

بررسی پارامترهای موثر هیدروفرمینگ لوله بر توزیع ضخامت و تنش‌های پسماند لوله‌های T شکل نامساوی به کمک شبیه‌سازی المان محدود

رسول محرمی*

سیدمرتضی نبوی

سروش آقایی

استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

در این مقاله شبیه سازی عددی فرآیند تیوب هیدروفرمینگ سه راهی T شکل نامساوی از جنس فولاد به کمک نرم افزار المان محدود انجام و اثر پارامترهایی نظیر شعاع فیلت، فشار داخلی و ضریب اصطکاک بر روی ضخامت نهایی و توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج این پارامترها بر روی ضخامت و بزرگی تنش های پسماند تاثیر گذار بوده و در حالت حدی تنشهای پسماند در حد ۹۰ درصد تنش تسلیم و کاهش ضخامتی در حد ۴۰ درصد در نمونه ساخته شده مشاهده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در موارد محدودی با نتایج تجربی مقایسه شده که نتایج مدلسازی اجزا محدود با نتایج عملی دارای نزدیکی مناسبی هستند.

واژه های کلیدی: تیوب هیدروفرمینگ، سه راهی T شکل، مدلسازی اجزا محدود، تنش پسماند، توزیع ضخامت.

Investigation on Effect of Tube Hydroforming Parameters on Thickness and Residual Stresses in a T Shaped Tubes by Finite Element Method

R. Moharrami

M. Nabaviee

S. Aghaiee

Faculty of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract

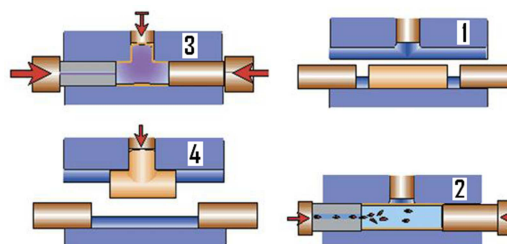
In this paper finite element simulation of hydroforming T shaped tube steel with elastic-plastic non-dependent temperature behavior by the aid of ABAQUS has been done and the effects of some parameters like fillet radius, internal pressure and friction coefficient on thickness distribution and residual stresses have been studied. According to the results, these parameters have tangible effect. In extreme conditions, residual stresses are about to 90 percent of yield strength and thickness has been reduced to 40 percent. After all simulation results have been validated with experimental data and comparison showed good proximity.

Keywords: Hydroforming, Residual stress, Thickness distribution, T shape tubes, Finite element simulation.

از مزایای روش هیدروفرمینگ لوله قابلیت تولید اشکال پیچیده، کاهش تعداد قطعات در سیستم بوسیله حذف اتصالات و تولید قطعات یکپارچه، کاهش وزن قطعات، افزایش صافی سطح و افزایش مقاومت می‌باشد. این فرآیند در صنعت خودرو، هوافضا، کشتی‌سازی و شیرالات بهداشتی اهمیت زیادی پیدا کرده است. هرچند این فرآیند دارای مزیت‌های نسبی زیادی نسبت به روش‌های دیگر شکل دهی می‌باشد ولی در صورت عدم اجرای صحیح فرآیند، قطعه می‌تواند، در معرض عوارضی چون کمانش، ترکیدگی و چروکیدگی، کاهش ضخامت و بروز تنشهای پسماند قرار گیرد [۱]. هرکدام از عوامل اشاره شده به همراه مواردی نظیر شعاع انحنای گوشه‌ها می‌تواند به عنوان معیارهای بررسی کیفیت ساخت مورد توجه باشند. بدلیل اهمیت کاربردی محصولات این فرآیند و نیز در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی طرح، تاثیر پارامترهای فرآیند بر معیارهای کیفی محصول مورد توجه محققان صنعت و دانشگاه بوده است. در این میان بررسی تغییرات ضخامت و نیز توزیع و بزرگی تنش‌های پسماند بعد ساخت به علت تاثیر قابل توجه بر استحکام و عمر قطعه مورد توجه ویژه می‌باشد. به علت پیچیدگی پروسه ساخت و اثرگذاری پارامترهای

۱- مقدمه

اساس فرایند هیدروفرمینگ لوله به عنوان یکی از روش‌های شکل‌دهی، اعمال فشار داخلی به لوله است که درون قالبی به شکل قطعه نهایی قرار دارد. قطعات تولید شده می‌توانند دارای سطح مقطع متغیر در راستای طولی باشند. فشار هیدرولیکی داخلی باعث انبساط لوله و گرفتن شکل قالب شده و در طی این فرآیند، ماده تحت تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ قرار می‌گیرد. شکل (۱) طرحواره مراحل مختلف فرایند هیدروفرمینگ لوله را معرفی می‌کند.



شکل ۱- مراحل مختلف فرایند هیدروفرمینگ لوله

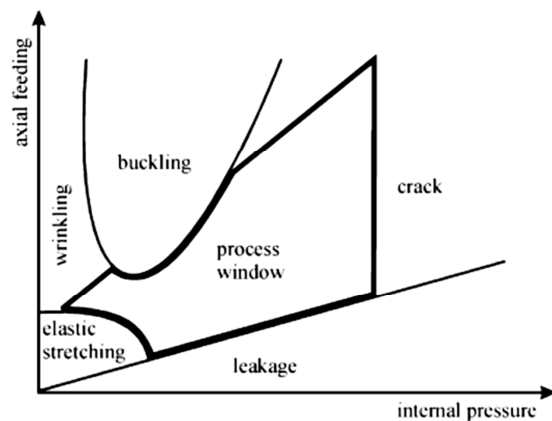
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r_moharrami@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۱۳

متعدد، اغلب پژوهش‌های انجام شده در این حوزه به صورت آنالیز عددی و بررسی‌های تجربی می‌باشد.

در زمینه بررسی تحلیلی فرآیند هیدروفرمینگ لوله T شکل، کوک و آلتان [۲] مدلهایی برای پیشگویی کمانش، چروک خوردگی و ترکیدگی ارائه کرده‌اند. همچنین آنها پارامترهای فرآیند از قبیل نیروی محوری، نیروی مخالف و ضخامت نهایی را به صورت تحلیلی به دست آوردند. لین و وان [۳] توسط نرم‌افزار DEFORM-3D به شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله T شکل پرداخته و پارامترهای شعاع گوشه قالب (فیلت) و فشار داخلی را در این فرآیند مورد بررسی قرار داد. طبق نتایج ایشان برای به دست آوردن محصول قابل قبول، حداقل ضخامت و ارتفاع برآمدگی نباید از حدی کمتر باشند. بنابراین مقادیر ضخامت و ارتفاع برآمدگی به عنوان پارامترهایی برای تشخیص قابل قبول بودن قطعه نهایی مورد استفاده قرار گرفتند. وی با تعیین محدوده قابل قبول فشار داخلی یک نموداری ارائه نمود که در آن محدوده پارامترهایی که منجر به محصول قابل قبول می‌شوند نشان داده شده است. به عنوان مثال طبق شکل ۲ برای داشتن محصول سالم، فشار داخلی و میزان جابجایی بایستی به صورت همزمان کنترل گردند...



شکل ۲- نمودار فرآیند کاری هیدروفرمینگ لوله [۴]

فرآیند تیوب هیدروفرمینگ، گاهی پس از یک فرآیند پیش فرم انجام می‌شود، تا بخشی از تغییر شکل، طی عملیات پیش فرم ایجاد شده و با اعمال فشار داخلی کمتر، تکمیل شکل نهایی به راحتی صورت پذیرد. با انجام عملیات پیش فرم، فشار شکل دهی کاهش یافته و توزیع ضخامت بهتری نیز به دست می‌آید [۵، ۶]. علاوه بر مطالعات فرآیندی، در بیست سال اخیر، تحقیقات زیادی درباره تنش‌های پسماند و همچنین اثر اینگونه تنش‌ها در رفتار قطعات صورت گرفته است. طبق نتایج تنش‌های پسماند تاثیر شدیدی بر رفتار خستگی و خوردگی داشته و منجر به ایجاد و رشد ترک و در نهایت شکست زودرس در قطعه گردد. احتمال بروز این رفتار هنگامی که تنش پسماند سطحی و تنش‌های ناشی از بارگذاری خارجی از نوع کششی باشند بسیار بیشتر می‌باشد. تنش‌های پسماند از منابع مختلفی بوجود می‌آید. به طور کلی می‌توان گفت هر فرآیندی که در آن یکی از موارد تغییر شکل پلاستیکی موضعی (عامل مکانیکی)، و تغییر حجم غیریکنواخت ناشی از ایجاد گرادیان حرارتی (عامل دمایی) و تغییر فاز

موضعی (عامل ساختاری) در قطعه وجود داشته باشد، باعث ایجاد تنش‌های پسماند در قطعه می‌شود [۷ و ۸].

هیدروفرمینگ به عنوان روشی که همراه تغییر شکلهای پلاستیک موضعی قابل ملاحظه می‌باشد عامل ایجاد این تنشها بر محصول تولید شده می‌باشد که این موضوع بر رفتار خوردگی و خستگی قطعه هیدروفرمینگ شده تاثیر گذار خواهد بود. از دیگر تاثیرات مهم تنش‌های پسماند در فرآیند هیدروفرمینگ، اعوجاج و تغییر شکل پس از ساخت قطعه می‌باشد [۹]. دقت ابعادی و شکل نهایی سطح یکی از مهمترین خاصیت های یک قطعه تولیدی است و قطعه‌ای که این سطح کیفیت را نداشته باشد فاقد کارایی لازم خواهد بود. از آنجایی که طراحی این فرآیند، از روش های تجربی، نیازمند آزمون و خطاهای زیاد بوده و هزینه زیادی به دنبال دارد، مدل سازی اجزاء محدود تولید قطعات، اهمیت زیادی پیدا کرده است.

در مقاله حاضر، در بخش تئوری، روابط کاربردی جهت تخمین اولیه مقادیر پارامترهایی که در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته اند مثل طول اولیه لوله، جابجایی محوری و فشار کالیبراسیون، بررسی و ارائه شده است. در بخش دیگر به مدلسازی المان محدود ساخت سه راهی‌های T شکل نامساوی به روش هیدروفرمینگ لوله با کد ABAQUS/EXPLICIT پرداخته شده و در ادامه اثر پارامترهایی نظیر ضریب اصطکاک، فشار داخلی و شعاع فیلت بر روی توزیع ضخامت و تنش های پسماند ایجاد شده بررسی گردیده است [۱۰].

۲- مبانی نظری در طراحی ساخت قطعات هیدروفرم

در تولید قطعات هیدروفرم انبساط محیطی در اثر فشار داخلی سیال ایجاد شده و با ادامه تغییر شکل لوله اولیه، ضخامت لوله به صورت تدریجی در برخی مناطق کاهش خواهد داشت. برای اجتناب از کاهش شدید موضعی و بروز پارگی و یکنواختی ضخامت پوسته قطعه تولیدی باید مواد را در جهت طول به حرکت درآورده و به ناحیه درحال انبساط هدایت نمود. در طول این فرآیند فقط حد معینی از ماده می‌تواند و باید به منطقه در حال انبساط در قالب هدایت شود، این مقدار مواد با کاهش طول اولیه لوله همراه خواهد بود. با در نظر گرفتن این موضوع و نیز فرض تراکم ناپذیری ماده مورد هیدروفرم می‌توان مقدار کاهش طول در ناحیه هدایتی، که در آن معمولاً شعاع ثابت است، را محاسبه نمود. همچنین در ابتدای بروز جریان مواد، لحظه‌ای وجود دارد که در آن نیروی فشاری هدایت کننده مواد به داخل محفظه انبساطی مساوی نیروی اصطکاک بین پوسته و قالب می‌گردد. در این حالت اگر نیروی فشاری بیش از این حد اعمال گردد به بروز کمانش در لوله منجر خواهد شد. شکل ۳ نمونه‌هایی از مشکلات ایجاد شده در اثر عدم اعمال فشار و پیشروی مناسب را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن موارد فوق، لازم است برای جلوگیری از بروز مشکل حین ساخت پارامترهای دخیل در این فرایند محاسبه گردد. پارامترهای اصلی این فرایند عبارت اند از: فشار تسلیم، فشار پارگی، فشار کالیبراسیون، نیروی محوری، میزان پیشروی محوری که در ادامه به بررسی محاسبه آنها پرداخته می‌گردد.

$$F_{\mu} = \pi d l_{\mu} p_i \mu \quad (6)$$

$$F_t = \pi d t \sigma_s \quad (7)$$

که در روابط فوق d_i شعاع داخلی لوله و l_{μ} طولی از لوله که با قالب در تماس است بر حسب میلی متر، P_i فشار داخلی لوله بر حسب مگاپاسکال و μ ضریب اصطکاک بین لوله و قالب می‌باشد. می‌توان به طور کلی رابطه ساده شده زیر را به عنوان تقریب رابطه فوق در نظر گرفت [۱۱].

$$F_a = (1.5 - 1.2) F_p \quad (8)$$

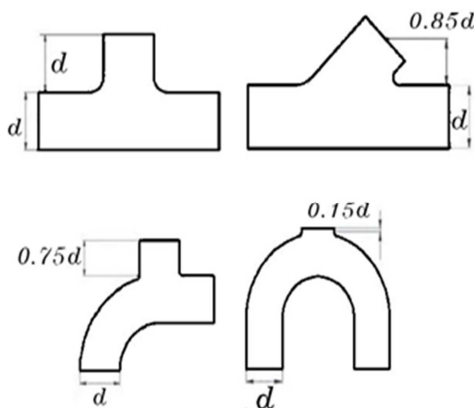
با توجه به روابط فوق می‌توان نیروهای شکل دهی را محاسبه کرد.

۴-۲- میزان پیشروی

برای محاسبه اندازه‌ی پیشروی مورد نیاز برای شکل دهی باید از قانون حجم ثابت استفاده کرد و میزان پیشروی مورد نیاز برای جلوگیری از نازک شدگی قطعه را به دست آورد. این محاسبات برای شکل‌ها پیچیده با شبیه سازی و محاسبات عددی انجام می‌شود.

$$l_a = \frac{V}{\pi d t} - l_f \quad (9)$$

که l_f طول نهایی لوله است که با نوشتن قانون حجم ثابت به دست می‌آید، l_i طول اولیه لوله و l_d طول مورد نیاز برای پیشروی می‌باشد. جهت سهولت محاسبه حجم بعد از شکل دهی می‌توان از حداکثر میزان تغییر شکل مجاز برای هندسه‌های مختلف استفاده نمود که در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- بیشینه تغییر شکل امکان پذیر در هندسه‌های گوناگون

۳- مدلسازی اجزا محدود

برای بررسی اثرات پارامترهای فرآیند بر توزیع ضخامت و تنش‌های پسماند قطعات ساخته شده، مدلسازی اجزا محدود توسط کد المان محدود ABAQUS انجام شده و برای بررسی صحت شبیه سازی به صورت موردی نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از تولید تجربی قطعه مقایسه شده است.

مشخصات ابعادی نمونه‌های شبیه سازی شده و یک نمونه از سه راهی غیر مساوی تولید شده در این تحقیق در شکل ۵ نشان داده شده است. پارامترهای ابعادی مورد استفاده در ساخت مدل هندسی در زیر شکل ارائه شده است.



ترکیدگی در انتهای برآمدگی چروکیدگی در محل سه راهی
شکل ۳- نمونه‌هایی از عیوب ایجاد شده در حین ساخت قطعه

۱-۲- فشار تسلیم

این فشار برابر فشاری است که در آن ماده شروع به تسلیم می‌کند و بنابر این حداقل فشار قابل استفاده در فرایند است.

$$p_s = \frac{2t}{d} \sigma_s \quad (1)$$

که در این رابطه P_s فشار تسلیم بر حسب مگاپاسکال، σ_s استحکام تسلیم ماده بر حسب مگاپاسکال، t ضخامت اولیه و d قطر اولیه لوله بر حسب میلی متر می‌باشند.

۲-۲- فشار پارگی

این فشار برابر فشاری است که در آن تنش وارده به لوله از حد استحکام نهایی فراتر رفته و ماده دچار پارگی می‌شود و به تبع حداکثر فشار قابل استفاده در فرایند است.

$$p_b = \frac{2t}{d} \sigma_u \quad (2)$$

که در این رابطه P_b فشار پارگی بر حسب مگاپاسکال، σ_u استحکام نهایی ماده بر حسب مگاپاسکال می‌باشند.

۳-۲- فشار کالیبراسیون

فشار کالیبراسیون عبارت است از فشاری که در آخرین مرحله فرایند به لوله اعمال می‌شود تا لوله گوشه‌های تیز و اشکال پیچیده قالب را به خود بگیرد. توصیه می‌شود که برای کاهش هزینه‌ها و سادگی فرایند تا حد امکان از ایجاد گوشه‌های با شعاع کم جلوگیری شود و حداکثر مقدار ممکن را برای شعاع گوشه‌ها در قالب در نظر گرفت.

$$p_c = \frac{t}{r_c} \sigma_s \quad (3)$$

که در آن P_c فشار کالیبراسیون و r_c کوچکترین شعاع موجود در گوشه‌های قالب و σ_s استحکام نهایی ماده می‌باشد.

۴-۲- نیروی محوری

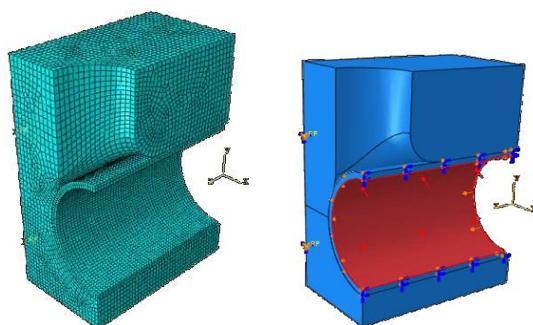
نیروی فشاری محوری F_a بر حسب نیوتن که به صورت محوری به دو سر لوله اعمال می‌شود.

$$F_a = F_p + F_{\mu} + F_t \quad (4)$$

نیروی فشار سیال مقابل F_p ، این نیرو ناشی از فشار سیال داخل لوله است، نیروی اصطکاک F_{μ} ، این نیرو ناشی از اصطکاک بین لوله و قالب است و نیروی مقابل تغییر شکل پلاستیک F_t که این نیرو ناشی از مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک می‌باشد.

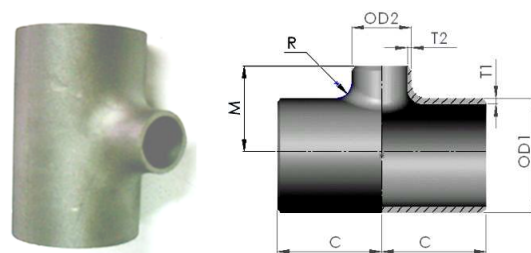
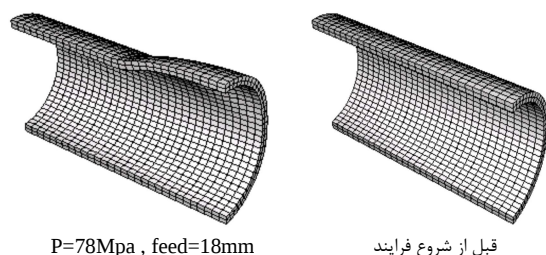
$$F_p = \pi \frac{d_i^2}{4} p_i \quad (5)$$

در مدلسازی هندسی صفحات XZ و YZ تقارن بوده و برای کاهش زمان محاسبات عددی فقط یک چهارم مدل سازی شده است. برای شبکه‌بندی از ۶ المان در ضخامت، ۶۰ المان در راستای محیطی و ۵۰ المان در راستای محوری لوله استفاده شده است تا نتایج حاصله دقت لازم را داشته باشند. برای مش بندی لوله از المان ۸ گرهی C3DR8 و در مش بندی قالب از المان صلب C3DR8 استفاده شده است. برای حفظ کیفیت مش بندی با وجود تغییر شکل های بزرگ در طول فرایند از تکنیک مش بندی تطبیقی به روش ALE استفاده شده است [۱۰].



شکل ۷- مدل هندسی و شبکه‌بندی شده مورد استفاده در شبیه‌سازی

همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است در شبیه سازی فرآیند قالب به صورت صلب فرض در نظر گرفته شده و برای در نظر گرفتن حرکت بین قالب و لوله از مقادیر مختلف ضرایب اصطکاک برای حالات مختلف طبق جدول شماره ۳ استفاده شده است. با اعمال تدریجی فشار و پیشروی طبق بارگذاری ارائه شده در شکل ۹، قطعه از لوله اولیه به سه راهی مورد نظر تبدیل میگردد که مراحل مختلف شکل گیری قطعه در فشارهای داخلی و جابجایی های محوری در شکل ۸ مشاهده می شود. منحنی بارگذاری استفاده شده در این شبیه سازی مطابق با روند مورد استفاده در ساخت تجربی سه راهی و روش ارائه شده در مراجع معتبر مورد می‌باشد [۱۲، ۱۳].



R	OD1	OD2	M	C	T1	T2
20, 30, 40, 50	114	89	98	105	7	5.5

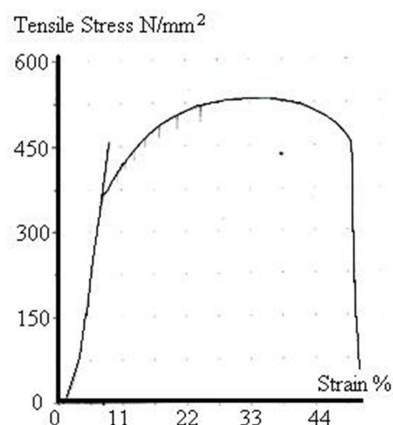
شکل ۵- مشخصات ابعادی نمونه شبیه سازی شده بر حسب میلیمتر

لوله اولیه بکار رفته از جنس ASTM A234 WPB بوده و ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ داده شده است. برای بررسی رفتار مکانیکی لوله و استخراج مشخصات برای استفاده در مدل سازی رفتار مواد، طبق استاندارد آزمون کشش انجام گردید که یک نمونه از نتایج حاصل در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون کشش خواص مکانیکی ارائه شده در جدول ۲ به عنوان رفتار مکانیکی مواد در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ماده اولیه لوله

C%	Mn%(max)	P%(max)	S%	Si%
۳/۰	۰۶/۱ - ۲۹/۰	۰۵/۰	۰۵۸/۰	۱/۰

مدلسازی رفتار الاستیک مواد با استفاده از مدول الاستیک و ضریب پواسون و مدلسازی رفتار پلاستیک با استفاده از قانون توانی حاصل از نمودار تست کشش به صورت $\bar{\sigma} = 900\epsilon^{-0.4}$ انجام شده است.



شکل ۶- نمودار تنش- کرنش به دست آمده از تست کشش

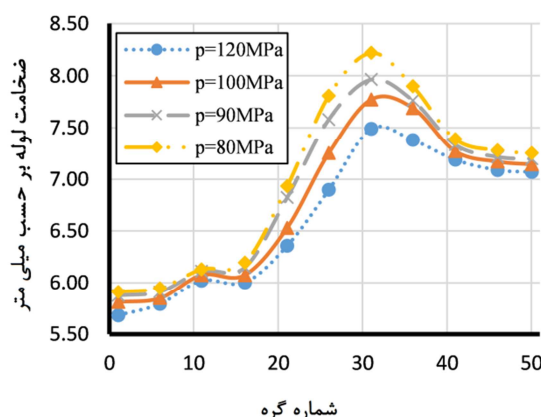
جدول ۲- خواص الاستیک و پلاستیک لوله و ضریب اصطکاک

ρ (kg/m ³)	σ_u (MPa)	σ_s (MPa)	μ	ν	E(Gpa)
۷۸۰۰	۵۴۲	۳۵۲	۰.۱/۰ ۰.۵/۰ ۱/۰ ۱۵/۰	۰.۳	۲۱۰

۵- بررسی اثر فشار

برای بررسی اثر فشار داخلی روی تغییر ضخامت لوله، تغییرات ضخامت لوله در قالب با شعاع ثابت گوشه قالب ۲۰ میلیمتر، ضریب اصطکاک ثابت ۰/۰۱ تحت فشارهای ۸۰، ۹۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال بررسی شده است.

شکل ۱۱ یک نمونه از نتایج بررسی اثر فشار تغییر شکل بر تغییر ضخامت را در لوله ای که در قالب با شعاع گوشه ۲۰ میلیمتر در اثر فشارهای متفاوت شکل دهی شده است را نشان می دهد.

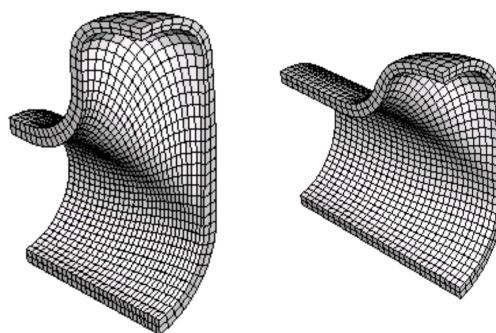


شکل ۱۱- تغییرات ضخامت در طول مسیر تعیین شده

همانطور که از نمودار مشخص می گردد با افزایش فشار منحنی ضخامت لوله در بحرانی ترین قسمت کاهش می یابد. در واقع کمترین مقدار ضخامت برای تمام منحنی ها مربوط به نوک برآمدگی و بیشترین ضخامت مربوط به محل جدایی لوله و قالب می باشد. همانطور که شکل ۱۱ نشان می دهد ضخامت به صورت یکنواخت در نواحی آزاد کم می شود و کمترین ضخامت در (نوک برآمدگی) اتفاق افتاده است. یکی از علل این پدیده اثر اصطکاک می باشد به طوری که در محل هایی که لوله با قالب در تماس است، اصطکاک مانع جریان یافتن ماده می شود در حالیکه در قسمت آزاد این مانع وجود ندارد. بنابراین عمده ترین قسمت آزاد، ماده جریان پیدا می کند و افزایش مساحت لوله را این ناحیه تامین می کند. بنابراین لوله در مکان هایی که در تماس با قالب نیست بر اثر فشار داخلی افزایش طولی و کاهش ضخامت بیشتری می یابد و نازکتر می شود.

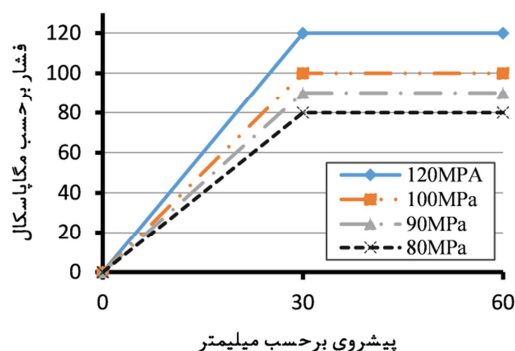
۶- اثر شعاع گوشه قالب

شکل ۱۲ تغییر ضخامت لوله را به ازای شعاع های فیلر $R=20, 30, 40, 50$ میلیمتر تحت بارگذاری با بیشینه فشار $P=120$ مگاپاسکال و ضریب اصطکاک ثابت $\mu=0/01$ نشان می دهد. کمترین مقدار ضخامت برای تمام منحنی ها مربوط به نوک برآمدگی در ابتدای مسیر بررسی و بیشترین ضخامت برای منحنی های با شعاع گوشه قالب کمتر ($R=20, R=30$) در محل جدایی لوله و قالب و بیشترین ضخامت برای منحنی های با شعاع گوشه قالب بزرگتر ($R=40, R=50$) مربوط به قسمت های نزدیک به انتهای لوله می باشد.



شکل ۸- مراحل شکل دهی در حین افزایش فشار و پیشروی

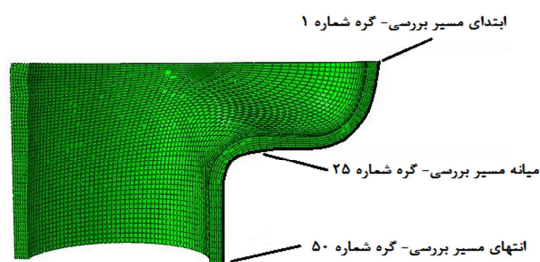
همانطور که در منحنی بارگذاری شکل ۹ مشاهده می شود، در نیمه ابتدایی فرایند، فشار داخلی به صورت خطی تا مقدار نهایی افزایش یافته و در نیمه دوم فرایند فشار داخلی ثابت مانده و تنها جابجایی محوری اعمال می گردد.



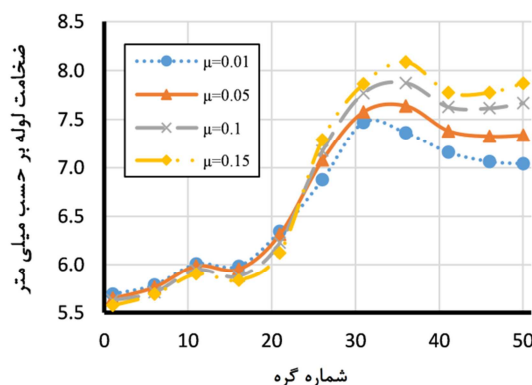
شکل ۹- منحنی بارگذاری و اعمال فشار داخلی بر حسب پیشروی

۴- پارامترهای موثر بر روی ضخامت

در این قسمت به بررسی تاثیر چند پارامتر مهم بر روی ضخامت نهایی لوله پرداخته شده است. تمام بررسی ها بر اساس منحنی بارگذاری ارائه شده در شکل ۹ و مشخصات معرفی شده قبلی می باشد. برای بررسی نتایج مطابق شکل ۱۰ مسیر اندازه گیری مشخصی که طبق بررسی اولیه از بحرانی ترین منطقه قطعه عبور می کند استفاده شده و در طول مسیر مقادیر ضخامت بعد از تکمیل شکل تعیین شده است.



شکل ۱۰- مسیر بررسی و اندازه گیری ضخامت بر روی نمونه تغییر شکل یافته



شکل ۱۳- اثر ضریب اصطکاک بر توزیع ضخامت

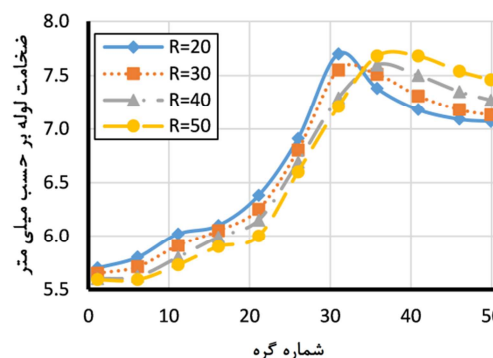
برای بررسی صحت شبیه‌سازی اجزا محدود، نتایج ابعاد حاصل از شبیه‌سازی با ابعاد به دست آمده از نتایج تجربی مقایسه گردیده است. آنچه از جدول ۳ برداشت می‌شود این است که نتایج مدل‌سازی اجزا محدود با نتایج عملی دارای نزدیکی مناسبی هستند.

جدول ۳- نتایج مقایسه ابعادی برخی پارامترها در شبیه‌سازی و نمونه تجربی

در صد خطای	نتایج شبیه‌سازی mm	نتایج تجربی mm
۱۴/۲	۱۵/۷	۷
۳۶/۶	۸۵/۵	۵/۵
۶/۱۰	۶/۹۸	۹۸

۸- بررسی پارامترهای موثر بر روی تنش پسماند

از آنجایی که عمر خستگی یکی از مهمترین خواص مکانیکی یک قطعه است بنابر این بررسی تاثیر تنش پسماند در لوله از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا اگر نتوان میزان تنش را کنترل کرد در قطعه ترک یا اعوجاج یا تغییر شکل بوجود می‌آید زیرا تنش‌های پسماند بیشترین تاثیر را در عمر خستگی دارند و در صورت کنترل نشدن باعث پارگی لوله می‌شود. در این قسمت از مقاله تاثیر پارامترهای موثر بر روی تنش پسماند بررسی می‌گردند. تنش‌های کششی معمولاً مضر هستند چود در چنین حالتی معمولاً جسم ترد و شکننده و مستعد رشد ترک و واماندگی می‌شود و مقاومت مکانیکی سطح کاهش می‌یابد. برای بررسی مقادیر توزیع تنش بر روی سه راهی باید مناطقی را که دارای بیشترین مقادیر تنش هستند را انتخاب نماییم. شکل ۱۴ نواحی که دارای بیشترین تنش پسماند در سطح لوله می‌باشند را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- اثر تغییرات شعاع گوشه بر توزیع ضخامت

با افزایش شعاع گوشه قالب، بیشترین ضخامت لوله از ورودی قالب به سمت داخل قالب منتقل می‌شود و توزیع همگن تری از ضخامت به وجود می‌آید. علت این موضوع این است که هرچه شعاع فیلت قالب افزایش یابد مواد در محل جدایی لوله و قالب راحت تر جریان پیدا می‌کند و بیشترین ضخامت به قسمت انتهایی لوله نزدیک می‌شود. هرچه شعاع فیلت افزایش می‌یابد در منطقه آزاد، ضخامت کاهش بیشتر می‌یابد و علت این موضوع افزایش مساحت کل لوله تغییر شکل یافته است، بنابراین لوله باید تغییر شکل بیشتری بدهد و نازک تر می‌شود.

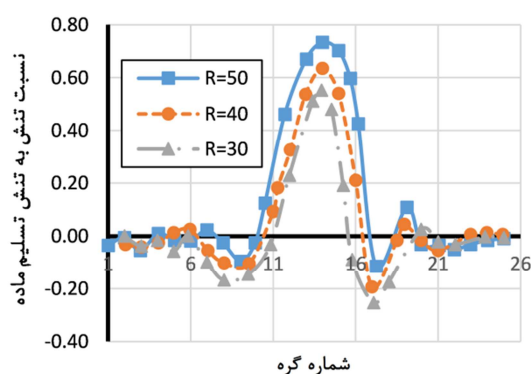
۷- بررسی اثر ضریب اصطکاک

شکل ۱۳ تغییر ضخامت لوله را به ازای ضریب اصطکاک متفاوت ارائه شده در جدول ۳ تحت بارگذاری با بیشینه فشار $P = 120$ و شعاع گوشه ثابت نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که اصطکاک تاثیر منفی زیادی بر توزیع ضخامت محصول دارد. همانطور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش ضریب اصطکاک، توزیع ضخامت یکنواختی خود را از دست می‌دهد. زیرا با افزایش ضریب اصطکاک با توجه به بزرگ بودن نیروهای عمود بر سطح قالب به علت فشارهای داخلی زیاد، نیروی اصطکاک بسیار زیاد شده و مانع جریان یافتن ماده در قسمت چسبیده به قالب می‌شود که این امر نازک شدگی بیش تر در ناحیه آزاد را به همراه خواهد داشت. در واقع مقدار ضخامت لوله در نوک برآمدگی کاهش می‌یابد و بیشتر حجم لوله در قبل ورودی قالب قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌شود بهترین راه حل برای جلوگیری از انباشتگی و غیریکنواخت شدن ضخامت لوله استفاده از روانساز مناسب جهت کاهش ضریب اصطکاک می‌باشد که این مساله کمک بسیاری به تولید محصولی با کیفیت خواهد نمود.

موجب افزایش تنش کششی در المان‌های ناحیه می‌گردد. در واقع این ناحیه جز بحرانی‌ترین مناطق می‌باشد و بیشترین مقدار تنش سطحی و تنش کششی پسماند در این منطقه بوجود می‌آید. فشار جز عوامل موثر بر روی میزان تنش پسماند این نواحی می‌باشد. لذا پیرو افزایش تنش سطحی در قطعه، خستگی افزایش می‌یابد که موجب ایجاد اعوجاج، تغییر شکل و ترک در لوله می‌گردد. از طرفی هم تغییر شکل پلاستیک مستلزم افزایش فشار می‌باشد. این در حالی است که افزایش فشار منجر به افزایش پیشرفت تغییر شکل ناحیه پلاستیک می‌گردد. بنابراین در اثر پیشرفت تغییر شکل در ناحیه پلاستیک مقدار تنش برشی بحرانی برای تغییر شکل المان‌ها افزایش می‌یابد. لذا برای کاهش میزان تنش پسماند در لوله بعد از تکمیل فرایند قطعات را باید با روش‌هایی مانند آنیل کردن، تنش زدایی کرد.

۱۱- اثر شعاع گوشه قالب

برای بررسی توزیع تنش پسماند از مسیر انتخاب شده قبلی استفاده شد، همانطور که از شکل ۱۶ پیداست با افزایش شعاع گوشه قالب کانتور تنش محیطی در نقاط بحرانی افزایش می‌یابد. بالاترین مقدار تنش پسماند کششی برای شعاع ۵۰ میلیمتر و در حدود ۲۴۰ مگاپاسکال می‌باشد و این مقدار در محدوده شعاع انحنای لوله قرار دارد. در واقع هر چه شعاع افزایش یابد سطح تماس المان‌ها با دیواره افزایش یافته و المان‌ها تحت کشش بیشتری قرار می‌گیرند.

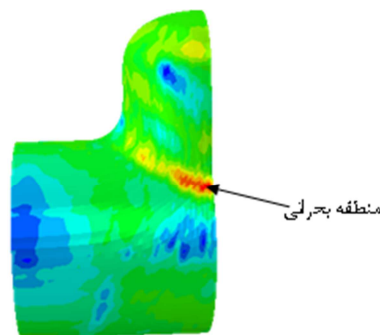


شکل ۱۶- تغییرات کانتور نسبت تنش محیطی به تنش تسلیم در ازای مقادیر مختلف شعاع

این نمودار می‌تواند به طراح کمک نماید تا همیشه شعاع لوله را در حد نرمال و ایده‌آل تعیین نماید تا کمترین میزان تنش پسماند در لوله بوجود آید.

۱۲- اثر ضریب اصطکاک

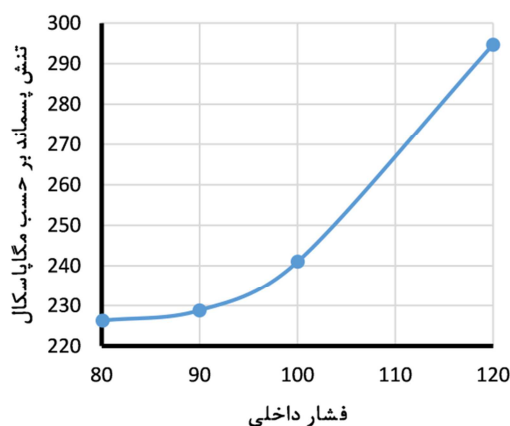
یکی از المان‌هایی که در ناحیه بحرانی در سطح لوله قرار دارد المان مشخص شده در شکل ۱۴ می‌باشد. شکل ۱۷ تغییرات کانتور تنش محیطی را برای به ازای ضرایب اصطکاک نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- ناحیه بحرانی بیشترین تنش پسماند ایجاد شده بر روی لوله

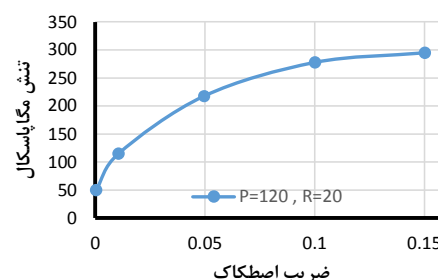
۹- بررسی اثر فشار

شکل ۱۵ نمودار تغییرات کانتور تنش محیطی را بعد از گذشت زمان، در منطقه بحرانی نشان داده شده در شکل ۱۴، نشان می‌دهد، که تنش‌ها به حالت تعادل رسیده و بیانگر تنش پسماند هستند، و به ازای فشارهای گوناگون و شعاع فیلر $R=20$ و ضریب اصطکاک $\mu=0.1$ می‌باشد. همانطور که از نمودار پیداست کمترین مقدار تنش پسماند برابر ۲۲۶ مگاپاسکال برای فشار $P=80$ و بیشترین مقدار برابر ۲۹۲ مگاپاسکال برای فشار $P=120$ می‌باشد. در واقع با افزایش فشار، مقادیر کانتور تنش محیطی افزایش می‌یابد. همانطور که از شکل ۱۴ پیداست سطح پایین راستای افقی لوله دارای کمترین میزان تنش پسماند نسبت به سایر نواحی می‌باشد. به این ناحیه easy glide یا همان ناحیه لغزش آسان گفته می‌شود و علت کم بودن تنش پسماند در این نواحی این است که کار سختی در این مناطق بسیار کم است. در واقع دلیل کم بودن کار سختی در این مناطق نبود مانع بر سر راه می‌باشد.



شکل ۱۵- نمودار تغییرات تنش پسماند در نقطه بحرانی

در شکل ۱۴ نشان داده شده است که سطح خارجی لوله در نواحی که با راستای افقی قالب در تماس است مقادیر تنش المان‌ها در حد نرمال می‌باشد اما زمانی که از راستای افقی قالب جدا شده و بر اثر فشار هیدرواستاتیک به سمت بالای قالب هدایت می‌شود، به یکباره یک تغییر شکل شدید در المان‌های ناحیه انحنای لوله رخ می‌دهد و المان‌ها در راستای y تحت کشش شدید قرار می‌گیرند که این امر



شکل ۱۷- تغییرات کانتور تنش محیطی برای منطقه بحرانی شکل ۱۴

همانطور که از نمودار پیداست با افزایش ضریب اصطکاک مقدار تنش در المان مورد نظر افزایش یافته است. در واقع زمانی که ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد سطح تماس بین لوله و قالب افزایش می‌یابد و المان‌ها قادر به جابجایی آسان نمی‌باشند. بنابراین اصطکاک بین لوله و قالب نقش مهمی در کنترل توزیع کرنش و شعاع حدی دارد.

با بالا رفتن ضریب اصطکاک از حد مجاز، چسبندگی شدیدی بوجود می‌آید و در حضور فشار بالا فقط بخشی از لوله که با جدار قالب تماس ندارد می‌تواند تغییر شکل دهد. زیرا با افزایش ضریب اصطکاک با توجه به بزرگ بودن نیروهای عمود بر سطح قالب به علت فشارهای داخلی زیاد، نیروی اصطکاک بسیار زیاد شده و مانع جریان ماده در قسمت چسبیده به قالب می‌شود که این، نازک شدگی و افزایش تنش را به همراه خواهد داشت.

باید تا جای ممکن با استفاده از روانساز مناسب ضریب اصطکاک را کاهش داد و این مساله کمک بسیاری به تولید محصولی با کیفیت مناسب می‌کند.

۱۳- نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدلسازی اجزا محدود با نتایج تجربی شرکت توس پیوند مقایسه گردید و نزدیکی این نتایج نشان داد که نتایج مدلسازی می‌تواند به عنوان یک تقریب مناسب با خطای قابل قبول از پارامترهای فرآیند مورد اطمینان باشد.

در این مقاله با استفاده از روش اجزا محدود به عنوان شیوه‌ای مناسب و قدرتمند برای تغییر شکل‌های بزرگ و مسایل پیچیده جریان مواد در شکل‌دهی فلزات، مدلسازی عددی فرایند هیدروفرمینگ لوله سه راهی T شکل نامساوی انجام پذیرفته است. سپس تاثیر پارامترهایی نظیر ضریب اصطکاک، شعاع فیلت قالب و فشار داخلی بر روی توزیع ضخامت و تنش پسماند بررسی گردید. نتایج به دست آمده از مدلسازی اجزا محدود به اختصار به شرح زیر می‌باشد.

- با افزایش ضریب اصطکاک میزان تنش پسماند در لوله افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش ضریب اصطکاک با توجه به بزرگ بودن نیروهای عمود بر سطح قالب به علت فشارهای داخلی زیاد، نیروی اصطکاک بسیار زیاد شده و مانع جریان ماده در قسمت چسبیده به قالب می‌شود که این، نازک شدگی و افزایش تنش را به همراه خواهد داشت. باید سعی کرد تا جای ممکن با استفاده از روانساز مناسب ضریب اصطکاک را کاهش داد و این مساله کمک بسیاری به تولید محصولی با کیفیت مناسب می‌کند.

- هرچه ضریب اصطکاک افزایش یابد حداقل ضخامت کاهش یافته و توزیع ضخامت غیریکنواخت تر می‌گردد. برعکس هرچه ضریب اصطکاک کمتر باشد توزیع ضخامت در لوله یکنواخت تر می‌گردد زیرا مقاومت کمی در برابر جریان مواد وجود دارد و مواد براحتی می‌توانند جریان پیدا کنند.
- با افزایش شعاع گوشه قالب حداقل ضخامت و شیب منحنی ضخامت لوله کاهش می‌یابد.
- با افزایش فشار میزان تنش‌های پسماند موجود در لوله افزایش می‌یابد. می‌توان برای از بین بردن پدیده کارسختی و کاهش میزان تنش‌های پسماند پس از پایان عملیات، لوله را آنیل نمود.
- با افزایش فشار داخلی حداقل ضخامت کاهش می‌یابد و قطعه کار نهایی دارای قسمت‌های نازکی می‌شود که این قسمت‌ها نهایتاً حداکثر بار قابل تحمل کل قطعه را کاهش خواهند داد.

۱۴- سپاسگزاری

از شرکت توس پیوند که در انجام این پژوهش همکاری و اطلاعات فنی مهندسی خود را جهت بررسی سه راهی T شکل نامساوی در اختیار نویسندگان مقاله گذاشته است تشکر به عمل می‌آید.

۱۵- مراجع

- [1] Ahmetoglu M., Altan T., Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends, J. Material Processing Technology, vol.98, pp. 25-33, 2000.
- [2] Muammar K., Altan T., An overall review of the tube hydroforming technology J. Materials Processing Technology, Vol. 108, pp. 384-393, 2001.
- [3] Lin F.C., Kwan C.T., Application of abductive network and FEM to predict an acceptable product on T-shape tube hydroforming process, J. Computers and Structures, Vol.82, pp.1189-1200, 2004.
- [4] Kuang-Jau F., Pou-Yuan H., Optimization of loading conditions for tube hydroforming, J. Materials Processing Technology, Vol. 140, pp. 520-524, 2003.
- [5] Xing H. L., Makinouchi A., Numerical analysis and design for tubular hydroforming, Int. J. Mechanical Science, Vol. 43, pp. 1009-1026, 2001.
- [6] Zhuanga W., Wang S., Linb J., Balintb D., Hartlc Ch., Experimental and numerical investigation of localized thinning in hydroforming of micro-tubes, European Journal of Mechanics - A/Solids, Vol. 31, Issue 1, pp 67-76, 2012.
- [7] Totten G., Howes M., Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International Press, 2002.
- [8] Bruni C., Celeghini M., Geiger M., Gabrielli F., A study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming, Int. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol. 33, Issue 9, pp 929-939, 2007.
- [9] Bruni C., Celeghini M., Geiger M., Gabrielli F., A study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming, J. Advanced Manufacturing Technology, Vol. 33, no. 9-10, pp. 929-939, 2007.
- [10] Abaqus 6.14-1 User's manual, USA, 2014.
- [11] Alaswad A., Benyounis, K.Y., Olabi A.G., Tube hydroforming process: A reference guide, Materials & Design, Vol. 33, pp. 328-339, 2012.
- [12] Ray P., Mac Donald B.J., Determination of the optimal load path for tube hydroforming processes using a fuzzy load control algorithm and finite element analysis, J. Finite Elements in Analysis and Design, Vol.41, pp. 173-192, 2004.
- [13] Koc M., Swat T., Theranat J., Altan T., The use of FEA and design of experiments to establish design guidelines for simple hydroformed parts. J. Machine tools and manufacture, Vol. 40, PP. 2249-2266, 2000.