چسبد. منحنی فشار-جابجایی استفاده شده برای دو قالب در شکل (۸) نشان داده شده است.

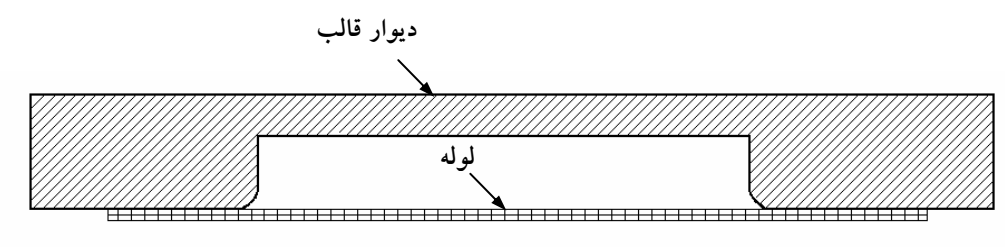


(د)

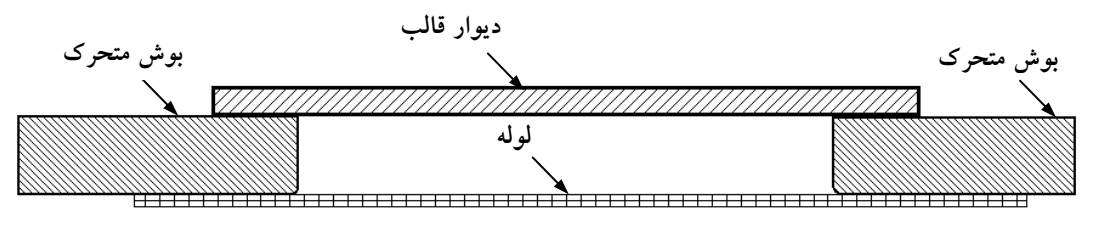
شکل ۳ طرحواره مراحل شکلدهی لوله در قالب جدید الف) مرحله قرارگیری اولیه ب) مرحله بشکهای شدن ج) مرحله شکل‌گیری نهایی لوله د) مدار هیدرولیکی استفاده شده



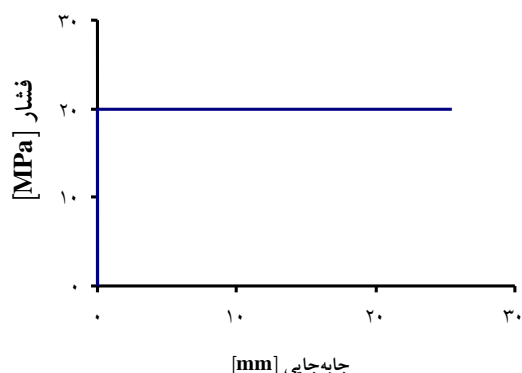
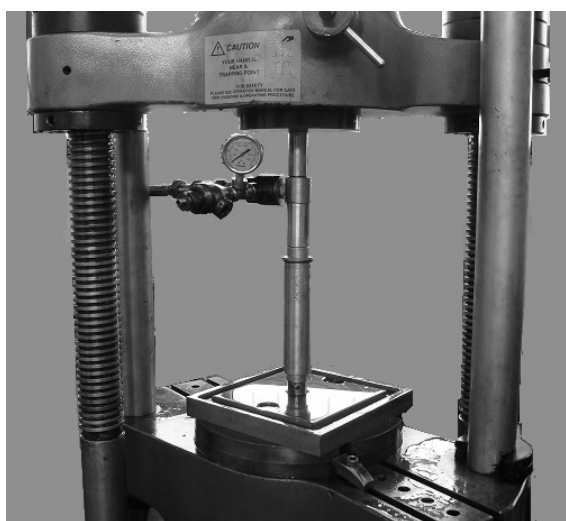
شکل ۵ مشخصات ابعادی قالب متداول هیدروفرمینگ در شبیه سازی



شکل ۶ قالب متداول هیدروفرمینگ شبیه سازی شده



شکل ۷ قالب جدید هیدروفرمینگ شبیه سازی شده



شکل ۸ منحنی فشار- جابه‌جایی استفاده شده برای دو نوع قالب متداول و قالب جدید هیدروفرمینگ

شکل ۹ مجموعه قالب نصب شده بر روی دستگاه آزمایش

به‌منظور تحلیل فرایند هیدروفرمینگ به‌روش اجزای محدود، به منحنی تنش- کرنش حقیقی نیاز است. از این‌رو، نمونه‌های آزمون کشش لوله، تهیه و آزمایش شد. شکل (۱۰)، منحنی تنش- کرنش حقیقی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

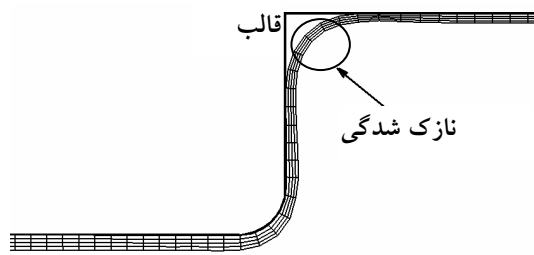
جدول ۱ ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ نزن SS316L

%C	%Si	%Mn	%P
۰/۰۲۲	۰/۴۵	۰/۸۸	۰/۰۳۴
%S	%Cr	%Mo	%Ni
۰/۰۰۵	۱۷/۴۵	۲/۰۱	۱۲
%Nb	%Al	%Co	%Cu
۰/۰۲۵	۰/۰۱۹	۰/۱۴	۰/۴۱
%Ti	%V	%W	%Fe
۰/۰۰۲	۰/۰۵۵	۰/۰۴	عنصر پایه

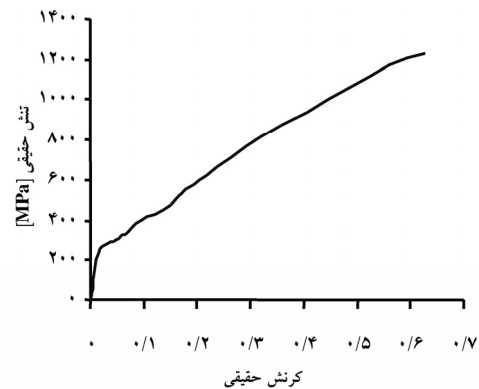
۴- مراحل آزمایشگاهی

شکل (۹) مجموعه قالب جدید هیدروفرمینگ را در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش نشان می‌دهد. برای انجام آزمایشها از دستگاه اونیورسال DMG (Denison Mayes Group) با ظرفیت ۶۰۰KN استفاده شد که امکانات کاملی برای ثبت اطلاعات خروجی دارد. فشار توسط مجموعه‌ای هیدرولیکی تأمین می‌شود که قابلیت اعمال فشار تا ۳۵MPa را دارد. مقدار حداکثر فشار، با استفاده از یک شیر محدود کننده قابل تنظیم است.

لوله شکل داده شده در آزمایشها از جنس SS316L و با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، قطر خارجی ۲۶ میلیمتر و طول ۲۰۰ میلی‌متر است. ترکیب جنس این لوله در جدول (۱) نشان داده شده است. سیال استفاده شده در آزمایشها روغن شرکت پارس با نام تجاری بابک هیدرولیک ۶۸ است.



شکل ۱۲ اعمال فشار اضافی و نازک شدگی ناشی از آن برای قالب متداول هیدروفرمینگ

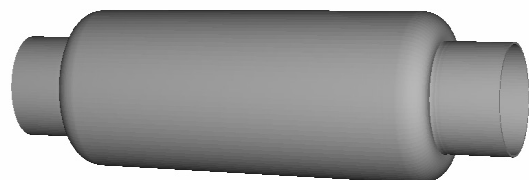


شکل ۱۰ منحنی تنش - کرنش حقیقی لوله SS316L

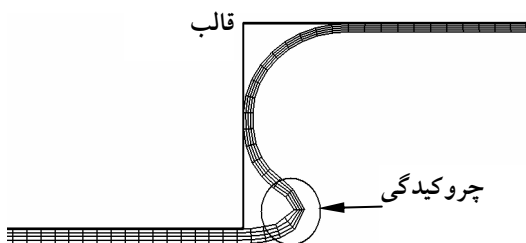
۵- بحث و نتایج

شکل ۱۱ نتیجه شبیه‌سازی لوله شکل داده شده در قالب متداول هیدروفرمینگ را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود گوشه‌های قطعه به‌طور کامل پرنشده است. برای پرسیدن گوشه قطعه در این نوع قالب، فشار داخلی افزایش داده شد، اما ملاحظه شد که نازک شدگی بیش از حد یا پارگی در لوله به‌وجود می‌آید. و اگر بارگذاری محوری افزایش داده می‌شد، چروکیدگی در ماده ایجاد می‌شد. این حالتها به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

براساس نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، این نتیجه‌گیری حاصل شده که در این نوع قالب‌ها نمی‌توان لوله‌هایی با گوشه‌های تیز را شکل داد.



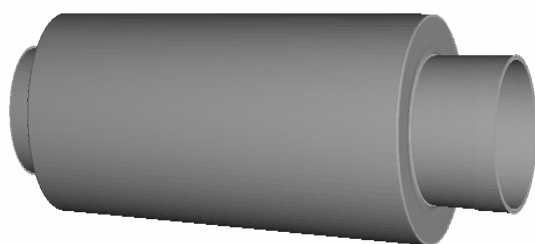
شکل ۱۱ لوله شکل داده شده با شبیه‌سازی در قالب متداول هیدروفرمینگ



شکل ۱۳ بارگذاری محوری اضافی و چروکیدگی ناشی از آن برای قالب متداول هیدروفرمینگ

شکل (۱۴) نتیجه شبیه‌سازی لوله قطعه شکل داده شده با قالب جدید را نشان می‌دهد. همان گونه که از این شکل پیداست با شرایطی کاملاً یکسان با قالب قبلی، گوشه‌های کاملاً تیزی در قطعه ایجاد شده و حفره قالب به‌طور کامل پر شده است. به‌علاوه، این پرس شدگی با اعمال مسیر فشار ساده نشان داده شده در شکل (۸) و با فشار حداکثر 20 MPa به‌دست آمد. ملاحظه می‌شود که گوشه‌های قالب در فشاری نسبتاً پایین و با مسیر بارگذاری ساده‌ای کاملاً پر شده است.

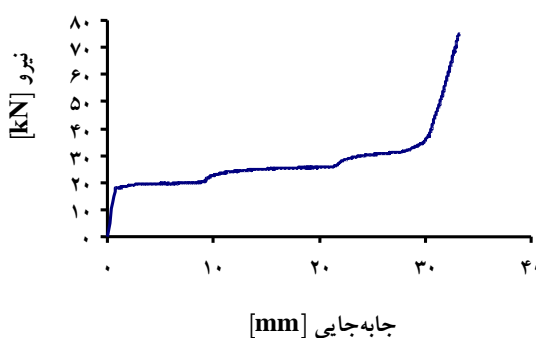
در انتهای فرایند، مقدار حداکثر تنش در محدوده گوشه‌های قطعه در هر دو قالب با شبیه‌سازی به‌دست



شکل ۱۴ لوله شکل داده شده با شبیه‌سازی قالب جدید هیدروفرمینگ



شکل ۱۵ لوله شکل داده شده با روش آزمایشگاهی در قالب جدید هیدروفرمینگ



شکل ۱۶ منحنی نیرو- جابه‌جایی با روش آزمایشگاهی در قالب جدید هیدروفرمینگ

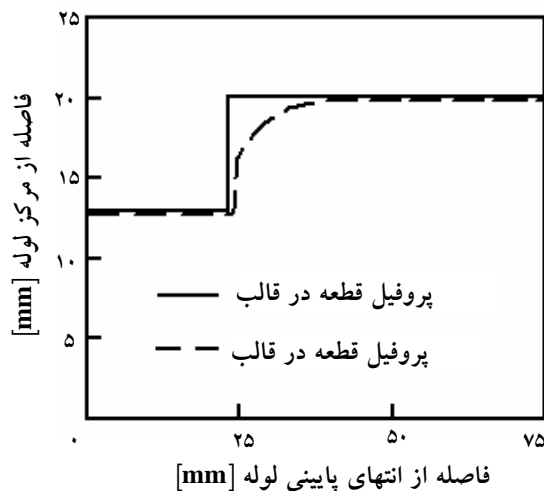
آمده است. این مقدار برای قالبهای متداول و جدید به ترتیب برابر $839/9 \text{ MPa}$ و $715/6 \text{ MPa}$ بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که با اعمال شرایطی کاملاً یکسان، مقدار تنش در محدوده گوشه قطعه در قالب جدید به‌طور قابل توجهی کمتر از قالب متداول به‌دست آمده است.

شکل (۱۵) قطعه شکل داده در قالب جدید را با روش آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست روش جدید هیچگونه محدودیتی در پرس شدن گوشه قالب نداشته و حفره قالب در آن به‌طور کامل پرس شده است.

در روش جدید همان‌گونه که پیشتر گفته شد در لحظه پرس شدن محفظه قالب دیده شد که نیرو بر روی کامپیوتر متصل به دستگاه افزایش می‌یابد و در این لحظه، فرایند متوقف شد. بنابراین در این فرایند، هیچگاه حرکت بوش‌ها بیش از مقدار لازم نبوده است. به‌علاوه، در طی آزمایشها مشاهده شد که چنانچه فشار کاری از فشار لازم برای شکلدهی کمتر باشد حرکت سنبه‌ها و بوش‌ها به چروکیدگی قطعه منجر می‌شود. در مقابل، اگر این فشار بیشتر می‌شد پارگی در لوله به‌وجود می‌آمد.

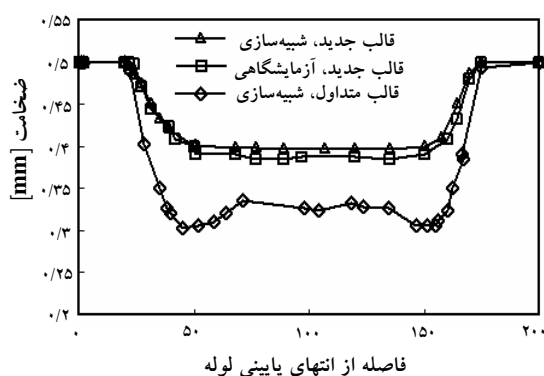
منحنی نیرو- جابه‌جایی با روش آزمایشگاهی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود شیب تند منحنی در انتهای فرایند مربوط به مرحله پرس شدن گوشه‌های قالب است.

در شکل (۱۷) پروفیل قطعه شکل داده شده با شبیه‌سازی و با روش آزمایشگاهی در قالب جدید مقایسه شده که در آن نیمه بالایی محور تقارن، قطعه شبیه‌سازی شده و نیمه پایینی آن محور، قطعه شکل داده شده با روش آزمایشگاهی است. تطابق بسیارخوب میان نتایج در این شکل نشان داده شده است.

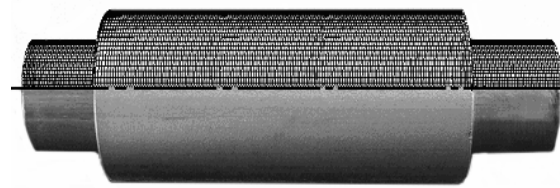


شکل ۱۸ مقایسه پرشدگی گوشه قالب در قطعات شکل داده شده در قالب جدید و قالب متداول

همان‌گونه که دیده می‌شود در روش جدید، از تغییر ناگهانی ضخامت در گوشه‌های قطعه جلوگیری شده و نقاط گوشه، ضخامتی نزدیک به ضخامت اولیه لوله دارند. مقدار نازک شدگی در وسط قطعه نیز ناشی از بشک‌ای شدن در مرحله اولیه شکلدهی است. اما این نازک شدگی از نازک شدگی در گوشه‌های قطعه - که در قالب بسته شکل داده شده - کمتر است.



شکل ۱۹ مقایسه توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در قالب جدید با روشهای تجربی و اجزای محدود



شکل ۱۷ مقایسه پروفیل قطعه شکل داده در قالب جدید، نیمه بالایی محور تقارن مربوط به شبیه‌سازی و نیمه پایینی محور مربوط به روش آزمایشگاهی

در شکل (۱۸) هندسه گوشه قطعه شکل داده شده با شبیه‌سازی و در فشار نهایی ۲۰ MPa در قالب‌های متداول و جدید مقایسه شده است. در این شکل نیز اختلاف میان پر شدن گوشه در هر دو قالب به خوبی نمایان است. قطعه شکل داده شده در قالب جدید به طور کامل و در تمامی نقاط به دیوار قالب چسبیده است، در حالی که در شرایطی یکسان، قطعه شکل داده شده در قالب متداول، حفره قالب را پر نکرده است. در این حالت، با شبیه‌سازی مقدار شعاع گوشه قطعه برابر ۶mm در قالب متداول به دست آمده است. توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در قالب جدید با روشهای تجربی و اجزای محدود در شکل (۱۹) مقایسه شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود تطابق بسیار خوبی میان نتایج وجود دارد.

توزیع ضخامت در روش تجربی با دستگاه ضخامت سنج اولتراسونیک اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری مسیرهای مختلفی در روی لوله مشخص شده و در هر مسیر حدود ۲۰ نقطه اندازه‌گیری شده است. توزیع ضخامت نشان داده شده در مقاله، میانگین این اعداد است. مقدار حداکثر کاهش ضخامت برای قطعه شکل داده شده در قالب جدید در حدود ۰/۱۱ میلی‌متر بوده و در وسط قطعه رخ داده است، اما این مقدار برای قطعه شکل داده شده در قالب متداول برابر ۰/۲۸ میلی‌متر بوده و در ناحیه نزدیک به گوشه قطعه رخ داده است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای شکلدهی قطعات لوله‌ای پله‌ای ارائه شده که در آن پر شدن گوشه‌های قالب نسبت به قالب‌های متداول هیدروفرمینگ بهبود یافته است. بدین منظور، مجموعه قالب متداول و مجموعه قالب جدید با شبیه‌سازی مدل‌سازی و پرشدن گوشه در هر دو قالب در شرایطی یکسان مطالعه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در قالب جدید، گوشه‌های قطعه به‌طور کامل پر شده، درحالی‌که در قالب متداول، گوشه‌ها به‌طور کامل شکل نگرفته است. به‌منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی، مجموعه قالب جدید ساخته و آزمایش‌هایی با آن انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود را تأیید کرد. پیچیده نبودن اجزای قالب، خطی بودن و پایین بودن فشار شکلدهی و هموار بودن کاهش ضخامت، برخی مزایای روش ارائه شده است.

۷- منابع

- 2003; pp. 287-296.
- [6] Fann, K.-J.; Hsiao, P.-Y.; "Optimization of loading conditions for tube hydroforming"; Journal of Material Processing Technology; Vol. 140; 2003; pp. 520-524.
- [7] Hwang, Y.-M.; Chen, W.-C.; "Analysis of tube hydroforming in a square cross-section die"; International Journal of Plasticity; Vol. 21; 2005; pp. 1815-1833.
- [8] Gang, L.; Shijian, Y.; Bugang, T.; "Analysis of thinning at the transition corner in tube hydroforming"; Journal of Materials Processing Technology; Vol. 177; 2006; pp. 688-691.
- [9] Xu, X.; Li, S.; Zhang, W.; Lin, Z.; "Analysis of thickness distribution of square-sectional hydroformed parts"; Journal of Material Processing Technology, Vol. 209; No. 1; 2009; pp. 158-164.
- [10] Chen, F.-K.; Wang, S.-J.; Lin, R.-H.; "A study of forming pressure in the tube-hydroforming process"; Journal of Materials Processing Technology; Vol. 192-193; 2007; pp. 404-409.
- [11] Orban, H.; Hu, S. J.; "Analytical modeling of wall thinning during corner filling in structural tube hydroforming" Journal of Materials Processing Technology; Vol. 194; 2007; pp. 7-14.
- [12] 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; 2007; pp. 461-467.
- [13] Loh-Mousavi, M.; Mori, K.; Hayashi, K.; Maki, S.; Bakhshi, M.; "3D finite element simulation of pulsating T-shape hydroforming of tubes" Key Engineering Materials; Vol. 340-341; 2007; pp. 353-358.
- [14] Elyasi, M.; Bakhshi-Jooybari, M.; Gorji, A.H.; Nourouzi, S.; Alinejad, G.M.; "Numerical and experimental investigation on forming metallic bellows in closed and open die hydroforming"; Steel Research International; Vol. 79; 2008; pp. 148-154.
- [15] ABAQUS.CAE 6.4. "Theory Manual"; Hibbit; Karlsson; Sorensen; Inc. 2003.
- [16] 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; 2004; pp. 108-115.
- [1] Koc, M.; Allen, T.; Jiratheranat, S.; Altan, T.; "The use of FEA and design of experiments to establish design guideline for simple hydroforming parts"; International Journal of Machine Tools & Manufacture; Vol. 40; 2000; pp. 2249-2266.
- [2] Kim, J.; Kang, B.-S.; "Implementation of backward tracing scheme of the FEM for design of initial tubular blank in hydroforming"; Journal of Material Processing Technology; Vol. 125-126; 2002; pp. 839-848.
- [3] Koc, M.; Altan, T.; "Application of two dimensional (2D) FEA for the tube hydroforming process"; International Journal of Machine Tools & Manufacture; Vol. 42; 2002; pp. 1285-1295.
- [4] Koc, M.; Altan, T.; "Predication of forming limits and parameters in the tube hydroforming process"; International Journal of Machine Tools & Manufacture; Vol. 42; 2002; pp. 123-138.
- [5] Kridli, G.T.; Bao, L.; Mallick, P.K.; Tian, Y.; "Investigation of thickness variation and corner filling in tube hydroforming"; Journal of Material Processing Technology; Vol. 133;