



بررسی اثر پارامترهای فرآیندی بر ارتفاع برآمدگی قطعات انشعاب‌دار در هیدروفورمینگ لوله

سیدجلال هاشمی^{۱*}، فرزاد رحمنی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: J_hashemi@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۵ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

فرآیند هیدروفورمینگ

شبیه‌سازی اجزای محدود

انشعاب

نازک‌شدگی

ارتفاع برآمدگی

در هیدروفورمینگ لوله، با اعمال فشار داخلی توسط یک سیال مانند آب یا روغن، انبساط در لوله ایجاد شده و سطح خارجی لوله بر دیواره‌های داخلی قالب منطبق می‌شود. در این مقاله، استفاده از فرآیند هیدروفورمینگ در ساخت یک اتصال انشعاب‌دار با دو شاخه بر لوله‌هایی از جنس مس مورد بررسی قرار گرفته است. از این نوع اتصالات در خطوط انتقال سیالات مختلف استفاده می‌شود. اثر چهار پارامتر مهم فرآیندی بر کیفیت محصول شکل داده شده و شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. با توجه به شکل پیچیده محصول مورد نظر، تأثیر چهار پارامتر تغذیه اولیه، تغذیه نهایی، فشار تسلیم و فشار ترکیدگی بررسی شده و اثر این پارامترها بر ارتفاع انشعاب‌های شکل داده شده و حداکثر نازک‌شدگی تعیین شده است. نتایج نشان داد که با انتخاب مناسب پارامترهای فرآیندی می‌توان در یک مرحله شکل‌دهی به یک محصول با دو انشعاب با کیفیت مناسب دست پیدا کرد. مهم‌ترین پارامتر اثرگذار بر ارتفاع انشعاب شکل داده شده تغذیه نهایی می‌باشد که با افزایش آن ارتفاع بیشتر شده است. از طرف دیگر مهم‌ترین پارامتر اثرگذار بر نازک‌شدگی فشار ترکیدگی بوده است. تغذیه اولیه کمترین اثر را بر روی نازک‌شدگی و ارتفاع انشعاب شکل داده شده داشته است.

Investigation of Effect of Process Parameters on Protrusion Height of Branched Parts in Tube Hydroforming

Seyed Jalal Hashemi^{1*}, Farzad Rahmani²

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

* Corresponding Author's Email: J_hashemi@tvu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 14 October 2023

Accepted: 6 November 2023

Keywords:

Hydroforming Process

Finite element Simulation

Branch

Thinning

Protrusion Height

Abstract

In tube hydroforming, by applying internal pressure using a fluid such as water or oil, bulging is created in the tube and the tube conforms to the inner walls of the die. In this paper, using hydroforming process in manufacturing of a branched joint with two branches on copper tubes has been investigated. This type of joint is used in various fluid transmission lines. Simulation of the forming process has been done in Abaqus finite element software. The effect of four important process parameters on the quality of the formed product has been studied. Considering the complex shape of the desired product, effect of four parameters of initial feeding, final feeding, yielding pressure and bursting pressure have been investigated and the effect of these parameters on the height of the formed branches and the maximum thinning has been determined. The results showed that with the appropriate selection of process parameters, a product with two branches with good quality can be obtained in one forming step. The most effective parameter on the height of the formed branch is the final feeding, so that increasing final feeding leads to more height of formed branches. On the other hand, bursting pressure has the most important parameter affecting the thinning. The initial feeding has the least effect on the thinning and the height of the formed branch.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Hashemi SJ, Rahmani F. Investigation of effect of process parameters on protrusion height of branched parts in tube hydroforming. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 March 21;10(1):38-48. doi: 10.22034/IJME.2023.420524.1858 [In Persian]

۱- مقدمه

صنعت خودروسازی با مشکلات عظیمی در زمینه مصرف سوخت و خوردگی قطعات روبرو می‌باشد. علاوه بر این مقدار انرژی مصرفی در زمان ساخت وسیله نقلیه نیز باید در نظر گرفته شود. این چالش‌ها بوسیله انتظارات مصرف‌کننده برای وسایل نقلیه تجاری و هم‌چنین خودروهای راحت‌تر و ایمن‌تر شدت بیشتری می‌یابد.

به منظور افزایش مقاومت در برابر خوردگی می‌توان در خودرو از فولادهای مقاوم استفاده کرد ولی باید ملاحظات مصرف سوخت را نیز در نظر گرفت. یک ساختار سبک‌تر برای خودرو می‌تواند مصرف انرژی را به شدت کاهش دهد. برای رسیدن به این هدف، گستره وسیعی از مواد معرفی و ساخته شده‌اند. شکل ۱، یک خودرو پیشرفته ساخته شده با ترکیب انواع مواد را نشان می‌دهد. بیشتر این مواد نیاز به روش‌های جدید شکل‌دهی دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطعات به کار رفته در بدنه و شاسی خودرو حالت توخالی داشته و هم‌چنین دارای جداره نازکی می‌باشند. برای تولید این قطعات می‌توان از فرآیند هیدروفرمینگ لوله استفاده کرد. امروزه بسیاری از قطعات خودرو مانند مانیفولد گاز و قطعات شاسی را با فرآیند هیدروفرمینگ تولید می‌کنند [۱].



شکل ۱ مواد به کار رفته در بدنه یک خودروی مدرن [۲]

هیدروفرمینگ لوله دارای پیشینه تقریباً صد ساله می‌باشد ولی کاربرد آن در صنعت خودروسازی از حدود دو دهه پیش آغاز شده است [۳]. کاربردهای این روش شکل‌دهی شامل ساخت قطعات لوله‌ای شکل به کار رفته در موتور و سیستم‌های خروج گاز می‌باشد. علاوه بر این، تعداد زیادی از قطعات شاسی و بدنه مانند قطعات در و کاپوت نیز با هیدروفرمینگ تولید شده‌اند. مزیت اصلی این فرآیند بالا بردن نسبت استحکام به وزن ساختار خودرو می‌باشد. از مزیت‌های دیگر فرآیند می‌توان به هزینه‌ی کمتر تجهیزات، عملیات‌های اضافی کمتر پس از تولید، دقت ابعادی بالاتر و برگشت فنی کمتر و هم‌چنین کاهش دور ریز اشاره کرد [۴-۵].

بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ میلادی، دیتمن، فاوپل [۶-۷] بررسی‌های عددی و تجربی را به منظور بدست آوردن فشار پارگی در سیلندرهای جدار ضخیم انجام دادند. استفاده از فشار هیدرواستاتیک در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات برای بالچ قطعات لوله‌ای شکل اولین بار توسط فوخرس [۸] گزارش شد. در سال ۱۹۷۰ میلادی، تحقیق بر روی جنبه‌های نظری و تجربی شکل‌دهی بالچی بوسیله محققین زیادی ادامه پیدا کرد. مواد و شکل‌های جدید و ابزارهای مختلف شکل‌دهی مطرح شد ولی اساس کار تغییر نکرد. برای مثال بجای پلی‌یورتان از لاستیک و الاستومر برای ایجاد فشار استفاده شد که تحقیق الکورشی [۹] از این جمله است. ساور و همکارانش [۱۰] در سال ۱۹۷۸ براساس نتایج تجربی و نظری خود یک معیار برای پارگی ارائه کردند. فوشیزاوا [۱۱] شکل‌دهی بالچی سیلندرهای جدار نازک با طول محدود را با نظری پلاسیسیته افزایشی مورد بررسی قرار داد. او تأثیر ضریب سخت‌شوندگی را بر روی محدودیت ارتفاع بالچ نشان داد. هشیمی و همکارانش [۱۲] بالچ قطعات محوری-مقارن و غیر مقارن را بصورت نظری، تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند. اسنافی [۱۳] در سال ۱۹۹۹ فرآیند هیدروفرمینگ لوله را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داد و روابطی برای رفتار تغییر شکل ماده حین فرآیند براساس جنس ماده، شکل قالب و منحنی بارگذاری بدست آورد. سیدکاشی همکارانش [۱۴] از روش بهینه‌سازی بازپخت برای تعیین منحنی بارگذاری در هیدروفرمینگ لوله‌های آلومینیومی استفاده کردند. هاشمی و همکارانش [۱۵] منحنی حد تنش را برای لوله‌ها براساس مدل مارسینیاک-کوچینزکی توسعه دادند. آن‌ها از این منحنی برای بدست‌آوردن منحنی بارگذاری مناسب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله استفاده کردند. لیوالد و همکارانش افزایش شکل‌پذیری لوله را با آنیل کردن مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه هیدروفرمینگ گرم لوله‌های منیزیمی با آلیاژ AZ31 و ZM21 انجام شده است.

ابتدا برای تعیین بهترین محدوده دمایی و زمانی آنیل آزمایش کشش بر روی نمونه‌های آنیل شده صورت گرفت. برای آلیاژ AZ31 نسبت بالچ ۳۸٪ در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد بدست می‌آید. این نسبت بالچ را می‌توان با انجام دو مرحله‌ای فرآیند به ۶۵٪ افزایش داد. به این صورت که ابتدا لوله تا ۱۵٪ بالچ شود و سپس در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶ ساعت آنیل شود [۱۷-۱۸].

در پژوهش‌هایی که توسط هی و همکارانش [۱۹] و همچنین لین و همکارانش [۲۰] صورت گرفت، از آزمایش‌های کشش محیطی با رینگ، هیدروبالچ و صاف‌کردن برای تشخیص شکل‌پذیری لوله‌های منیزی در دماهای متفاوت استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر مقدار شکل‌پذیری در راستای محیطی روندی متفاوت نسبت به راستای محوری دارد. نتایج نشان داد با افزایش دما تا ۱۷۰ درجه سانتیگراد نسبت بالچ به ۳۰٪ می‌رسد ولی بعد از این دما روند کاهش در میزان شکل‌پذیری مشاهده می‌شود که این روند از دمای اتاق تا دمای ۲۳۰ درجه سانتیگراد مشابه نتایج آزمایش رینگ می‌باشد. فشار ترکیدگی با افزایش دما به سرعت کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد فشار کمتری برای تغییر شکل در دماهای بالاتر مورد نیاز می‌باشد. کدخدائیان و عرفانی مقدم [۲۱] از شبیه‌سازی عددی و روش بهینه‌سازی بازبخت شبیه‌سازی شده برای تعیین منحنی بارگذاری بهینه در هیدروفورمینگ قطعات چهاراهی استفاده کردند. لیو و همکارانش [۲۲] پدیده چروکیدگی دیواره را در هیدروفورمینگ قطعات سه راهی مورد بررسی قرار داده و نشان دادن افزایش نسبت قطر لوله اولیه به ضخامت آن می‌تواند احتمال چروکیدگی را بالا ببرد. کوی و یوان [۲۳] هیدروفورمینگ مقطع سه راهی را در چند مرحله انجام داد و در بین مراحل برای افزایش شکل‌پذیری لوله از فرآیند آنیل استفاده کردند.

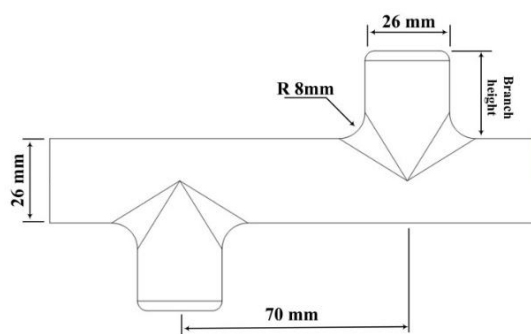
پیش‌بینی تغییر شکل در یک فرآیند شکل‌دهی ورق بسیار مشکل می‌باشد. بسیاری از پارامترها مانند غیرخطی بودن خواص ماده، تأثیر اصطکاک در سطح تماس قطعه و قالب باید در محاسبات در نظر گرفته شوند. روش تحلیلی می‌تواند برای فرآیندهای شکل‌دهی ساده و متقارن به کار رود. برای محاسبه واقعی تغییر شکل در یک فرآیند، روش‌های عددی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. امروزه، یکی از بهترین روش‌های عددی روش اجزای محدود می‌باشد. با پیشرفت‌های اخیر در زمینه کامپیوتر و نرم‌افزار، فرآیند شبیه‌سازی شده و از تعداد آزمون و خطاها و هزینه انجام آزمایش‌های تجربی کاسته می‌شود.

در این مقاله به منظور دستیابی به شکل‌دهی یک اتصال دو شاخه با حداکثر ارتفاع برآمدگی و کمترین نازک‌شدگی ایجاد شده در لوله از روش اجزای محدود استفاده شد. با توجه به این که دستیابی به این مقادیر به صورت تحلیلی مشکل بوده از روش اجزای محدود استفاده شده و تأثیر پارامترهای مهم فرآیندی بر توزیع ضخامت و ارتفاع برآمدگی با استفاده از طراحی آزمایش مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

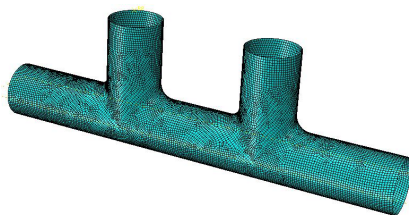
لوله‌های مسی مورد بررسی در این مقاله از آلیاژ C11000 بدون انجام هیچ‌گونه عملیات حرارتی می‌باشند. قطر خارجی اولیه لوله‌ها ۲۶ میلی‌متر و ضخامت اولیه دیواره آن ۰/۸ میلی‌متر است.

شکل ۲ ابعاد انشعاب شاخه‌دار مورد نظر در این مقاله را نمایش می‌دهد. ارتفاع شاخه‌ها یکی از خروجی‌های شبیه‌سازی با توجه به پارامترهای فرآیند شکل‌دهی می‌باشد. به دلیل معکوس بودن جهت انشعاب‌ها، شکل‌دهی این قطعه دارای پیچیدگی‌هایی نظیر چروکیدگی لبه‌ها و دیواره‌ی مرکزی می‌باشد. قطر انشعاب‌ها برابر با قطر اولیه‌ی لوله در نظر گرفته شده است. طول کلی این قطعه با توجه به مقدار تغذیه محوری به کار رفته در شبیه‌سازی متغیر خواهد بود.

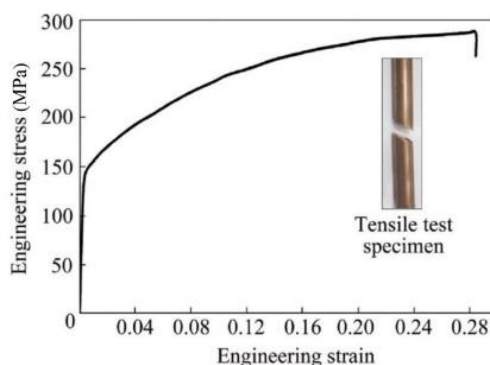


شکل ۲ شماتیک اتصال انشعاب‌دار

به منظور کاهش زمان تحلیل، از شبیه‌سازی سنبه‌های تغذیه محوری صرف نظر شده است. قالب به صورت یک جسم صلب گسسته، مدل شده است. شکل ۳ قالب شبیه‌سازی شده به صورت مش‌بندی را نمایش می‌دهد. تعداد ۲۱۹۳۷ المان نوع R3D4 برای مش‌بندی قالب استفاده شده است. المان S4R که یکی از المان‌های چندمنظوره است برای مدل‌سازی ورق انتخاب شد. این المان دارای چهار گره بوده و از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده می‌کند. انتگرال‌گیری در جهت ضخامت به کمک روش سیمپسون و با پنج نقطه انتگرال‌گیری انجام شد. ۷۰۴۹ المان چهارگره‌ای نوع S4R با یک نقطه انتگرال‌گیری روی سطح لوله ایجاد شد. منحنی تنش- کرنش حقیقی ماده بر طبق نتایج آزمایش کشش تعریف شد. منحنی تنش-کرنش مهندسی ماده که طبق استاندارد ASTM-E8M به دست آمده، در شکل ۴ نشان داده شده است.

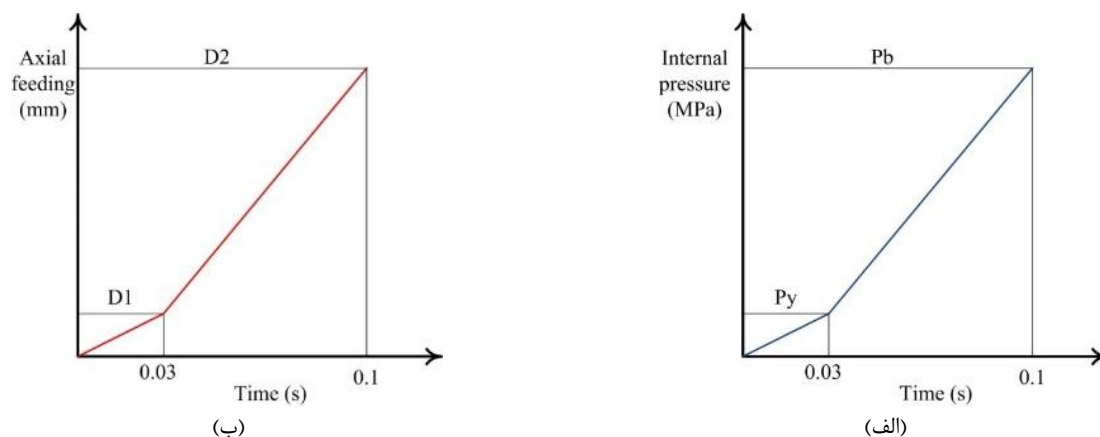


شکل ۳ مش‌بندی قالب



شکل ۴ منحنی تنش-کرنش مهندسی لوله مسی

مهمترین پارامتر در راستای تولید قطعه هیدروفرمینگ با حداقل عیوب شامل چروکیدگی و ترکیدگی منحنی بارگذاری می‌باشد. اعمال فشار داخلی بیش از حد و بدون تغذیه محوری منجر به نازک شدن دیواره لوله و در نهایت ترکیدگی خواهد شد و از طرف دیگر اگر تغذیه محوری بیش از حد در نبود فشار داخلی کافی به لوله اعمال شود در اثر تنش‌های فشاری چروکیدگی رخ خواهد داد. با توجه به شکل نهایی قطعه مورد در این مقاله، منحنی‌های بارگذاری مطابق با شکل ۵ مورد استفاده قرار گرفته است. در این منحنی‌ها فشار تسلیم (P_y) برابر با مقدار فشاری است که باعث شروع تغییر شکل پلاستیک در لوله می‌شود. فشار ترکیدگی (P_b) برابر با مقدار فشاری می‌باشد که بدون اعمال تغذیه محوری باعث ایجاد پارگی در لوله خواهد شد. $D1$ مقدار تغذیه محوری تا لحظه شروع تغییر شکل پلاستیک در لوله و $D2$ مقدار تغذیه محوری نهایی خواهد بود که از دو طرف به لوله اعمال خواهد شد. در صورت تعیین صحیح این چهار پارامتر می‌توان به بالاترین ارتفاع در شاخه‌های منشعب از لوله و کمترین نازک‌شدگی دست یافت. مقدار اولیه فشار تسلیم و فشار ترکیدگی براساس نتایج شبیه‌سازی تعیین شده است.



شکل ۵ الف) منحنی فشار داخلی، ب) منحنی تغذیه محوری

در راستای انتخاب مطلوب این چهار پارامتر و رسیدن به یک مقدار بهینه از طراحی آزمایش استفاده شده است تا علاوه بر بهینه کردن این پارامترها، اثر هر کدام از آن‌ها بر ارتفاع برآمدگی در انشعاب‌ها و حداکثر نازک‌شدگی ایجاد شده مشخص گردد. در این مقاله از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ با نقطه مرکزی بهره گرفته شده است. این روش می‌تواند تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای دستیابی به اثر پارامترها را به شدت کاهش دهد. برای هر کدام از پارامترهای مؤثر معرفی شده پنج سطح در نظر گرفته شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر حداقل و حداقل سطوح از شبیه‌سازی‌های اولیه بدست آمده است به صورتی که لوله دچار چروکیدگی یا ترکیدگی در زمان انجام فرآیند نشود. بعد از طراحی آزمایش در نرم‌افزار مینی‌تب با در نظر گرفتن یک نقطه مرکزی تعداد ۲۵ آزمایش پیشنهاد شد که طبق اعداد بدست آمده از طراحی نرم‌افزار مینی‌تب شبیه‌سازی‌ها انجام شد و پس از شکل‌دهی لوله در هر حالت ارتفاع برآمدگی و نازک‌شدگی محاسبه شد. به دلیل استفاده از شبیه‌سازی و یکی‌شدن نتایج، فقط یک نقطه‌ی مرکزی در نظر گرفته شده است.

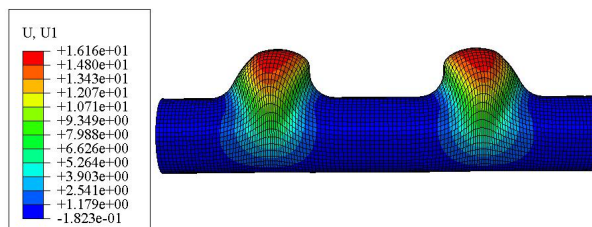
جدول ۱ سطوح پارامترهای طراحی آزمایش

پارامتر	واحد	سطح اول	سطح دوم	سطح میانی	سطح چهارم	سطح پنجم
فشار تسلیم	MPa	۶	۷	۸	۹	۱۰
فشار ترکیدگی	MPa	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
تغذیه اولیه (D1)	mm	۶	۷	۸	۹	۱۰
تغذیه نهایی (D2)	mm	۳۲	۳۴	۳۶	۳۸	۴۰

در این مقاله به علت بالابودن هزینه‌های ساخت قالب و تجهیزات هیدرولیکی مورد نیاز برای انجام فرآیند هیدروفرمینگ از انجام آزمایش‌ها به صورت تجربی صرف نظر شده است. نتایج شبیه‌سازی می‌تواند به کم‌کردن هزینه‌های آزمون و خطا برای دستیابی به بهترین شکل‌دهی کمک شایانی کند؛ اما دقت نتایج شبیه‌سازی باید با مقایسه‌شدن با نتایج تجربی مشخص شود. از این‌رو در این مقاله برای مشخص شدن صحت نتایج شبیه‌سازی، ابتدا یک حالت مشابه پژوهش‌های پیشین مقایسه با حالت تجربی انجام شده و پس از اطمینان از دقت نتایج، حالت‌های جدید بررسی شده است. حالت مقایسه انجام شده برای صحت‌سنجی نتایج عددی، شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله انشعاب‌دار با دو شاخه موازی بوده است که در شکل ۶ با نتایج تجربی مقاله [۲۴] در کنار هم دیگر قرار گرفته‌اند. ارتفاع برآمدگی گزارش شده در حالت تجربی ۱۶/۸ میلی‌متر بوده که در شبیه‌سازی انجام شده برای این مقاله ۱۶/۱۶ به دست آمده است که اختلاف حدود ۳/۸ درصدی را نشان می‌دهد. پس با توجه این مقایسه می‌توان به صحت نتایج شبیه‌سازی اطمینان حاصل کرد.



(الف)



(ب)

شکل ۶ صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی (الف) نتیجه تجربی [۲۴]، (ب) شبیه‌سازی

۳- نتایج و بحث

با توجه به طراحی آزمایش شرح داده شده در بخش روش تحقیق، ۲۵ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بعد از انجام شبیه‌سازی‌ها حداکثر نازک‌شدگی قطعه و حداکثر ارتفاع انشعاب محاسبه شد که در جدول ۲ نشان داده شده است. در همه حالت‌های شبیه‌سازی شده حداکثر نازک‌شدگی در قله برآمدگی‌ها ایجاد شده است. افزایش تغذیه محوری به افزایش ارتفاع برآمدگی و کم شدن نازک‌شدگی کمک شایانی کرده است. حداکثر ارتفاع برآمدگی برابر با ۲۲/۹۲ میلی‌متر در حالت آزمایشی شماره ۲۵ ایجاد شده است. حداکثر نازک‌شدگی نیز در حالت آزمایشی شماره ۴ با مقدار ۱۳/۷۷٪ رخ داده است. در این حالت آزمایشی مقدار تغذیه‌ی نهایی در کمترین مقدار خود یعنی ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده بوده است.

جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده براساس طراحی آزمایش

شماره آزمایش	Py (MPa)	Pb (MPa)	D1 (mm)	D2 (mm)	نازک‌شدگی (%)	ارتفاع (mm)
۱	۷	۲۷	۷	۳۸	۹/۷۷	۲۱/۲۸
۲	۷	۲۹	۹	۳۴	۱۳/۲	۱۹/۵۵
۳	۷	۲۷	۹	۳۸	۹/۸۳	۲۱/۵۱
۳	۸	۳۰	۸	۳۶	۱۳/۷۷	۲۱/۴۵
۵	۷	۲۹	۷	۳۸	۱۱/۷۶	۲۲/۰۷
۶	۶	۲۸	۸	۳۶	۱۱/۴۲	۲۰/۲۱
۷	۹	۲۹	۹	۳۴	۱۳/۰۴	۲۰/۱۳
۸	۷	۲۹	۹	۳۸	۱۱/۸۶	۲۱/۵۹
۹	۹	۲۷	۹	۳۴	۱۰/۷۲	۱۹/۵۳
۱۰	۸	۲۸	۱۰	۳۶	۱۱/۳۷	۲۰/۳۲
۱۱	۸	۲۶	۸	۳۶	۹/۳۹	۲۰/۲۵

سید جلال هاشمی و فرزاد رحمنی			بررسی اثر پارامترهای فرآیندی بر ارتفاع برآمدگی قطعات انشعاب‌دار در هیدروفرمینگ لوله			
۱۲	۹	۲۹	۷	۳۴	۱۳/۲۲	۲۰/۶۴
۱۳	۸	۲۸	۶	۳۶	۱۱/۲۱	۲۱/۲۵
۱۴	۱۰	۲۸	۸	۳۶	۱۱/۳۱	۲۱/۸۹
۱۵	۷	۲۷	۹	۳۴	۱۱/۱	۱۹/۰۵
۱۶	۷	۲۹	۷	۳۴	۱۳/۰۴	۲۰/۰۴
۱۷	۹	۲۷	۷	۳۸	۹/۷	۲۲/۰۵
۱۸	۸	۲۸	۸	۳۲	۱۲/۵	۱۸/۷۷
۱۹	۹	۲۹	۷	۳۸	۱۱/۸۵	۲۲/۷۴
۲۰	۹	۲۹	۹	۳۸	۱۱/۷۷	۲۲/۲۲
۲۱	۸	۲۸	۸	۴۰	۱۰/۱۷	۲۲/۹۲
۲۲	۹	۲۷	۹	۳۸	۹/۷۴	۲۱/۶۴
۲۳	۹	۲۷	۷	۳۴	۱۱/۲	۲۰
۲۴	۸	۲۸	۸	۳۶	۱۱/۲۲	۲۰/۷۹
۲۵	۷	۲۷	۷	۳۴	۱۰/۸۱	۱۹/۴۳

جدول ۳ خلاصه تحلیل آماری پارامترهای تأثیرگذار بر ارتفاع برآمدگی انشعاب را نمایش می‌دهد. با توجه به مدل برازش بدست آمده از نرم‌افزار، تغذیه‌ی محوری نهایی بیشترین اثر را بر ارتفاع داشته است. اثر دیگر پارامترها بر ارتفاع برآمدگی خیلی کمتر از تغذیه محوری نهایی می‌باشد. هیچ اثر متقابل معنی‌دار بر ارتفاع بین پارامترها وجود نداشته است. مدل توسعه یافته برای ارتفاع برآمدگی در معادله ۱ مشاهده می‌شود. مقدار ضریب تعیین مدل بالا و برابر با ۹۸/۷۴٪ بوده است که دقت مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۳ اثر پارامترها بر ارتفاع برآمدگی

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	مقدار F	p-value Prob > F	
مدل	۳۱/۸۶۷۷۲	۴	۷/۹۶۶۹۲۹	۳۹۰/۶۶۲۸	۰/۰۰۰۱<	معنی‌دار
Py	۲/۴۰۰۳۳۸	۱	۲/۴۰۰۳۳۸	۱۱۷/۷۰۱۹	۰/۰۰۰۱<	
Pb	۱/۸۶۴۸۳۸	۱	۱/۸۶۴۸۳۸	۹۱/۴۴۳۳۴	۰/۰۰۰۱<	
D1	۱/۰۷۹۵۰۴	۱	۱/۰۷۹۵۰۴	۵۲/۹۳۴۰۸	۰/۰۰۰۱<	
D2	۲۶/۵۲۳۰۴	۱	۲۶/۵۲۳۰۴	۱۳۰۰/۵۷۲	۰/۰۰۰۱<	

$$Height = -6.70003 + 0.31625 \times Py + 0.28785 \times Pb - 0.21208 \times D1 + 0.52563 \times D2 \quad (1)$$

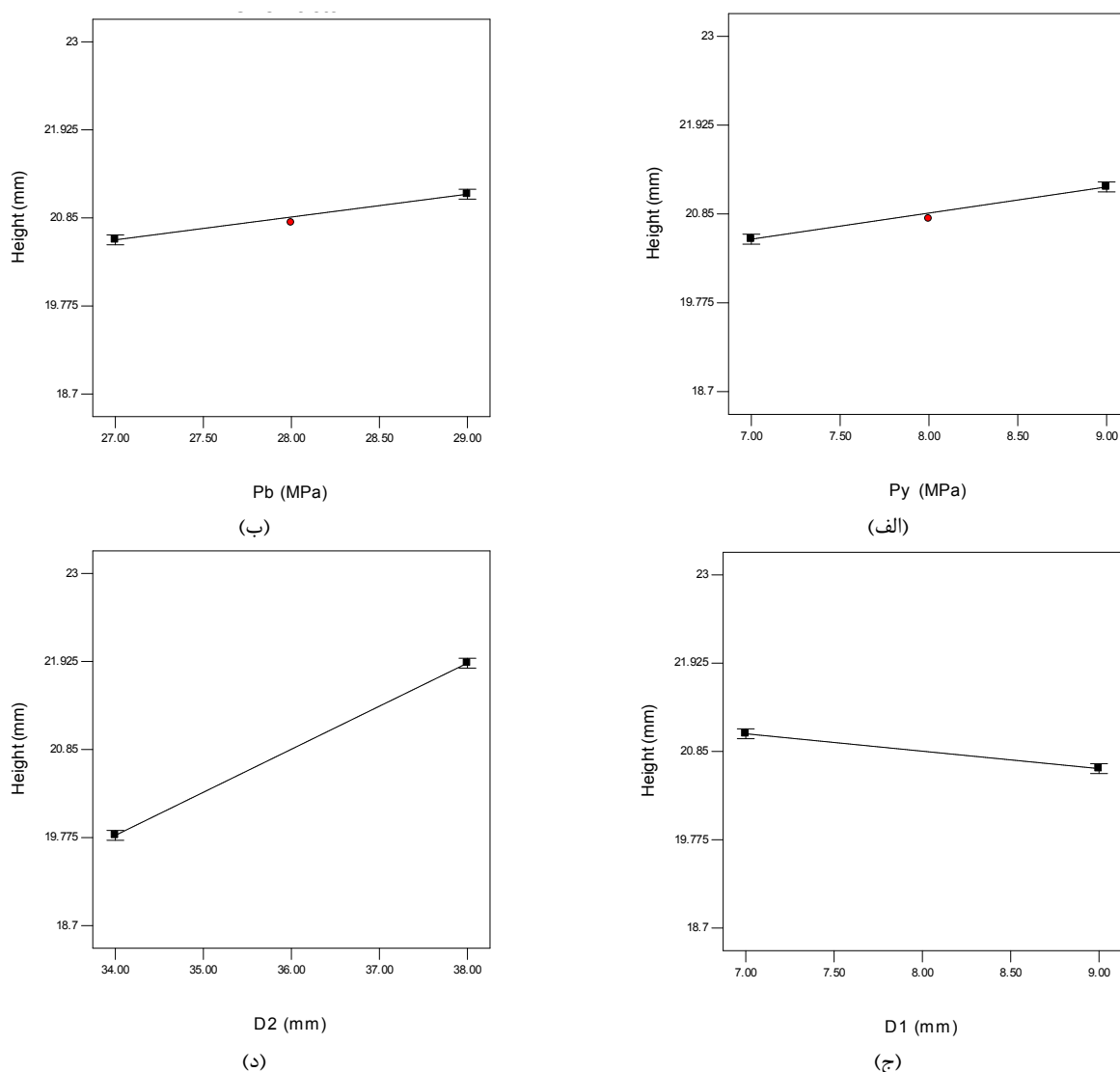
اثر پارامترهای فشار تسلیم، فشار ترکیب‌گی، تغذیه‌ی اولیه و تغذیه‌ی نهایی بر ارتفاع برآمدگی شکل داده شده به ترتیب در شکل ۷ الف تا شکل ۷ د نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها، با افزایش فشار تسلیم مقدار ارتفاع برآمدگی بیشتر شده است. در واقع با

بیشتر شدن این فشار، ابتدا یک برآمدگی کوچک اولیه قبل از وارد شدن تغذیه‌ی نهایی در محل انشعاب‌ها ایجاد می‌شود که به جریان راحت‌تر ماده به محل انشعاب‌ها کمک کرده و در نهایت ارتفاع آن را بالاتر می‌برد.

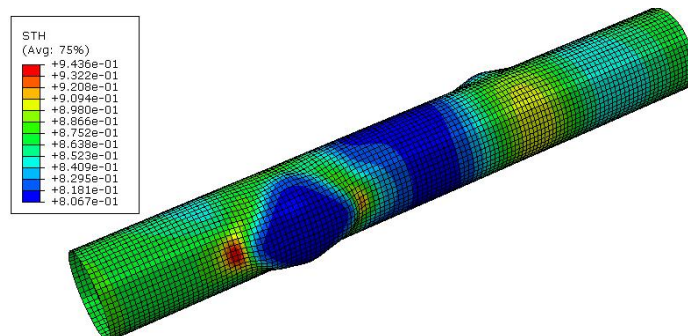
افزایش فشار نهایی باعث بیشتر شدن تنش اعمالی کششی در محل برآمدگی شده و باعث بالج بیشتر در این نقاط می‌شود البته این موضوع به نازک شدگی بیشتر قله برآمدگی نیز منجر خواهد شد. با توجه به شکل‌ها می‌توان گفت که اثر فشار تسلیم بر ارتفاع بیشتر از اثر فشار نهایی بوده است.

همان‌طور که در شکل ۷ ج مشاهده می‌شود با افزایش تغذیه اولیه مقدار ارتفاع کاهش یافته است. در واقع زیاد بودن تغذیه اولیه در زمانی که فشار کافی برای انبساط لوله وجود ندارد باعث افزایش ضخامت لوله در محل شکل‌دهی شده و در نتیجه انبساط آن مشکل‌تر خواهد شد. شکل ۸ نمونه‌ای از این حالت را نمایش می‌دهد که در اثر وارد شدن تغذیه‌ی اولیه ۹ میلی‌متر افزایش ضخامت شدید در محل ورود لوله به انشعاب ایجاد شده که باعث ناهمگن شدن توزیع ضخامت و سخت شدن فرآیند شکل‌دهی می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد تغذیه‌ی نهایی بیشترین اثر را بر ارتفاع برآمدگی انشعاب دارد. با توجه به شکل ۷ د با افزایش تغذیه‌ی نهایی، ارتفاع برآمدگی‌ها نیز بیشتر شده است. به دلیل اینکه این تغذیه به همراه فشار حداکثری به دو انتهای لوله وارد می‌شود باعث جریان لوله به داخل انشعاب‌ها شده و از نازک شدگی و ترکیدگی محصول جلوگیری می‌کند.

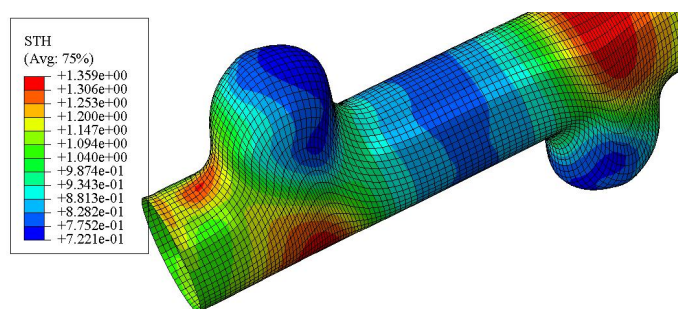


شکل ۷ تأثیر پارامترهای فرآیندی بر ارتفاع برآمدگی



شکل ۸ توزیع ضخامت بعد از اعمال تغذیه اولیه ۹ میلی‌متری

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود کمترین ضخامت محصول در قله برآمدگی انشعاب‌ها ایجاد می‌شود. این موضوع به مقدار پارامترهای فرآیندی ارتباطی نداشته در تمامی حالت‌ها یکسان است. با توجه به مقادیر بدست آمده مدلی برای محاسبه حداکثر نازک شدگی توسعه داده شد که در معادله ۲ آورده شده است. جدول ۴ نتیجه تحلیل آماری نتایج برای نازک شدگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج نشان داده شده، فشار تسلیم و تغذیه اولیه اثر معنی داری بر مقدار نازک شدگی نداشته‌اند. بیشترین اثر بر نازک شدگی مربوط فشار ترکیب می‌باشد. کمترین اثر را نیز تغذیه اولیه به خود اختصاص داده است.



شکل ۹ حداکثر نازک‌شدگی در قله برآمدگی

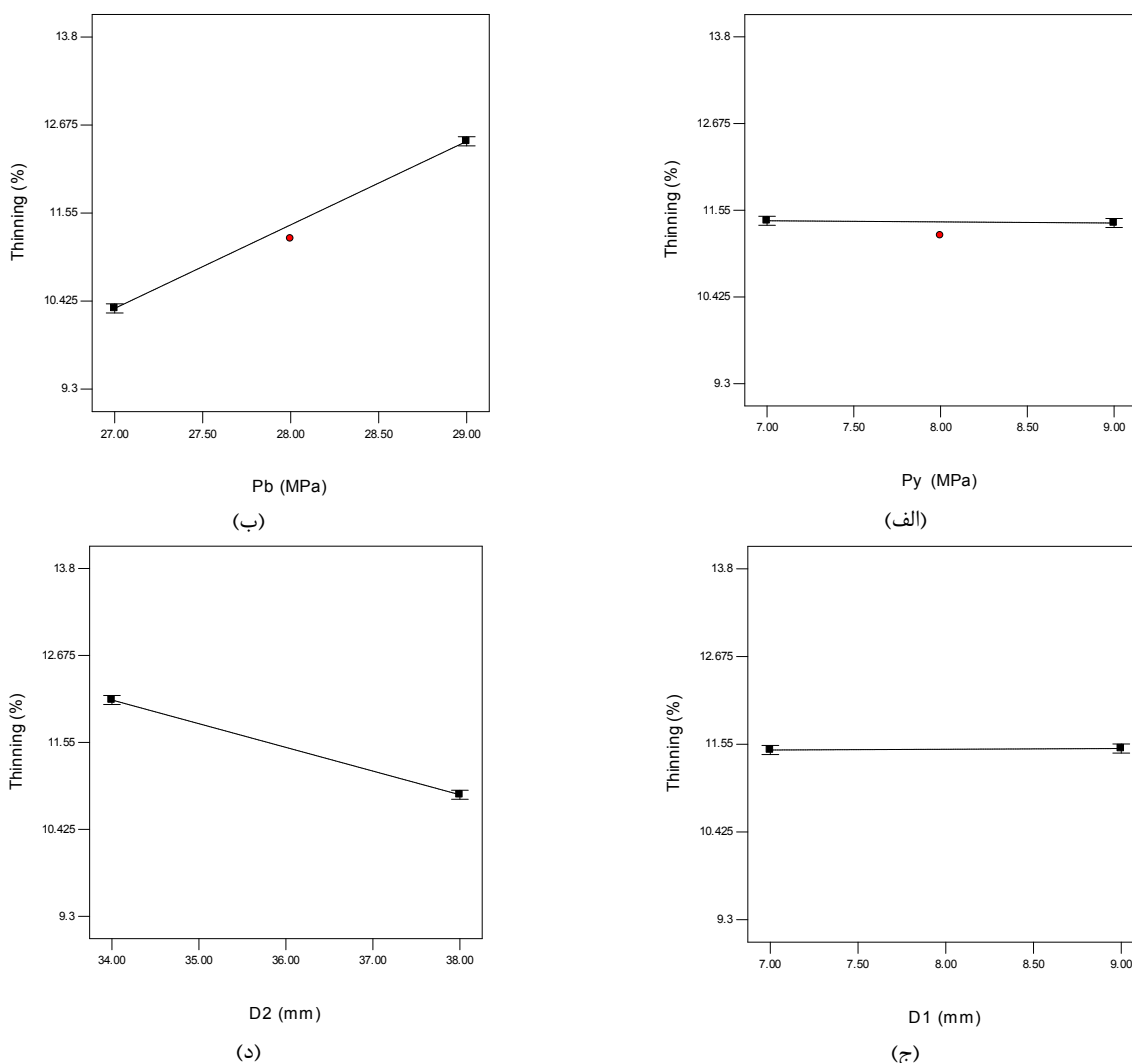
$$\text{Thinning} = -7.4307 - 0.14583 \times P_y + 1.06792 \times P_b + 9.5833 \times 10^{-3} * D_1 - 0.30464 \times D_2 \quad (2)$$

جدول ۴ اثر پارامترها بر حداکثر نازک‌شدگی

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	مقدار F	p-value Prob > F	معنی‌دار
مدل	۳۶/۳۹۴۰۲	۴	۹/۰۹۸۵۰۴	۴۷۴/۰۶۸۹	۰/۰۰۰۱<	
P _y	۰/۰۰۵۱۰۴	۱	۰/۰۰۵۱۰۴	۰/۲۶۵۹۴۸	۰/۶۱۱۷	
P _b	۲۷/۳۷۰۷	۱	۲۳/۳۷۰۷	۱۴۲۶/۱۲۴	۰/۰۰۰۱<	
D ₁	۰/۰۰۲۲۰۴	۱	۰/۰۰۲۲۰۴	۰/۱۱۴۸۴۶	۰/۷۳۸۲	
D ₂	۹/۰۱۶۰۰۴	۱	۹/۰۱۶۰۰۴	۴۶۹/۷۷۰۳	۰/۰۰۰۱<	

اثر پارامترهای فشار تسلیم، فشار ترکیب، تغذیه‌ی اولیه و تغذیه‌ی نهایی بر ارتفاع برآمدگی شکل داده شده به ترتیب در شکل ۱۰ الف تا شکل ۱۰ د نشان داده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد و در این شکل‌ها نیز مشاهده می‌شود فشار تسلیم و تغذیه‌ی اولیه اثر چندانی بر حداکثر نازک شدگی ندارند. در واقع این دو پارامتر مربوط به مرحله‌ی اول منحنی بارگذاری می‌شوند که روی ضخامت قله برآمدگی انبساط اثری ندارند.

اما با افزایش فشار ترکیدگی حداکثر نازک شدگی به شدت بالا رفته است. در واقع این فشار باعث افزایش تنش کششی زیاد در برآمدگی شده و علاوه بر بالابردن ارتفاع آن ضخامت آن را کاهش می‌دهد. در این حال اگر تغذیه‌ی نهایی زیادتر باشد می‌تواند به جلوگیری از کاهش ضخامت در قله‌ی برآمدگی کمک کند که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰ تأثیر پارامترهای فرآیندی بر ارتفاع برآمدگی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله شکل‌دهی یک اتصال انشعاب‌دار بوسیله فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثر پارامترها بر خروجی، از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. هدف نهایی، تولید یک انشعاب با حداکثر ارتفاع برآمدگی و کمترین نازک شدگی بوده است. دو معادله برای پیش‌بینی مقدار نازک شدگی و ارتفاع برآمدگی از نتایج طراحی آزمایش حاصل شد. نتایج مهم این مقاله عبارتند از:

- مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر حداکثر نازک شدگی، فشار ترکیدگی می‌باشد. با افزایش فشار ترکیدگی نهایی مقدار نازک شدگی به شدت افزایش می‌یابد. با افزایش این فشار از ۲۷ به ۲۹ مگاپاسکال مقدار نازک شدگی حدود ۲۰٪ افزایش می‌یابد.
- فشار تسلیم و تغذیه‌ی اولیه اثر چندانی بر مقدار نازک شدگی ندارند.
- تغذیه‌ی نهایی بیشترین اثر را بر ارتفاع برآمدگی شکل داده شده دارد. به طوری که با افزایش این تغذیه از ۳۴ به ۳۸ میلی‌متر، ارتفاع حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.
- با افزایش فشار تسلیم ارتفاع برآمدگی بیشتر می‌شود در حالی که با افزایش تغذیه‌ی اولیه این مقدار کاهش می‌یابد.

References

- [1] Dohmann F, Hartl C. Tube hydroforming—research and practical application. *Journal of Materials Processing Technology*: 1997; 71(1): 174-186. doi: [10.1016/S0924-0136\(97\)00166-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00166-0)
- [2] Korkolis I. Formability and hydroforming of anisotropic aluminum tubes [dissertation]. University of Texas. 2009.
- [3] Lang L, Wang Z, Kang D, Yuan S, Zhang S-H, Danckert J. Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*: 2004; 151 (1-3): 165-77. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2004.04.032](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.032)
- [4] Ahmetoglu M, Sutter K, Li X, Altan T. Tube hydroforming: current research, applications and need for training. *Journal of Materials Processing Technology*: 2000; 98 (2): 224-31. doi: [10.1016/S0924-0136\(99\)00203-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00203-4)
- [5] Ahmetoglu M, Altan T. Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*: 2000; 98 (1): 25-33. doi: [10.1016/S0924-0136\(99\)00302-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00302-7)
- [6] Faupel J H. Yield and bursting characteristics of heavy wall cylinders. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*: 1956; 78(5):1031-1064. doi: [10.1115/1.4013916](https://doi.org/10.1115/1.4013916)
- [7] Dietmann H. The flow behavior of thick-walled cylinders under internal pressure, *Bander Blech Rohre*. 1967; 8 (3): 143-149. [In German]
- [8] Fuchs F J. Hydrostatic pressure its role in metal forming. *Mechanical Engineering*: 1966; 88(4), pp. 34-40.
- [9] Al-Qureshi H A. Comparison between the bulging of thin-walled tubes using rubber forming technique and hydraulic forming process. *Sheet Metal Industries*: 1970; 47: 607-612.
- [10] Sauer W J, Gotera A, Robb F, Huang P. Free bulge forming of tubes under internal pressure and axial compression. in: *Proceedings of the Sixth NAMRC*: 1978: 228-235.
- [11] Fuchizawa S. Influence of strain hardening exponent on the deformation of thin-walled tube of finite length subjected to hydrostatic external pressure. *Advanced Technology of Plasticity*: 1984; 1: 297-302.
- [12] Hashimi M S J, Crampton R. Hydraulic bulge forming of axisymmetric and asymmetric components: comparison of experimental results and theoretical predictions. in: *Proceedings of the International MTDR Conference*: 1985: 541-549.
- [13] Asnafi N. Analytical modelling of tube hydroforming. *Thin-Walled Structures*: 1999; 34: 295-330. doi: [10.1016/S0263-8231\(99\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(99)00018-X)
- [14] Seyedkashi S M H, Moslemi N H, Liaghat Gh, Mosavi M M, Shojaee K, Mirzaali M, Moon Y H. Experimental and numerical investigation of an adaptive simulated annealing technique in optimization of warm tube hydroforming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*: 2012; 226(11): 1869-1879. doi: [10.1177/0954405412459611](https://doi.org/10.1177/0954405412459611)
- [15] Hashemi R, Assempour A, Abad E M K. Implementation of the forming limit stress diagram to obtain suitable load path in tube hydroforming considering M-K model. *Materials & Design*: 2009; 30:3545-53.
- [16] Liewald M. Magnesium Tube Hydroforming. 10th ESAFORM Conference on Material Forming. Zaragoza, Spain 2007.
- [17] Liewald M. Magnesium tube hydroforming. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung*: 2008; 39:4-5. doi: [10.1002/mawe.200800303](https://doi.org/10.1002/mawe.200800303)
- [18] He Z-b, Liu G, Wu J, Yuan S-j, Liang Y-c. Mechanical property and formability of AZ31B extruded tube at elevated temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*: 2008;18: 209-213. doi: [10.1016/S1003-6326\(10\)60204-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60204-X)
- [19] He Z, Yuan S, Liu G, Wu J, Cha W. Formability testing of AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperature. *Journal of Materials Processing Technology*: 2010; 210: 877-884.
- [20] Lin Y-l, He Z-b, Yuan S-j, Wu J. Formability determination of AZ31B tube for IHPF process at elevated temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*: 2011; 21: 851-856. doi: [10.1016/S1003-6326\(11\)60792-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60792-9)
- [21] Kadkhodayan M, Moghadam A E. Optimization of load paths in X-and Y-shaped hydroforming. *International Journal of Material Forming*: 2013; 6: 75-91. doi: [10.1007/s12289-011-1074-3](https://doi.org/10.1007/s12289-011-1074-3)
- [22] Liu G, Peng J, Yuan S, Teng B, Li K. Analysis on critical conditions of sidewall wrinkling for hydroforming of thin-walled Tee-joint. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 2015; 97: 42-49. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2015.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.06.004)
- [23] Cui X L, Yuan S. Analysis of thickness variation and stress state in hydroforming of complex T-shaped tubular part of nickel-based superalloy. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*: 2021; 21: 1-14. doi: [10.1007/s43452-021-00263-x](https://doi.org/10.1007/s43452-021-00263-x)
- [24] Chen M, Xiao X, Tong J, Guo H, Wen J. Optimization of loading path in hydroforming of parallel double branched tube through response surface methodology. *Advances in Engineering Software*: 2018; 115: 429-438. doi: [10.1016/j.advengsoft.2017.11.003](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.11.003)