

بررسی عددی تاثیر مسیرهای فشار دوخطی بر پرشدن گوشه قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل

محسن لوح موسوی^{۱*}

میثم شهبازی^۲

*loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

پر شدن گوشه قالب در فرآیند هیدروفرمینگ، از مسائل بسیار مهم است. تعریف صحیح مسیر فشار، یکی از پارامترهای مهم در بهبود پرشدگی گوشه قالب به شمار می رود. با این حال به دلیل پیچیدگی مسئله، هنوز ارتباط بین مسیر فشار با میزان پرشدگی گوشه به خوبی مشخص نیست. در این مقاله، تاثیر مسیرهای فشار دوخطی مختلف بر پر شدن گوشه قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل به صورت عددی و تجربی بررسی شده است. مسیر فشار دوخطی، ساده ترین مسیر فشار ممکن برای انجام فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل است. در این حالت، فشار داخلی در ثانیه اول فرآیند (مرحله آب بندی) تا یک مقدار اولیه افزایش یافته و پس از انجام عمل آب بندی به تدریج تا رسیدن به فشار نهایی (فشار کالیبراسیون) بطور خطی افزایش می یابد. نشان داده می شود که برای مسیرهای فشار دوخطی که فشار اولیه آنها کمتر از فشار تسلیم باشد، یک چروکیدگی اولیه مفید در گوشه بوجود می آید که باعث بهبود پرشدگی بیشتر قالب در گوشه های طولی قالب می گردد، درحالیکه برای سایر مسیرها، در ابتدای فرآیند یک برجستگی محدب اتفاق می افتد و به همین خاطر، جریان مواد به درون قالب کند شده و در نتیجه، گوشه قالب بطور نامناسب شکل می گیرد.

واژه های کلیدی: هیدروفرمینگ لوله، مسیر فشار داخلی، قالب جعبه ای شکل، روش اجزای محدود

^۱ - استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۱- مقدمه

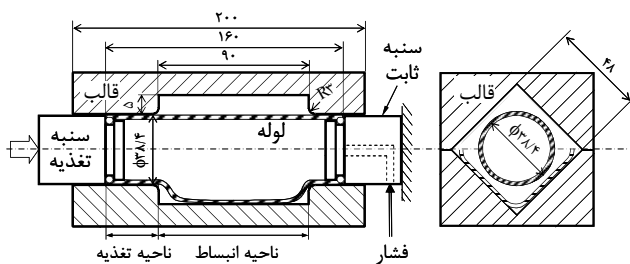
مقدار فشار اولیه، برای این نوع مسیرهای فشار بر بهبود پر شدگی قالب مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با انجام آزمایش های مربوطه، نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه می شود تا صحت و درستی نتایج حل عددی بررسی گردد.

۲- هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل

۲-۱- روش آزمایشگاهی

مجموعه قالب جعبه ای شکل و پرس بکار رفته برای بررسی تجربی و شبیه سازی اجزای محدود هیدروفرمینگ لوله در شکل های (۱) و (۲) و در شکل (۳) پرس استفاده شده در آزمایش ها، نشان داده شده است. لوله از جنس فولاد کم کربن بوده و طول، ضخامت و قطر خارجی آن به ترتیب ۱۶۰، ۱ و ۳/۴ میلیمتر میباشد. سنبه تغذیه از یک سمت و با سرعت ۱ میلیمتر بر ثانیه بر انتهای لوله فشار وارد کرده و سمت دیگر لوله ثابت فرض شده است. مقدار کل جابجایی سنبه تغذیه برای این آزمایش ۲۵ میلیمتر می باشد.

در جدول شماره (۱) نتایج آنالیز فولاد بکار رفته در لوله آورده شده است. شکل (۴) نیز بیانگر نمودار تنش تسلیم و کرنش پلاستیک لوله استفاده شده می باشد.



شکل ۱ اجزای مهم قالب و ابزار استفاده شده در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل (ابعاد به میلیمتر).

فرایند هیدروفرمینگ لوله روش نسبتاً جدیدی برای شکل دادن لوله به منظور تولید قطعات توخالی پیچیده است. از مزایای اصلی این فرایند، کم کردن وزن قطعات و کم کردن عملیات جوشکاری است و به همین خاطر در سال های اخیر مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است [۱]. در این فرایند، لوله های مستقیم و یا خمیده تحت فشار سیال به اشکال مورد نظر درمی آیند. با انبساط لوله تحت فشار بالا، ضخامت جداره آن کاهش می یابد. این امر، در نهایت منجر به پارگی لوله می شود. برای اجتناب از کاهش موضعی ضخامت جداره لوله، همزمان با اعمال فشار داخلی، لوله از یک سمت یا هر دو سمت تحت بار محوری فشاری قرار می گیرد تا ماده بیشتری در راستای محوری به ناحیه تغییر شکل، تغذیه شود. با این حال، تغذیه محوری نامناسب منجر به بوجود آمدن عیوب دیگری از قبیل چروکیدگی و کمانش لوله و یا خالی ماندن گوشه های قالب می شود [۲]. بطور کلی، برای تولید یک قطعه بی عیب با ابعاد و تolerانس های مورد نیاز، انتخاب مسیر فشار برحسب تغذیه محوری بسیار مهم است [۳].

کوروکاوا [۴]، پرشدن گوشه های قالب را در دو مرحله به روش هیدروفرمینگ بهبود بخشید، او در مرحله اول قطعه کار را به فرم یک بیضی شکل دهی کرد و سپس این بیضی را تحت فشار سیال بصورت یک مکعب درون قالب جعبه ای شکل فرم داد. ردلی [۵]، بصورت عملی و همچنین با شبیه سازی عددی به بررسی توزیع ضخامت و شعاعهای بوجود آمده در گوشه های یک قطعه در قالب جعبه ای شکل پرداخت. نگارنده اول این مقاله و همکارانش [۶]، به بررسی عملی و تحلیلی تاثیر فشار نوسانی بر پرشدن گوشه های قالب پرداخته و با کنترل چروکیدگی به کمک فشار داخلی نوسانی، مقدار پرشدگی گوشه های قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای را بهبود دادند.

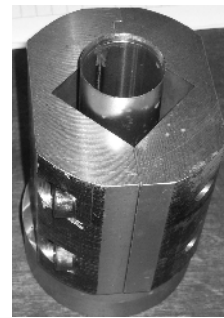
در این مقاله، فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل، برای مسیرهای فشار دو خطی به کمک روش اجزای محدود و بطور سه بعدی شبیه سازی شده و تاثیر

۲-۲- شبیه سازی اجزای محدود

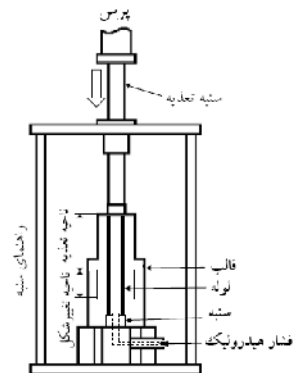
فرآیند هیدروفرمینگ لوله جعبه ای شکل در قالب بسته به کمک نرم افزار اجزای محدود ABAQUS و کد صریح دینامیکی شبیه سازی شد. قالب و لوله توسط المان پوسته ای مدل سازی شده است. نوع و تعداد المان استفاده شده برای لوله بترتیب S4R و ۳۴۰۰ می باشد. سطح قالب با المان صلب از نوع R3D4 مدل سازی شده است و از روش پینالتی برای مدل سازی رفتار تمامی قالب و لوله استفاده شده است. تنش سیلان و ضرایب ناهمسانگردی برای لوله فولادی STKM11A با کرنش متوسط بوسیله آزمایش کشش ساده در جهات مختلف اندازه گیری شده است. شکل (۵) وجدول (۲) به ترتیب نشان دهنده مدل اجزای محدود و شرایط استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود می باشند.

جدول ۲ شرایط استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود.

مدول یانگ	۲۱۰ GPa
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم	۲۹۰ MPa
آمقدار	۱/۶
ضریب اصطکاک	۰/۱
قطر خارجی لوله	۳۸/۴ mm
ضخامت حداره لوله	۱/۱ mm
سرعت سنبه	۱ mm/s



شکل ۲ لوله و قالب هیدروفرمینگ جعبه ای شکل.

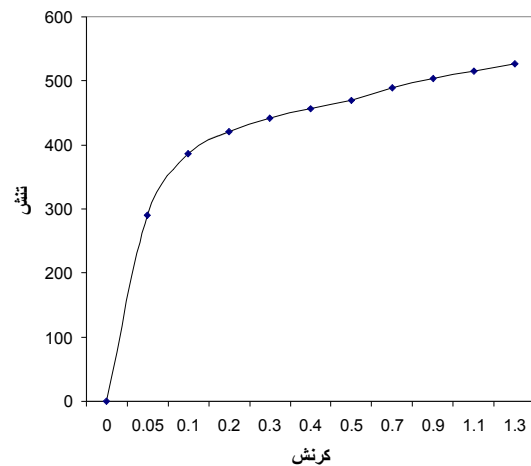


جدول ۱ مشخصات فولاد بکار رفته در آزمایش.

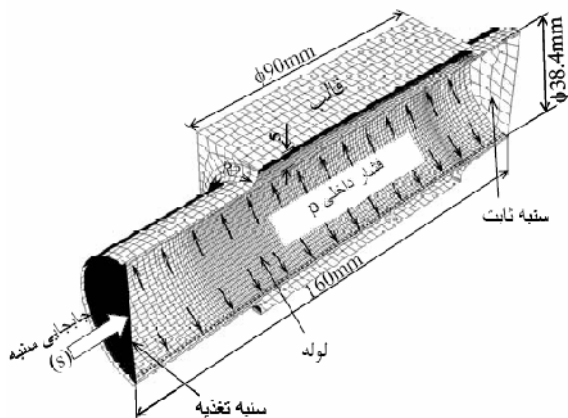
فشار مورد نظر

درصد سیلیسیم	۰/۰۳
درصد منگنز	۰/۴
درصد فسفر	۰/۰۲۵

نمودار تنش-کرنش حقیقی فولاد STKM11A



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش حقیقی لوله استفاده شده.



شکل ۵ مدل اجزای محدود فرآیند هیدرو فرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل.

۳- مسیرهای مختلف فشار

۳-۱- فشار داخلی

فشار تسلیم حداقل فشاری است که باید به لوله وارد شود تا لوله شروع به تغییر شکل نماید. مدل‌های تحلیلی که فشار تسلیم را ارائه می کنند برای یک لوله با تقارن محوری وانتهای ثابت بر اساس تست بالچینگ حاصل میشود. براین اساس وبا توجه به معادله (۱) فشار مورد نیاز اولیه برای تغییر شکل لوله را می توان بدست آورد.

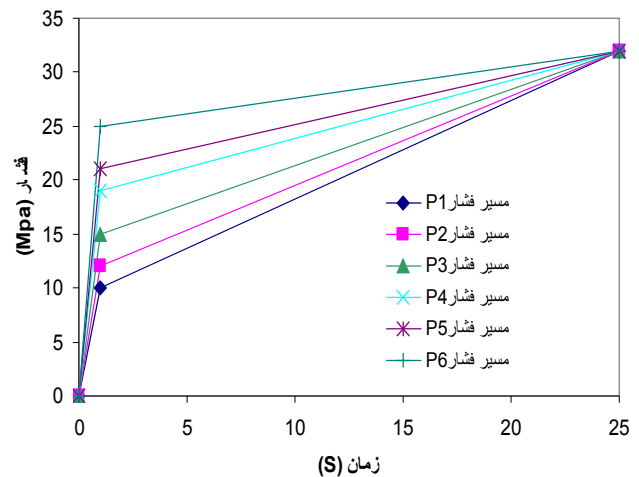
$$P_i = S_y \frac{2t}{(D - t)} \quad (1)$$

که در آن P_i فشار تسلیم، S_y تنش تسلیم، t ضخامت اولیه لوله و D قطر لوله می باشد. با جایگذاری، فشار اولیه تسلیم بصورت زیر بدست می آید:

$$P_i = \frac{290 \text{ MPa} * 2 * 1.1}{(38.4 - 1.1)} = 17 \text{ MPa}$$

برای بررسی اثر مسیرهای مختلف

فشار بر توزیع ضخامت، جریان مواد در طی فرآیند و نیز تغییر شکل لوله اعم از پرشدگی گوشه های قالب، مسیرهای مختلف فشار طبق شکل (۶) انتخاب شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می شود، شش مسیر فشار مختلف برای انجام این آزمایش در نظر گرفته شده است.

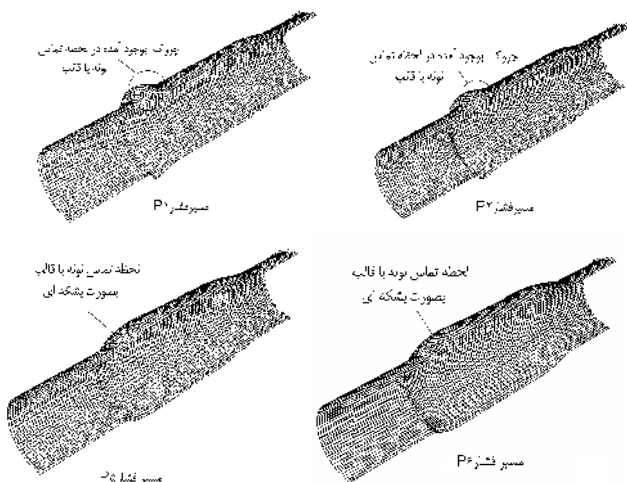


شکل (۶) مسیرهای فشار استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود.

با توجه به شکل (۶) ابتدا در یک ثانیه اول از فرآیند هیدروفورمینگ، لوله از سیال (آب و روغن) پر می شود و پس از رسیدن فشار درونی لوله به فشارهای اولیه نشان داده شده در شکل، فشار درون لوله به تدریج و به صورت خطی تا فشار نهایی (۳۲ مگا پاسکال) بالا برده می شود. برای مسیرهای فشار P_1 ، P_2 و P_3 فشار اولیه کمتر از فشار تسلیم لوله و در مسیرهای فشار P_4 تا P_6 مقدار فشار اولیه در لحظه یک ثانیه، بیشتر از فشار تسلیم تعریف شده است که علت آن در قسمت های بعد نشان داده می شود.

۴- تاثیر مسیرهای مختلف فشار بر تغییر شکل لوله و تشکیل گوشه طولی

در شکل (۷) مقدار چروکیدگی در لحظه تماس اولیه لوله و قالب برای چهار مسیر فشار انتخابی نمایش داده شده است. در مسیرهای فشار P_1 ، P_2 و P_3 با توجه به اینکه فشار اولیه درون لوله هنوز به فشار تسلیم نرسیده و از طرف دیگر، به دلیل جابجایی سنبه تغذیه در این زمان و تغذیه محوری لوله، مقداری چروکیدگی در ابتدای لوله ملاحظه می شود که با افزایش تدریجی فشار، این چروکیدگی در گوشه قالب پخش شده و باعث بهبود پر شدگی آن میشود. با افزایش فشار اولیه در مسیرهای فشار بعدی و گذشتن آن از محدوده فشار تسلیم به مقدار این چروک کاسته شده و لوله در لحظات اولیه به صورت بشکه ای یا بالج شده در خواهد آمد.

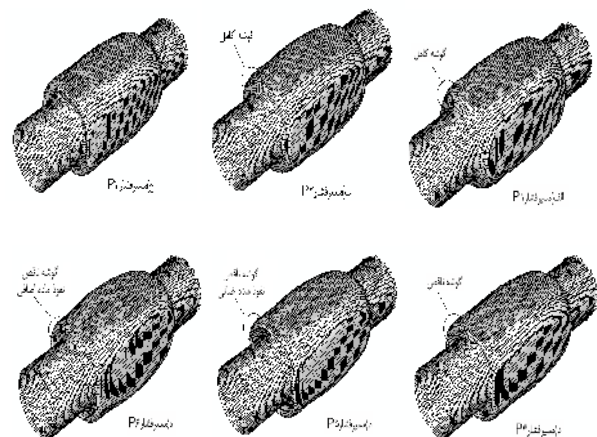


شکل ۷ مقدار چروکیدگی در لحظه تماس اولیه لوله و قالب برای چهار مسیر فشار انتخابی.

۵- بردارهای جریان مواد
 بردارهای جریان مواد مربوط به ناحیه تغییر شکل لوله در لحظه تماس اولیه لوله و قالب و زمان پایان فرآیند برای مسیرهای مختلف فشار در شکل (۹) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در مسیرهای فشار P_1 ، P_2 و P_3 جریان مواد در لحظه تماس اولیه یکنواخت تر بوده و سطح تماس بین لوله و قالب ناچیز می باشد که این امر باعث کاهش اصطکاک در لحظه تماس اولیه لوله با قالب و جریان راحت تر مواد در درون قالب می شود. به تدریج با افزایش فشار درون لوله جریان مواد از چروک بوجود آمده به سمت گوشه های قالب، علی الخصوص در مقطع طولی شروع به حرکت کرده و باعث بهبود در پرشدگی گوشه های طولی قالب می شود. در مسیر فشار P_2 به علت مناسب بودن لحظه تماس اولیه و ایجاد حالت چروکیدگی مناسب و اصطکاک کم، جریان مواد بصورت مطلوبتری نسبت به مسیرهای فشار P_1 و P_3 توانسته اند که به سمت حفره های خالی قالب حرکت نمایند.

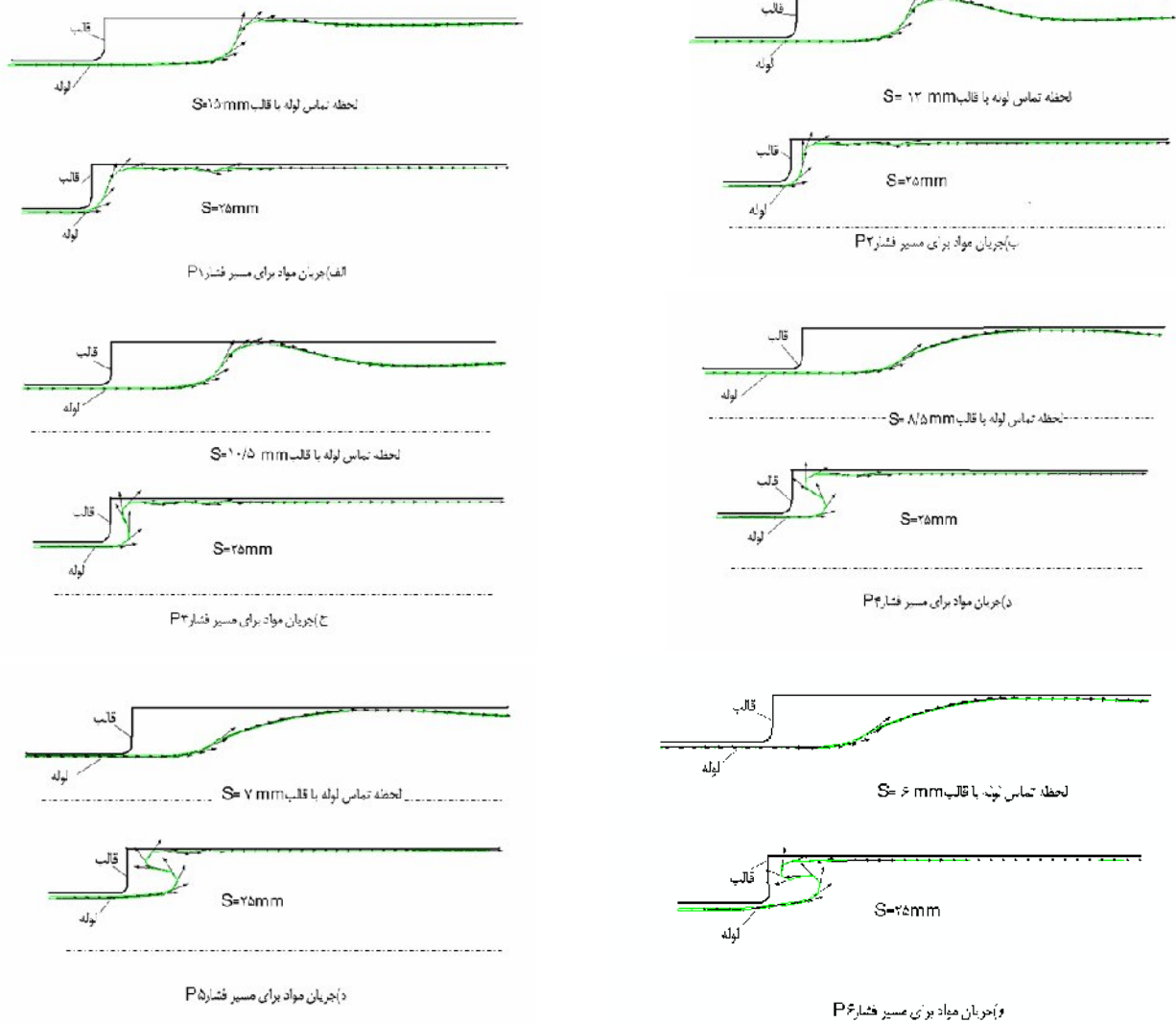
شکل (۸) شبکه اجزای محدود تغییر شکل یافته را در پایان فرآیند برای هر ۶ مسیر فشار نمایش می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود، برای مسیرهای فشار P_1 و P_2 شرایط نزدیک به هم می باشد و گوشه کامل تری نسبت به سایر موارد، پیدا نموده و در شکل، پرشدگی کامل و مطلوب این گوشه مشاهده می شود.

این، بدلیل بوجود آمدن چروکیدگی اولیه مفید (شکل ۷ را ببینید) و پخش یکنواخت آن در درون قالب می باشد که در انتها نیز بصورت خط باریکی اثر آن ملاحظه می گردد. اما برای مسیرهای فشار P_3 تا P_6 ، به علت افزایش فشار اولیه و زمان کم برای تغذیه طولی توسط سنبه ها، تماس اولیه لوله با قالب بصورت بالچینگ و بشکه ای بوده و چروکیدگی اولیه در گوشه بوجود نیامده است (شکل ۸)، به همین خاطر، تماس اولیه لوله با قالب زودتر و با سطح تماس بیشتر اتفاق افتاده است. علاوه بر این، در همان لحظات ابتدایی به علت اصطکاک موجود، جریان مواد فرصت حرکت به سمت گوشه ها را به طور مطلوب پیدا نکرده و رفته رفته با افزایش مقدار تغذیه محوری پدیده نفوذ مواد اضافی (پس زدن مواد) به درون قطعه در جهت طولی مشاهده می گردد.



شکل ۸ تغییر شکل های نهایی لوله برای مسیرهای فشار دوخطی، بدست آمده از روش اجزای محدود.

همانطور که از شکل ۸ ملاحظه می شود گوشه سمت راست قطعه، مقدار پرشدگی کمتری را نشان می دهد که دلیل آن تغذیه یکطرفه لوله (شکل ۱) بوده و در تولید صنعتی به علت وجود تغذیه دوطرفه این مسئله بوجود نمی آید.



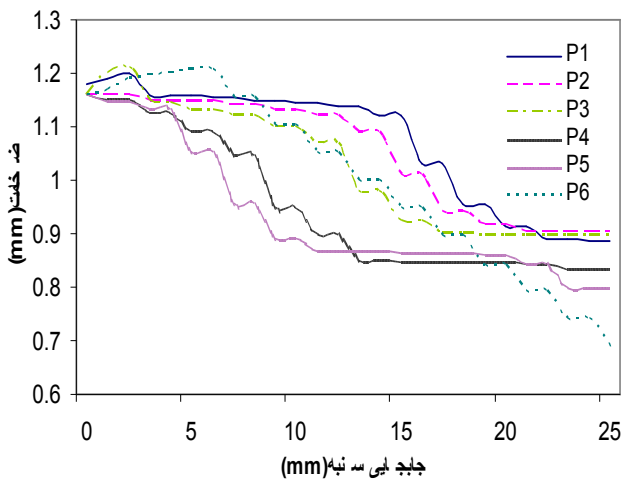
شکل ۹ بردارهای جریان مواد مربوط به ناحیه تغییر شکل لوله در لحظه تماس اولیه

لوله و قالب و زمان پایان فرآیند، مقدار جابجایی سنبه S .

در وضعیت فشار P_1 به علت کم بودن مقدار چروکیدگی و در نتیجه افزایش سریعتر سطح تماس لوله با قالب و افزایش اصطکاک، حرکت جریان مواد کند شده و برای مسیر فشار P_3 به علت اینکه تماس اولیه در مقایسه با مسیر فشار P_2 زودتر اتفاق می افتد، اصطکاک ناشی از آن باعث کندی در حرکت مواد به سمت گوشه ها شده درحالیکه هنوز تغذیه محوری پایان نیافته است، به همین دلیل مواد اضافی ناشی از تغذیه محوری به داخل قطعه پس زده شده است و پرشدگی قالب نیز کمتر می باشد.

در مسیرهای فشار P_4 تا P_6 به علت بالاتر بودن فشار اولیه، جریان مواد با انحنای بیشتری نسبت به سه مسیر اول حرکت کرده و تماس اولیه لوله با قالب در زمان کمتر و بصورت بشکه ای اتفاق می افتد و مانع از حرکت مواد به داخل حفره قالب و همچنین گوشه های طولی قالب می گردد و حتی با تغذیه محوری بیشتر، تجمع مواد اضافی و در نتیجه شکل نامناسبی برای قطعه کار بوجود می آید.

شکل ۱۰ توزیع ضخامت برای تمامی مسیرهای فشار در پایان فرآیند.

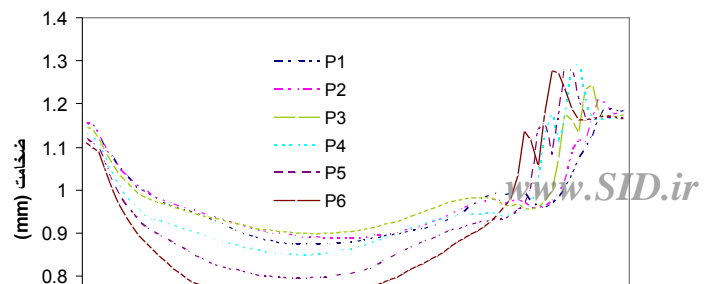


شکل ۱۱ تغییرات ضخامت لوله در حین فرآیند هیدروفرمینگ لوله در مسیرهای مختلف فشار.

همانطور که مشخص است اگرچه تغییرات ضخامت با توجه به افزایش مقدار جابجایی سنبه (S) دارای شیب زیادی است، ولی این کاهش ضخامت در اکثر مسیرهای فشار بغیر از مسیر فشار P_6 از $S=13$ میلیمتر تا پایان، روند ملایمتری را طی میکنند.

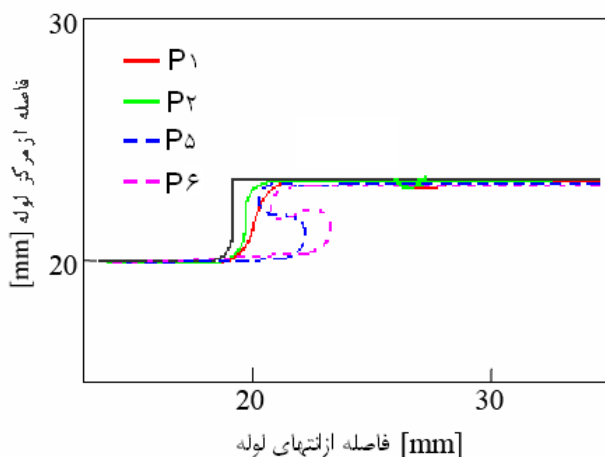
۶- تاثیر مسیرهای مختلف فشار بر ضخامت جداره لوله

در شکل (۱۰) توزیع ضخامت قطعه برای تمامی مسیرهای فشار در پایان فرآیند مقایسه شده است. همانطور که انتظار می رود مطابق شکل هرچه فشار اولیه بیشتر باشد یعنی از مسیر فشار P_1 به سمت مسیر P_6 توزیع ضخامت کاهش می یابد زیرا قبل از تغذیه محوری کافی، ضخامت لوله در اثر فشار اولیه بالا و اصطکاک کاهش می یابد. از طرف دیگر توزیع ضخامت مربوط به فشار P_2 نسبتاً از ضخامت مربوط به بقیه مسیرهای فشار بیشتر است. شکل (۱۱) تغییرات ضخامت لوله را در طول فرآیند و برای مسیرهای مختلف فشار نشان می دهد.



در شکل (۱۳) نیز پر شدگی قالب برای ۴ مسیر فشار انتخابی نشان داده شده است. ملاحظه می گردد، پر شدگی مربوط به مسیر P₂ از همه بیشتر است.

در شکل ۱۴ قطعات شکل یافته در آزمایش هیدروفرمینگ در قالب جعبه ای شکل با فشار داخلی دوخطی برای سه مسیر فشار از شش مسیر فشار مندرج در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. با مقایسه این شکل با شکل ۸ می توان به خوبی ملاحظه نمود که گوشه ایجاد شده توسط مسیر فشار P₂ از گوشه های ایجاد شده توسط سایر مسیرهای فشار، بیشتر پر شده است. در شکل ۱۵، شکل گوشه قطعه بدست آمده از آزمایش و حل عددی برای مسیر فشار P₂ مقایسه شده است. از این شکل و همچنین از مقایسه شکل های ۸ و ۱۴ به خوبی پیداست که همخوانی مناسبی بین نتایج اجزای محدود و نتایج تجربی بدست آمده، وجود دارد.



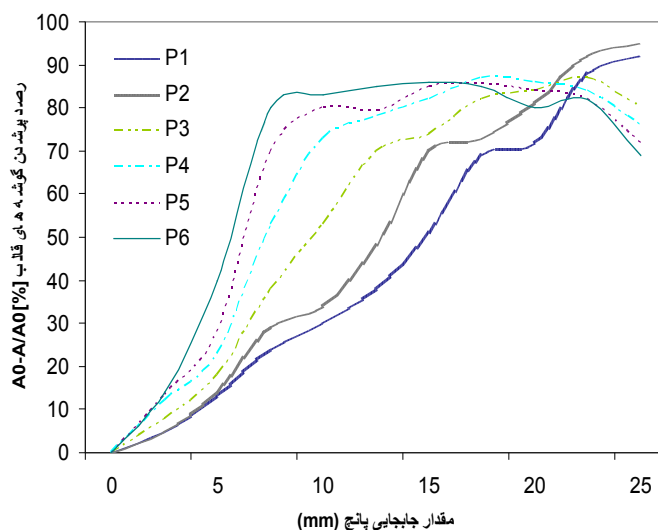
شکل ۱۳ پر شدگی قالب برای ۴ مسیر فشار.

۷- تاثیر مسیرهای مختلف فشار بر درصد پر شدگی گوشه قالب

درصد پر شدگی گوشه قالب مطابق رابطه (۲) تعریف می شود که در آن A₀ مساحت فضای خالی اولیه قالب و A مساحت پر نشده یا فضای خالی ثانویه قالب پس از پایان فرآیند می باشد.

$$\text{درصد پر شدگی قالب} = \left(\frac{A_0 - A}{A_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

شکل (۱۲)، درصد پر شدگی گوشه قالب برای ۶ مسیر فشار در نظر گرفته شده که از تحلیل اجزای محدود بدست آمده را نشان می دهد. مطابق شکل با افزایش تغذیه محوری، مقدار پر شدگی گوشه نیز افزایش می یابد. بیشترین مقدار پر شدگی برای مسیرهای فشار P₁ و P₂ بوده که دلیل آن تشکیل



شکل ۱۲ درصد پر شدگی گوشه قالب برای تمامی مسیرهای فشار.



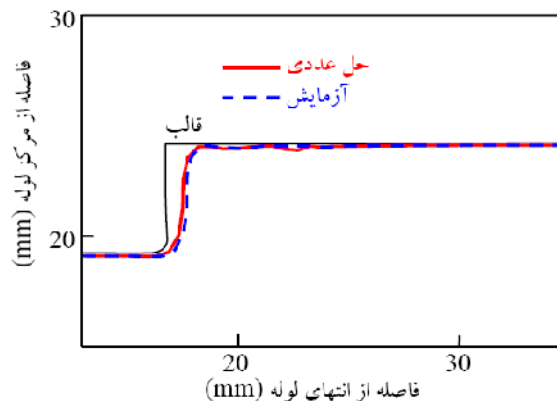
(ج) مسیر فشار P₄

(ب) مسیر فشار P₂

(الف) مسیر فشار P₁

شکل ۱۴ قطعات شکل یافته در آزمایش هیدروفرمینگ در قالب جعبه ای شکل با فشار داخلی دوخطی.

هیدروفرمینگ لوله های جعبه ای شکل، بهتر است مقدار فشار اولیه (فشار آب بندی) کمتر از فشار تسلیم لوله تعریف شود تا از انبساط ناگهانی لوله و در نتیجه تماس زود هنگام لوله و قالب جلوگیری گردد.



شکل ۱۵ مقایسه حل عددی با نتایج تجربی برای پر شدگی قالب با مسیر فشار P_2

۸- نتیجه گیری

تاثیر مسیرهای مختلف فشار بر شکل پذیری و پرشدگی گوشه قالب و همچنین بر توزیع ضخامت در طی فرآیند برای فرآیند هیدروفرمینگ در قالب جعبه ای شکل بررسی شد. بررسی ها نشان می دهد که در مسیرهای فشاری که از زیر فشار تسلیم لوله شروع می شود، در لحظه برقراری تماس اولیه بین لوله و قالب، مقداری چروکیدگی در لوله بوجود می آید که با کنترل و پخش آن در گوشه قالب، میزان پر شدگی در گوشه های طولی قطعه بهبود می یابد. این به آن علت است که در لحظه تماس اولیه لوله با قالب به علت کوچک بودن سطح تماس لوله و قالب در ناحیه چروک خورده، اصطکاک اولیه برای جریان مواد کاهش یافته و در طول فرآیند و به تدریج با افزایش فشار و تغذیه محوری، جریان مواد بهتر به درون محفظه قالب رانده می شود. علاوه بر بهبود پر شدگی برای این حالت، توزیع ضخامت نیز بهبود می یابد. در مسیرهای فشاری که بیشتر از فشار تسلیم باشند مشاهده شد که تماس اولیه لوله با قالب بصورت ناگهانی و در همان لحظات اولیه تغییر شکل صورت گرفت که علاوه بر نازکی ضخامت در جداره های لوله، باعث بوجود آمدن اصطکاک زیاد در همان لحظات اولیه تماس شده و جریان مواد نمی تواند به صورت مطلوب گوشه های قالب را پر کنند. بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق می توان نتیجه گیری کرد که برای پر شدن بهتر گوشه قالب در

مراجع

- [1] B. J. Mac Donald and M. Hashmi, "Near-Net-Shape Manufacture of Engineering Components using Bulge Forming Process", J. Mater. Process. Technol., Vol. 120 (2002), 341-
- [2] F. Dohmann, C. Hartl, Tube hydroforming—research and practical application, J. Mater. Process. Technol, 71 (1997), 174–186.
- [3] M. Koc and T. Altan, "Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 42 (2002), 123-138.
- [4] H. Kurokawa and M. Kojima: Proc. 7th ICTP, Yokohama, Japan, (2002), p. 1471
- [5] G.T. Kridli, L. Bao, P.K. Mallick and Y. Tian: J. Mater. Process. Technol. Vol. 133 (2003), p. 287
- [6] M. Loh-Mousavi, K. Mori, K. Hayashi, S. Maki and M. Bakhshi, "3-D finite element simulation of pulsating T-shape hydroforming of tubes", Key Engin. Mater., 340 (2007), 353-358.