

شبیه‌سازی و مطالعه تجربی فرآیند خم‌کاری لوله جدار نازک با مقطع مربعی به روش هیدروفرمینگ

بهزاد اکبرزاده

عبدالحمیدگرچی*

محمد بخشی‌جویباری

دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

خم‌کاری لوله کاربرد وسیعی در صنایع هواپیمایی و خودروسازی دارد. از مشکلات اصلی این فرآیند، چروکیدگی، پارگی و عدم پر شدگی قالب می‌باشد. چنانچه نسبت شعاع خم به قطر لوله (R/D) در فرآیند خم‌کاری بین ۱ تا ۱/۵ باشد، خم‌کاری با روش‌های معمول قابل انجام نیست. بنابراین ارایه یک روش جدید در این راستا بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، ابتدا لوله‌های انتها بسته و بدون درز با استفاده فرآیندهای چند مرحله‌ای کشش عمیق و اتوکاری تولید شده است. سپس، فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های با مقطع مربعی و با نسبت (R/D) برابر یک، به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شده است که با استفاده از فرآیند جدید، امکان خم‌کاری لوله با مقطع مربعی و با نسبت پایین $R/D=1$ فراهم گردید. به علاوه، اثر فشار سیال و زاویه خم قالب بر توزیع ضخامت لوله در دیواره‌های داخلی، خارجی و جانبی ناحیه خم لوله مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شده است که با افزایش فشار، تغییر ضخامت در این دیواره‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش در کاهش ضخامت، برای دیواره خارجی نسبت به دو دیواره دیگر بیشتر است. همچنین لوله در $R/D=1$ ، با چند زاویه خم مختلف شکل‌دهی شده است که با افزایش زاویه خم، فشار شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خم‌کاری لوله، هیدروفرمینگ لوله، شبیه‌سازی اجزای محدود، لوله با مقطع مربعی.

Experimental and Numerical Investigation on Bending Process of Thin Wall Tube with Square Section by Hydroforming Method

B. Akbarzadeh

A. H. Gorji

M. Bakhshi Jooybari

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Tube bending is widely used in the aerospace and automotive industries. Of the main difficulties of this process are wrinkling, rupture and incomplete filling of the die. If the ratio of the bend radius to tube diameter (R/D) in the bending process is between 1 and 1.5, the bending cannot be performed by conventional methods. Therefore, it is important to develop a new technique in this respect. In this study, at first, closed-end seamless tubes were produced by multistage deep drawing and ironing processes. Then, the proposed hydroforming process of square cross-section tubes with the ratio of $R/D=1$ has been examined experimentally and by FEM. It is illustrated that the square cross section tubes with low R/D can successfully be produced by the developed technique. In addition, the effect of internal fluid pressure and die bend angle on the thickness distribution of the inner, outer and lateral walls of the bending area has been investigated. It is shown that with increasing the pressure, the thickness of the inner, outer and lateral tube walls increases. The reduction in the thickness is much greater for the external wall. The tube in the $R/D = 1$ was formed with multi of bending angles. The results exhibit with increasing the bending angle, the pressure of forming was decreased.

Keywords: Tube Bending, Tube Hydroforming, Finite Element Simulation, Square Section.

جدید و ابتکاری برای خم‌های با شعاع کوچک در لوله‌های با مقاطع غیر دایره‌ای ضروری به نظر می‌رسد.

۱- مقدمه

در زمینه خم‌کاری لوله‌ها، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. به منظور کاهش چروک و تغییر ضخامت دیواره لوله، تاثیر پارامترهای هندسی ابزار خم‌کاری، قالب و سایر پارامترهای موثر بر خم‌کاری در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفت [۳ و ۴]. لی و ژنگ [۵] خم‌کاری با فشار محوری لوله‌ها و پارامترهای موثر در آن را بطور تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها تاثیر فشار داخلی و شرایط اصطکاکی را بر روی تغییر شکل لوله بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که زمانی که فشار درونی خیلی کم باشد چروکیدگی در منطقه خم ایجاد خواهد شد.

لوله‌های خمیده با شعاع خم کوچک کاربرد وسیعی در موتور هواپیماها، سفینه‌های فضایی، موتورهای کشتی ها و مانند آن‌ها دارند [۱]. در خم‌کاری لوله‌ها هر چه ضخامت دیواره آن کمتر و شعاع خم کوچکتر باشد، احتمال ایجاد عیوبی مانند چروکیدگی و پارگی، به ویژه زمانی که سطح مقطع لوله دایروی نباشد، بیشتر می‌شود [۲]. در چنین مواردی، به کمک روش‌های معمول خم‌کاری لوله‌ها، نمی‌توان این خم‌ها را با کیفیت مطلوب و بدون عیب تولید کرد. بنابراین ارایه روش‌های

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hamidgorji@nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۱۶

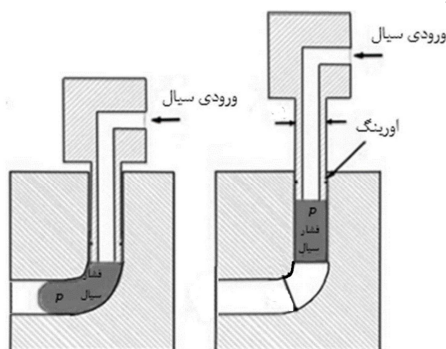
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹

همچنین در شرایط اصطکاکی خیلی خوب در صورت عدم وجود نیروی محوری کافی، لوله در شعاع خارجی دچار نازک‌شدگی و پارگی می‌شود. در عین حال، شرایط اصطکاکی نامناسب باعث کند شدن حرکت لوله در قالب می‌شود و در نتیجه موجب چروکیدگی لوله در شعاع داخلی می‌گردد. ژانگ و ردیکاپ [۶] خیم‌کاری لوله به روش فشاری را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی نموده و تعدادی از پارامترهای موثر بر شکل‌پذیری از جمله شعاع خیم‌کاری، فشار داخلی و ضریب اصطکاک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که کاهش شعاع خیم، موجب افزایش تغییرات ضخامت شده و افزایش فشار داخلی چروک را کاهش می‌دهد. همچنین آنها یافتند که تاثیر اصطکاک کم بوده و افزایش آن موجب چروک می‌شود. یانگ و همکاران [۷] فرآیند خیم‌کاری هیدروفرمینگ را برای ساخت قطعات خودرو به صورت شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه شعاع خیم کمتر باشد، نازک‌شدگی و غیردایروی بودن سطح مقطع بیشتر می‌شود. هوانگ و آلتان [۸] تحلیل اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله با مقطع اولیه دایره‌ای را در قالب مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند. آنها شکل‌دهی این نوع لوله را با دو فرآیند انبساطی و برخوردی^۱ انجام دادند و توزیع ضخامت، نیروی گیربندی و فشار شکل‌دهی را در این دو فرآیند مورد مقایسه قرار دادند. با توجه به بررسی آنها، بیشترین فشار شکل‌دهی در فرآیند برخوردی فقط ۵ درصد فرآیند انبساطی و بیشترین نیروی فرآیند برخوردی فقط ۷ درصد نیروی گیربندی فرآیند انبساطی می‌باشد. همچنین توزیع ضخامت در فرآیند برخوردی به مراتب بهتر از فرآیند انبساطی می‌باشد. با این وجود، فرآیند برخوردی نیاز به تجهیزات بیشتری در مقایسه با فرآیند انبساطی دارد. ژيو و همکاران [۹] فرآیند خیم‌کاری فشاری لوله‌های با مقطع مستطیلی را در قالب با شعاع انحنای خیم متغیر ارایه کردند. این روش برخلاف تکنیک‌های رایج خیم‌کاری، لوله با مقطع مستطیلی را بطور تدریجی از شعاع‌های بزرگ تا شعاع‌های کوچک شکل می‌دهد. در این روش دستیابی به شعاع خیم کوچکتر نسبت به سایر روش‌های مرسوم خیم‌کاری امکان‌پذیر می‌باشد. نقطه کلیدی این روش آن است که از تمرکز کرنش (تغییر شکل) در یک نقطه خاص در طی مراحل تغییر شکل جلوگیری می‌کند. وانگ و آگاروال [۱۰] غیردایره‌ای بودن سطح مقطع لوله و تغییرات ضخامت دیواره لوله را در فرآیند خیم‌کاری هیدروفرمینگ لوله، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی، به صورت شبیه‌سازی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که با اعمال همزمان فشار داخلی و نیروی محوری، غیردایره‌ای بودن سطح مقطع و چروکیدگی در شعاع داخلی لوله کاهش می‌یابد. کمی و همکاران [۱۱] فرآیند خیم‌کاری فشاری لوله جدار نازک با مقطع مستطیلی را به وسیله تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این مطالعه که قالب خیم‌کاری دارای شعاع انحنای خیم متغیر می‌باشد، به این نتیجه رسیدند که تغییرات ضخامت لوله به تدریج با افزایش زاویه خیم و پیشروی لوله در قالب، افزایش می‌یابد. همچنین، در قوس داخلی افزایش ضخامت و در قوس خارجی نازک‌شدگی بروز خواهد کرد.

منتظری و همکاران [۱۲] فرآیند خیم‌کاری لوله با نسبت شعاع خیم به قطر لوله (R/D) برابر یک را توسط یک فرآیند جدید خیم‌کاری هیدروفرمینگ به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها پس از بررسی مسیر فشار، مسیر فشاری را که در آن لوله بدون چروکیدگی به طور کامل شکل قالب را به خود می‌گیرد، بدست آوردند. همچنین آنها اثر تغییر فشار بر توزیع ضخامت لوله را در شعاع داخلی و شعاع خارجی ناحیه لوله مورد بررسی قرار دادند.

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه خیم‌کاری لوله انجام گرفته است. محققان توانستند با روش‌های مختلف خیم‌کاری، میزان چروک احتمالی را در فرآیند خیم‌کاری کاهش داده و در مواردی چروک را از بین ببرند و تغییر ضخامت سطح مقطع لوله را در حین فرآیند خیم‌کاری به حداقل برسانند. هنگامی که نسبت R/D پایین باشد، نمی‌توان با روش‌های معمول در فرآیند خیم‌کاری که در بالا به آن اشاره شد، خیم‌کاری لوله را بدون عیب انجام داد. یکی از راه‌های کاهش این عیوب، استفاده از هیدروفرمینگ لوله می‌باشد. از مزایای این روش می‌توان به بهبود کیفیت سطحی قطعات، به حداقل رسیدن تغییرات ضخامت در قطعات، افزایش استحکام و کاهش هزینه اشاره کرد [۱].

در پژوهش حاضر روشی ارایه شده است که با استفاده از آن می‌توان لوله‌ای با مقطع دایره‌ای را بطور همزمان به لوله‌ای با مقطع مربعی و تحت زاویه خیم ۹۰ درجه شکل داد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در این روش، لوله‌ها بصورت انتها بسته تولید شده و سپس در قالب خیم با مقطع مربعی قرار می‌گیرد. سیال با استفاده از مجرای ایجاد شده در سنبه به درون لوله وارد می‌شود. با اعمال فشار مناسب سنبه لوله را به داخل قالب وارد می‌کند و لوله شکل قالب را به خود می‌گیرد. در این قالب با توجه به نوع قالب، لوله خیم شده با مقطع مربع ای بدون چروک تولید می‌شود. همچنین با توجه به اینکه تهیه لوله جدار نازک با انتهای بسته مشکل بوده است، در ابتدا لوله‌های انتها بسته بدون درز، به وسیله فرآیندهای چند مرحله‌ای کشش عمیق و اتوکاری تولید شده و پس از ساخت لوله‌ها، فرآیند خیم‌کاری فشاری این لوله‌ها تحت زاویه خیم ۹۰ درجه با روش جدید، به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱- طرحواره قالب ارایه شده

¹ Crushing



شکل ۴- اجزای چهار مرحله قالب اتوکاری به همراه نمونه‌های تولیدی قالب‌های اتوکاری (به ترتیب از چپ به راست)

مجموعه قالب ساخته شده به در شکل ۵ نشان داده شده است. در انجام آزمایش‌ها، ابتدا لوله میان دو کفه قالب قرار گرفته و سنبه داخل لوله قرار می‌گیرد. برای آب‌بندی، از اورینگ روی سنبه استفاده شده است. پس از هواگیری محفظه داخلی لوله، سیال از طریق سوراخی که در سنبه وجود دارد، وارد محفظه لوله می‌شود. در ادامه با پیشروی سنبه و افزایش فشار در لوله، لوله به سمت جلو حرکت کرده و بطور همزمان مقطع مربعی و شعاع خم قالب در لوله ایجاد می‌شود. فشار سیال موجود در محفظه قالب از ایجاد چروک در قطعه جلوگیری می‌کند.

برای تامین فشار اولیه از یک واحد هیدرولیکی استفاده شده است که قابلیت اعمال فشار تا حداکثر ۳۰ مگاپاسکال را دارد و دبی آن توسط یک پیچ تنظیم، قابل تغییر است. برای تنظیم فشار داخل مخزن، از یک مدار هیدرولیکی استفاده شده است. این مدار از یک شیر کنترل فشار برای تنظیم فشار نهایی، یک فشار سنج جهت نشان دادن مقدار فشار داخل لوله، یک شیر یک طرفه، سه راهی و اتصالات هیدرولیکی تشکیل می‌شود. شکل ۶ تجهیزات سیستم هیدرولیکی تامین فشار را نشان می‌دهد.

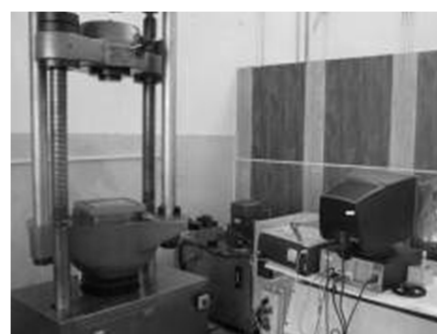
۲- مراحل آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی، از یک دستگاه آزمایش اونیورسال DMG^۱ با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن که در شکل ۲ نشان داده شده است، استفاده شد. کلیه حرکات و تنظیمات این دستگاه دارای قابلیت کنترل با کامپیوتر بوده و سرعت آن تا ۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه قابل تغییر می‌باشد. آزمایش‌ها در سرعت ثابت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه انجام شده است. برای تولید لوله جدار نازک، از ورق مسی با ضخامت اولیه ۲ میلی‌متر و قطر اولیه ۴۰ میلی‌متر استفاده شد. جدول ۱ خواص مکانیکی ورق مورد نظر را نشان می‌دهد.

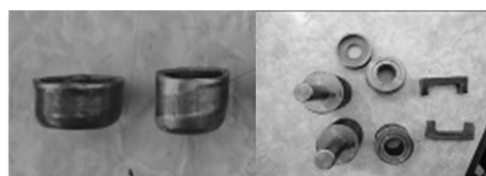
لوله جدار نازک مورد استفاده در فرآیند خم‌کاری، از طریق دو مرحله کشش عمیق و چهار مرحله اتوکاری تولید شد. شکل ۳ مجموعه قالب‌های کشش عمیق مرحله‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. پس از اتمام فرآیند کشش عمیق، با انجام چهار مرحله اتوکاری، از ضخامت لوله کاسته شده و به طول آن افزوده شد. عملیات آنیل کردن به منظور کاهش میزان کار سختی در لوله، قبل از هر مرحله اتوکاری، صورت گرفته است. شکل ۴ مجموعه قالب‌های فرآیند اتوکاری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق مسی مورد استفاده [۱۳]

مدول	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m ³)
الاستیسیته (GPa)			
۱۱۷	۱۲۳	۰/۲۳	۸۹۴۰



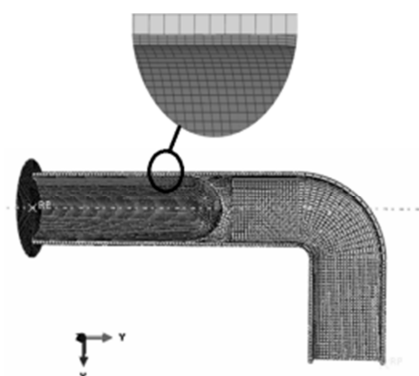
شکل ۲- دستگاه آزمایش اونیورسال (DMG)



شکل ۳- اجزای قالب کشش عمیق مرحله یک و دو، به همراه نمونه‌های تولیدی در دو قالب کشش

^۱ Denison and Mayes Group(DMG)

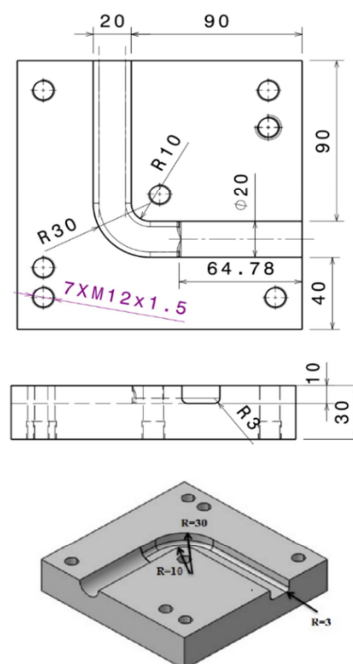
صورت پوسته‌ای صلب و گسسته در نرم افزار مدل سازی شده‌اند. خصوصیات مکانیکی لوله مطابق جدول ۱ به نرم‌افزار معرفی شده است. این لوله مسی استفاده شده در شبیه سازی، همسانگرد فرض شده است. این فرض با نتایج حاصل از نمونه‌های تولید شده سازگاری داشته است، چرا که هیچ اثری از گوشواره‌ای شدن بر روی استوانه‌های کشش عمیق یافته ملاحظه نگردید. برای تعریف تماس اجزا از تماس سطح به سطح و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی تعریف شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، از مدل اصطکاکی کولمب و شرایط تماسی پنالتی برای سطوح استفاده شده است. براساس نتایج حاصل از شبیه سازی و تجربی و بررسی‌های انجام شده، ضریب اصطکاک بین لوله و قالب خم ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. در قسمت بارگذاری، فشار سیال با استفاده از قید فشار به محفظه داخلی لوله وارد شده است. قالب و سنبه با المان R3D4 و لوله با المان C3D8R با اندازه المان ۰/۰۰۰۶ شبکه بندی شده‌اند. همچنین تعداد سه المان در راستای ضخامت لوله در نظر گرفته شد. شکل ۷، مدل مونتاژ شده و نحوه مش بندی اجزا در شبیه سازی فرآیند خم‌کاری را نشان می‌دهد.



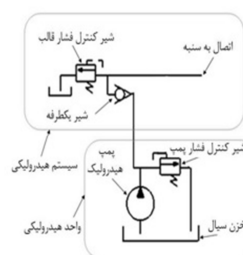
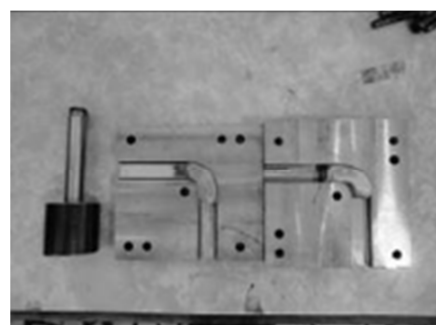
شکل ۷- مدل مونتاژ شده و نحوه مش بندی اجزا در شبیه سازی فرآیند خم‌کاری

۴- نتایج و بحث

در فرآیند خم‌کاری، ضخامت لوله در ناحیه دیواره داخلی به دلیل وجود کرنش‌های فشاری افزایش می‌یابد و بنابراین احتمال ایجاد چروک در این ناحیه وجود دارد. در دیواره خارجی نیز به دلیل وجود کرنش‌های کششی، کاهش ضخامت رخ می‌دهد. همچنین، در امتداد خم امکان پر شدن کامل قالب توسط لوله وجود ندارد، یعنی شعاع مقطع مربعی لوله‌ی تولیدی با شعاع گوشه‌های قالب برابر نخواهد بود. در فرآیند خم‌کاری با مقطع غیردایروی، میزان فشار داخلی تاثیر زیادی بر کیفیت و میزان شکل‌دهی دارد، زیرا اگر فشار داخلی زیاد باشد امکان پارگی در دیواره خارجی وجود دارد و اگر این فشار کم باشد امکان پر کردن کامل قالب توسط لوله کاهش می‌یابد و لوله شکل کامل مقطع قالب را به خود نمی‌گیرد. در فرآیند جدید ارائه شده، در دیواره داخلی لوله به دلیل اعمال فشار سیال در قسمت انتهای لوله در حین خم‌کاری، علاوه بر کرنش‌های فشاری،



شکل ۵- قالب خم هیدروفرمینگ

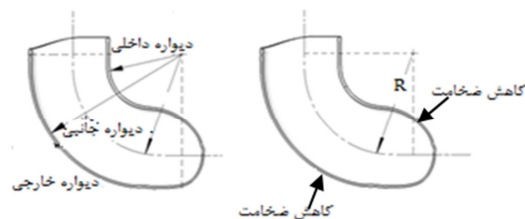


شکل ۶- تجهیزات سیستم هیدرولیکی تأمین فشار و مدار اعمال و کنترل فشار



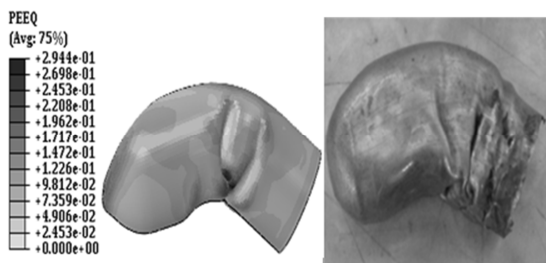
۳- مراحل شبیه سازی

در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.10.1 برای شبیه سازی فرآیند خم‌کاری استفاده شده است. به علت تقارن لوله، فقط نیمی از هندسه آن در نرم افزار مدل شده است. در شبیه سازی فرآیند، لوله به صورت سه بعدی توپر و شکل‌پذیر و اجزای قالب به

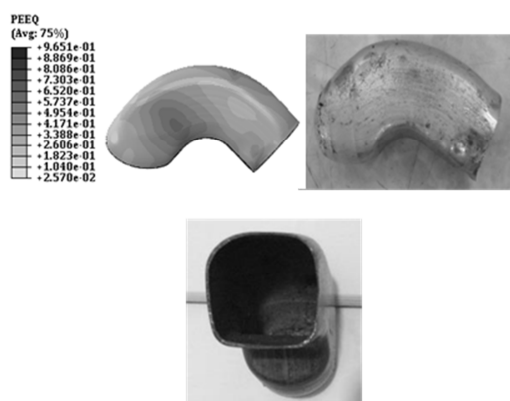


شکل ۸- ناحیه‌های بحرانی لوله در فرآیند خم جدید

ابتدا به منظور مشاهده نحوه شکل‌گیری نمونه در خم ایجادشده، فشار ۵ مگاپاسکال به سطح داخلی لوله اعمال گردید. با اعمال فشار سیال به سطح داخلی لوله و با جابجایی سنبه، نمونه شروع به شکل‌گیری کرده و تا حدودی شکل قالب را به خود می‌گیرد اما در این فشار چروک در ناحیه دیواره داخلی لوله مشاهده می‌شود و لوله شکل کامل قالب را به خود نمی‌گیرد. این چروکیدگی در شکل ۹ نشان داده شده است. به‌منظور بهبود چروک در لوله و شبیه‌سازی در فشارهای بالا تر صورت گرفت، مشاهده شد با افزایش فشار میزان چروک در قطعه کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد در فشار سیال ۱۵ مگاپاسکال قطعه سالم شکل می‌گیرد. جهت تایید شبیه‌سازی قطعه به صورت تجربی در این فشار شکل داده شد. قطعه شکل داده شده در شبیه‌سازی و تجربی در این فشار در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹- لوله شکل داده شده در ۵ مگاپاسکال



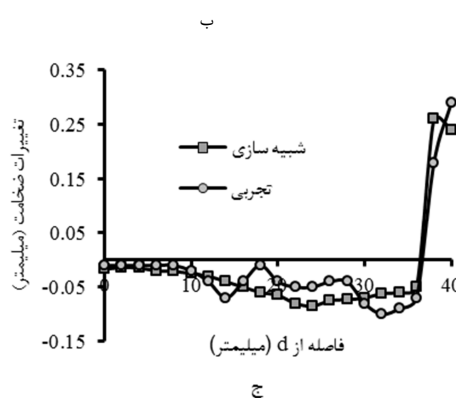
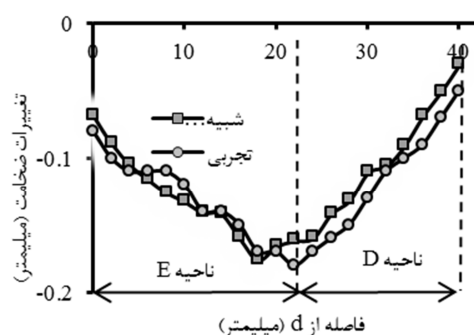
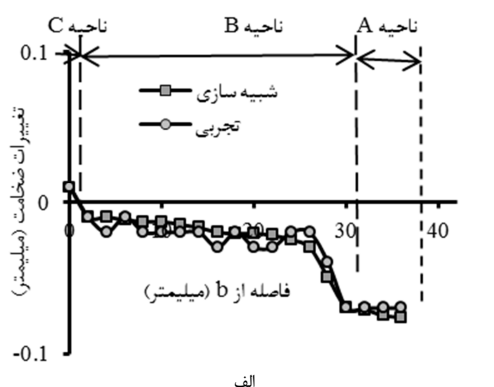
شکل ۱۰- لوله شکل داده شده در فشار ۱۵ مگاپاسکال

کرنش‌های کششی نیز ایجاد می‌شود. مقدار کرنش کششی به فشار سیال بستگی دارد که ممکن است در فشارهای بالا در این ناحیه کرنش‌های کششی از کرنش‌های فشاری بیشتر شده که باعث ایجاد نازک‌شدگی در این ناحیه می‌شود. پژوهش‌های بسیاری برای کاهش میزان چروکیدگی و نازک‌شدگی در ناحیه بحرانی لوله و همچنین پر شدن کامل قالب توسط لوله انجام شده است اما پژوهشگران تاکنون نتوانستند چروک احتمالی و نازک‌شدگی در این نواحی را با در نظر گرفتن مقطع مربعی لوله، بطور کامل برطرف کنند. در این پژوهش، قطر لوله ۲۰ میلی‌متر، شعاع خم ۲۰ میلی‌متر و نسبت R/D برابر یک است. لوله در حین خم شدن تغییر مقطع داده و علاوه بر خمکاری مقطع آن از دایره به مربعی تبدیل می‌شود. ضخامت کم لوله (0.5 میلی‌متر)، شکل‌دهی را مشکل‌تر می‌کند و امکان پارگی و چروک را در لوله افزایش می‌دهد. یکی دیگر از پارامترهایی که باید در حین خم‌کاری به آن توجه کرد، تغییر در ضخامت دیواره لوله است. در روش جدید ارایه شده در این پژوهش، با انتها بسته کردن لوله، با وجود دشوار بودن شرایط شکل‌دهی خصوصاً برای مقطع مربعی، چروک در دیواره داخلی لوله بطور کامل برطرف شده و تغییر ضخامت نیز تا حدود زیادی کاهش می‌یابد. در فرآیند خم‌کاری فشاری جدید ارایه شده به روش هیدرولیکی، ابتدا فشار در سطح داخلی لوله اعمال می‌شود. سپس، با جابجایی سنبه و اعمال همزمان فشار سیال در سطح داخلی لوله، عملیات خم‌کاری صورت می‌گیرد.

۴-۱- بررسی فشار شکل دهی

با توجه به نوع فرآیند، فشار شکل‌دهی یکی از پارامترهای اصلی در فرآیند خم‌کاری به‌شمار می‌آید. از این رو، شکل‌گیری لوله در قالب با فشارهای ۵، ۱۵ و ۱۷ مگاپاسکال در شعاع خم ۲۰ میلی‌متر و قطر لوله ۲۰ میلی‌متر به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در فرآیند خم‌کاری بررسی شده در این پژوهش، بطور کلی ضخامت لوله خم‌کاری شده به دلیل ماهیت این فرآیند که لوله با مقطع دایره-ای به لوله با مقطع مربعی تبدیل می‌شود و در واقع با وارد شدن لوله در قالب خم با اعمال فشار داخلی، لوله منبسط می‌شود و در تمام وجه‌های آن تحت کشش قرار می‌گیرند، ضخامت لوله نسبت به حالت اولیه آن کاهش می‌یابد. ضخامت لوله در ناحیه دیواره خارجی نیز به دلیل وجود کرنش‌های کششی، کاهش بیشتری نسبت به دیواره داخلی که تحت کرنش‌های فشاری قرار دارد، می‌یابد. همچنین، در ناحیه خم، قطعه در فشارهای پایین شکل کامل قالب را به خود نمی‌گیرد، که با افزایش فشار داخلی لوله این مشکل برطرف می‌شود. البته باید توجه داشت که افزایش زیاد فشار داخلی لوله موجب افزایش کرنش کششی در ناحیه دیواره خارجی لوله شده و لوله دچار پارگی می‌شود. در شکل ۸ ناحیه‌های بحرانی لوله در فرآیند خم‌کاری فشاری هیدروفرمینگ نشان داده شده است. این ناحیه‌ها شامل ناحیه‌هایی است که در اثر کاهش ضخامت در لوله پارگی رخ می‌دهد.

این حالت در دیواره های داخلی، خارجی و جانبی، به ترتیب ۴، ۷ و ۱۵ درصد است.

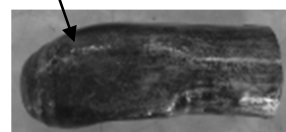


شکل ۱۳- منحنی توزیع ضخامت لوله در فشار ۱۵ مگاپاسکال الف- دیواره داخلی ب- دیواره خارجی ج- دیواره جانبی

همانطور که در شکل (۱۳- الف) مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش در حجم لوله تولیدی، ضخامت دیواره‌های لوله خم‌کاری شده مطمئناً کمتر از ضخامت اولیه لوله می‌باشد، در نتیجه در نواحی دیواره داخلی که تحت تنش فشاری بیشتری نسبت به نواحی دیواره خارجی قرار دارد، تنش کششی ناشی از افزایش حجم بر تنش فشاری غلبه کرده و در این نواحی هم کاهش ضخامت لوله خم‌کاری شده وجود خواهد داشت. در این نواحی با افزایش فاصله از انتهای آزاد (b)، کاهش ضخامت با شیب ثابت در نمونه رخ خواهد داد که با ورود در ناحیه A، این کاهش ضخامت

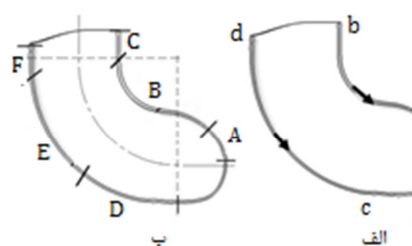
همانطور که ملاحظه شد، چروک در لوله شکل داده شده در فشار ۱۵ مگاپاسکال به طور کامل برطرف شد و دیواره لوله به طور کامل شکل قالب را به خود گرفته است. افزایش بیشتر فشار از ۱۵ تا ۱۷ مگاپاسکال تاثیری بر شکل ظاهری لوله نداشته است اما در فشار ۱۷ مگاپاسکال باعث ایجاد پارگی در دیواره خارجی لوله شده است. شکل قطعه شکل داده شده در فشار ۱۷ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. همانطور که شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، به علت بالا بودن فشار سیال، کرنش‌های کششی بیش از حد ایجاد شده و لوله در این ناحیه دچار پارگی شده است.

ناحیه پارگی



شکل ۱۱- لوله شکل داده شده در فشار ۱۷ مگاپاسکال

افزایش فشار، باعث افزایش نیروی عمودی و در نتیجه افزایش اصطکاک بین لوله و جداره قالب و سخت‌تر شدن جریان لوله در قالب می‌شود. از طرفی، افزایش فشار باعث افزایش کرنش کششی در انتهای لوله نیز می‌گردد. بررسی‌ها نشان داد که در فشار ۱۷ مگاپاسکال، پارگی در ناحیه کششی دیواره خارجی خم قطعه ایجاد می‌گردد. به منظور بررسی دقیق‌تر، منحنی‌های توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی لوله در ناحیه‌های دیواره داخلی، خارجی و جانبی در فشار ۱۵ مگاپاسکال مورد مقایسه قرار گرفت. برای بررسی توزیع ضخامت در دیواره قطعه‌کار، مطابق با شکل (۱۲- الف) برای دیواره داخلی مسیر ba و برای دیواره خارجی و جانبی مسیر dc انتخاب شده است. همچنین برای بررسی بهتر، مسیرهای یاد شده بر حسب تغییر میزان ضخامت به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده‌اند که در شکل (۱۲- ب) نشان داده شده است.

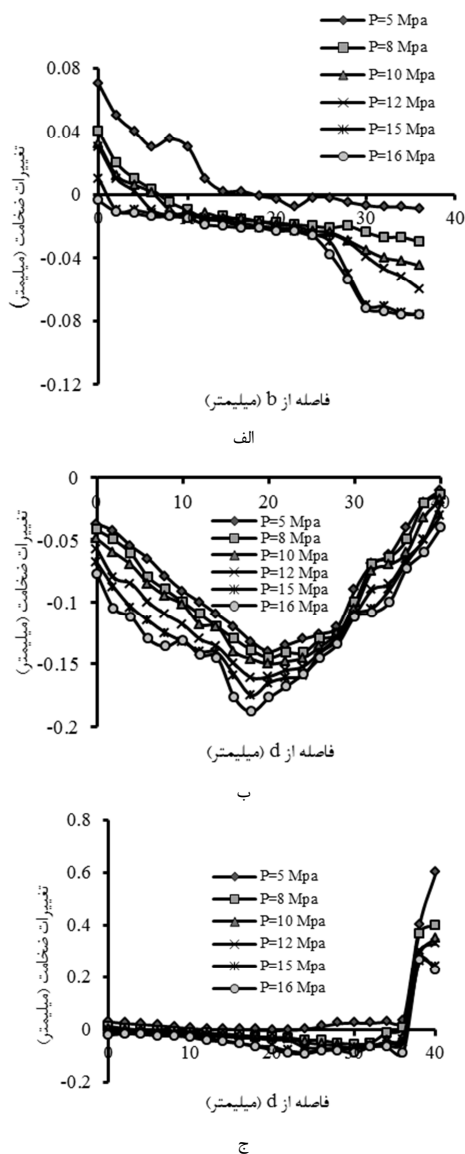


شکل ۱۲- الف- مسیر اندازه‌گیری ضخامت ba و dc ب- ناحیه‌های مورد بررسی در دیواره داخلی، خارجی و جانبی قطعه خم‌شده

ابتدا برای نشان دادن تطابق نتایج برای دیواره داخلی، خارجی و جانبی نمودار تغییرات ضخامت در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی در فشار ۱۵ مگاپاسکال در شکل ۱۳ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود نمودار تجربی و شبیه‌سازی مطابقت خوبی با یکدیگر دارد و میانگین اختلاف بین منحنی‌های توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی در

ناشی از تنش فشاری و انباشته شدن مواد در این ناحیه، ضخامت لوله خم کاری شده از ضخامت اولیه لوله بیشتر می‌شود.

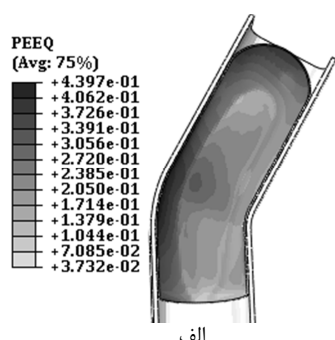
به منظور بررسی دقیق‌تر اثر فشار سیال بر شکل‌دهی لوله، تاثیر تغییر فشار داخلی بر توزیع ضخامت لوله خم‌شده با شعاع خم ۲۰ میلیمتر و ضخامت ۰/۵ میلیمتر در حالت شبیه‌سازی برای دیواره داخلی، خارجی و جانبی لوله در فشارهای ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ مگاپاسکال مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



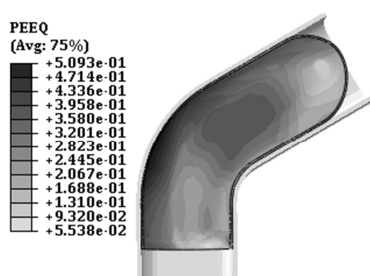
شکل ۱۴- منحنی‌های توزیع ضخامت الف- دیواره داخلی ب- دیواره خارجی و ج- دیواره جانبی در فشارهای مختلف، حاصل از شبیه‌سازی

با افزایش فشار سیال در سطح داخلی قطعه‌کار، میزان نازک‌شدگی در دیواره داخلی لوله افزایش می‌یابد اما مقدار کاهش ضخامت نسبت به ناحیه بحرانی دیواره خارجی کمتر است و پارگی در این ناحیه بوجود

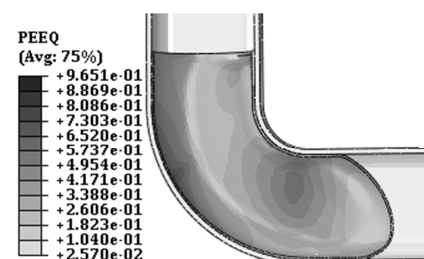
افزایش می‌یابد و در نقطه (a) به کمترین مقدار خود می‌رسد. باید توجه داشت که این کاهش ضخامت نسبت به حداکثر کاهش ضخامت در دیواره خارجی کمتر می‌باشد. در دیواره داخلی در ته لوله در ناحیه A، به دلیل اعمال فشار سیال، کرنش‌های کششی بوجود می‌آید که موجب نازک‌شدگی در این ناحیه نسبت به سایر نواحی موجود در دیواره داخلی می‌گردد. در سر لوله (ناحیه C) که فشار توسط سنبه اعمال می‌گردد، کرنش‌های فشاری وجود دارد که موجب افزایش ضخامت قطعه در این ناحیه می‌شود. بیشترین کرنش کششی در ناحیه داخلی، در نقطه (a) لوله ایجاد می‌گردد و از آن پس کرنش‌های فشاری افزایش یافته و کاهش ضخامت کم می‌شود. همانگونه که در شکل (۱۳-الف) مشاهده می‌شود میزان ضخامت در فاصله ۳۰ میلیمتر از لبه باز لوله (نقطه a در شکل ۱۲-الف) به دلیل افزایش کرنش‌های کششی بیشترین کاهش را در دیواره داخلی داشته است. کاهش ضخامت دیواره در نقطه a در فشار ۱۵ مگاپاسکال برابر با ۰/۰۷ میلیمتر می‌باشد. در ادامه، با افزایش زاویه خم، در ناحیه B میزان کاهش ضخامت کم شده است. از آن پس، با غلبه کرنش فشاری بر کرنش کششی میزان ضخامت در نقطه b، لبه باز لوله به میزان ۰/۰۱ میلیمتر افزایش می‌یابد. شکل (۱۳-ب) منحنی توزیع ضخامت لوله در ناحیه دیواره خارجی را در فشار ۱۵ مگاپاسکال نشان می‌دهد. روند تغییرات ضخامت همانند روند تغییرات ضخامت دیواره داخلی می‌باشد و تنها تفاوت موجود در این است که کرنش‌های کششی ناشی از دیواره خارجی نیز به کرنش‌های اعمال شده اضافه شده و منطقه کاهش ضخامت یافته در قطعه افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۳-ب) مشاهده می‌شود، در ابتدای لوله نیز به دلیل کرنش فشاری ناشی از فشار سنبه، کرنش فشاری بر کرنش کششی غلبه کرده و مقدار نازک‌شدگی کم می‌باشد. با افزایش فاصله از انتهای باز لوله (d) در دیواره بیرونی، ضخامت لوله خم شده کاهش می‌یابد و در مرز نواحی E و D، در فاصله ۲۲ میلیمتر از انتهای باز لوله (d) این کاهش ضخامت به حداکثر میزان خود یعنی ۰/۱۸ میلیمتر می‌رسد. از این نقطه به بعد دوباره این کاهش ضخامت کم می‌شود و در انتهای لوله (C)، ضخامت لوله خم‌کاری شده نزدیک به ضخامت اولیه لوله می‌شود. شکل (۱۳-ج) منحنی توزیع ضخامت لوله در دیواره جانبی را در فشار ۱۵ مگاپاسکال نشان می‌دهد. روند تغییرات ضخامت تقریباً همانند روند تغییرات ضخامت دیواره داخلی می‌باشد و تنها تفاوت موجود افزایش ناگهانی ضخامت در انتهای لوله می‌باشد. دلیل این امر، افزایش کرنش فشاری ناشی از تنش فشاری و انباشته شدن مواد در این ناحیه می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۳-ج) مشاهده می‌شود، در ابتدای لوله نیز به دلیل کرنش فشاری ناشی از فشار سنبه، کرنش فشاری بر کرنش کششی غلبه کرده و مقدار نازک‌شدگی کم می‌باشد. با افزایش فاصله از انتهای باز لوله (d)، ضخامت لوله خم شده کاهش می‌یابد و در فاصله ۳۲ میلیمتر از انتهای باز لوله (d) این کاهش ضخامت به حداکثر میزان خود یعنی ۰/۱ میلیمتر می‌رسد. از این نقطه به بعد دوباره این کاهش ضخامت کم می‌شود و در انتهای لوله، به دلیل افزایش کرنش فشاری



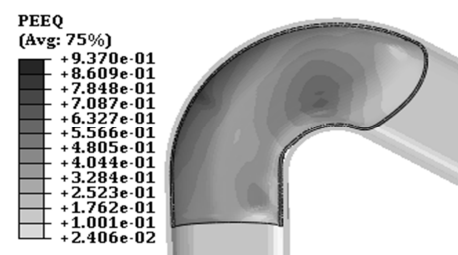
الف



ب



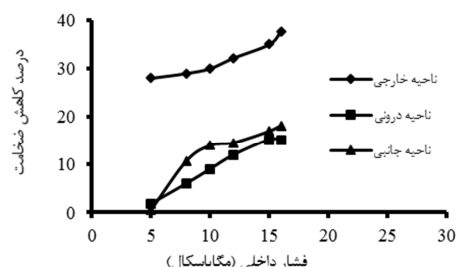
ج



د

نمی‌آید. بیشترین کاهش تغییرات ضخامت در فشارهای ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۰/۰۰۹، ۰/۰۳، ۰/۰۴۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷۶ و ۰/۰۷۶ میلیمتر می‌باشد که ملاحظه می‌شود میزان کاهش ضخامت دیواره با افزایش میزان فشار، افزایش می‌یابد و با توجه به معیار حداکثر نازک‌شدگی با افزایش فشار لوله به پارگی می‌رسد. در دیواره خارجی که منحنی‌های توزیع ضخامت آن در فشارهای مختلف در شکل (۱۴-ب) نشان داده شده است، با افزایش فشار سیال در سطح داخلی قطعه‌کار، میزان نازک‌شدگی در دیواره خارجی لوله افزایش می‌یابد که با ادامه این افزایش فشار، پارگی در این ناحیه بوجود می‌آید. شکل (۱۴-ج) منحنی توزیع ضخامت لوله در دیواره جانبی را در فشارهای مختلف نشان می‌دهد. روند تغییرات ضخامت تقریباً همانند روند تغییرات ضخامت دیواره داخلی می‌باشد.

شکل ۱۵ درصد کاهش ضخامت را در ناحیه‌های بحرانی دیواره داخلی، خارجی و جانبی لوله در فشارهای مختلف حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار تغییرات ضخامت در ناحیه‌های بحرانی دیواره داخلی، خارجی و جانبی لوله افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش فشار داخلی لوله، درصد کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. این افزایش در کاهش درصد ضخامت برای دیواره خارجی نسبت به دو دیواره دیگر بسیار بیشتر است به گونه‌ای که درصد کاهش ضخامت در فشار ۱۰ مگاپاسکال برای دیواره داخلی حدود ۹٪ بوده و برای دیواره خارجی در حدود ۳۰٪ می‌باشد. همچنین در دیواره داخلی با افزایش فشار درون لوله درصد کاهش ضخامت لوله افزایش می‌یابد. این روند افزایش درصد کاهش ضخامت در دیواره لوله با افزایش فشار در دو دیواره دیگر خارجی و جانبی هم مشاهده می‌شود.

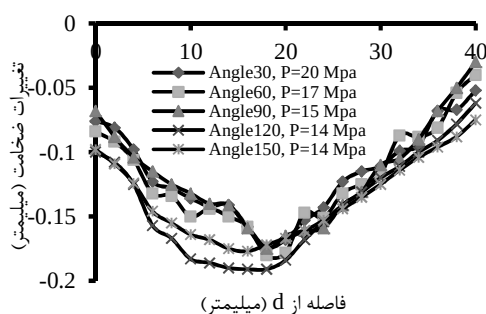


شکل ۱۵- درصد کاهش ضخامت در قطعه در فشارهای مختلف در ناحیه دیواره داخلی، خارجی و جانبی

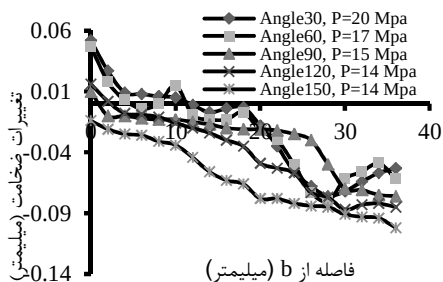
۴-۲- تاثیر زاویه خم

تاثیر تغییر زاویه خم قالب در شعاع قالب به قطر لوله ثابت و مساوی یک ($R/D=1$)، بر فشار شکل‌دهی لوله و تغییرات ضخامت لوله در دیواره داخلی، خارجی و جانبی با استفاده از چندین قالب با زاویه خم مختلف ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه بصورت شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. با انجام این شبیه‌سازی فشار شکل‌دهی برای زاویه‌های خم ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه به ترتیب برابر ۲۰، ۱۷، ۱۵، ۱۴ و ۱۴ مگاپاسکال به دست آمد. شکل ۱۶ لوله‌های شکل داده شده در زاویه‌های مختلف خم قالب را نشان می‌دهد.

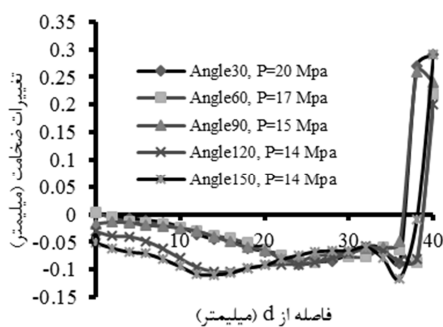
جانبی نشان می‌دهد. مطابق شکل، تغییرات ضخامت در دیواره جانبی لوله منفی بوده و ضخامت آن کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه خم قالب جریان لوله در قالب سخت‌تر می‌شود و موجب بیشتر شدن تغییرات ضخامت در دیواره جانبی می‌شود. بیشترین مقدار تغییرات منفی برای شعاع خم ۱۵۰ درجه و در فاصله ۳۶ میلیمتری از انتهای باز لوله اتفاق می‌افتد و مقدار ضخامت لوله در این نقطه برابر ۰/۳۸ میلیمتر می‌باشد. در انتهای لوله، به دلیل افزایش کرنش فشاری ناشی از تنش فشاری و انباشته شدن مواد در این ناحیه، ضخامت لوله خم‌کاری شده از ضخامت اولیه لوله بیشتر می‌شود.



الف

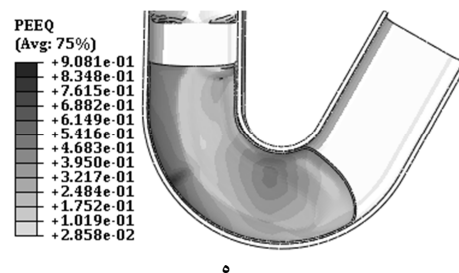


ب



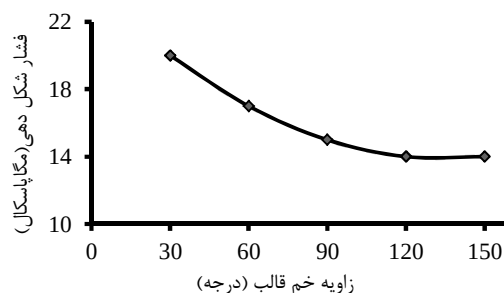
ج

شکل ۱۸- منحنی تغییرات توزیع ضخامت لوله در زاویه خم مختلف قالب به همراه فشار شکل‌دهی الف- دیواره خارجی ب- دیواره داخلی ج- دیواره جانبی



شکل ۱۶- لوله‌های شکل داده شده در زاویه‌های خم قالب الف- ۳۰ درجه، ب- ۶۰ درجه، ج- ۹۰ درجه، د- ۱۲۰ درجه، ه- ۱۵۰ درجه، با نسبت $R/D=1$ با قطر لوله برابر با ۲۰mm

همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است با افزایش زاویه خم قالب، فشار شکل‌دهی کاهش می‌یابد. در زاویه خم قالب بزرگتر، لوله در شعاع بیرونی تحت کرنش کششی بیشتری قرار می‌گیرد و در فشارهای پایین‌تر لوله در شعاع خارجی دچار پارگی می‌شود.



شکل ۱۷- منحنی تغییرات فشار شکل‌دهی بر حسب زاویه خم قالب در قطر لوله ثابت برابر ۲۰mm

با افزایش زاویه خم قالب تغییرات ضخامت در لوله بیشتر می‌شود. شکل ۱۸ منحنی تغییرات توزیع ضخامت لوله در زاویه خم مختلف قالب را در دیواره خارجی، داخلی و جانبی نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۸- الف) با افزایش زاویه خم قالب تغییرات ضخامت در دیواره خارجی لوله افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار تغییرات ضخامت برای شعاع خم ۱۲۰ درجه و در فاصله ۱۸ میلیمتری از انتهای باز لوله اتفاق می‌افتد و مقدار ضخامت لوله در این نقطه برابر ۰/۳۱ میلیمتر می‌باشد. شکل (۱۸- ب) تغییرات توزیع ضخامت لوله در زاویه‌های مختلف خم قالب را در دیواره داخلی نشان می‌دهد. مطابق شکل هر چه از انتهای باز لوله به سمت انتهای بسته آن پیش می‌رویم تغییرات ضخامت لوله منفی‌تر و بیشتر می‌شود. هر چه زاویه خم قالب بیشتر شود تغییرات ضخامت به دلیل کرنش‌های کششی بیشتر، افزایش می‌یابد. براساس شکل در زاویه خم قالب ۱۵۰ درجه تغییرات ضخامت در سراسر طول لوله منفی بوده و در انتهای لوله به کمترین مقدار خود، ۰/۴ میلیمتر می‌رسد. شکل (۱۸- ج) تغییرات توزیع ضخامت لوله در زاویه‌های مختلف خم قالب را در دیواره

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی برای خم‌کاری فشاری لوله جدار نازک فرآیند خم‌کاری هیدرولیکی لوله با مقطع مربعی، با هدف دستیابی به کمترین تغییرات ضخامت در دیواره لوله و در عین حال دستیابی به لوله با سطح مقطع مربعی کامل بطوری که گوشه‌های قالب را بطور کامل پر کند، ارایه شده است. همچنین اثر تغییرات فشار سیال بر توزیع ضخامت لوله در دیواره داخلی، خارجی و جانبی مورد بررسی قرار گرفت و فشار شکل‌گیری در زوایای مختلف خم قالب مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش در زیر آورده شده است:

- ۱- در روش جدید، علاوه بر امکان شکل‌دهی کامل لوله در نسبت شعاع قالب به قطر لوله (R/D) برابر یک، عیوبی نظیر چروکیدگی، نازک‌شدگی بیش از اندازه و عدم پر شدن قطعه در گوشه‌ها برطرف شده است؛
- ۲- در این پژوهش در نتایج تجربی برای خم‌کاری لوله مورد نظر در نسبت R/D برابر یک، مشاهده شد که در فشارهای کم (کمتر از ۱۰ مگاپاسکال) در قطعه، در ناحیه خم چروک با عمق زیاد ایجاد می‌شود. با افزایش فشار میزان چروک کم و کمتر می‌شود و در فشار ۱۵ مگاپاسکال عیوب در نمونه حذف شده و نمونه بطور کامل شکل قالب را به خود گرفته است. در فشارهای بالاتر از ۱۵ مگاپاسکال میزان تغییرات ضخامت افزایش می‌یابد و بالاخره نمونه در فشار ۱۷ مگاپاسکال در دیواره خارجی دچار پارگی می‌شود؛
- ۳- با افزایش فشار تغییرات ضخامت در ناحیه‌های بحرانی دیواره داخلی، خارجی و جانبی لوله افزایش می‌یابد. این افزایش در کاهش درصد ضخامت برای دیواره خارجی به نسبت دو دیواره دیگر بسیار بیشتر است به گونه‌ای که درصد کاهش ضخامت در فشار ۱۰ مگاپاسکال برای دیواره داخلی حدود ۹٪ بوده و برای دیواره خارجی در حدود ۳۰٪ می‌باشد؛
- ۴- در دیواره داخلی با افزایش فشار درون لوله درصد کاهش ضخامت لوله افزایش می‌یابد. این روند افزایش در درصد کاهش ضخامت در دیواره لوله با افزایش فشار در دو دیواره دیگر خارجی و جانبی هم مشاهده می‌شود؛
- ۵- نمونه‌ها در شعاع قالب به قطر لوله ($R/D=1$) ثابت مساوی یک، با زاویه خم قالب مختلف ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه به ترتیب در فشارهای ۲۰، ۱۷، ۱۵، ۱۴ و ۱۴ مگاپاسکال شکل می‌گیرد که با افزایش زاویه خم قالب فشار شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Lang L.H., et al, Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 151, PP. 165-177, 2004.
- [2] Yang H., Y. Lin, Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 152, PP. 363-369, 2004.
- [3] Fang J., Lu S., Wang K., Xu J., Xu X., Zh. Yao, Effect of Mandrel on Cross-Section Quality in Numerical Control Bending Process of Stainless Steel 2169 Small Diameter Tube, Advances in Materials Science and Engineering 2013, 9pages, 2013.
- [4] Zhiqianga J., Mei Zh., He Y., Xudongb X., Guangjun L., Deformation Behavior of Medium-strength TA18 High-

pressure Tubes During NC Bending with Different Bending Radius, Chinese Journal of Aeronautics Vol. 24, pp. 657-664, 2011.

- [5] Zeng, Y, Li. Z, Experimental research on the tube push-bending process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122, pp.237-240, 2002.
- [6] Zhang Y., Redekop D., Shell element simulation of the push method of tube bending, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 17, PP. 301-304, 2006.
- [7] Yang J.b., Joen B.h., Oh S.l., the bending technology of a hydroforming process for an automotive part, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 175-181, 2001.
- [8] Yeong-Maw Hwang, Taylan Altan, Finite element analysis of tube hydroforming processes in a rectangular die, Journal of Finit Elements in Analysis and Design, Vol. 39, pp.1071-1082, 2003.
- [9] Xiao. X. T., et al, study on varying curvature push-bending technique of rectangular section tube, Journal of Materials processing Technology, Vol. 187-188, pp. 476-479, 2007.
- [10] Wang J., Agarwal R., Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, pp. 598-605, 2006.

[۱۱] عبدالواحد کمی، بیژن ملائی داریانی، فرید رضا بیگلری، تحلیل امان محدود فرآیند خم‌کاری فشاری لوله‌های مقطع مستطیلی، نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، بیرجند، ۱۳۸۷.

[۱۲] سحرناز منتظری، عبدالحمید گرچی، محمد بخشی، یک روش جدید برای خم‌کاری فشاری لوله جدار نازک در خم‌کاری هیدرولیکی، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۱۲، ص ۱۹۸-۱۹۰، ۱۳۹۳.

[۱۳] سحرناز منتظری، بررسی تجربی و شبیه سازی بر روی فرآیند خم‌کاری لوله جدار نازک به روش هیدروفورمینگ و تولید لوله‌های جدار نازک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مکانیک، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۳.