

بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی پارامترهای خم‌کاری بر میزان برگشت فنری لوله در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی

چکیده

خم‌کاری لوله‌های آلومینیومی با نسبت خم بحرانی نیازمند به کارگیری روش‌های نوین خم‌کاری می‌باشد. در این پژوهش روش جدیدی از خم‌کاری کششی دورانی با قالب خم انحنای متغیر ارائه شده است. برخلاف روش‌های مرسوم که لوله‌های توخالی با سطح مقطع گرد با یک شعاع ثابت خم می‌شوند، در این روش به صورت تدریجی از یک شعاع بزرگ به شعاع کوچک تغییر شکل می‌دهد. برای تعیین انحنای قالب خم، یک منحنی اینولوت به عنوان معادله مکان هندسی انحنای متغیر قالب خم در نظر گرفته شده است. با توجه به توسعه هیدروفورمینگ لوله‌ها، سیال تحت فشار به جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله استفاده شده است. برای این منظور یک لوله جدار نازک آلومینیومی از آلیاژ ۶۰۶۳ (با نسبت قطر به ضخامت برابر ۱۳/۸۸) تهیه شده است. سپس توسط خم‌کاری کششی دورانی در نسبت شعاع خم به قطر ۱، ۱/۶ و انحنای متغیر با زاویه ۹۰ درجه خم گردیده است. تاثیر فشار سیال داخلی و انحنای قالب خم بر میزان برگشت فنری لوله با استفاده از شبیه‌سازی و تست‌های تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در یک فشار ثابت، برگشت فنری لوله خمیده توسط قالب خم شعاع متغیر نسبت به قالب خم شعاع ثابت کمتر می‌باشد. فشار داخلی بر روی برگشت فنری لوله خمیده تاثیر نامحسوسی دارد.

کلیدواژه‌ها:

خم‌کاری، قالب شعاع متغیر، فشار سیال هیدروفورمینگ، برگشت فنری لوله

Experimental investigation and Numerical simulation of bending parameters on the spring back of the tube in the rotational bending process

A B S T R A C T

Tube bending with a critical bending ratio necessitates the exploration of new bending methods. This research introduces a novel approach to rotational bending using a variable curvature bending die. Unlike conventional techniques that employ fixed-radius bending for hollow tubes with a round cross-section, this method gradually transitions the shape from a large radius to a small radius. To determine the curvature of the bending die, we employ an involute curve as the geometric equation governing the variable curvature of the bending die. With the advancement of tube hydroforming, pressurized fluid is employed instead of a mandrel in the rotational bending process. To investigate this, a thin-walled aluminum tube composed of 6063 alloys (with a D/t ratio of 13/88) is prepared and subjected to rotational tensile bending at critical bending radius ratios of $D1$, $D1.6$, and variable curvature, all at a 90-degree angle. Both simulation and experimental tests are utilized to analyze the impact of internal fluid pressure and bending die curvature on tube springback. The results demonstrate that, under constant pressure conditions, the use of a variable-radius bending die results in reduced springback compared to a fixed-radius bending die. Furthermore, the effect of internal pressure on the springback of the bent tube is found to be negligible.

Keywords:

Bending, Variable radius die, Fluid hydroforming pressure, Tube spring back

۱- مقدمه

در گذشته انجام عملیات خم کاری لوله یک هنر تلقی می‌شد و نوعاً توسط افراد ماهر و با تجربه صورت می‌گرفت. در چند دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در خم کاری لوله‌ها به منظور ایجاد دانش پایه در این زمینه صورت گرفته است. به کمک کارهای تجربی، تحلیل‌های تئوری و شبیه‌سازی عددی درک بهتری از نحوه تغییر شکل لوله در حین خم کاری فراهم شده است. قطعات لوله‌ای به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا امروزه در صنایع مهمی همچون هواپیماسازی، خوردروسازی، نفت و گاز و... به صورت وسیعی به کار گرفته می‌شوند [۱ و ۲]. از لحاظ شرایط بارگذاری، انواع خم کاری لوله به خم کاری خالص، خم کاری تحت فشار، خم کاری کششی، خم کاری غلتکی، خم کاری فشاری، خم کاری کوبه‌ای، خم کاری به همراه سیال و خم کاری کششی دورانی تقسیم می‌شود. امروزه در میان این روش‌ها، خم کاری کششی دورانی به عنوان معمول‌ترین و تحت کنترل‌ترین روش خم کاری لوله شناخته شده است [۳].

از نقطه نظر سختی خم کاری، خم کاری آسان با شعاع خم کاری بزرگ و خم کاری دشوار با شعاع خم کاری کوچک وجود دارند [۴]. انتخاب روش خم کاری بستگی به کیفیت خم، تعداد تولید، جنس لوله، شعاع نسبی خم (R/D)، قطر نسبی لوله (D/t) و دقت مورد انتظار دارد که در آن‌ها D قطر خارجی، t ضخامت و R شعاع خط مرکزی خم (CLR) می‌باشد [۳]. تاکنون به منظور توسعه علم و تکنولوژی خم کاری لوله، تلاش‌های زیادی برای بررسی عیب‌ها، ناپایداری‌ها و انتخاب و بهینه‌سازی پارامترهای شکل‌دهی و قالب انجام شده است. این تلاش‌ها درباره انواع فرآیندهای خم کاری لوله با شرایط بارگذاری مختلف، توسط کاربرد تحلیلی، روش‌های تجربی، فیزیکی و عددی انجام گرفته است. بدین منظور در ادامه به بررسی مهمترین تحقیقات انجام گرفته در زمینه خم کاری لوله پرداخته شده است.

هنگ و همکاران [۵] تاثیر پارامترهای خم کاری و فرآیندی بر بازگشت فنی لوله‌های جدار نازک آلومینیومی را از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود و تست‌های تجربی بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها با توجه به اینکه با افزایش

سرعت خم کاری، تنش تسلیم افزایش می یابد، خم کاری با سرعت بیشتر باعث می شود که تغییر شکل الاستیک بیشتری بوجود بیاید. در نتیجه برگشت فنی افزایش یابد.

ژیو و همکاران [۶] اثر قالب شعاع متغیر را بر کیفیت خم کاری لوله هایی با مقطع مستطیلی جدار نازک در فرآیند خم کاری فشاری به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. لوله مورد آزمایش از جنس آلومینیومی با عرض و طول ۱۰ و ۲۰ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر، در محدوده زاویه خم ۱۳۵ درجه انتخاب شده بود. در این مطالعه یک منحنی اینولوت به عنوان معادله مکان هندسی انحنای متغیر قالب خم در نظر گرفته شده و میزان تغییرات خم انتخاب شده بر اساس یک منحنی اینولوت محاسبه شد. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان داد که با افزایش زاویه خم، ضخامت بیرونی لوله کاهش و درونی لوله افزایش یافته است.

وانگ و آگاروال [۷] خم کاری لوله را تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی به روش خم کاری کششی دورانی به صورت تحلیلی و شبیه سازی مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که تغییر شکل سطح مقطع و تغییرات ضخامتی که در سطح نمونه رخ می دهد را می توان با نیروی محوری و فشار داخلی کنترل نمود. سپس، اثر نیروی محوری را مورد بررسی قرار دادند و توانستند با محاسبه نیروی بهینه، چروک را در شعاع داخلی نمونه از بین ببرند.

لازراسکو و همکاران [۸] اثر فشار داخلی بر روی بیضوی شدن سطح مقطع، نازک شدن و ضخیم شدن دیواره لوله را در خم کاری کششی دورانی لوله های آلومینیومی با فشار سیال داخلی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که فشار داخلی اثر قابل توجهی روی کیفیت سطح مقطع لوله های آلومینیومی خمیده دارد. بطوریکه با افزایش فشار داخلی، بیضوی شدن سطح مقطع و ضخیم شدن دیواره کاهش و نازک شدن دیواره لوله افزایش می یابد. همچنین اثر فشار سیال روی نازک شدن دیواره بسیار بیشتر از اثر آن روی ضخیم شدن دیواره در انحنای داخلی بدست آمده است.

ون و همکاران [۹] یک روش جدیدی از خم کاری کششی دورانی ارائه دادند که برای خم کاری لوله با قطرهای بیرونی مختلف در شرایط بدون مندرل مناسب است. در مقایسه با لوله های خم شده در روش مرسوم، لوله خم

شده با قالب جدید دارای نیروهای تماسی و حالت‌های کرنش متفاوتی در شیار قالب خم است که سبب توزیع تنش، کرنش و رفتار تغییر شکل متفاوت می‌شود. در کل، کیفیت خم‌کاری از نظر تغییر شکل سطح مقطع نازک‌شدگی دیواره لوله‌های خم شده توسط قالب جدید در شرایطی که قطر لوله کوچکتر یا مساوی با قطر شیار قالب نگهدارنده باشد، نسبت به روش مرسوم مناسب‌تر است.

الیاسی و همکاران [۱۰ و ۱۱] در ابتدا تاثیر فشار سیال داخلی در دماهای بالا را بر کیفیت خم لوله آلومینیومی در خم‌کاری کششی دورانی بررسی نمودند. نتایج کار این محققان نشان داد که دو پارامتر فشار و دما اثر قابل توجهی روی کیفیت سطح مقطع لوله‌های آلومینیومی دارد. بطوریکه با افزایش فشار داخلی، عدم گردی سطح مقطع و ضخیم‌شدگی دیواره کاهش یافته است. در ادامه این محققان پارامترهای موثر بر خم‌کاری لوله را بصورت تحلیلی بررسی نمودند. در این روش، تاثیر جابجایی تار خنثی بر توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله شکل داده شده بررسی شد و نتایج قابل قبولی بدست آمده که با مقایسه آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی اثبات شده است.

هدف از این پژوهش ارایه روشی است که بتوان یکی از عیوب شکل‌دهی لوله که میزان برگشت فنری می‌باشد را به حداقل رساند و به خم با کیفیت مطلوب و شعاع بحرانی دست یافت. یکی از دست‌آوردهای این پژوهش این است که در آن روش جدیدی از خم‌کاری کششی دورانی با قالب خم انحنای متغیر ارائه می‌گردد. برخلاف روش‌های مرسوم که لوله‌های توخالی با سطح مقطع گرد با یک شعاع ثابت خم می‌شوند، در این روش برای دستیابی به شعاع منیمم خم، لوله به صورت تدریجی از یک شعاع بزرگ به شعاع کوچک تغییر شکل می‌دهد. که شعاع کوچک برابر قطر خارجی لوله است. کاهش نسبت خم تاثیر بسزایی در بازگشت فنری لوله دارد. از مزایای استفاده از قالب با شعاع متغیر نسبت به شعاع ثابت در این است که می‌توان نسبت خم را کاهش داد تا باعث بهبود در مقدار برگشت فنری شود. اما در عین حال از پارگی و چروکیدگی لوله جلوگیری نمود.

۲- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش به منظور بررسی مکانیزم خم‌کاری، فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با دو روش قالب شعاع ثابت و شعاع متغیر به همراه فشار سیال داخلی با کمک نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. در ادامه مدل‌سازی فرآیند و نحوه تحلیل بیان گردیده است.

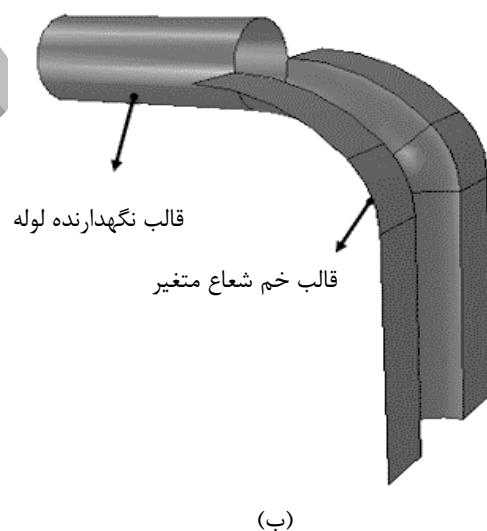
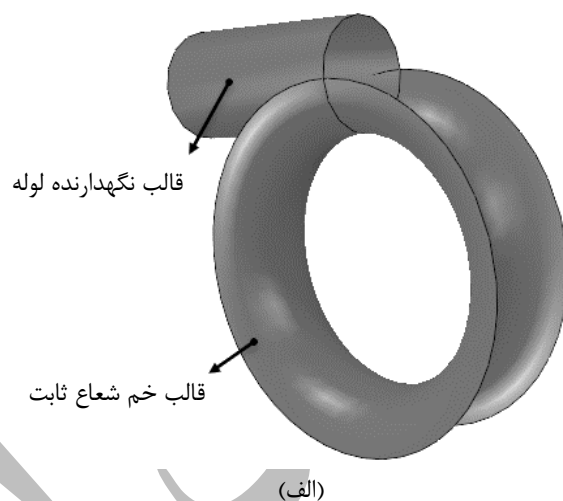
۲-۱- مدل‌سازی فرآیند

دو نوع قالب، یکی شعاع ثابت با نسبت خم به قطر یک و $1/6$ و دیگری 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 پوسته سه‌بعدی و شکل‌پذیر و اجزای قالب به صورت پوسته‌ای صلب و گسسته در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. قطعه کار بصورت الاستو-پلاستیک با کرنش سختی همسانگرد فرض شده است. به منظور تعریف خواص مکانیکی لوله از معادله کرنش سختی سوئیفت مطابق رابطه ۱ استفاده شده است. در این رابطه K ضریب استحکام، ϵ_0 کرنش اولیه و n توان کارسختی نامیده می‌شود که مقدار این ضرایب با استفاده از آزمون تجربی تست کشش که در ادامه بدان پرداخته شده است، استخراج گردید [۱۲].

$$\bar{\sigma} = k(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n = 274.282(\bar{\epsilon} + 0.203)^{0.286} \quad (1)$$

در این معادله ضریب استحکام برابر 274.282 ، کرنش اولیه 0.203 و توان کارسختی 0.286 بدست آمده است. با توجه به تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی استفاده شده است. برای کاهش زمان محاسبات، زمان شکل‌دهی ۱ ثانیه در نظر گرفته شد و 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 0.125 مطابق مرجع [۸] تعریف شده است. المان بکار رفته در مدل لوله از نوع S4R انتخاب شد که یک المان چهارگره‌ای از گروه ورق‌ها، مناسب و رایج در استفاده‌های معمول تحلیل ورق، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته، با قابلیت کنترل

پدیده Hourglass و حل مسائل با کرنش‌های محدود بوده که از معروف‌ترین المان‌های مورد استفاده در تحلیل مسائل لوله و ورق‌ها می‌باشد. برای قالب‌ها از المان چهارگره‌ای R3D4 استفاده شده که المانی سه‌بعدی، دوخطی و صلب است و برای اجسام صلبی که نیاز به تحلیل ندارند، استفاده می‌شود. برای بدست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی از همگرایی کرنش در انحنای بیرونی لوله خمیده استفاده شد و در نهایت با بررسی نتایج، مقدار 0.001 برای عدد دانه‌بندی لوله و مقدار 0.006 برای عدد دانه‌بندی قالب‌ها انتخاب شد. شکل ۱ نمای کلی از مدل شبیه‌سازی شده را برای دو حالت قالب شعاع ثابت و قالب شعاع متغیر نشان می‌دهد.



شکل ۱. الف) مدل سازی قالب با شعاع ثابت با نسبت یک برابر و $1/6$ برابر قطر و ب) مدل سازی قالب با شعاع متغیر بر اساس منحنی اینولوت

۲-۲- معیار گلوبی شدن

به منظور پیش‌بینی گلوبی شدن و همچنین پارگی در ناحیه خم از معیار گلوبی شدن در شبیه‌سازی استفاده شده است. یکی از معیارهای پرکاربرد، معیار کرنش پلاستیک معادل است. کمیت اسکالر کرنش پلاستیک معادل بیانگر تغییرشکل‌های غیر الاستیک ماده است، بطوری که مقدار مثبت آن نشان‌دهنده تسلیم شدن ماده است [۱۳]. افزایش ناگهانی شیب کرنش پلاستیک معادل یک المان در مقایسه با رفتار سایر المان‌ها، نشان‌دهنده شروع ناپایداری در آن المان می‌باشد [۱۴]. مقدار کرنش پلاستیک معادل از رابطه ۲ به دست می‌آید. در این رابطه $\bar{\epsilon}_0^{PI}$ و $\dot{\epsilon}^{PI}$ به ترتیب کرنش پلاستیک معادل اولیه و نرخ جریان پلاستیکی متناظر است. از آنجایی که همواره پارگی در انحنای خارجی خم رخ می‌دهد، در طول فرآیند شبیه‌سازی مقدار کرنش پلاستیک معادل المان‌ها برای پیش‌بینی گلوبی شدن بررسی شده است.

$$\bar{\epsilon}^{PI} = \bar{\epsilon}_0^{PI} + \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^{PI} : \dot{\epsilon}^{PI}} \quad (2)$$

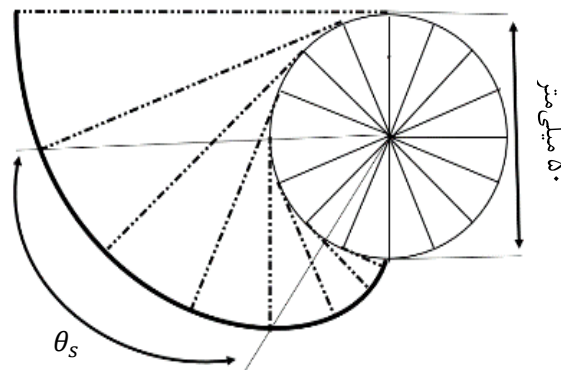
۳- مراحل آزمایشگاهی

۳-۱- تجهیزات لازم برای انجام آزمون‌ها

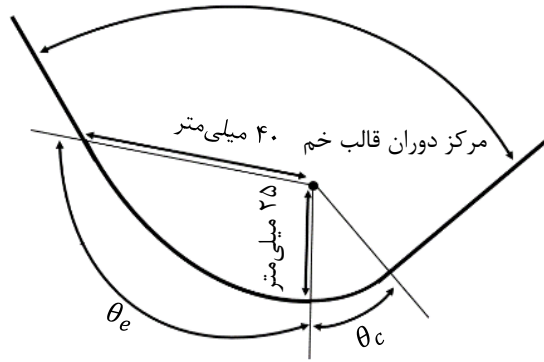
به منظور انجام آزمون‌های تجربی از لوله آلومینیومی با قطر خارجی ۲۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱/۸ میلی‌متر با گروه آلیاژی ۶۰۶۳ استفاده شده است. آلیاژهای این گروه عملیات حرارتی پذیر بوده و مقاومت به خوردگی بالا و خاصیت جوش پذیری خوبی دارند. لذا بطور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور خم‌کاری این لوله‌ها از دستگاه خم‌کاری کششی دورانی همراه با فشار سیال استفاده شده است. سرعت خم‌کاری در طول فرآیند یکسان در نظر گرفته شده است. سیستم هیدرولیکی این دستگاه قابلیت اعمال فشار تا ۲۰ مگاپاسکال (۲۰۰ بار) را دارد. همچنین بر روی دستگاه، مجموعه اعمال فشار سیال جهت تامین فشار داخلی لوله تعبیه شده و قابلیت ایجاد فشار تا ۱۰ مگاپاسکال (۱۰۰ بار) را داراست.

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 فشارسنج و شیر اطمینان، روی میزان دلخواه تنظیم گردیده و در تمام طول کورس خم‌کاری فشار ثابت در نظر گرفته می‌شود.

همانطور که ذکر شد، در روش خم‌کاری با شعاع ثابت از دو قالب خم‌کن استفاده شد که شعاع خم‌کاری هر کدام که همان شعاع قالب خم‌کن است برابر ۴۰ و ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. برای تعیین منحنی قالب خم با شعاع متغیر می‌توان از منحنی‌های متفاوت استفاده کرد. هریک از این منحنی‌ها بسته به نوع طراحی می‌توانند تابع منحنی‌های متفاوتی مانند منحنی‌های اینولوتی، هذلولوی، سیکلوئید، هیپوسیکلوئید بی‌زیر و غیره باشند. در این پژوهش یک منحنی اینولوت به عنوان معادله مکان هندسی انحنا متغیر قالب خم در نظر گرفته شده است و میزان تغییرات خم انتخاب شده، بر اساس یک منحنی اینولوت محاسبه شده است [۶]. نحوه انتخاب انحنا 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 خم‌کاری برساند. شعاع دایره اینولوت ۲۵ میلی‌متر می‌باشد که برابر با شعاع مینیمم خم‌کاری است. اگر انحنا متغیر لوله به سوی ۹۰ درجه خم شده باشد، شعاع خم مینیمم ۲۵ میلی‌متر است. محدوده خم انتخاب شده را می‌توان بر اساس روابط ۳ تا ۵ محاسبه کرد. جنس کلیه اجزای قالب از فولاد MO40 انتخاب شد. در شکل ۳ دستگاه خم‌کاری که قالب‌ها با شعاع ثابت و متغیر بر روی آن قرار می‌گیرد، به همراه تجهیزات آن نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲. انتخاب محدوده خم شدن، الف) موقعیت شعاع خم مینیمم، ب) محدوده خم با شعاع ثابت یک برابر قطر و شعاع متغیر

$$(\theta_s) = \frac{r}{d} \frac{180^\circ}{\pi} = 57.5^\circ$$

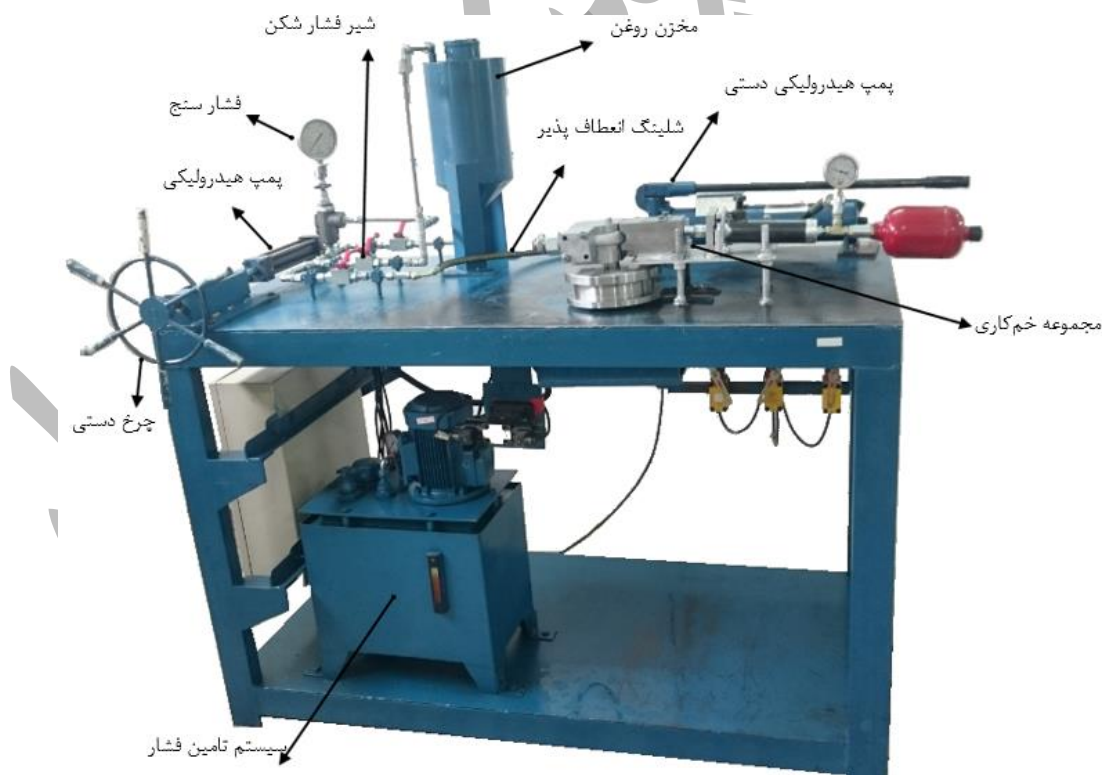
(۳) موقعیت شعاع خم مینیمم

$$(\theta_e) = 80^\circ$$

(۴) محدوده خم با شعاع متغیر

$$(\theta_c) = 45^\circ$$

(۵) دامنه خم با شعاع ثابت ($r=D$)

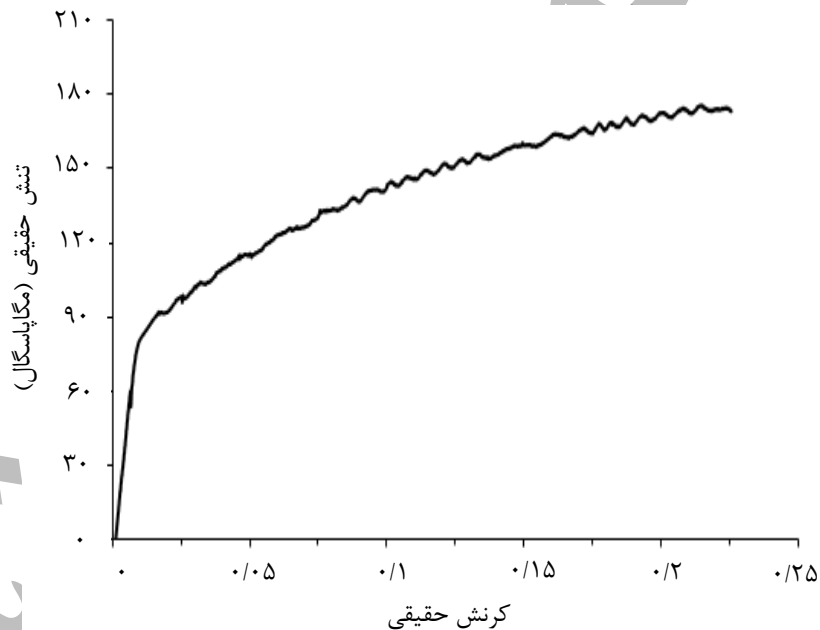


شکل ۳. مجموعه قالب‌های مورد استفاده برای خم.

۳-۲- تعیین خواص مکانیکی لوله

به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله 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 ۴ نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از انجام آزمون نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی بدست آمده مطابق با معادله سوئیفت برای استفاده در مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمودار تنش-کرنش لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ مورد استفاده در این پژوهش

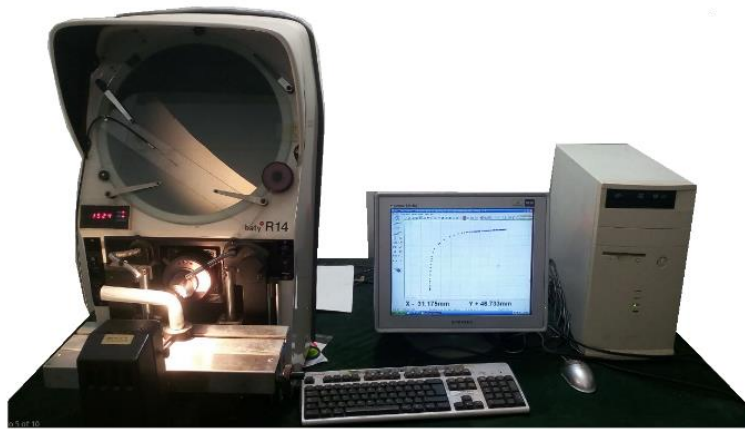
جدول ۱. خواص مکانیکی و فیزیکی لوله آلومینیومی ۶۰۶۳

پارامتر	واحد	مقدار
استحکام کشش نهایی	مگاپاسگال	۱۷۳/۶۸۹
تنش تسلیم ۰/۲ درصد	مگاپاسگال	۹۰/۱۱۴

۲۶	درصد	حداکثر ازدیاد طول
۰/۲۸۶	—	نمای کرنش سختی
۲۷۴/۲۸۲	مگاپاسگال	ضریب استحکام
۶۸/۳	گیگاپاسگال	مدول یانگ
۰/۳۳	—	ضریب پواسون
۲۹۶۰	کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی

۳-۳- دستگاه پروفایل پروژکتور

از این دستگاه برای اندازه‌گیری زاویه برگشت فنری لوله خم شده بعد از باربرداری استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری ابعادی آن ۰/۰۰۱ میلی‌متر بوده و دارای یک صفحه گردان به موازات محور افق با زاویه ۳۶۰ درجه و دقت ۱ درجه است که برای چرخش میز دستگاه استفاده می‌شود. این میز در راستای محور X و Y هم حرکت خطی داشته و توسط میکرومتر کنترل می‌شود. دقت این ریز سنجه‌ها ۰/۰۰۵ میلی‌متر و دامنه اندازه‌گیری آن محدود می‌باشد. کنگی دستگاه در راستای محور Z حرکت بالا و پایین داشته و تثبیت می‌شود. این حرکت به دلیل تنظیم مناسب لنز دستگاه با چشم اپراتور می‌باشد. کنگی حول محور Y به اندازه ۲۵ درجه قابل تنظیم بوده که ۱۲/۵ درجه در جهت ساعت و ۱۲/۵ درجه در جهت پاد ساعت می‌باشد. همانطور در شکل ۵ نشان داده شده است، لوله روی دستگاه می‌گیرد و سپس داده‌های پروفیل مقطع به عنوان فایل DXF ذخیره شده و سپس به نرم افزار اتوکد مکانیکال وارد شده و بازگشت فنری اندازه‌گیری می‌شود.

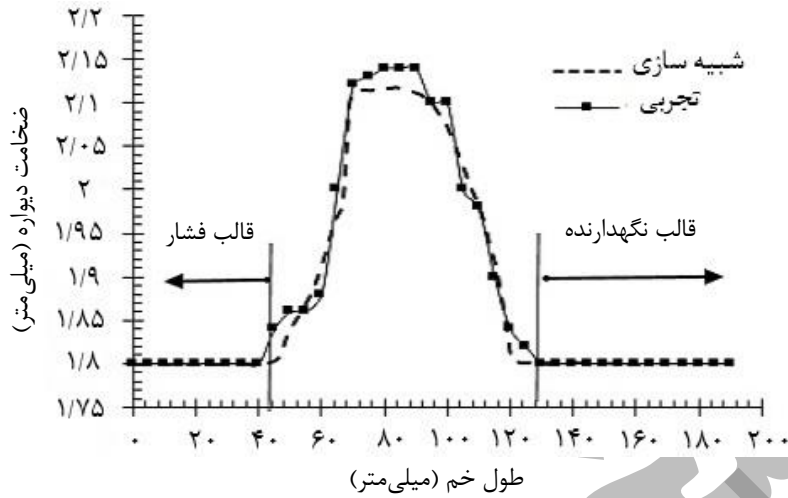


شکل ۵. دستگاه پروفایل پروژکتور مدل bty سری R14

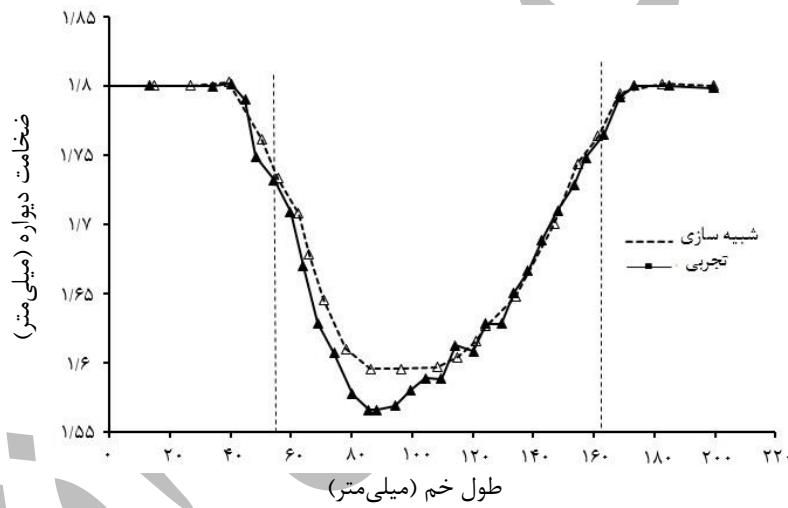
۴- نتایج و بحث

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. همانگونه که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی حاضر مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. حداکثر اختلاف کمتر از $8/5$ درصد می‌باشد. این میزان اختلاف حاصل فرضیات در نظر گرفته شده همچون فرض تنش صفحه‌ای بودن و همسانگرد بودن جنس لوله، عدم یکنواختی جنس لوله در آزمایش‌ها، عدم دقت هندسه لوله در دایروی بودن و یکنواختی ضخامت لوله و همچنین عدم یکنواختی ضرایب اصطکاک در سطح قالب‌ها می‌باشد.

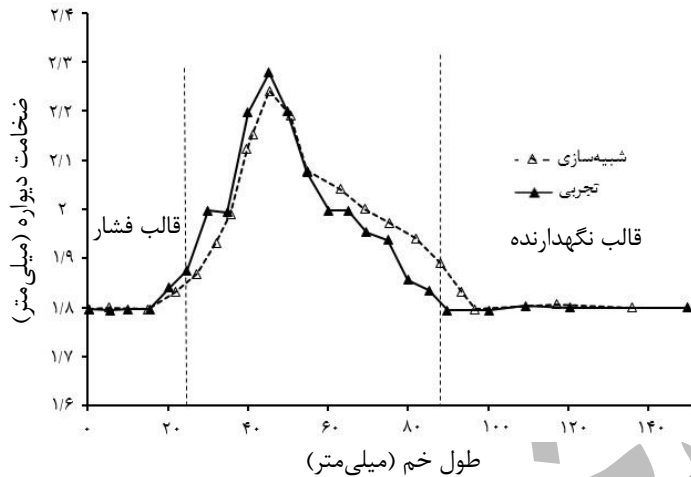


(الف)

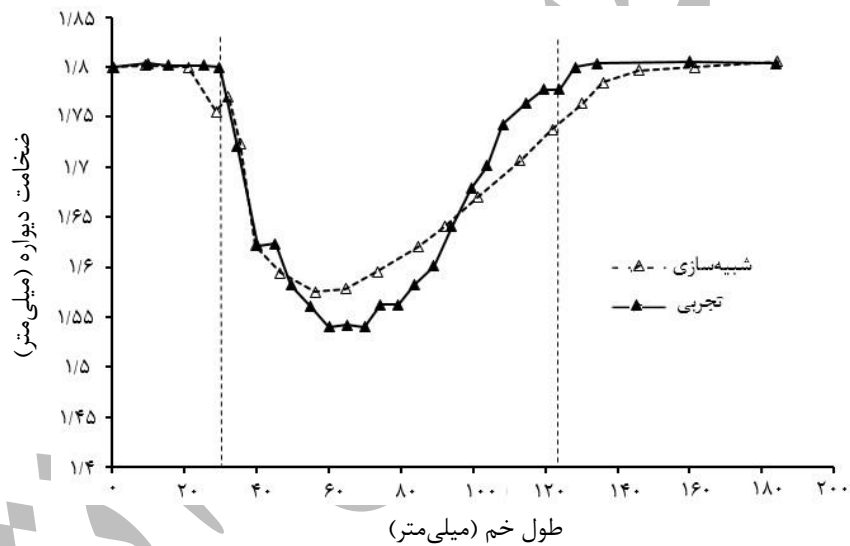


(ب)

شکل ۶. نمودار تغییرات ضخامت بر حسب طول خم در نسبت شعاع خم $1/6$ برابر قطر و در حالت بدون فشار داخلی سیال، الف) قوس بیرونی خم و ب) قوس داخلی خم



(الف)



(ب)

شکل ۷. نمودار تغییرات ضخامت بر حسب طول خم در نسبت شعاع خم متغیر در حالت بدون فشار داخلی سیال، الف) قوس بیرونی خم و ب) قوس داخلی خم

۴-۲- تاثیر انحنای خم و فشار سیال بر روی برگشت فنری

در آزمون‌های تجربی خم کاری کششی دورانی، پس از آن که لوله خم شده از قید قالب‌های فشار، خم و نگهدارنده لوله آزاد شد (اتمام بارگذاری)، قسمتی که بصورت الاستیک تغییر شکل یافته تمایل به برگشت به حالت اولیه دارد که منجر به کاهش θ و برگشت فنری می‌شود. کشش بیرونی و فشار درونی در جهت طولی لوله خم شده

یک بخش عمده‌ای در تغییر شکل لوله می‌باشند. آنها همچنین تغییرات عمده‌ای هستند که منجر به برگشت فنری می‌شوند.

شعاع انحنای خم بعد از برگشت فنری از رابطه ۶ بدست می‌آید [۱۵].

$$R' = \frac{R}{1 - \frac{K}{E} \left\{ \frac{d_0}{2R} + \frac{t_0}{R} \left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_s}{K} \right)^{\frac{1}{n}-1}} \right] \right\}^{n-1}} \quad (6)$$

از رابطه ۶ می‌توان دریافت که مقدار برگشت فنری انحنای لوله خم شده از زاویه خم کاری مستقل است. به طور دقیق، شکل لوله خم شده، یک قوس کامل بعد از برگشت فنری نیست. بنابراین خیلی مشکل است که به صورت دقیق از شعاع خم برای توصیف انحنای لوله خم شده بعد از برگشت فنری بتوان استفاده کرد. R' در واقع یک مقدار تقریبی است. همچنین از رابطه ۶ می‌توان دریافت که انحنای خم بعد از برگشت فنری از خم شدن در زمان بارگذاری کمتر است. در واقع R' بزرگتر از R است. یعنی با افزایش R مقدار R' افزایش می‌یابد.

زاویه برگشت فنری لوله خم شده بعد از اتمام بارگذاری از رابطه ۷ بدست می‌آید:

$$\Delta\theta = \theta - \theta' \quad (7)$$

θ زاویه خم کاری در مدت زمان بارگذاری و θ' زاویه خم واقعی بعد از باربرداری است. با فرض اینکه محور مرکزی

لوله بعد از برگشت فنری مشابه یک قوس کامل است، پس $R\theta = R'\theta'$ بدست می‌آید. به عبارتی $\theta' = \theta \cdot \frac{R}{R'}$ می‌باشد. لذا زاویه برگشت فنری بعد از باربرداری توسط رابطه ۸ بدست می‌آید [۱۴]:

$$\Delta\theta = \theta \cdot \frac{K}{E} \cdot \left\{ \frac{d_0}{2R} + \frac{t_0}{R} \left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_s}{K} \right)^{\frac{1}{n}-1}} \right] \right\}^{n-1} \quad (8)$$

رابطه ۸ بیانگر آن است که اگر زاویه خم کاری (θ) افزایش یابد، برگشت فنری متناسب با ناحیه تغییر شکل یافته افزایش خواهد یافت. همچنین زاویه بازگشت فنری $\Delta\theta$ نیز افزایش می‌یابد.

مقدار زیاد ضریب استحکام (K)، سبب مقاومت مواد لوله نسبت به تغییر شکل پلاستیک بیشتر می‌شود. همچنین

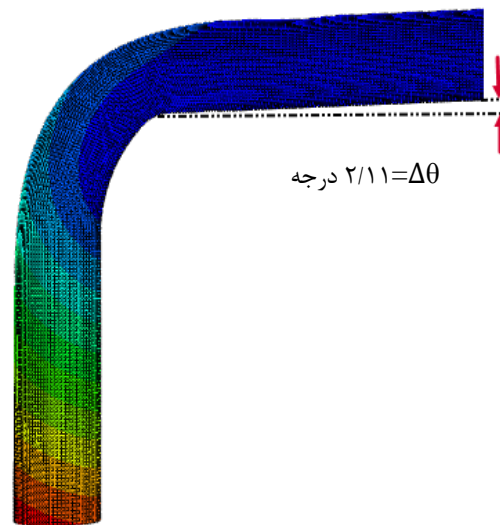
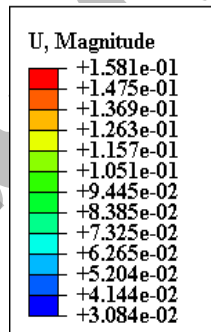
مقدار زیاد مدول یانگ (E)، موجب مقاومت مواد به تغییر شکل الاستیک بیشتر شده و نسبت تغییر الاستیک در

فرآیند خم کاری کاهش می‌یابد. از این رو به طوری که مقدار ضریب استحکام (K) در لوله معین افزایش یابد، همراه با کاهش مدول یانگ (E)، منجر به افزایش زاویه بازگشت فنری $\Delta\theta$ بعد از خم کاری می‌شود. مقادیر شعاع بعد از باربرداری در حالت خم با شعاع ثابت، در جدول ۲ آورده شده است.

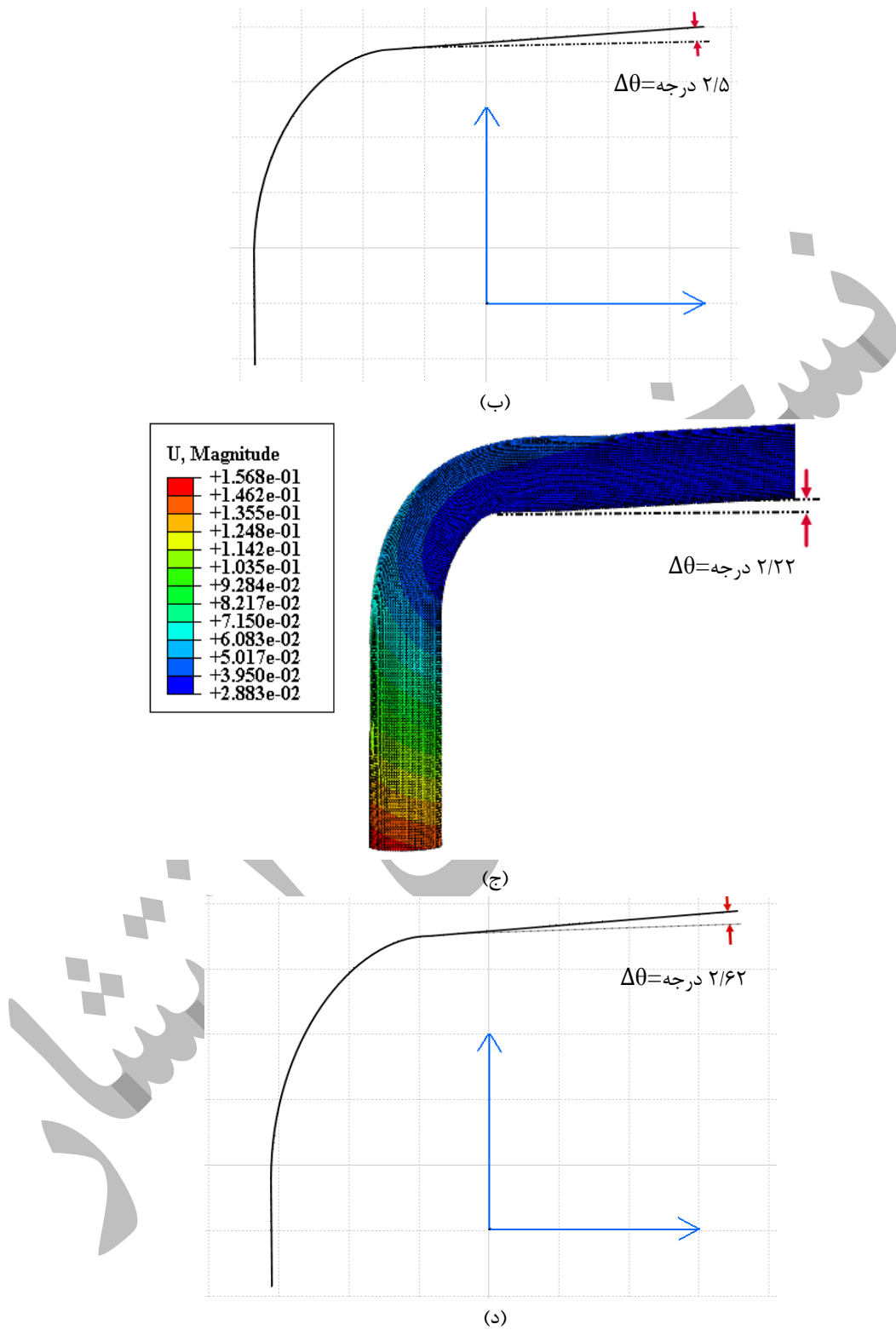
جدول ۲. مقادیر شعاع خم بعد از باربرداری بدست آمده از رابطه ۶

R=1.6D	R=1D	نسبت شعاع خم (میلی متر)
۴۰	۲۵	شعاع خم
۴۰/۳۵	۲۵/۱۵	شعاع خم بعد از باربرداری

مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی و تست‌های تجربی در حالت شعاع خم متغیر به منظور اعتبارسنجی و دقت مدل برای پیش‌بینی برگشت فنری لوله‌ها انجام گردید. شکل ۸ نشان می‌دهد که حداکثر تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حدود ۱۵ درصد است.



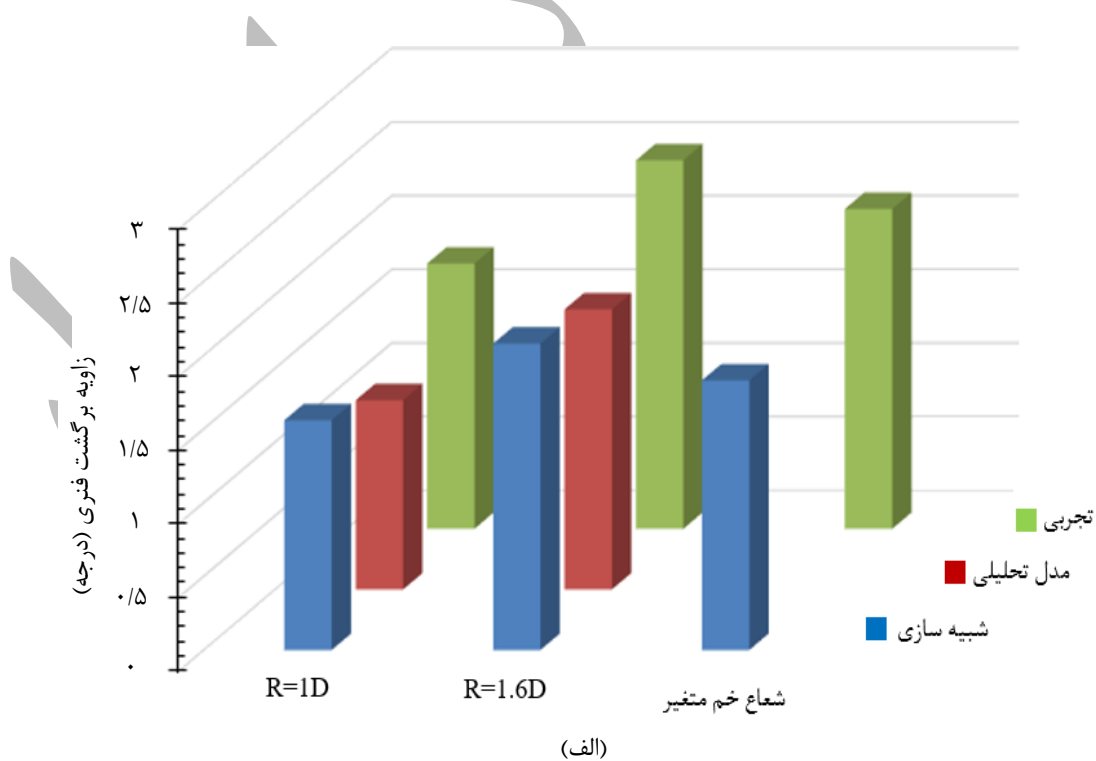
(الف)

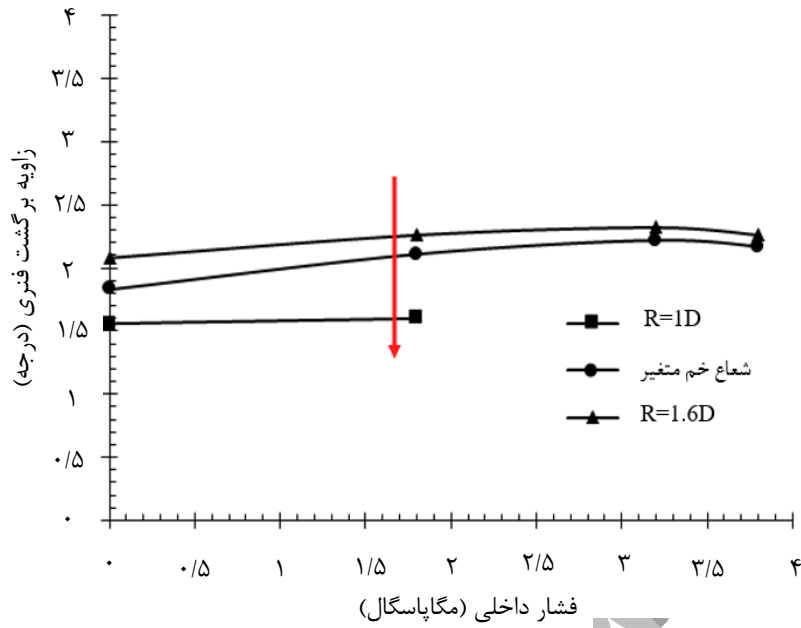


شکل ۸. مقایسه بین نتایج شبیه سازی و تجربی در شعاع خم متغیر برای برگشت فنری. (الف) شبیه سازی در فشار ۱/۸ مگاپاسگال. (ب) تجربی در فشار ۱/۸ مگاپاسگال. (ج) شبیه سازی در فشار ۳/۲ مگاپاسگال و (د) تجربی در فشار ۳/۲ مگاپاسگال

شکل ۹ میزان برگشت فنری لوله را برحسب شعاع خم و فشار سیال داخلی نشان می‌دهد. نکته مهمی که از شکل ۹-الف برداشت می‌شود این است که با کاهش نسبت خم از $1/6$ به 1 در حالت بدون فشار داخلی سیال، میزان برگشت فنری به ترتیب $2/5$ به $1/8$ درجه کاهش یافته است. همچنین مقدار آن در شعاع خم متغیر، $2/17$ درجه می‌باشد. کاهش شعاع خم باعث سخت‌تر شدن شرایط شکل‌دهی و افزایش کرنش پلاستیک در محدوده خم کاری می‌گردد. در نتیجه این امر، تغییر شکل پلاستیک شدیدتری در منطقه خم کاری رخ می‌دهد و نواحی با تغییر شکل الاستیک کاهش می‌یابند.

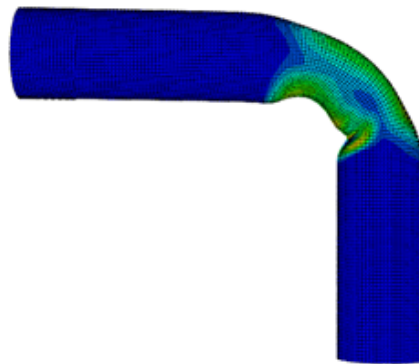
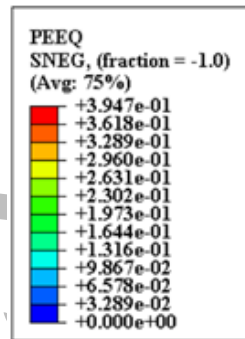
شبه خطی بودن نمودارها در شکل ۹-ب در تمامی نسبت‌های خم، نشان می‌دهد که افزایش فشار از صفر تا $3/8$ مگاپاسکال تاثیر کمی بر برگشت فنری دارد. می‌توان نتیجه گرفت که این سطح از فشارها تاثیر محسوسی بر میزان تغییر شکل الاستیک بوجود آمده در منطقه خم ندارد و میزان تغییر شکل الاستیک ذخیره شده در لوله در کلیه فشارها تقریباً یکسان است. کاهش نواحی حامل تغییر شکل الاستیک منجر به کاهش بازگشت فنری می‌گردد. شکل ۱۰ تغییرات کرنش معادل برحسب شعاع خم در حالت بدون فشار داخلی سیال را نشان می‌دهد.



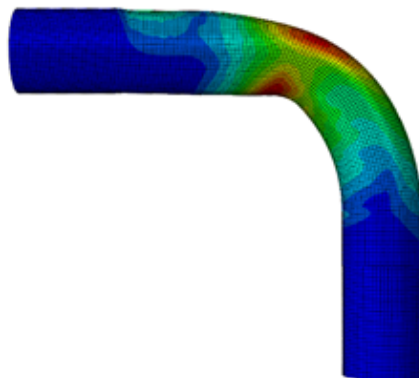
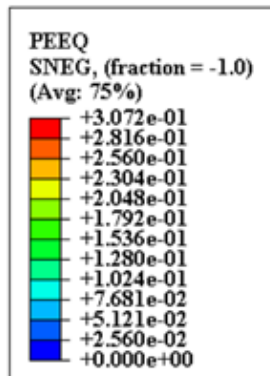


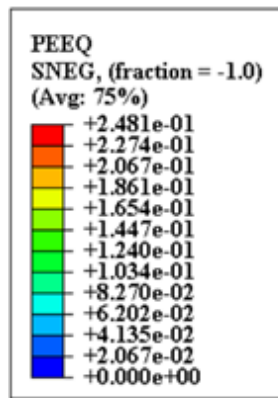
(ب)

شکل ۹. میزان برگشت فنری در شرایط مختلف. الف) نتایج بدست آمده از تاثیر نسبت شعاع خم بر روی بازگشت فنری، ب) نتایج بدست آمده از تاثیر فشار سیال بر روی بازگشت فنری.

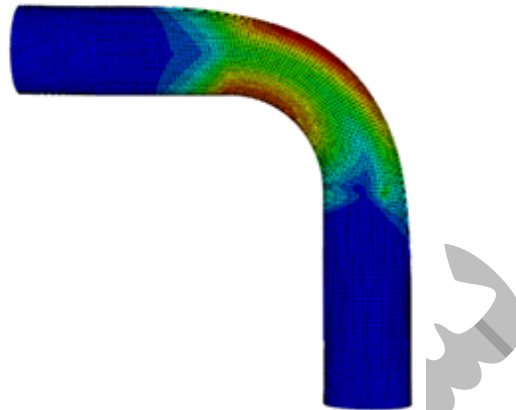


(الف)





(ب)



(ج)

شکل 10. مقادیر کرنش معادل در نسبت خم مختلف در حالت بدون فشار داخلی سیال، الف (R=1D، ب) R=1.6D، ج) شعاع خم متغیر.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی لوله آلومینیومی با آلیاژ ۶۰۶۳ به منظور بررسی تاثیر ابزار خم کاری بر روی کیفیت خم تولید شده، با دو نسبت شعاع خم ثابت و متغیر مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر پارامتر فشار سیال داخلی و انحنای قالب خم بر میزان برگشت فنری لوله‌های خمیده با استفاده از آزمون تجربی و شبیه‌سازی مشخص گردید. همچنین فشار داخلی بیشینه قابل اعمال نیز به کمک معیار گلوبی پیشبینی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

۱- زاویه برگشت فنری در حالت بدون فشار سیال داخلی در نسبت شعاع خم به قطر ۱، ۱/۶ و شعاع خم متغیر به ترتیب ۱/۵۶، ۲/۰۸ و ۱/۸۳ درجه اندازه‌گیری شده است.

۲- نتایج نشان داد که کاهش نسبت خم تاثیر بسزایی در بازگشت فنری لوله دارد.

۳- افزایش فشار از صفر تا ۳/۸ مگاپاسکال تاثیر محسوسی بر بازگشت فنری ندارد.

تاییدیه‌های اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

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.

منابع

- [1] A. Zardoshtian, H. Sabet, M. Elyasi, "Improvement of the rotary draw bending process in rectangular tubes by using internal fluid pressure," *Int J Adv Manuf Technol.*, Vol. 95, pp. 697–705, 2018.
- [2] M. Elyasi, M. Paluch, M. Hosseinzadeh, Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes, *Int J Adv Manuf Technol.*, Vol. 88, pp. 3307–3318, 2017.
- [3] M. Roein, M. Elyasi, M.J. Mirnia, "Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 66, pp. 27-38, 2021.
- [4] M. Roein, M. Elyasi, M.J. Mirnia, "Development of bending of AISI 304L micro-tubes with micro-wire mandrel and investigation of its effective parameters," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 64, pp. 723-738, 2021.
- [3] R. Bihamta, Q.-H. Bui, M. Guillot, G. D'Amours, A. Rahem, and M. Fafard, "Global optimisation of the production of complex aluminium tubes by the hydroforming process," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 9, pp. 1-11, 2015.
- [4] Y. He, L. Heng, Z. Zhang, Z. Mei, L. Jing, and L. Guangjun, "Advances and trends on tube bending forming technologies," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 25, pp. 1-12, 2012.
- [5] L. Heng, K.-p. SHI, Y. He, and Y.-l. TIAN, "Springback law of thin-walled 6061-T4 Al-alloy tube upon bending," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. s357-s363, 2012.
- [6] X. Xiao, Y. Liao, Y. Sun, Z. Zhang, Y. P. Kerdeyev, and R. Neperish, "Study on varying curvature push-bending technique of rectangular section tube," *Journal of materials processing technology*, Vol. 187, pp. 476-479, 2007.
- [7] J. Wang and R. Agarwal, "Tube bending under axial force and internal pressure," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, pp. 598-605, 2006.
- [8] L. Lăzărescu, "Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, pp. 85-91, 2013.

- [9] T. Wen, "On a new concept of rotary draw bend-die adaptable for bending tubes with multiple outer diameters under non-mandrel condition," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 311-317, 2014.
- [10] Vahid Modanloo, Majid Elyasi, Hossein Talebi-Ghadikolaee, Farzad Ahmadi Khatir, Behnam Akhondi, "The use of MCDM techniques to assess fluid pressure on the bending quality of AA6063 heat-treated tubes," *Journal of Engineering Research*, in Press, 2023.
- [11] M. Elyasi, V. Modanloo, H. Talebi Ghadikolaee, F. Ahmadi Khatir, B. Akhondi, "Investigating the effect of heat treatment in hydraulic rotary draw bending of AA6063 tubes," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 23, pp. 257-264, 2023.
- [12] H. Talebi-Ghadikolaee, F. Ahmadi Khatir, S. Seddighi, "Numerical-experimental study on the thickness distribution of metallic bipolar plates for PEM fuel cells," *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*, Vol.9, pp.1-18, 2022.
- [13] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, and R. Mahdavinejad, "A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks," *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 22, pp. 3210-3221, 2013.
- [14] S. Bagherzadeh, M. Mirnia, and B. M. Dariani, "Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp. 131-140, 2015.
- [15] E. Da-Xin, H.-h. He, X.-y. Liu, and R.-x. Ning, "Spring-back deformation in tube bending," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 16, pp. 177-183, 2009.