

بررسی تجربی و شبیه‌سازی تاثیرات فشار بر توزیع ضخامت و شکل سطح مقطع نهایی لوله در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی

چکیده

در میان انواع روش‌های جدیدی که جهت تولید خم مطلوب مورد استفاده قرار گرفته‌اند، خم‌کاری کششی دورانی به عنوان معمول‌ترین و تحت کنترل‌ترین روش خم‌کاری لوله شناخته شده است. در این پژوهش، خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی لوله آلومینیومی با آلیاژ ۶۰۶۳ به منظور بررسی تاثیر نوع قالب خم‌کاری بر روی کیفیت خم تولید شده از نظر توزیع ضخامت و شکل سطح مقطع لوله با دو نسبت شعاع خم ثابت (۱ برابر و ۱/۶ برابر قطر) و شعاع خم متغیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثر فشار سیال داخلی بر کیفیت لوله‌های خمیده بصورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی گردید. فاکتورهای ارزیابی کیفیت لوله خمیده شده، بیضوی شدن و تغییرات ضخامت لوله بوده است. نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین مقدار بیضوی شدن سطح مقطع در خم‌کاری با شعاع ثابت در زاویه ۳۳ درجه و برای خم شعاع متغیر در زاویه ۲۲/۵ درجه رخ می‌دهد. با بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی، مشاهده گردید که حداکثر میزان بیضوی شدن در حالت بدون استفاده از فشار سیال داخلی در نسبت شعاع خم ۱، ۱/۶ و شعاع خم متغیر، بترتیب ۴۸/۴۶٪، ۱۷/۶۸٪ و ۱۹/۶٪ می‌باشد. در حالیکه در فشار ۳/۸ مگاپاسکال، حداکثر میزان بیضوی شدن در نسبت شعاع خم ثابت ۱/۶ و شعاع متغیر بترتیب ۱۰/۸۲٪ و ۱۱/۲۲٪ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها:

خم‌کاری، فشار سیال هیدروفرمینگ، توزیع ضخامت لوله، شبیه‌سازی خم‌کاری

Experimental and Numerical Investigation of Pressure-Induced Changes in Tube Thickness Distribution and Cross-Section during Rotary Bending

ABSTRACT

Among the innovative techniques employed to achieve desired bends, rotational tensile bending has emerged as the most prevalent and controlled method for tube bending. This research focuses on the hydraulic rotational tensile bending of aluminum tubes made from alloy 6063. The primary objective is to examine the influence of the bending die type on the quality of the resulting bend, particularly in terms of thickness distribution and cross-sectional shape. The study involves two constant bend radius ratios as well as variable bending radii. The impact of internal fluid pressure on the quality of the bent tubes is investigated. The quality assessment criteria for the bent tubes include ovality and variations in tube thickness. The obtained results demonstrate that the highest level of ovality in the cross-section occurs during fixed-radius bending at an angle of 33 degrees, while variable-radius bending at an angle of 22.5 degrees exhibits maximum ovality. Furthermore, the findings from the thickness distribution analysis reveal that, under constant pressure conditions, the curvature of the bend radius significantly influences thickness distribution. By examining how the tube is formed in the process of rotational tensile bending of the tube with internal fluid pressure, it was observed that the maximum amount of ovality in the state without using internal fluid pressure in the bending ratio of 1, 1.6 and variable radius, 48.46%, 17.68% and 19.6% respectively. While at a pressure of 3.8 MPa, the maximum amount of ovality in the bending ratio 1.6 and variable radius is 10.82% and 11.22%, respectively.

Keywords:

Bending, Hydroforming pressure, Thickness distribution, Tube bending simulation

۱- مقدمه

قطعات لوله‌ای به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا امروزه در صنایع مهمی همچون هواپیماسازی، خوردروسازی، نفت و گاز، سازه‌های مکانیکی و ... جهت انتقال سیال، سازه بدنه و ... به صورت وسیعی به کار گرفته می‌شوند [۱]. روش‌های متنوعی برای خم‌کاری لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله پرکاربردترین آن‌ها را می‌توان به خم‌کاری القایی حرارتی [۲]، خم‌کاری فشاری [۳]، خم‌کاری القایی لیزری [۴]، خم‌کاری به همراه سیال [۵] و خم‌کاری کششی-دورانی [۶] تقسیم نمود. در میان این روش‌ها، خم‌کاری کششی دورانی به عنوان معمول‌ترین و تحت کنترل‌ترین روش خم‌کاری لوله شناخته شده است. بطوریکه امروزه حدود ۹۵٪ عملیات خم‌کاری لوله‌ها با این روش انجام می‌شود. چرا که در مقایسه با سایر روش‌های خم‌کاری دارای مزایایی مانند سرعت تولید بالا، دقت خوب، تولید خم با کیفیت مناسب، امکان کنترل جریان ماده در ناحیه خم، بهبود مقاومت و سختی، امکان ایجاد خم‌های متوالی در زوایای مختلف روی یک شاخه لوله و در نتیجه کاهش ضایعات و کاهش هزینه با توجه به کاهش نیروی کار، تجهیزات و مصرف انرژی می‌باشد [۷]. اجزای اصلی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی شامل قالب خم، قالب فشاری، قالب نگهدارنده، قالب جاروب‌کن و مندرل می‌باشد که در این پژوهش به جای مندرل از فشار سیال هیدروفرمینگ به منظور افزایش نسبت کشش، بهبود کیفیت سطحی قطعات، به حداقل رسیدن تغییرات ضخامتی در قطعات و کاهش هزینه استفاده شده است.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی به بررسی خم‌کاری لوله با شعاع خم بحرانی پرداخته‌اند. بدین منظور در ادامه به بررسی مهمترین تحقیقات انجام گرفته در زمینه خم‌کاری لوله پرداخته شده است. ژبو و همکاران [۸] اثر قالب شعاع متغیر را بر کیفیت خم‌کاری لوله آلومینیومی با مقطع مستطیلی جدار نازک در فرآیند خم‌کاری فشاری به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان از توزیع ضخامت تقریباً یکنواخت در ناحیه داخلی و خارجی شعاع خم دارد. تنگ و همکاران [۹] اثر نیروی فشاری و تقویت‌کننده سطح را بر روی نازک‌شدگی دیواره و دو پهنی سطح مقطع لوله مسی در خم‌کاری کششی دورانی مورد بررسی قرار دادند. این محققان اذعان داشتند که سیستم تقویت‌کننده سطح، یک تکنیک جدید است که منجر به بهبود کیفیت شکل‌دهی در خم‌کاری کششی دورانی از طریق جابجای قالب فشار می‌شود. نتایج نشان داد که سیستم تقویت‌کننده عیب نازک‌شدگی و فروپاشی سطح مقطع را به طور همزمان کاهش می‌دهد و قادر است شرایط جریان ماده در قسمت خم‌کاری بخصوص در قوس بیرونی را بهبود ببخشد. پالوج و همکاران [۱۰] تاثیر فشار سیال داخلی در دماهای بالا را بر کیفیت خم لوله آلومینیومی در خم‌کاری کششی دورانی بررسی نمودند. آن‌ها از روغن داغ تحت فشار به جای مندرل استفاده کردند. نتایج نشان داد که فشار داخلی و دما اثر قابل توجهی روی کیفیت سطح مقطع لوله‌های آلومینیومی دارد. همچنین افزایش فشار داخلی، عدم گردی سطح مقطع و ضخیم‌شدگی دیواره را کاهش می‌دهد. به علاوه تاثیر فشار داخلی و دما بر روی نازک‌شدگی بسیار بیشتر از تاثیر آن روی ضخیم‌شدگی

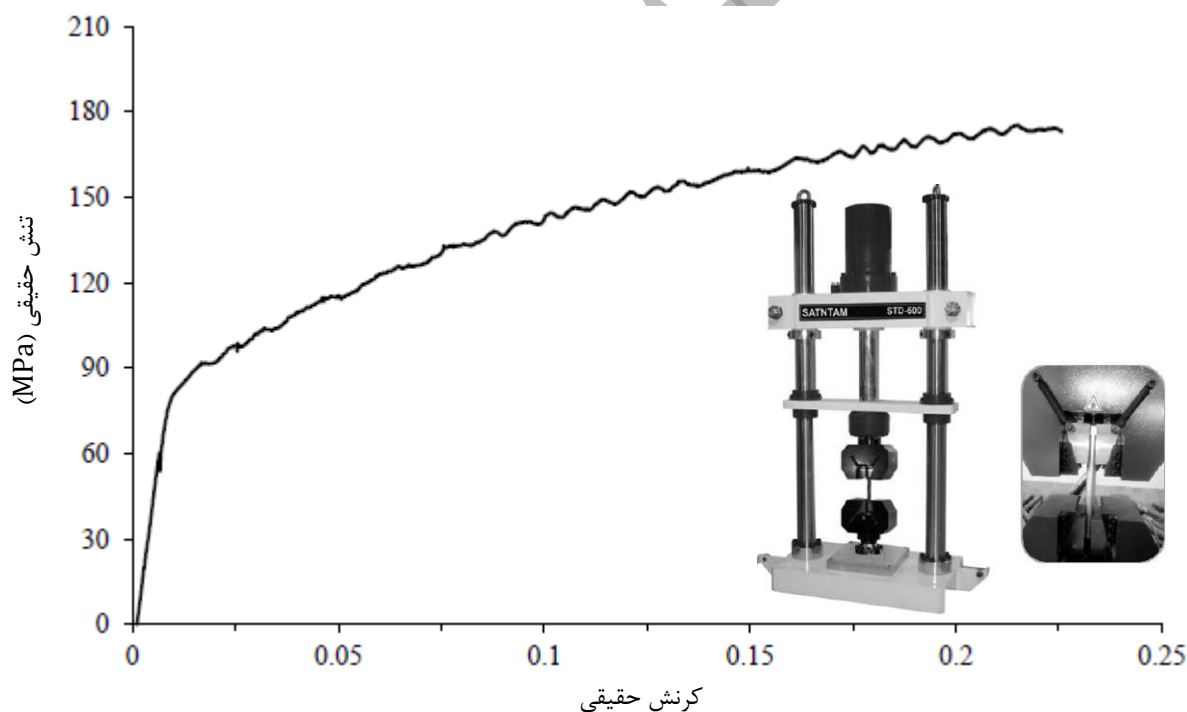
است. در ادامه پژوهش این محققان [۷] به ارائه یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی پارامترهای فرآیند بر خم‌کاری لوله تحت فشار سیال داخلی پرداختند. در این مدل با در نظر گرفتن تاثیر جابجایی تار خنثی بر توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله شکل داده شده و همچنین استفاده از روابط مناسب، پیش‌بینی‌های نسبتاً دقیقی بدست آمده که با مقایسه نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی اثبات شده است. مدانلو و همکاران [۱۱] از روش بهینه‌سازی MCDM برای انتخاب بهترین حالت از لوله‌های خمکاری شده آلومینیوم تحت فشار و شرایط عملیات حرارتی مختلف پرداخته‌اند. از دو روش آنالیز تاپسیس و مورا استفاده نمودند که هر دو حالت گزینه یکسانی را برای بهترین حالت از پارامترهای ورودی پیشنهاد نموده است. در ادامه [۱۲] این محققان به بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی پرداخته‌اند. با استفاده از فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌های آلومینیومی نمونه اولیه، آنیل شده و پیرسازی مصنوعی شده در فشارهای سیال مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که عملیات حرارتی و فشار سیال تاثیر بسزایی در کیفیت لوله‌های خم شده دارند. الیاسی و همکاران [۱۳] مقدار بیضوی شده و توزیع ضخامت را در شکل‌دهی لوله در شعاع خم ثابت و متغیر، بدون در نظر گرفتن فشار سیال بررسی نمودند. نتایج نشان از بهبود شکل‌دهی در خمکاری با شعاع متغیر بوده است. آشتیانی و همکاران [۱۴] به مطالعه تجربی و عددی تاثیرات عملیات حرارتی بر روی خمکاری لوله‌های آلومینیومی پرداختند. این محققان زاویه و شعاع خم را متغیر در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که شرایط عملیات حرارتی تاثیرات مطلوبی بر نحوه شکل‌گیری لوله‌های آلومینیومی داشته است.

مقدار فشار داخلی سیال هیدرولیک بر شکل سطح مقطع لوله‌ها و همچنین شکل‌گیری، پارگی و توزیع ضخامت لوله‌ها پارامتر بسیار مهمی است. تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه خم‌کاری لوله برای حذف یا کاهش مشکلاتی نظیر پدیده چروکیدگی در شعاع داخلی لوله، تغییرات ضخامت زیاد در دیواره لوله و بیضوی شدن سطح مقطع انجام شده است. با انتخاب درست پارامترهای ورودی همچون فشار سیال می‌توان این عیوب را به حداقل رساند. اما در این پژوهش به ارائه یک مدل جدید برای شعاع قالب که تاثیر بسیار زیادی بر کاهش عیوب قطعات تولیدی دارد، انجام شده است. در واقع در این پژوهش اثرات فشار در خم‌کاری کششی دورانی با قالب خم انحنای متغیر بررسی شده که به وسیله آن می‌توان به خم با کیفیت مطلوب و شعاع بحرانی دست یافت. برخلاف روش‌های معمول شکل‌دهی لوله که با یک شعاع ثابت خم می‌شوند، در این روش برای بهبود شکل‌پذیری، لوله به صورت تدریجی از یک شعاع بزرگ به شعاع کوچک (برابر قطر خارجی لوله) تغییر شکل می‌دهد که تاکنون پژوهش‌های بسیار اندکی در این حوزه مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات توزیع فشار بر شکل سطح مقطع و توزیع ضخامت لوله در سه حالت شعاع متغیر، شعاع ثابت یک برابر قطر و

شعاع ثابت ۱/۶ برابر قطر بررسی و مقایسه شده است. فاکتورهای ارزیابی کیفیت لوله در این پژوهش، تغییرات ضخامت و بیضوی شدن لوله‌ها پس از خم‌کاری می‌باشد که پدیده‌های رایج خم‌کاری به شمار می‌آیند.

۲- مراحل تجربی

در این پژوهش از لوله‌های آلومینیومی با گروه آلیاژی ۶۰۶۳ و با قطر خارجی ۲۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱/۸ میلی‌متر استفاده شده است. دلیل استفاده از این آلیاژها، کاربرد گسترده آن در صنایع مختلف به دلیل مقاومت به خوردگی بالا، خاصیت جوش پذیری و قابلیت تغییرات خواص با عملیات حرارتی می‌باشد. به منظور تعیین خواص مکانیکی این آلیاژ و بدست آوردن نمودار تنش-کرنش آن، نمونه‌هایی از لوله طبق استاندارد ASTM-A370 تهیه شده‌اند. برای انجام تست کشش لوله، مطابق استاندارد دو عدد مندرل ساخته شد که در دو انتهای لوله قرار گرفته است. نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه آزمایش کشش انیورسال SANTAM مدل STD-600 با ظرفیت ۶۰ تن، تا حد پارگی کشیده شدند. در شکل ۱ نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از انجام آزمون نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ خواص مکانیکی بدست آمده حاصل از آنالیز نمودار تست کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش لوله آلومینیوم ۶۰۶۳

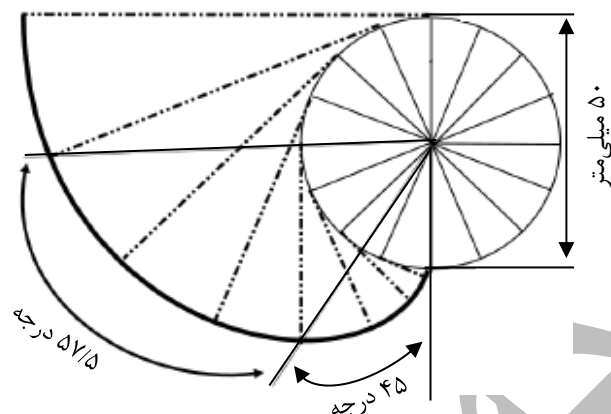
جدول ۱. مشخصات مکانیکی و فیزیکی لوله آلومینیومی مورد استفاده در آزمایش‌ها

پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
استحکام کشش نهایی	UTS	MPa	۱۷۳/۷
تنش تسلیم	σ_y	MPa	۹۰/۱۱
حداکثر ازدیاد طول	-	%	۲۶
نمای کرنش سختی	n	-	۰/۲۸۶
ضریب استحکام	K	MPa	۲۷۴/۳
مدول یانگ	E	GPa	۶۸/۳
ضریب پواسون	ν	-	۰/۳۳
چگالی	ρ	Kg/m ³	۲۹۶۰

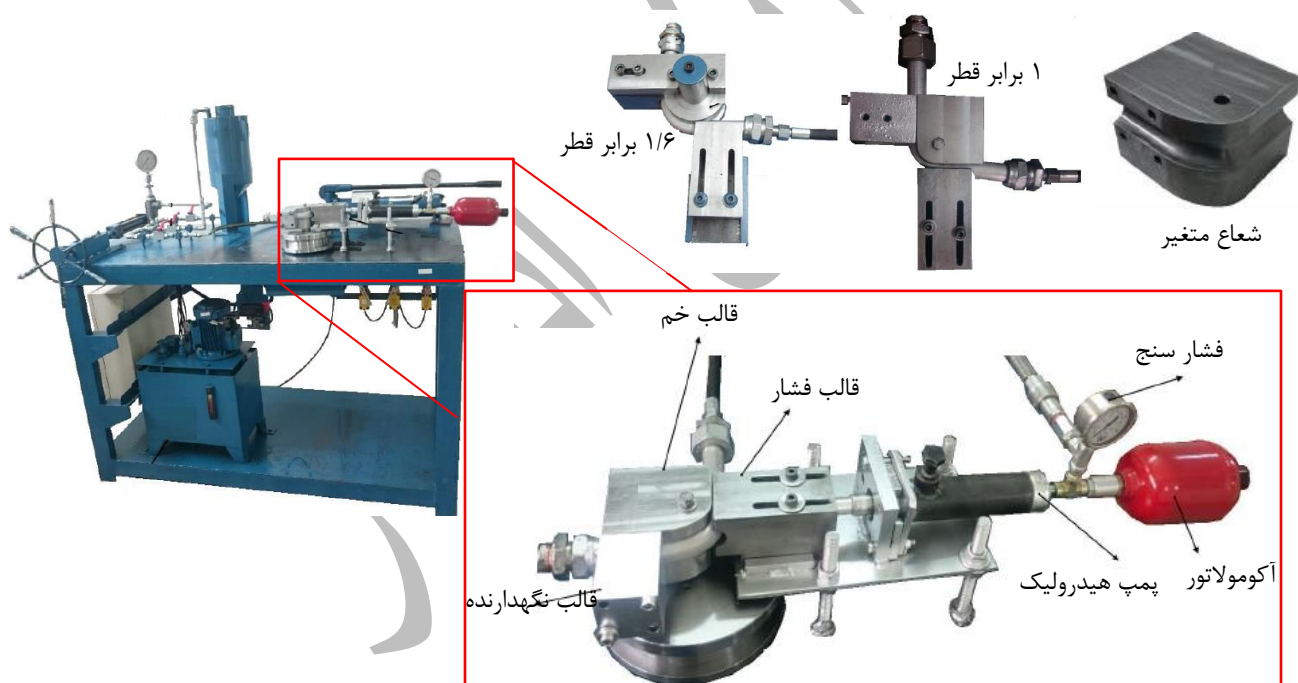
به منظور خمکاری این لوله‌ها از دستگاه خم کاری کششی دورانی همراه با فشار سیال استفاده شده است. سرعت خم کاری در طول فرآیند یکسان در نظر گرفته شده است. سیستم هیدرولیکی این دستگاه قابلیت اعمال فشار تا ۲۰ مگاپاسکال را دارد. برای آب‌بندی دو انتهای لوله از مهره ماسوره و بوش استاندارد استفاده شد. پس از ورود روغن به درون لوله و هواگیری، درپوش آن بسته شده و فشار سیال با استفاده از فشار سنج و شیر اطمینان، روی میزان دلخواه تنظیم گردیده و در تمام طول کورس خم کاری، فشار ثابت در نظر گرفته می‌شود.

دو مدل قالب خم از جنس فولاد MO40 ساخته شده است. یکی قالب با شعاع ثابت با نسبت‌های ۱ برابر قطر و ۱/۶ برابر قطر که شعاع قالب خم‌کن آن‌ها به ترتیب ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر بوده و دیگری قالب با شعاع خم متغیر. برای تعیین منحنی قالب خم با شعاع متغیر، می‌توان از منحنی‌های متفاوت استفاده کرد. هر یک از این منحنی‌ها بسته به نوع طراحی می‌توانند تابع منحنی‌های متفاوتی مانند منحنی‌های اینولوتی، هذلولوی، سیکلوئید، هیپوسیکلوئید بی‌زیر و غیره باشند. در این پژوهش از منحنی اینولوت به عنوان معادله مکان هندسی انحنای متغیر قالب خم استفاده شده است [۸]. نحوه انتخاب انحنای قالب خم بر اساس منحنی اینولوتی در شکل ۲ نشان داده شده است. شعاع متغیر قالب خم به گونه‌ای انتخاب شد که قالب خم بتواند لوله را از نسبت خم ۱/۶ به نسبت ۱ در حین خم کاری برساند. شعاع دایره اینولوت ۲۵ میلی‌متر می‌باشد که برابر با شعاع مینیمم خم کاری است. اگر انحنای متغیر لوله به سوی ۹۰ درجه خم شده باشد، شعاع خم مینیمم ۲۵ میلی‌متر است. در شکل ۳ قالب‌ها با شعاع ثابت و متغیر به همراه تجهیزات آن نشان داده شده است.

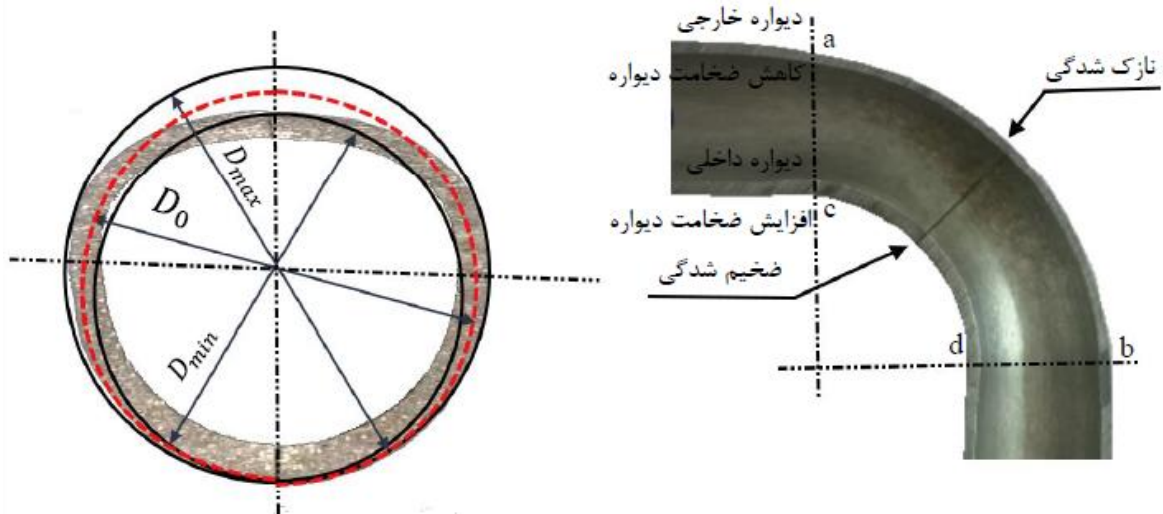
به منظور اندازه‌گیری خروجی‌های مطرح شده در بخش قبل، پس از انجام آزمون‌ها، نمونه‌ها با کمک دستگاه برش سیمی از وسط بریده شده و ضخامت در لبه بریده شده با کمک کولیس اندازه‌گیری می‌گردد. پروفیل سطح مقطع نمونه‌ها نیز عکس برداری شده و میزان بیضوی شدن آن با استفاده از رابطه ۱ نشان داده شده در شکل ۴ محاسبه شده است.



شکل ۲. انتخاب محدوده خمش بر اساس منحنی اینولوت



شکل ۳. دستگاه خمکاری مورد استفاده در پژوهش به همراه مجموعه قالب‌های مورد استفاده در سه حالت



شکل ۴. شماتیکی از عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌ها پس از شکل‌دهی به همراه پارامترهای آن در ناحیه بحرانی

$$\psi = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

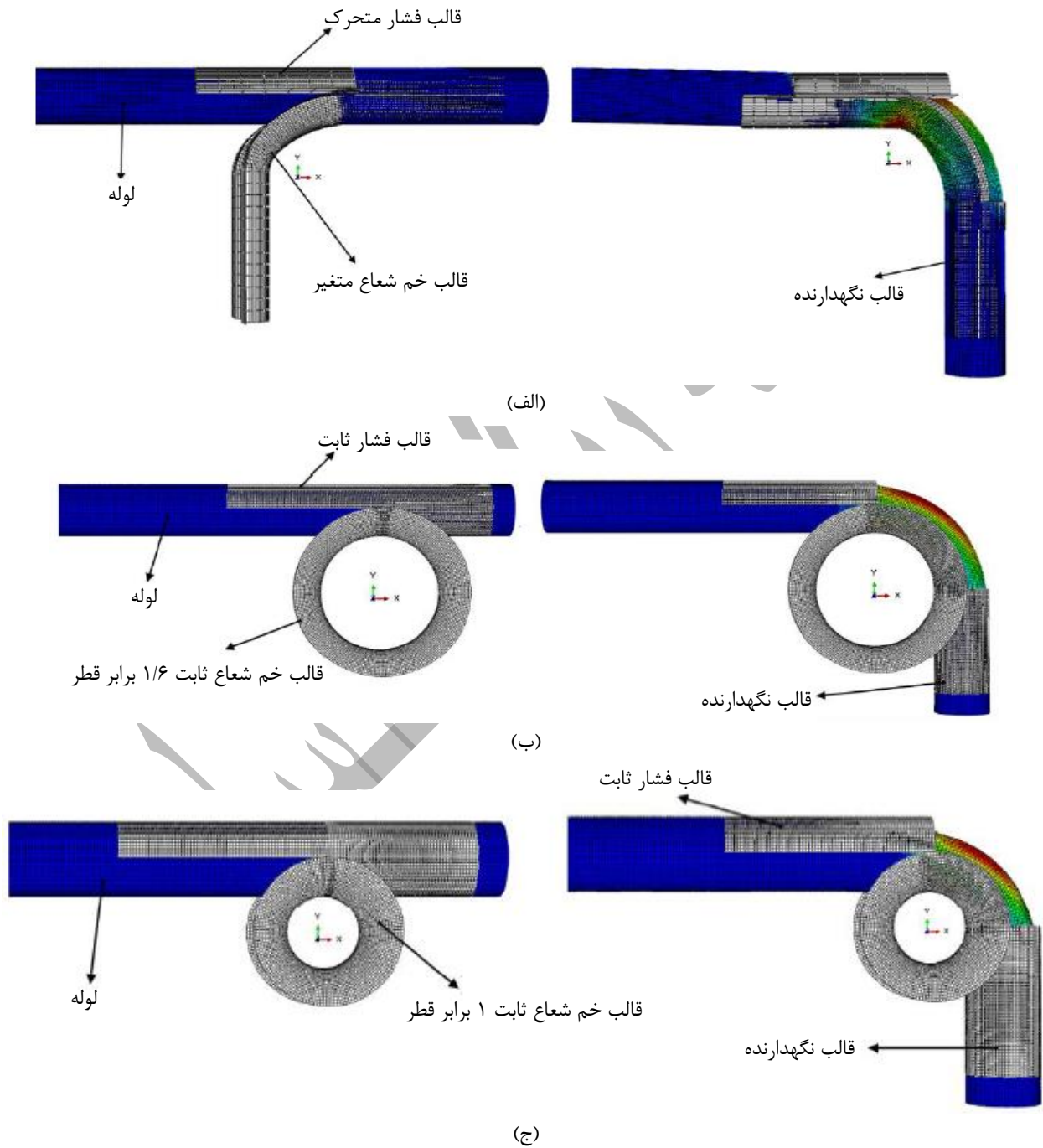
۳- شبیه‌سازی عددی

به منظور تعیین میزان تنش‌ها و کرنش‌های اعمال شده به لوله‌ها و همچنین درک بهتر از نحوه شکل‌گیری لوله‌ها در حین فرآیند، از شبیه‌سازی نمونه در نرم افزار آباکوس بهره گرفته شده است. در این بخش دو نوع قالب شعاع ثابت با نسبت‌های یک برابر و ۱/۶ برابر قطر و قالب با شعاع متغیر مدل‌سازی گردید. با توجه به تقارن مساله، نیمی از مدل طراحی شده و سپس با توجه به صفحه تقارن گسترش داده شد. هندسه لوله به صورت سه‌بعدی پوسته و شکل‌پذیر و سایر اجزای قالب به صورت پوسته‌ای صلب و گسسته در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. قطعه‌کار بصورت الاستو-پلاستیک با کرنش سختی همسانگرد فرض شده است. به منظور تعریف خواص مکانیکی لوله از داده‌های حاصل از تست کشش که در جدول ۱ نشان داده شده استفاده شده و بصورت معادله کرنش سخت سوئیفت (رابطه ۲) به نرم افزار اعمال شده است [۱۵]. با توجه به تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی استفاده شد و همچنین برای کاهش زمان محاسبات، زمان شکل‌دهی ۱ ثانیه در نظر گرفته شد. همواره دقت شده تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل از یک درصد مجموع انرژی داخلی شکل‌دهی تجاوز نکند تا طبیعت شبه استاتیکی مساله حفظ شود. کلیه تماس‌ها از نوع تماس سطح به سطح و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی استفاده شده است. به منظور تعریف رفتار اصطکاکی از مدل ضرایب اصطکاکی کولمب و شرایط تماسی پنالتی با مقدار ضریب ۰/۱۲۵ مطابق مرجع [۱۶] تعریف شده است.

المان بکار رفته در مدل لوله از نوع S4R انتخاب شد که یک المان چهار گره‌ای می‌باشد. برای قالب‌ها از المان چهار گره‌ای R3D4 استفاده شد. برای بدست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی از همگرایی کرنش در انحنای بیرونی لوله خمیده استفاده شد و در نهایت با

بررسی نتایج مقدار ۱ میلی متر برای عدد دانه بندی لوله و مقدار ۶ میلی متر برای عدد دانه بندی قالب ها انتخاب شد. شکل ۵ نمای کلی از مدل شبیه سازی شده را نشان می دهد.

$$\bar{\sigma} = k(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n = 274.282(\bar{\epsilon} + 0.203)^{0.286} \quad (2)$$

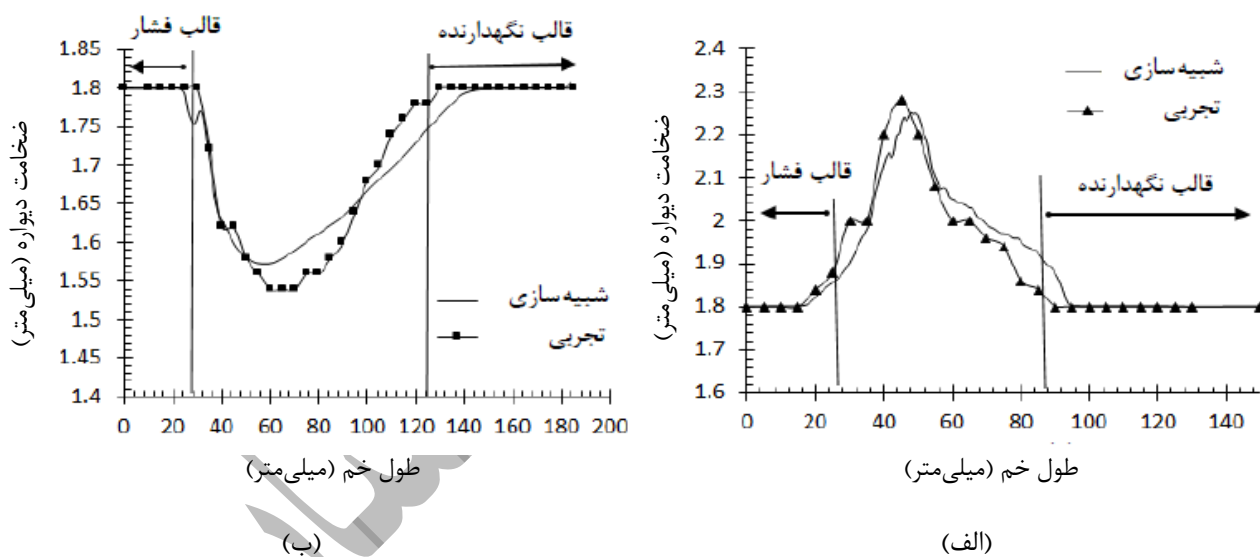


شکل ۵. مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیه سازی. الف) قالب با شعاع خم متغیر، ب) قالب با شعاع خم ثابت ۱/۶ برابر قطر و ج) قالب با شعاع خم ثابت ۱ برابر قطر

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

به منظور اعتبار سنجی مدل اجزای محدود بکار گرفته شده در این پژوهش، نتایج توزیع ضخامت بدست آمده توسط مدل شبیه‌سازی شده، در نسبت شعاع خم ثابت $1/6$ برابر قطر و شعاع متغیر در حالت بدون فشار داخلی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. همانطور که از شکل ۶ پیداست، نتایج شبیه‌سازی حاضر مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. بطوریکه حداکثر اختلاف کمتر از $8/5$ درصد می‌باشد. عوامل زیادی می‌تواند خطاها را بوجود بیاورد که می‌توان فرض تنش صفحه‌ای بودن و همسانگرد بودن جنس لوله، عدم یکنواختی جنس لوله فراهم شده برای آزمایش‌ها، عدم دقت هندسه لوله فراهم آمده در دایروی بودن و یکنواختی ضخامت لوله، عدم دقت در ابعاد هندسی قالب‌هایی که آزمایش‌ها بوسیله آنها انجام شده، عدم یکنواختی ضرایب اصطکاک در سطح قالب‌ها و عدم یکنواختی در سرعت خم دستگاه خم‌کن لوله را نام برد.

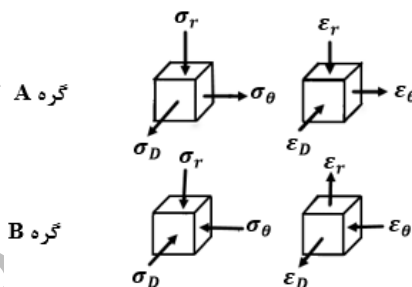
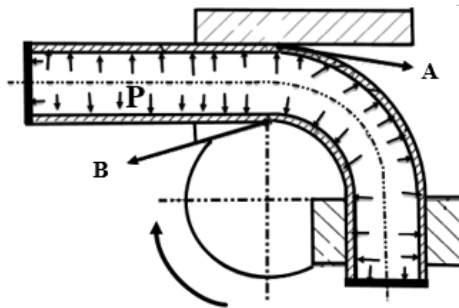


شکل ۶. نمودار تغییرات ضخامت بر حسب طول خم در شعاع خم متغیر در حالت بدون فشار داخلی سیال. الف) قوس بیرونی خم و ب) قوس داخلی خم

۴-۲- تاثیر فشار روی تغییر شکل سطح مقطع

مشخص شده است که معایبی مانند تغییر شکل سطح مقطع، نازک‌شدگی، ضخیم‌شدگی و چروکیدگی، حساس‌تر به تنش‌های فشاری و کششی طولی هستند [۱۷]. در این بخش توزیع تنش‌ها، حالات تنش و کرنش در لوله خمیده شده مورد آنالیز قرار گرفته است. شکل ۷ نشان می‌دهد که گره A در قوس بیرونی تحت تنش کششی در جهت طولی، حلقوی و تنش فشاری در جهت شعاعی

است. در همین حال گره B در قوس داخلی تحت تنش فشاری در سه جهت است. گره‌ها در قوس بیرونی تحت کرنش کششی طولی، کرنش حلقوی و شعاعی به صورت فشاری قرار دارند. در حالی که گره‌ها در قوس داخلی تحت کرنش فشاری طولی، کرنش‌های حلقوی و شعاعی به صورت کششی قرار دارند. تنش طولی σ_θ و کرنش طولی ϵ_θ در نواحی نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی به عنوان حداکثر تنش و کرنش اصلی مطرح می‌شوند. با توجه به بزرگ بودن نسبت قطر به ضخامت لوله، می‌توان تنش نرمال را نادیده گرفت. بنابراین، حالت تنش صفحه‌ای فرض می‌شود. مطابق شکل ۷ در ابتدا زاویه‌ای که در آن افزایش ناگهانی شیب کرنش طولی رخ می‌دهد، که در واقع به آن سطح مقطع بحرانی گویند، با کمک نتایج شبیه‌سازی بدست آمد. بطوریکه برای قالب با شعاع ثابت ۱ برابر قطر و ۱/۶ برابر قطر در زاویه ۳۳ درجه شروع شده و برای قالب با شعاع خم متغیر در زاویه ۲۲/۵ درجه رخ می‌دهد.



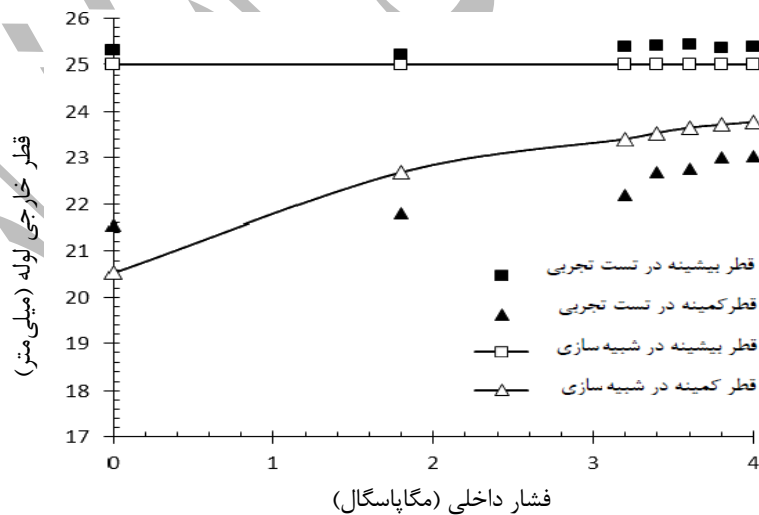
شکل ۷. حالات تنش و کرنش در ناحیه خم.

شکل ۸ و ۹ تغییرات قطر خارجی لوله در سطح مقطع بحرانی را بر حسب فشار، در خم‌کاری با نسبت شعاع خم ۱/۶ برابر قطر و شعاع متغیر نشان می‌دهد. شیب بسیار کم منحنی قطر بیشینه، نشان می‌دهد که میزان بیشترین قطر لوله در خم‌کاری، انحراف کمی از قطر اولیه لوله دارد و تغییرات چشمگیری را با افزایش فشار ندارد. دلیل این امر این است که لوله در راستای بیشترین قطر، در شیار قالب خم کن محدود است و نمی‌تواند به مقدار محسوسی فراتر از آن برود. اما در راستای کمترین قطر، هیچ محدودیتی به جز فشار داخلی وجود ندارد. لذا انحنای خارجی خم می‌تواند با آزادی بیشتری جابه‌جا گردد. از طرفی، در مقطع لوله، افزایش فشار تاثیر بیشتری بر روی کرنش حلقوی نسبت به کرنش طولی داشته است. به همین دلیل قطر لوله هم در راستای عمودی و هم در راستای

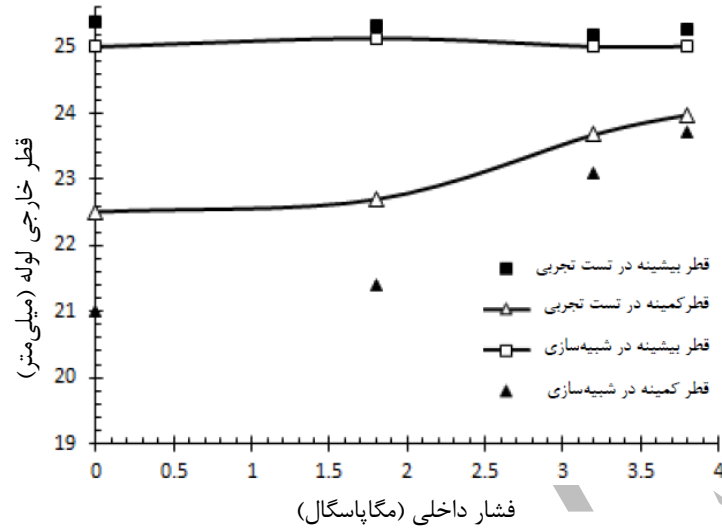
افقی به قطر اولیه نزدیک شده است. در نتیجه افزایش فشار، اعوجاج سطح مقطع نیز کاهش می‌یابد که این موضوع برای نسبت‌های خم ۱ برابر قطر نیز صدق می‌کند.

شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تغییرات کرنش طولی و کرنش حلقوی را در فشارهای مختلف برای سطح مقطع بحرانی در نسبت شعاع خم ثابت ۱/۶ برابر قطر و شعاع خم متغیر نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای حاصل از شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش شعاع خم، میزان کرنش‌های طولی و حلقوی در سطح مقطع بحرانی لوله افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار سیال داخلی، این میزان کاهش یافته است. لذا مقدار کرنش حلقوی و طولی شعاع متغیر نسبت به شعاع خم ۱ برابر قطر کمتر می‌باشد. بنابراین درصد تغییر شکل سطح مقطع، نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی در شعاع خم متغیر کمتر می‌باشد.

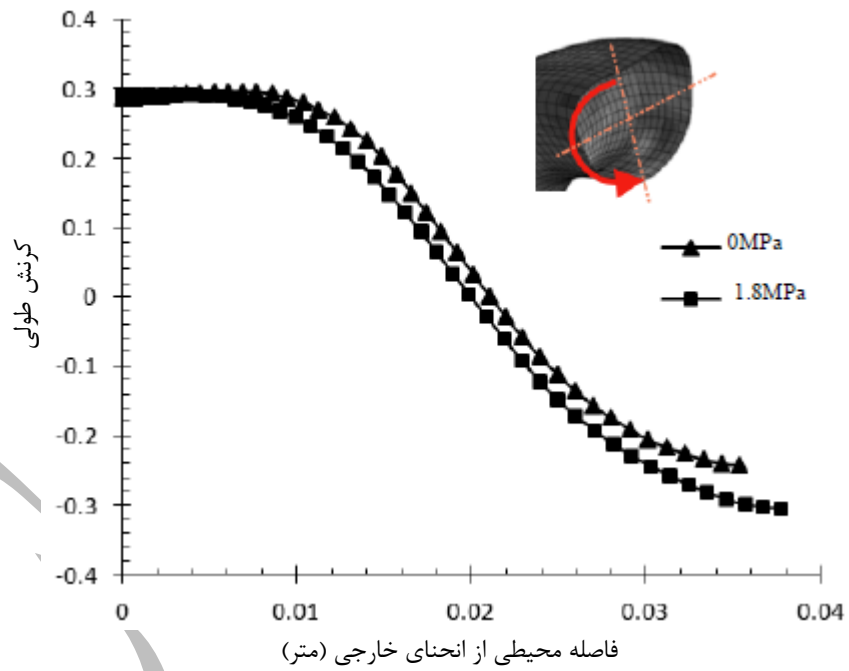
جدول ۲ سطح مقطع لوله خم شده در مقاطع بحرانی، در نسبت شعاع خم ۱ برابر قطر، ۱/۶ برابر قطر و شعاع متغیر تحت فشارهای مختلف آورده شده است. با مقایسه پروفیل‌ها و مقدار غیر دایروی شدن در کنار هر تصویر، می‌توان تشخیص داد که سطح مقطع لوله خم شده در شعاع خم متغیر تحت فشار داخلی ۳/۸ مگاپاسکال نسبت به حالت شعاع خم ثابت ۱ برابر قطر، تحت فشار داخلی ۱/۸ مگاپاسکال، به دایره نزدیک‌تر است. مقدار غیر دایروی شدن که از رابطه ۱ محاسبه شده است، در این شرایط ۱۱/۲۲٪ بوده که حتی از مقدار غیر دایروی شدن در نسبت شعاع خم ثابت ۱/۶ برابر قطر تحت فشار ۳/۸ مگاپاسکال (برابر ۱۰/۸۲٪) نیز بیشتر است. یعنی افزایش شعاع خم سبب شده در یک شرایط یکسان، به نتیجه مطلوب‌تری از غیر دایروی شدن دست یافت. به طور کلی افزایش شعاع خم و فشار، باعث بهبود عیب تغییر شکل سطح مقطع می‌گردند.



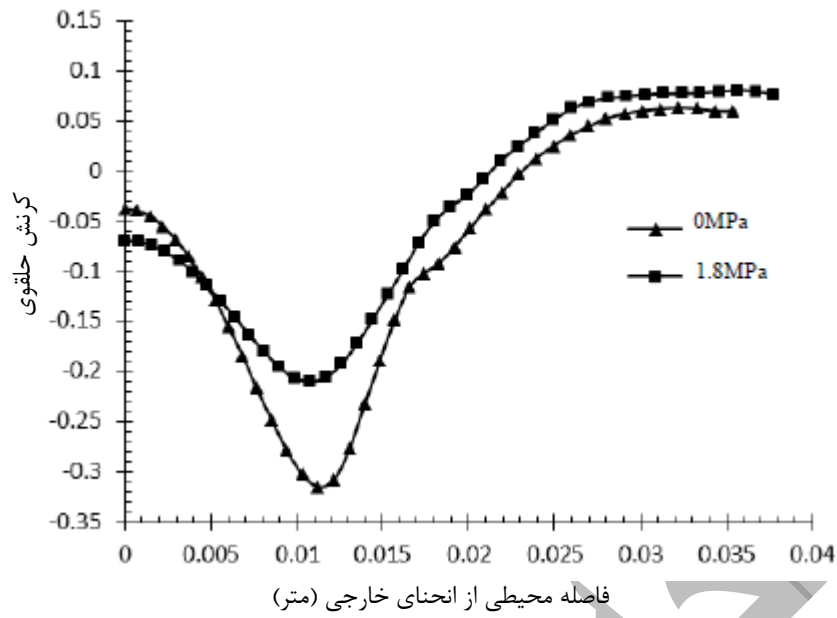
شکل ۸. تغییرات قطر خارجی لوله در سطح مقطع بحرانی بر حسب فشار، در شعاع خم ثابت ۱/۶ برابر قطر



شکل ۹. تغییرات قطر خارجی لوله در سطح مقطع بحرانی بر حسب فشار، در شعاع خم متغیر

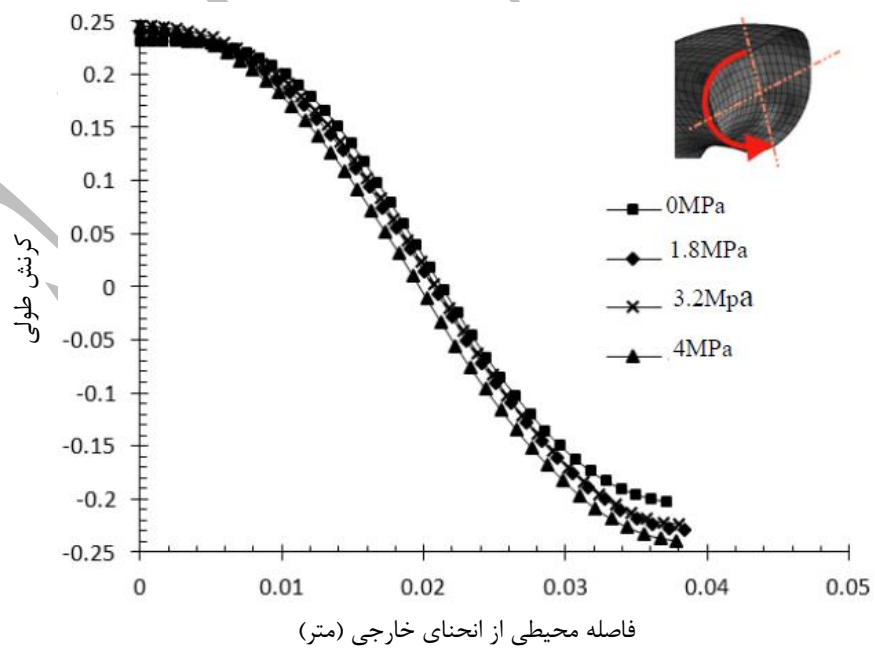


(الف)

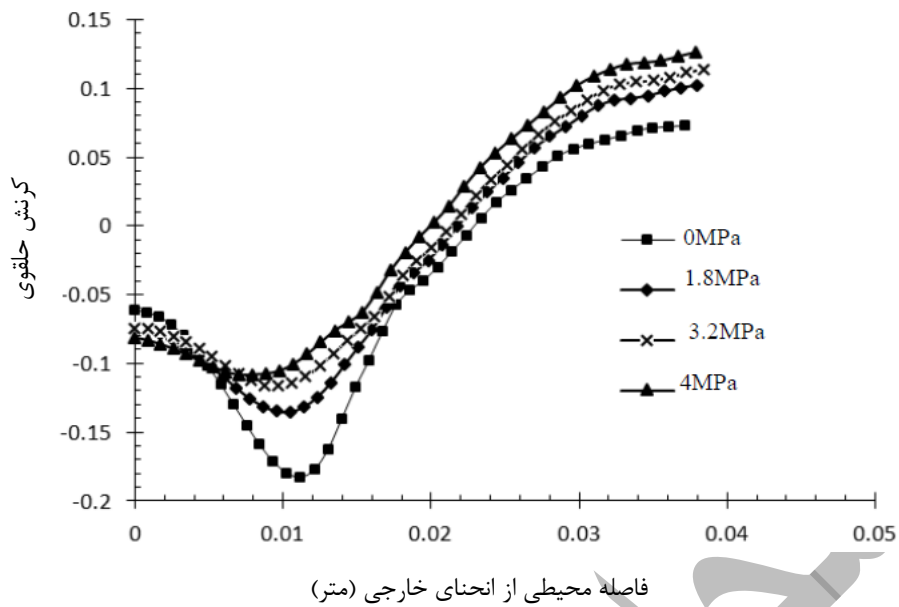


(ب)

شکل ۱۰. تغییرات کرنش در فشارهای مختلف در نسبت شعاع خم ثابت ۱ برابر قطر در سطح مقطع بحرانی. الف) کرنش طولی و ب) کرنش حلقوی

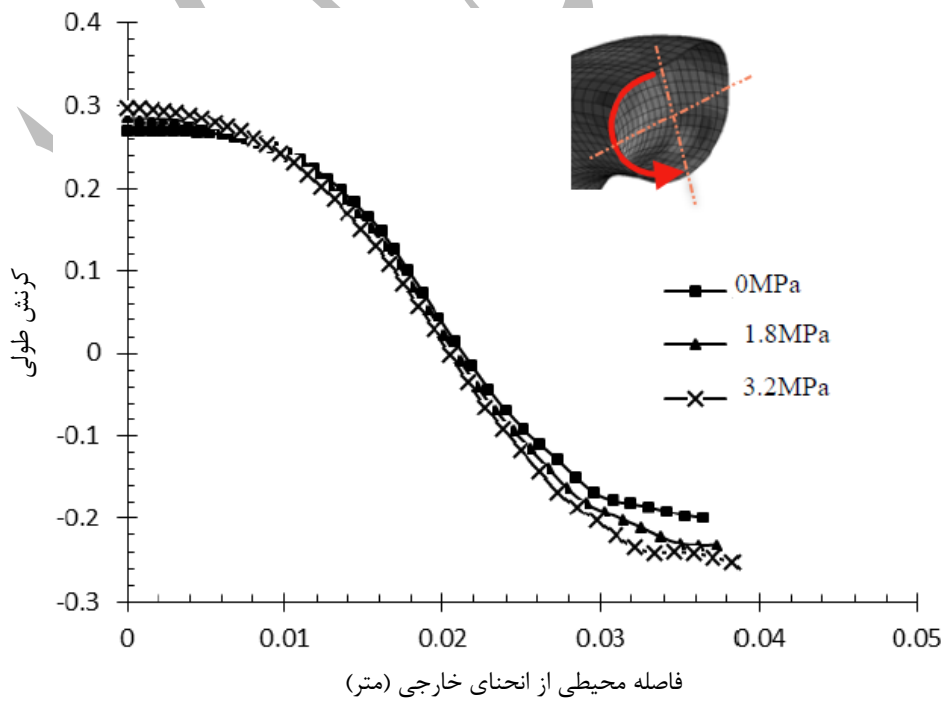


(الف)

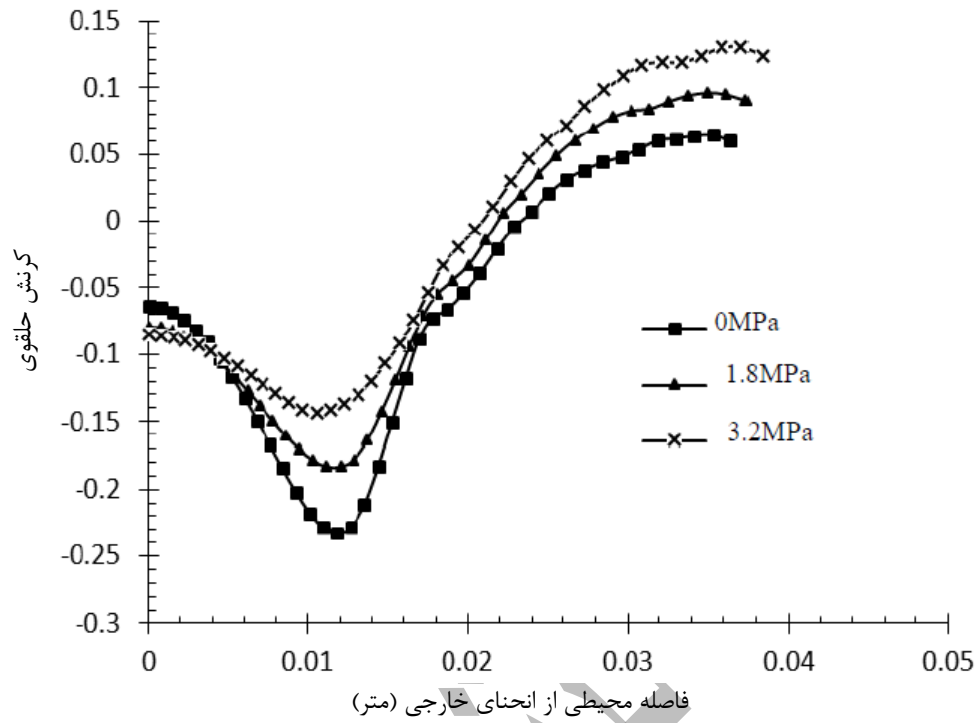


(ب)

شکل ۱۱. تغییرات کرنش در فشارهای مختلف در نسبت شعاع خم ثابت $\frac{1}{6}$ برابر قطر در سطح مقطع بحرانی. الف) کرنش طولی و ب) کرنش حلقوی



(الف)








(ب)

شکل ۱۲. تغییرات کرنش در فشارهای مختلف در نسبت شعاع خم متغیر برابر قطر در سطح مقطع بحرانی. (الف) کرنش طولی و (ب) کرنش حلقوی

جدول ۲. پروفیل مقطع لوله خم شده در مقاطع بحرانی در شعاع خم مختلف و فشارهای مختلف.

نسبت شعاع خم R=1D	شعاع خم متغیر	نسبت شعاع خم R=1.6D	فشار داخلی سیال
			بدون فشار
$\psi = 0.48/46$	$\psi = 0.19/6$	$\psi = 0.17/68$	
			1/8 MPa
$\psi = 0.36/49$	$\psi = 0.16/4$	$\psi = 0.15$	

پارگی			۳/۲ MPa
	$\psi = 13/63$	$\psi = 13/32$	
پارگی			۳/۸ MPa
	$\psi = 11/22$	$\psi = 10/82$	
پارگی	پارگی		۴ MPa
		$\psi = 10/50$	

۳-۴- تاثیر فشار و انحنای خم بر توزیع ضخامت

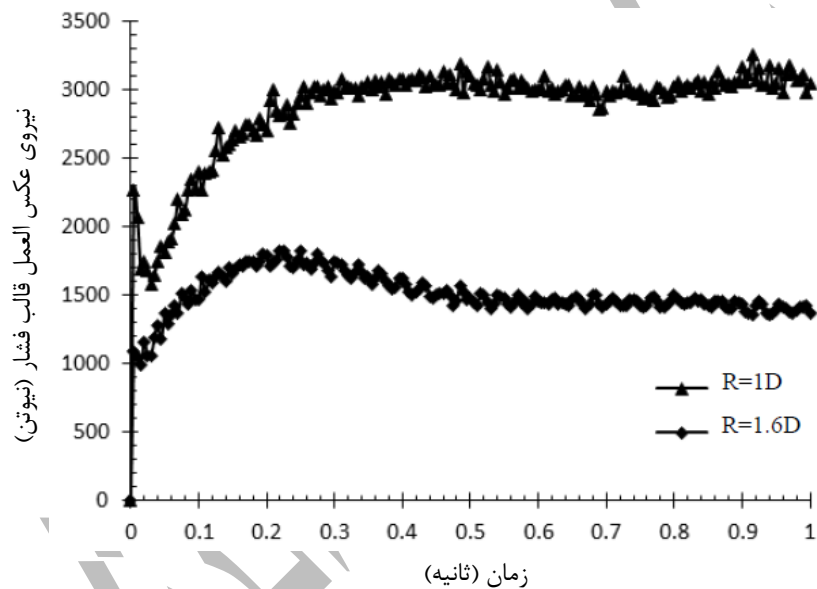
به منظور پیش‌بینی ناحیه نازک‌شدگی، ضخیم‌شدگی و چروکیدگی از توزیع کرنش در جهت خم شدن استفاده گردید. ضخامت لوله در جهت حلقوی، در سطح مقطع بحرانی برای محاسبه کرنش ضخامتی اندازه‌گیری شده است. رابطه ۳ نحوه محاسبه کرنش ضخامتی را نشان می‌دهد [۱۸].

$$\epsilon_r = \ln\left(1 + \frac{\Delta t}{t_0}\right) \quad (3)$$

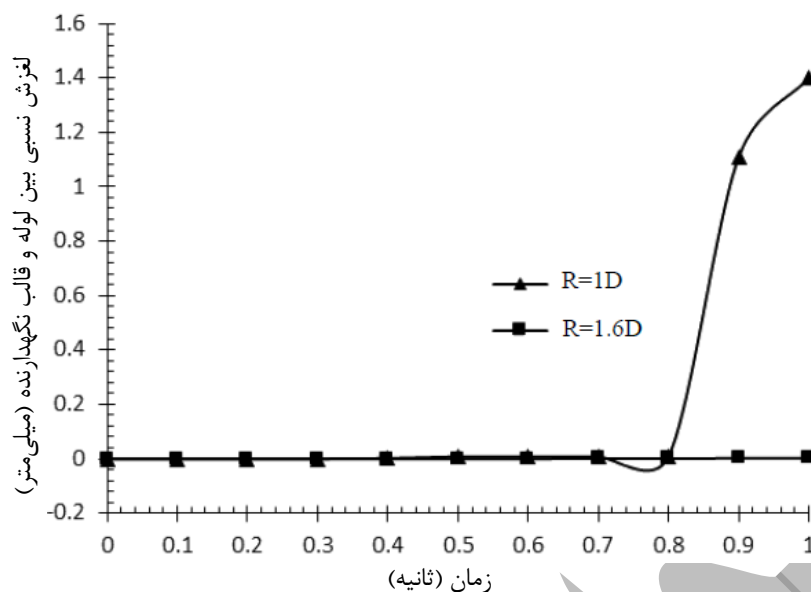
میزان لغزش بین قالب نگهدارنده و لوله، باعث چروکیدگی ناحیه داخلی خم می‌شود و میزان این لغزش ۳/۱ میلی‌متر می‌باشد. یکی از عوامل موثر بر لغزش بیان شده، نیروی بین لوله و قالب فشار می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، نیروی عکس‌العمل قالب فشار در نسبت شعاع خم ۱ برابر قطر در مقایسه با نسبت شعاع خم ۱/۶ برابر قطر خیلی زیاد است. این امر باعث افزایش اصطکاک و به دنبال آن باعث کاهش لغزش لوله در تماس با قالب فشار و افزایش لغزش بین لوله و قالب نگهدارنده در نسبت شعاع ۱ برابر قطر می‌شود. لغزش بین قالب فشار و لوله، نشان دهنده مقدار ماده درگیر در تغییر شکل خم شدن است. کاهش لغزش بین لوله و قالب فشار باعث افزایش درجه نازک‌شدگی دیواره لوله می‌شود. مشکل عمده خم‌کاری با نسبت شعاع ۱ برابر قطر، لغزش نسبی بین لوله و قالب نگهدارنده است. این امر موجب چروک در هنگام خم‌کاری می‌شود. بنابراین در نسبت شعاع خم ۱ برابر قطر،

ضخیم شدگی و چروکیدگی در ناحیه نزدیک به قالب نگهدارنده رخ می‌دهد. شکل ۱۴ لغزش نسبی بین لوله و قالب نگهدارنده در نسبت شعاع خم ۱ برابر و ۱/۶ برابر قطر را نشان می‌دهد.

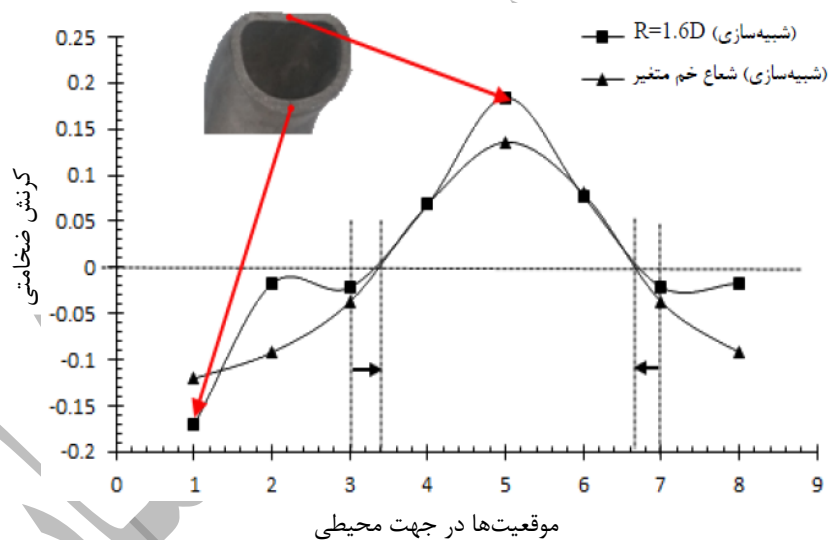
شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تار خنثی کرنش ضخامتی به سمت مرکز لوله منتقل شده است. همانطور که از شکل پیداست، کرنش شعاعی در قوس بیرونی خم بسیار بزرگتر از قوس داخلی است. یعنی درصد نازک شدن در قوس بیرونی بسیار بیشتر از قوس داخلی است. برای کاهش نازک‌شدگی دیواره باید تنش‌های کششی در قوس بیرونی کاهش یابد. مقدار کرنش شعاعی در قوس بیرونی خم در شعاع خم متغیر نسبت به شعاع خم ۱/۶ برابر قطر کمتر است. دلیل این امر گسترش توزیع تنش در ناحیه خم شعاع متغیر است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که درصد نازک‌شدگی در شعاع خم متغیر کمتر از نسبت شعاع خم ۱/۶ برابر قطر است.



شکل ۱۳. نیروی عکس العمل قالب فشار در زمان بارگذاری



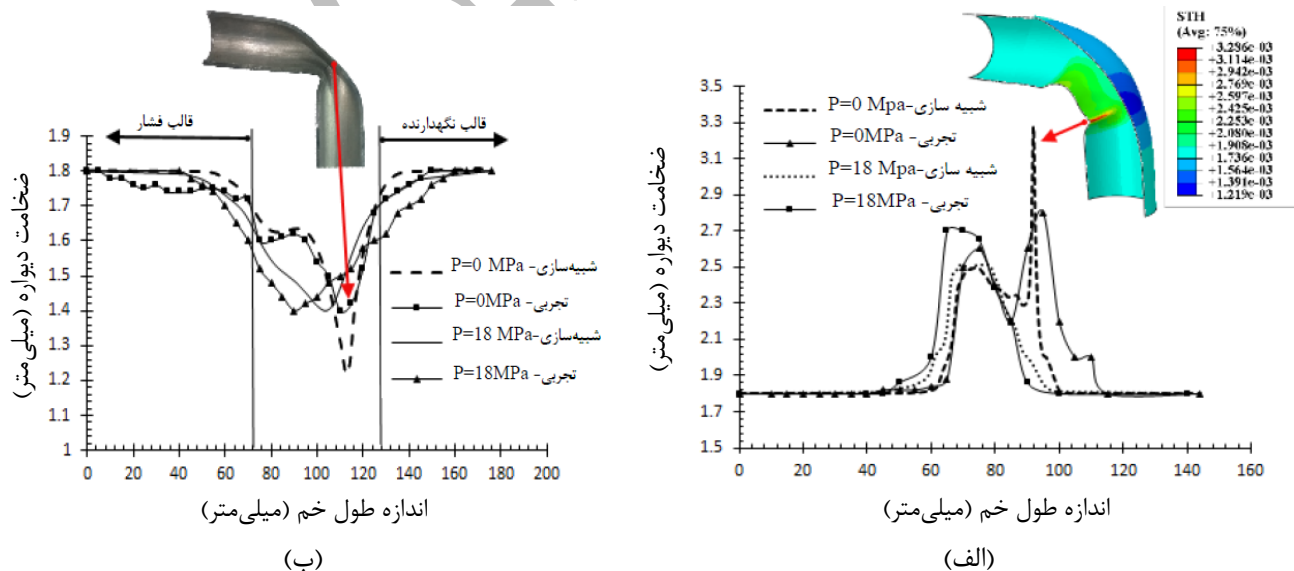
شکل ۱۴. میزان لغزش بین لوله و قالب نگهدارنده در نسبت شعاع خم ثابت ۱ و ۱/۶ برابر قطر



شکل ۱۵. کرنش ضخامتی در سطح مقطع در نسبت شعاع خم ۱/۶ برابر قطر و شعاع خم متغیر در حالت بدون فشار سیال داخلی تاثیر فشار بر توزیع ضخامت دیواره در نسبت‌های شعاع خم ثابت ۱ برابر قطر، ۱/۶ برابر قطر و شعاع خم متغیر به ترتیب در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ آورده شده است. محور افقی نمودار، اندازه طول مسیر در امتداد خم را نشان می‌دهد. به دلیل تنش در مناطق اطراف محدوده خم‌کاری، تغییرات ضخامت در بازه‌ای بیشتر از محدوده خم‌کاری اندازه گرفته شد. این بازه از ابتدای قالب فشار تا انتهای قالب نگهدارنده لوله بوده است. موقعیت آغاز و پایان اندازه‌گیری‌ها روی لوله مقطع زده شده در شکل نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده شد، در نسبت شعاع خم ۱ برابر قطر، در حالت بدون فشار سیال، لوله در انحنای داخلی دچار چروکیدگی

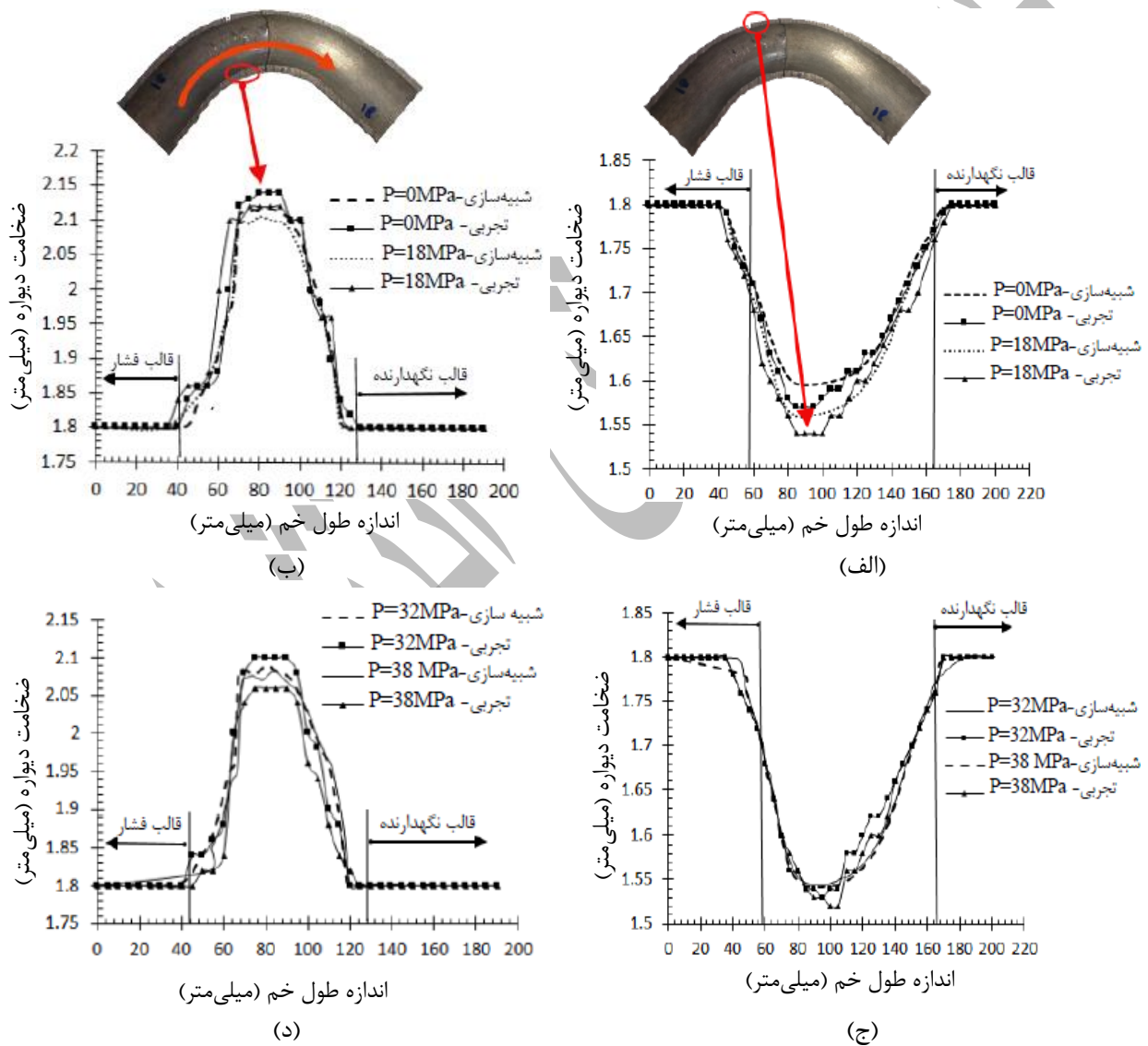
شدیدی می‌شود. در ادامه با ایجاد فشار داخلی به منظور رفع چروکیدگی، مشاهده می‌گردد که با افزایش فشار از صفر به $1/8$ مگاپاسکال، کمترین ضخامت لوله در انحنای خارجی از $1/4$ به $1/2$ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در واقع درصد نازک‌شدگی بیشتر از حد مجاز استاندارد SAE می‌باشد. در نسبت خم $1/6$ برابر قطر، با افزایش فشار از صفر تا $3/8$ مگاپاسکال، بیشترین و کمترین ضخامت دیواره لوله در انحنای داخلی و خارجی به ترتیب $2/15$ به $2/06$ و $1/66$ به $1/52$ کاهش می‌یابد. لذا درصد نازک‌شدگی کمتر از حد مجاز استاندارد SAE می‌باشد. در نسبت خم با شعاع متغیر، ناحیه خم به دو قسمت تقسیم می‌گردد. ناحیه نخست مربوط شعاع خم ثابت (25 میلی‌متر) و ناحیه دوم شامل شعاع خم متغیر (40 به 25 میلی‌متر کاهش می‌یابد) است. با افزایش از صفر تا $3/8$ مگاپاسکال، بیشترین و کمترین ضخامت دیواره در ناحیه خم با شعاع ثابت به ترتیب $2/25$ به $2/23$ و $1/57$ به $1/49$ کاهش می‌یابد. همچنین در ناحیه خم با شعاع متغیر بترتیب از $2/19$ به $2/07$ و $1/58$ به $1/52$ کاهش می‌یابد. بطوری که درصد نازک‌شدگی کمتر از حد مجاز استاندارد SAE می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، با کاهش نسبت خم، به دلیل افزایش کرنش‌های کششی و فشاری، ضخیم‌شدگی دیواره در انحنای داخلی و نازک‌شدگی در انحنای خارجی افزایش می‌یابد. نکته کلی که هر کدام از این شکل‌ها بیان می‌کنند، این است که با افزایش فشار، میزان نازک‌شدگی افزایش و میزان ضخیم‌شدگی کاهش می‌یابد.

با بررسی نمودارهای شکل ۱۶، ۱۷ و ۱۸ می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل اعمال فشار سیال، تنش‌های فشاری طولی و حلقوی بوجود آمده در انحنای داخلی کاهش می‌یابد. بنابراین موجب کاهش ضخیم‌شدگی در این ناحیه شده است. همچنین با ایجاد فشار، تنش‌های کششی طولی و حلقوی در انحنای خارجی، کرنش‌های کششی را بوجود می‌آورند که باعث نازک‌شدگی در این ناحیه می‌شود.

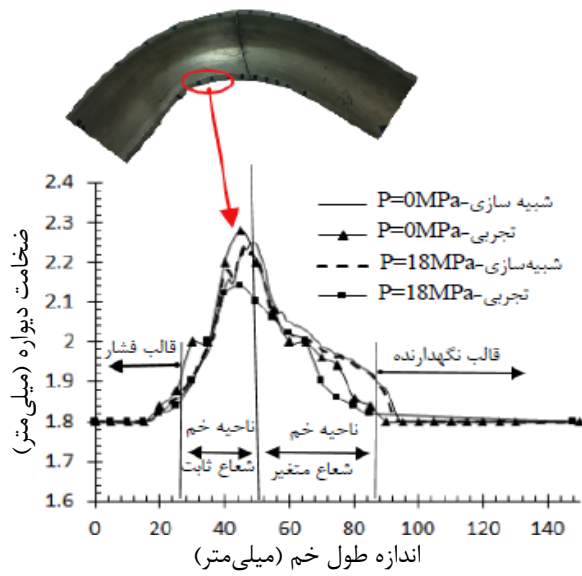


شکل ۱۶. نمودار تغییرات توزیع ضخامت در نسبت شعاع خم ۱ برابر قطر. الف) قوس بیرونی خم و ب) قوس داخلی خم

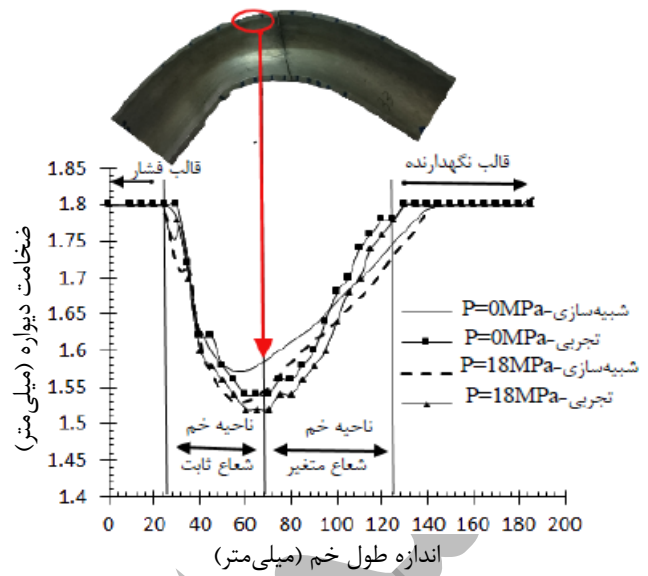
شکل ۱۹ نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی تاثیر انحنای خم بر توزیع کرنش‌های طولی و توزیع ضخامت در ناحیه خم در فشار ثابت در خم ۴۵ درجه در نسبت شعاع خم $1/6$ برابر قطر و شعاع متغیر نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که تحت این دو شرایط، موقعیت و سطح ماکزیمم کرنش طولی فشاری و کششی متفاوت است. کرنش طولی لوله خم شده توسط قالب خم با شعاع ثابت به صورت موضعی توزیع شده است. از سوی دیگر در قالب خم با شعاع متغیر، توزیع کرنش طولی به صورت گسترده می‌باشد. همچنین در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که سطح نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله خم شده با روش شعاع متغیر نسبت به شعاع ثابت کم می‌باشد. دلیل این امر، گسترش دادن تغییر شکل متمرکز در مراحل مختلف شکل‌دهی در شعاع متغیر است [۸].



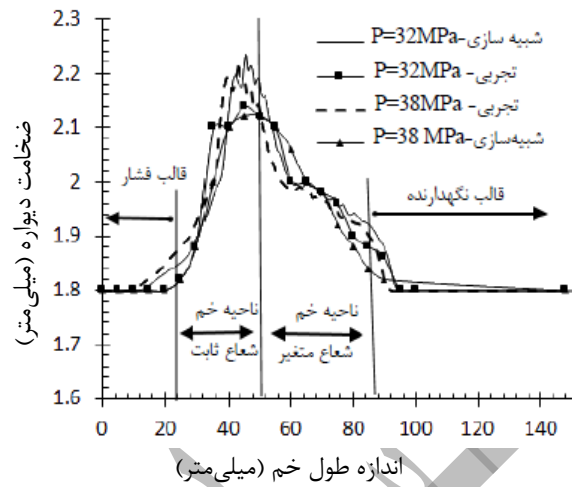
شکل ۱۷. نمودار تغییرات توزیع ضخامت در نسبت شعاع خم $1/6$ برابر قطر. الف و ج) قوس بیرونی خم و ب و د) قوس داخلی خم



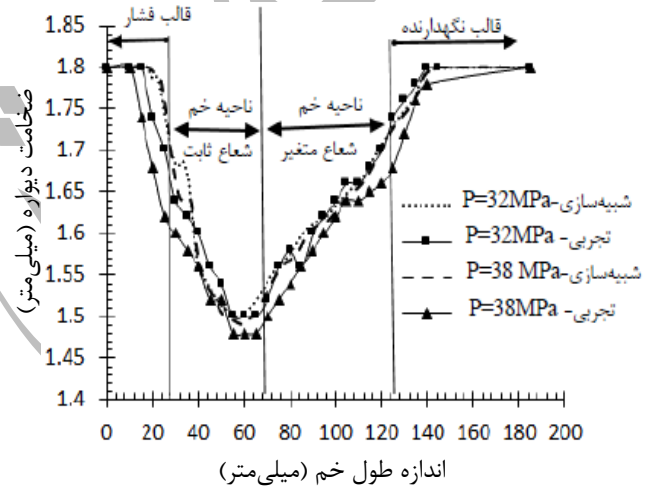
(ب)



(الف)

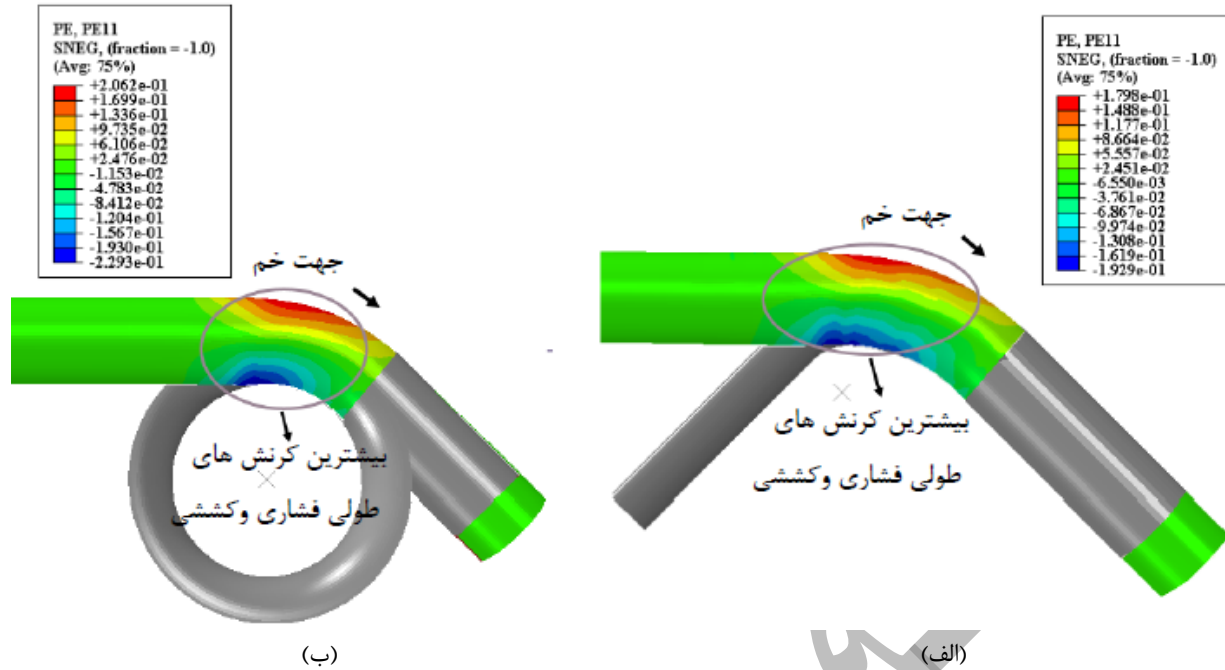


(د)

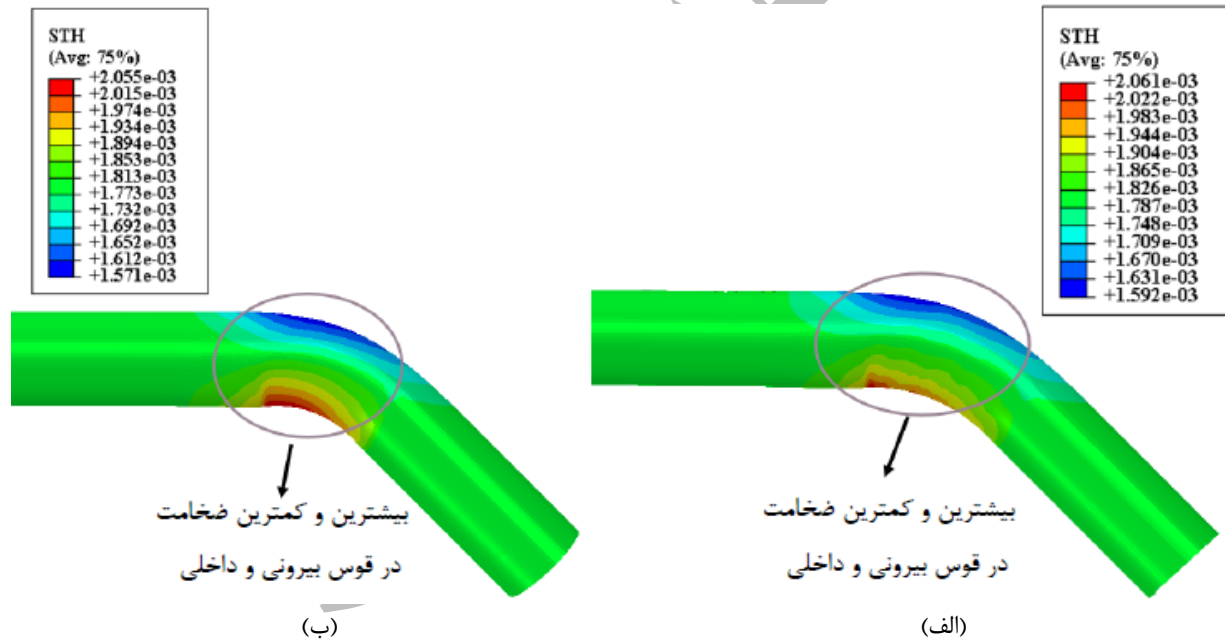


(ج)

شکل ۱۸. نمودار تغییرات توزیع ضخامت در نسبت شعاع خم متغیر. الف و ج) قوس بیرونی خم و ب و د) قوس داخلی خم



شکل ۱۹. توزیع کرنش طولی در خم ۴۵ درجه. الف) شعاع متغیر و ب) شعاع ثابت ۱/۶ برابر قطر



شکل ۲۰. توزیع ضخامت در خم ۴۵ درجه تحت فشار داخلی ۳/۸ مگاپاسگال. الف) شعاع متغیر و ب) شعاع ثابت ۱/۶ برابر قطر

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی اثرات فشار بر توزیع ضخامت و شکل سطح مقطع نهایی لوله آلومینیومی با آلیاژ ۶۰۶۳ پرداخته است. نتایج نشان داد که در خم کاری لوله، تغییر شکل بصورت موضعی و توزیع کرنش و تنش بصورت غیر یکنواخت است. بدین منظور خم کاری با شعاع متغیر با هدف پراکنده کردن تغییر شکل موضعی در سرتاسر مراحل مختلف شکل دهی برای بهبود کیفیت قطعه ارائه شده است. همچنین نتایج برای دو حالت شعاع ثابت (با نسبت شعاع به قطر ۱ و ۱/۶) و شعاع متغیر با یکدیگر بررسی و مقایسه شده است. دستاوردهای مهم حاصل از این پژوهش را می توان به موارد زیر برشمرد :

۱- در فرآیند خم کاری آلومینیوم ۶۰۶۳، با نسبت شعاع به قطر ۱، به علت نقص های نظیر ترک خوردن، چروکیده شدن و نازک شدگی، قابلیت شکل دهی ندارد .

۲- در خم کاری شعاع ثابت به کمک سیال داخلی (به جای مندرل) بیشترین مقدار بیضوی شدن سطح مقطع در زاویه ۳۳ درجه اتفاق می افتد. در حالی که در خم شعاع متغیر این مقدار ۲۲/۵ درجه است.

۳- با بررسی نحوه شکل گیری لوله در فرآیند خم کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی، مشاهده گردید که حداکثر میزان بیضوی شدن در حالت بدون استفاده از فشار سیال داخلی در نسبت شعاع خم ثابت ۱، ۱/۶ و شعاع خم متغیر، بترتیب ۴۸٪/۴۶، ۱۷٪/۶۸ و ۱۹٪/۶ می باشد. در فشار ۳/۸ مگاپاسکال، حداکثر میزان بیضوی شدن در نسبت شعاع خم ثابت ۱/۶ و شعاع متغیر بترتیب ۱۰/۸۲٪ و ۱۱/۲۲٪ می باشد .

۴- با افزایش فشار داخلی، میزان نازک شدگی در انحنای خارجی افزایش و میزان ضخیم شدگی در انحنای داخلی کاهش می یابد. از شیب کم منحنی در حداکثر میزان ضخیم شدگی نسبت به میزان نازک شدگی در فشارهای مختلف، می توان دریافت که تاثیر فشار بر ضخیم شدگی، کمتر از تاثیر بر نازک شدگی است.

۵- در یک فشار ثابت، انحنای شعاع خم تاثیری بسزایی در توزیع ضخامت دارد. ناحیه نازک شدگی و ضخیم شدگی در نسبت شعاع خم متغیر در مقایسه با نسبت شعاع خم ثابت ۱/۶، بصورت گسترده بوده است. همچنین سطح نازک شدگی و ضخیم شدگی کمتری نسبت به شعاع ثابت دارد.

تاییدیه های اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

- [1] Kleiner, M., Geiger, M. and Klaus, A., 2003. Manufacturing of lightweight components by metal forming. *CIRP annals*, 52(2), pp.521-542.
- [2] Collie, G.J., Higgins, R.J. and Black, I., 2010. Modeling and predicting the deformed geometry of thick-walled pipes subjected to induction bending. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 224(4), pp.177-189.
- [3] Al-Qureshi, H.A., 1999. Elastic-plastic analysis of tube bending. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(1), pp.87-104.
- [4] Li, W. and Yao, Y.L., 2001. Laser bending of tubes: mechanism, analysis, and prediction. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 123(4), pp.674-681.
- [5] Wang, X. and Li, F., 2015. Analysis of wall thickness variation in the hydro-bending of a double-layered tube. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, pp.67-72.
- [6] Mentella, A. and Strano, M., 2012. Rotary draw bending of small diameter copper tubes: predicting the quality of the cross-section. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(2), pp.267-278.
- [7] Soleimani, J., Elyasi, M. and Hosseinzadeh, M., 2016. Embedding of internal fluid pressure investigation in mandrel through tube rotary draw bending of thin-walled tubes with critical bend radius. *Modares Mechanical Engineering*, 16(9), pp.287-297.
- [8] Xiao, X.T., Liao, Y.J., Sun, Y.S., Zhang, Z.R., Kerdeyev, Y.P. and Neperish, R.I., 2007. Study on varying curvature push-bending technique of rectangular section tube. *Journal of Materials Processing Technology*, 187, pp.476-479.
- [9] Tang, D., Li, D., Yin, Z. and Peng, Y., 2009. Roles of surface booster system on bending of thin-walled copper tube. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18, pp.369-377.
- [10] Paluch, M., Elyasi, M. and Hoseinzadeh, M., 2016. Predicting the bending limit of AA8112 tubes using failure criterion in Hydro-Rotary draw bending process. *Modares Mechanical Engineering*, 16(5), pp.123-134.
- [11] Modanloo, V., Elyasi, M., Talebi-Ghadikolaee, H., Khatir, F.A. and Akhoundi, B., 2023. The use of MCDM techniques to assess fluid pressure on the bending quality of AA6063 heat-treated tubes. *Journal of Engineering Research*.
- [12] Elyasi, M., Modanloo, V., Talebi Ghadikolaee, H., Ahmadi Khatir, F. and Akhoundi, B., 2023. Investigating the effect of heat treatment in hydraulic rotary draw bending of AA6063 tubes. *Modares Mechanical Engineering*, 23(4), pp.257-264.
- [13] Elyasi, M., Khatir, F.A., Ghadikolaee, H.T. and Modanloo, V., 2024. Experimental investigation and numerical simulation of the effect of type of bending die on the quality of tube forming in rotary draw bending process. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 7(2), pp.233-247.
- [14] Rezaei Ashtiani, Hamid Reza, and Shahab Moghaddam. "Experimental and Numerical Investigation on the Heat Treatment Effects of AA6063 Aluminum Alloy Tubes during Rotary Draw Bending." *Iranian Journal of Materials Science & Engineering* 19.1 (2022).
- [15] Talebi-Ghadikolaee, H., Ahmadi Khatir, F. and Seddighi, S., 2022. Numerical-experimental study on the thickness distribution of metallic bipolar plates for PEM fuel cells. *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*, 9(1), pp.1-18.
- [16] Lazarescu, L., 2013. Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending. *International journal of advanced manufacturing technology*, 64(1), pp.85-91.
- [17] Halvorsen, F. and Aukrust, T., 2006. Studies of the mechanisms for buckling and waving in aluminum extrusion by use of a Lagrangian FEM software. *International Journal of Plasticity*, 22(1), pp.158-173.
- [18] Heng, L.I., He, Y.A.N.G., Mei, Z.H.A.N. and Rui-Jie, G.U., 2006. Forming characteristics of thin-walled tube bending process with small bending radius. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, pp.s613-s623.