

ارائه یک مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم‌کاری لوله تحت فشار سیال داخلی

جابر سلیمانی^۱، مجید الیاسی^{۱*}، مرتضی حسین‌زاده^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران
^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت‌الله آملی، آمل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ فروردین ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۳ آبان ۱۳۹۵
پذیرش: ۸ دی ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۸ دی ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

امکان‌سنجی خم‌کاری لوله
پیش‌بینی پارامترهای فرآیند
فشار سیال داخلی
مدل تحلیلی
شبیه‌سازی عددی

چکیده: امروزه خم‌کاری لوله از جمله فرآیندهای پرکاربرد در صنعت هوافضا، خودروسازی و صنایع دیگر است. طی خم‌کاری، تغییرات ضخامت و اعوجاج سطح مقطع قابل‌توجهی رخ می‌دهد. ضخامت در انحنای داخلی لوله خمیده افزایش و در انحنای خارجی کاهش می‌یابد. همچنین در اکثر موارد، وقتی شعاع خم کوچک باشد، چین‌خوردگی در انحنای داخلی اتفاق می‌افتد. در صنعت برای رفع چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع از مندرل استفاده می‌شود. اما در مواردی که شعاع قالب خم کوچک باشد، استفاده از مندرل اجتناب می‌شود. زیرا مندرل نازک‌شدگی دیواره لوله را در انحنای خارجی افزایش می‌دهد و این در عملیات تولید، نامطلوب است. در پژوهش حاضر با توجه به توسعه هیدروفورمینگ لوله‌ها، جایگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل مورد توجه قرار گرفته است؛ که می‌تواند برای کنترل بهتر تغییر شکل و توزیع ضخامت لوله مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، مدل تحلیلی ارائه شده که با در نظر گرفتن تاثیر جابجایی تاریختی بر توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله شکل داده شده و استفاده از روابط مناسب، نتایج دقیق‌تری نسبت به آثار منتشر شده قبلی می‌دهد. همچنین به منظور بررسی پارامترهای فرآیند در خم‌کاری لوله با شعاع خم بحرانی ($R/D < 2$)، شعاع خم و D قطر خارجی لوله، از شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است. با بررسی آزمایشگاهی نشان داده شد، پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی و شبیه‌سازی مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.

۱- مقدمه

امروزه لوله‌های خمیده یکی از کلیدی‌ترین قطعات سبک‌وزن، برای انتقال مواد هستند که در بسیاری از صنایع دارای تکنولوژی بالا مانند صنایع هوابیمایی، هوافضا، کشتی‌سازی، اتومبیل، انرژی و پزشکی کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند. به طوری که این قطعات لوله‌ای، همه نیازهای موجود برای قطعات با وزن کم، استحکام بالا و عملکرد مناسب را در هر دو جنبه‌ی جنس و ساختار برطرف نموده‌اند. برای خم کردن قطعات لوله‌ای شکل، با شعاع خم‌کاری، زاویه خم‌کاری و شکل مشخص، خم‌کاری لوله به‌عنوان یک تکنولوژی ساخت اساسی برای تولید محصولات سبک‌وزن، شناخته شده است. در میان انواع روش‌های جدیدی که جهت تولید خم مطلوب مورد استفاده قرار گرفته‌اند، خم‌کاری کششی دورانی، معمول‌ترین و تحت کنترل‌ترین روش خم‌کاری لوله است و امروزه حدود ۹۵ درصد عملیات خم‌کاری لوله‌ها با این روش انجام می‌شود. این روش در مقایسه با سایر روش‌های خم‌کاری لوله‌ها دارای مزایایی مانند سرعت تولید بالا، دقت خوب، تولید خم با کیفیت مناسب، امکان کنترل جریان ماده در ناحیه خم، 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 است [۱ و ۲]. شکل ۱ ابزارهای استفاده شده در خم‌کاری کششی دورانی را نشان

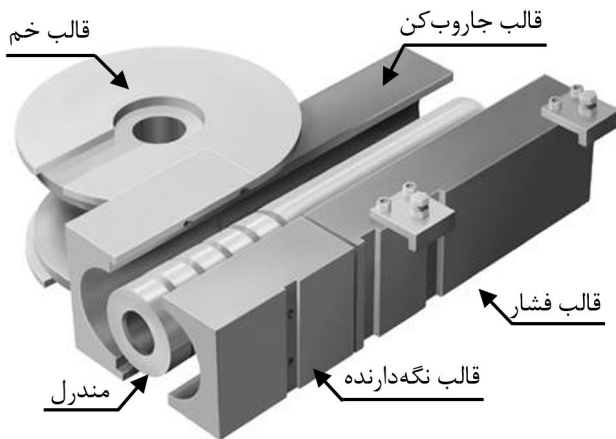


Fig. 1. Main components of the rotary draw bending die [3]

شکل ۱: اجزای اصلی قالب خم‌کاری کششی دورانی [۳]

می‌دهد. اجزای قالب خم‌کاری در این فرآیند، عبارتند از: قالب خم^۱ که شعاع آن، شعاع خم‌کاری محسوب شده و گشتاور خمشی از این قطعه به لوله وارد می‌شود.

قالب نگه‌دارنده^۲ همواره لوله را روی قالب خم، فشرده نگه داشته و

1 Bend die
2 Clamp die

و کائو^۶ [۸] چین و چروک در خم کاری لوله را با محدودیت‌های مرزی در انتهای لوله، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با به کار بردن روش انرژی، شعاع خم کاری را به عنوان تابعی از هندسه لوله، هندسه ابزار و خواص ماده محاسبه نمودند. با پیشرفت محاسبات عددی، روش المان محدود برای شبیه‌سازی فرآیند خم کاری لوله به کار برده شده است؛ ژان^۷ و همکاران [۹] فرآیند خم کاری کنترل عددی لوله را برای لوله‌های جدار نازک شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش زاویه خم، نسبت حداکثر نازک شدن دیواره در انحنای خارجی اندکی افزایش داشته و نسبت حداکثر ضخیم شدن دیواره در انحنای داخلی به صورت خطی افزایش می‌یابد. یانگ و ژئو^۸ [۱۰] خم کاری کششی دورانی را شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که در مورد خم با مندرل، مقطع لوله به حالت دایروی نزدیک باقی می‌ماند، اما کاهش ضخامت در انحنای بیرونی می‌تواند قابل توجه باشد. وانگ و آکاروال^۹ [۱۱] غیر دایروی بودن سطح مقطع لوله و تغییرات ضخامت دیواره لوله را در فرآیند خم کاری هیدرولیکی، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی، به صورت تحلیلی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با اعمال هم‌زمان فشار داخلی و نیروی محوری، غیر دایروی بودن سطح مقطع و چروکیدگی در شعاع داخلی لوله کاهش می‌یابد.

لازارسکو^{۱۰} [۱۲] تأثیر فشار سیال داخلی بر کیفیت خم کاری لوله آلومینیومی را مورد بررسی قرار داده و نشان داد که با افزایش فشار داخلی، عدم گردی سطح مقطع و ضخیم‌شدگی انحنای داخلی خم، کاهش یافته و درصد نازک‌شدگی دیواره لوله در انحنای خارجی خم افزایش می‌یابد. سلیمانی و همکاران [۱۳] با جایگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خم کاری کششی دورانی دریافتند، استفاده از فشار سیال داخلی بیشترین نازک‌شدگی دیواره لوله را در انحنای خارجی به میزان چشمگیری بهبود می‌بخشد؛ اما بیشترین اعوجاج سطح مقطع و بیشترین ضخیم‌شدگی دیواره لوله در انحنای داخلی خم، نسبت به حالت با مندرل افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، چین خوردگی، نازک‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع، سه عیب اصلی در فرآیند خم کاری لوله‌ها هستند و تاکنون محققان برای کاهش این عیوب و بهبود کیفیت لوله‌های خم کاری شده تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند.

آشکار است که امکان‌سنجی خم لوله قبل از عملیات خم کاری و پیش‌بینی پارامترهای فرآیند نقش مهمی در تجزیه و تحلیل ابزار و فرآیند طراحی خم لوله در مرحله طراحی اولیه دارد. همچنین با توجه به اینکه در دهه‌های اخیر، هیدروفورمینگ لوله‌ها به عنوان یک تکنولوژی جدید در تولید قطعات شناخته شده است، جایگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل در خم کاری کششی دورانی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا ایجاد فشار

لوله توسط آن در حین خم کاری مهار می‌شود. قالب فشار^۱ از چرخش لوله به همراه قالب خم جلوگیری کرده و لوله را در مقابل گشتاوری که قالب خم به لوله وارد می‌کند نگه می‌دارد. همچنین با ایجاد نیروی فشاری کافی در برابر قالب جاروب‌کن^۲ از چروکیدگی لوله جلوگیری می‌کند. قالب فشار می‌تواند ثابت یا متحرک باشد و در صورت متحرک بودن، به جریان ماده به داخل منطقه خم کاری کمک می‌کند و باعث کاهش درجه نازک‌شدگی شعاع بیرونی خم می‌شود. قالب جاروب‌کن برای جلوگیری از چروکیدگی قسمت داخلی خم در مواقعی که شعاع خم کوچک باشد استفاده می‌گردد. مندرل^۳ برای جلوگیری از چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع به کار برده می‌شود. البته در استفاده از مندرل باید در حد امکان پرهیز کرد؛ زیرا هزینه تولید را افزایش می‌دهد. مندرل یک عامل حمایت‌کننده از داخل لوله است که معمولاً به صورت ثابت و مفصلی ساخته می‌شود. همچنین از مواد نرم مانند سرب، قیر، فشار روغن نیز می‌توان به عنوان مندرل استفاده کرد. در روش خم کاری کششی دورانی، ابتدا لوله از یک انتها توسط قالب نگه‌دارنده و قالب خم مهار می‌شود. سپس با چرخش هم‌زمان قالب خم و قالب نگه‌دارنده، لوله در امتداد قالب فشار و روی شیار قالب خم کشیده می‌شود. چرخش قالب دورانی به اندازه‌ای است که زاویه خم مورد نظر در لوله ایجاد شود. در مرحله بعد توسط یک بازویی، مندرل از درون لوله خارج می‌شود. سپس قالب‌ها از لوله جدا شده و لوله با برابرداری می‌شود.

برای هر فرآیند خم کاری، با شروع تغییر شکل، توزیع تنش‌های کششی و فشاری به ترتیب در شعاع داخلی و خارجی لوله ایجاد می‌شوند که باعث عیوب متعددی مانند چین خوردگی، نازک‌شدگی بیش از حد (شکست)، اعوجاج سطح مقطع و غیره می‌شود. پیش‌بینی درست پدیده‌های فیزیکی و کنترل مؤثر بر متغیرهای فرآیند خم کاری از مسائل اساسی در زمینه خم کاری است [۱]. طی فرآیند خم کاری می‌توان از عیب چروکیدگی جلوگیری کرد، اما عدم گردی سطح مقطع و نازک‌شدگی دیواره به ناچار پدیدار خواهند شد [۴]. هر چه مقطع لوله‌ی خم کاری شده به حالت دایروی نزدیک‌تر باشد، مقاومت آن در برابر فشارهای داخلی، بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر، نازک‌شدگی در قوس بیرونی باعث تضعیف استحکام لوله می‌شود [۵].

در گذشته، محققان روی مسئله اعوجاج سطح مقطع، تغییرات ضخامت دیواره و چروکیدگی در فرآیند خم کاری لوله‌ها تحقیقاتی انجام داده‌اند. پن و استلسون^۴ [۶] با استفاده از روش انرژی، شکل اعوجاج و تغییرات ضخامت را در لوله‌های تغییر شکل یافته بررسی کردند. تانگ^۵ [۷] عبارت‌هایی را برای محاسبه مقدار تنش‌ها در خم کاری ساده لوله توسعه داد. سپس تغییرات ضخامت دیواره، میزان چروکیدگی در ناحیه خم، انحراف تار خشی و طول لوله تغذیه‌شده را بر اساس تئوری تغییر شکل پلاستیک استخراج کرد. وانگ

6 Wang and Cao

7 Zhan

8 Yang and Jeon

9 Wang and Agarwal

10 Lazaresco

1 Pressure die

2 Wiper die

3 Mandrel

4 Pan and Stelson

5 Tang

هستند.

۲- مدل تحلیلی

در این قسمت یک مدل تحلیلی برای فرآیند خم کاری کششی دورانی لوله ارائه شده است که بتواند رفتار اعوجاج سطح مقطع و تغییرات ضخامت دیواره را تحت فشار سیال داخلی، پیش‌بینی نماید. مزیت مدل تحلیلی ارائه شده این است که در یک زمان محاسباتی بسیار کم‌تر نسبت به شبیه‌سازی اجزای محدود، پیش‌بینی خوبی از هندسه نهایی لوله را مهیا می‌سازد. همچنین، علاوه بر فهم بهتر نسبت به مکانیک شکل‌دهی نمونه، با مطالعه مدل تحلیلی فرآیند، درک بهتری برای تفسیر نتایج شکل‌دهی حاصل خواهد شد. در این مدل تحلیلی، به جای استفاده از روش مینیمم انرژی که در اکثر کارهای قبلی به کار گرفته شده است، تئوری تغییرشکل پلاستیک که توسط تانگ [۷] و وانگ و آگاروال [۱۱] بیان گردیده توسعه داده شده است. سیستم مختصات استفاده شده در این تحلیل، در شکل ۲ نشان داده شده است. روی صفحه خم کاری، یک لوله به شعاع r (مرکز لوله تا وسط دیواره) و ضخامت t ، به وسیله یک قالب خم به شعاع R و زاویه خم θ خم شده است. روی سطح مقطع، محیط لوله به وسیله زاویه φ نمایش داده شده است. انحنای بیرونی با زاویه $0 \leq \varphi < \pi/2$ و $\pi \leq \varphi < 3\pi/2$ تعریف شده است و انحنای درونی نیز در این مقطع با زاویه $0 \leq \varphi < \pi/2$ و $\pi \leq \varphi < 3\pi/2$ نشان داده شده است. فشار داخلی P_i ، در سطح داخلی لوله به کار برده شده که در مورد خم کاری خالص برابر صفر در نظر گرفته شده است.

فرض‌های در نظر گرفته شده برای تحلیل عبارتند از:

۱. صفحه‌ای عمود بر محور لوله قبل از تغییرشکل، صفحه‌ای عمود بر محور بعد از تغییرشکل است.
۲. ضخامت لوله در مقایسه با طول و شعاع لوله کوچک است. بنابراین، تغییرشکل به سبب برش نادیده گرفته شده است.

سیال درون لوله، باعث به وجود آمدن تماس بهتر قالب با لوله در مقایسه با استفاده از مندرل می‌شود. در این پژوهش امکان‌سنجی خم لوله و پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم کاری لوله با دو روش مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی ارائه شده است. مدل تحلیلی ارائه شده در این پژوهش، در مقایسه با پژوهش‌های منتشر شده قبلی، با استفاده کردن از معیار فون میزز به جای معیار ترسکا در نظر گرفتن تأثیر جابجایی تار خنثی بر توزیع تنش و کرنش در انحنای داخلی و خارجی لوله و استفاده از رابطه کرنش حقیقی به جای رابطه کرنش مهندسی، به نتایج دقیق‌تری رسیده است. پس از ارائه مدل تحلیلی، با توجه به اینکه وجود اصطکاک و قالب جاروب‌کن طی عملیات خم کاری، باعث تغییر جریان ماده لوله در انحنای داخلی خم می‌شوند، شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی دقیق‌تری از توزیع ضخامت در انحنای داخلی لوله نسبت به مدل تحلیلی ارائه می‌دهد. در ادامه با به کارگیری فشار سیال داخلی به جای روش معمول استفاده از مندرل، در خم کاری کششی دورانی لوله، پیش‌بینی توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله خمیده به صورت تحلیلی، شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین جایگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل (با توجه به اینکه شناخت کافی در مورد رفتار فشار سیال داخلی در فرآیند خم کاری کششی دورانی لوله‌ها وجود ندارد)، توسعه مدل تحلیلی فرآیند به منظور شناخت بهتر مکانیک خم کاری، پیش‌بینی توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله تغییرشکل یافته در شرایط بارگذاری مختلف، توسعه مدل شبیه‌سازی المان محدود برای پیش‌بینی توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله خم شده در شعاع خم بحرانی، انجام آزمایش‌های تجربی روی لوله آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳ به قطر ۲۵ و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر در شعاع خم ۴۰ و زاویه خم ۹۰ درجه به وسیله دستگاه کنترل عددی خم کاری کششی دورانی لوله، راستی آزمایشی مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی، مقایسه بین نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی، شبیه‌سازی و نتایج تجربی در فشارهای مختلف از اهداف مطالعه حاضر

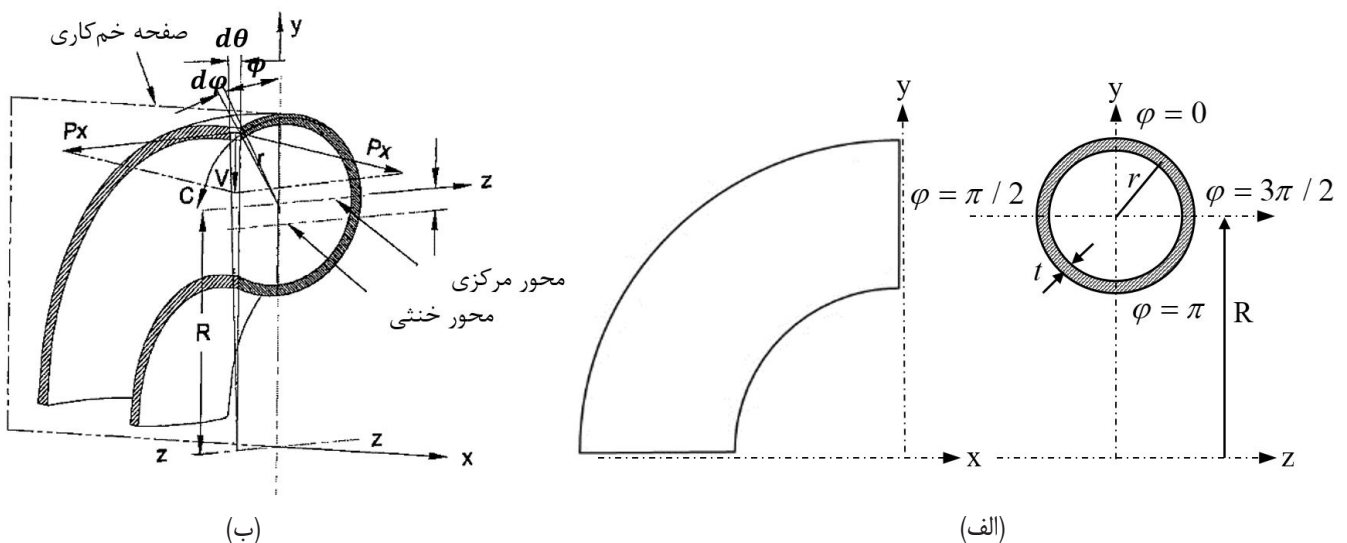


Fig. 2. a) coordinate system used for the model; b) stresses acting to the bending region in 3D; [7]

شکل ۲: الف- سیستم مختصات استفاده شده در مدل، ب- تنش‌های اعمال شده به منطقه خم در حالت سه‌بعدی [۷]

۳. تغییرشکل نسبت به صفحه‌ی $x-y$ و صفحه‌ی نرمال بر $x-y$ در $\theta/2$ متقارن است.

۴. ماده همگن و تراکم‌ناپذیر فرض شده است.

۵. کرنش الاستیک و کارسختی نادیده گرفته شده‌اند و ماده با مدل صلب، موم‌سان کامل بیان شده است.

۶. از اصطکاک بین لوله و ابزارها صرف‌نظر شده است. تحت این فرض‌ها، تنش‌ها، کرنش‌ها، ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله به سبب خم‌کاری و فشار داخلی استخراج شدند.

۲-۱- تنش‌ها و کرنش‌های طولی، حلقوی و شعاعی

برای شروع تحلیل همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است یک المان کوچک روی لوله تحت تغییرشکل در نظر گرفته شده است. طبق روش تانگ [۷] به دلیل گشتاور خم‌کاری خارجی، نیروی طولی داخلی dp_x در هر دو سمت المان به وجود می‌آید.

$$dp_x = \sigma_x tr (d\varphi) \quad (1)$$

که در آن، r شعاع لوله، تنش طولی و t ضخامت دیواره است. نیروی متمایل به مرکز dv به دست آمده از برآیند نیروهای dp_x برابر است با:

$$dv = 2dp_x \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

که در شکل ۳ نشان داده شده است. به دلیل کوچک بودن اندازه زاویه θ

$$(3)$$

بنابراین

$$dv = 2dp_x \sin \frac{\theta}{2} = \sigma_x tr \theta d\varphi \quad (4)$$

نیرو متمایل به مرکز dv ، نیروی dp_c را در راستای محیطی لوله به وجود می‌آورد که برابر است با:

$$dp_c = dvsin\varphi = \sigma_x tr \theta d\varphi sin\varphi \quad (5)$$

نیروی dp_c از روی تنش حلقوی نیز می‌تواند توصیف شود:

$$dp_c = d\sigma_c (R + y) \theta t \quad (6)$$

که در این معادله R شعاع خم‌کاری لوله، y فاصله عمودی از مرکز لوله تا المان و σ_c تنش حلقوی است. از آن جایی که $y = R \cos\varphi$ است؛ بنابراین:

$$dp_c = d\sigma_c (R + r \cos\varphi) \theta t \quad (7)$$

و با برابر قرار دادن رابطه‌های (۵) و (۷)، رابطه (۸) به دست خواهد آمد:

$$d\sigma_c (R + r \cos\varphi) \theta t = \sigma_x tr \theta d\varphi sin\varphi \quad (8)$$

اکنون با حذف $t\theta$ از طرفین این رابطه، رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$d\sigma_c (R + r \cos\varphi) = \sigma_x r sin\varphi d\varphi \quad (9)$$

بنابراین تنش حلقوی می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$d\sigma_c = \sigma_x r \frac{sin\varphi d\varphi}{R + r \cos\varphi} \quad (10)$$

با انتگرال‌گیری از طرفین رابطه (۱۰)، در بازه صفر تا φ ، تنش حلقوی

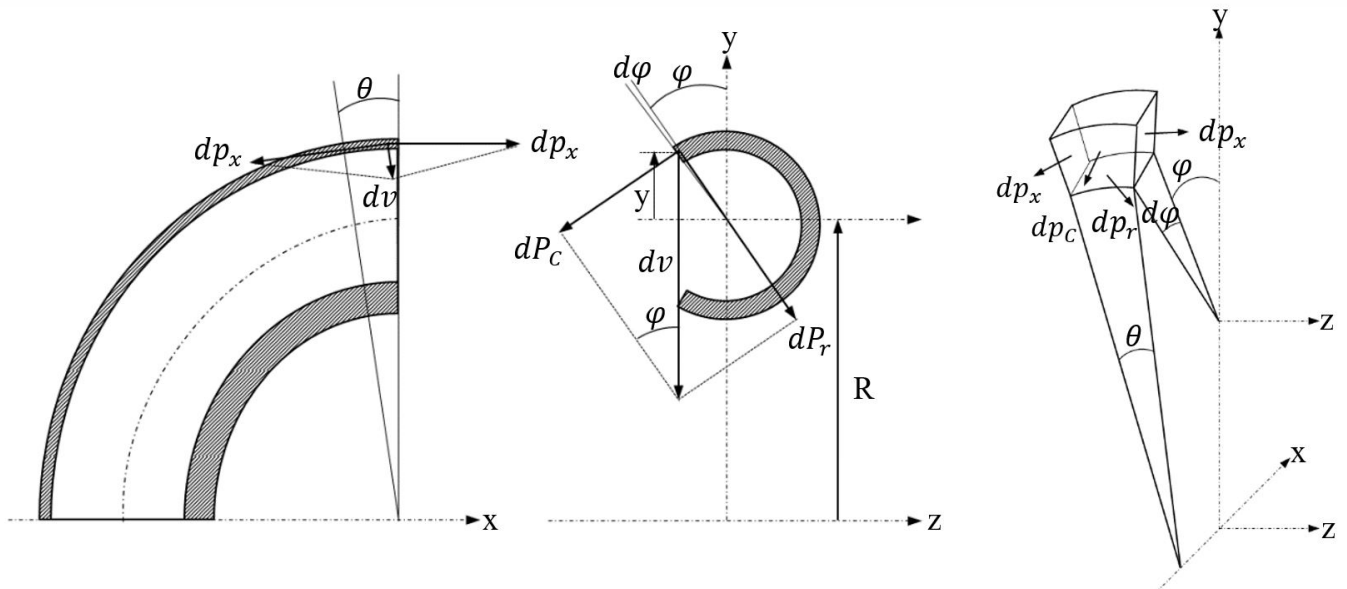


Fig. 3. Stress acting on a small element of the tube

شکل ۳: تنش‌های اعمال شده روی یک المان کوچک از لوله

به دست می آید.

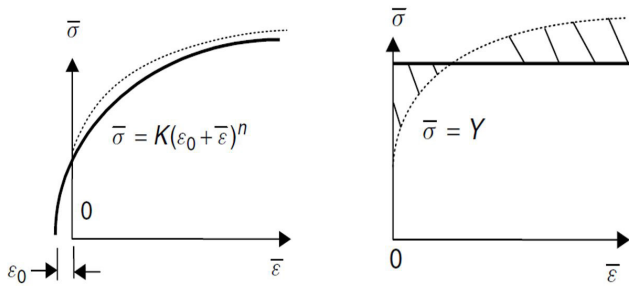


Fig. 4. Empirical effective stress-strain laws fitted to an experimental curve

شکل ۴: رابطه تجربی تنش- کرنش مؤثر که بر یک منحنی آزمایشگاهی برازش شده است [۱۴]

۲-۲- تنش‌های ایجادشده به وسیله فشار داخلی

فشار داخلی P_i ایجادشده درون لوله، تنش‌هایی را در راستای طولی، محیطی و شعاعی لوله ایجاد می‌کند. زمانی که ضخامت دیواره لوله در مقایسه با شعاع لوله خیلی کوچک است تنش شعاعی σ_{rp} برابر صفر در نظر گرفته می‌شود (یعنی $\sigma_{rp} = 0$). تنش طولی ایجادشده در لوله توسط فشار داخلی و σ_{cp} تنش مماسی یا تنش حلقوی ایجادشده در لوله به سبب فشار داخلی است.

$$\sigma_{xp} = \frac{P_i r}{2t} \quad (17)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{P_i r}{t} \quad (18)$$

۲-۳- نتیجه وضعیت تنش‌ها

با توجه به چگونگی تنش‌های بیان شده، تنش طولی با ترکیب شرایط بارگذاری خم‌کاری به همراه فشار داخلی می‌تواند با اضافه شدن رابطه (۱۷) به رابطه (۱۶) توسط رابطه (۱۹) بیان شود [۱۵].

$$\sigma_x = \sigma_{xm} + \frac{P_i r}{2t} \quad (19)$$

تنش حلقوی نیز با اضافه شدن رابطه (۱۸) به رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\sigma_c = \alpha \sigma_x + \frac{P_i r}{t} \quad (20)$$

و تنش شعاعی برابر است با:

$$\sigma_r = 0 \quad (21)$$

۲-۴- تغییر مکان تار خنثی

هندسه لوله و سطح مقطع آن بعد از خم‌کاری در شکل ۵ نشان داده شده است. محور خنثی اولیه لوله در مرکز لوله و فاصله مرکز لوله تا مرکز

$$\sigma_c = -\sigma_x \ln \frac{R+r \cos \varphi}{R+r} \quad (11)$$

برای بیان ساده‌تر، رابطه (۱۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$\alpha = \ln \frac{R+r}{R+r \cos \varphi} \quad (12)$$

بنابراین:

$$\sigma_c = \alpha \sigma_x \quad (13)$$

با توجه به رابطه (۱۳) از آنجایی که $R+r \cos \varphi \leq R+r$ است پس همیشه $\alpha \geq 0$ و تنش‌های طولی و حلقوی هم علامت هستند؛ یعنی تنش‌های طولی و حلقوی در نیمه‌ی بالایی لوله کششی و در نیمه پایینی فشاری است. از آنجایی که ضخامت دیواره بسیار کوچک‌تر از شعاع لوله است از تنش‌های شعاعی چشم‌پوشی می‌شود و فرآیند به صورت تنش صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود. اکنون، طبق روش وانگ و آگاروال [۱۱] با در نظر گرفتن گشتاور خم‌کاری به عنوان تنها عامل تغییر شکل پلاستیک، بدون به کار بردن فشار داخلی، بر پایه معیار فون میزز می‌توان تنش‌های طولی و حلقوی را به دست آورد.

$$\sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_c)^2 + (\sigma_c - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_x)^2 \}} = Y \quad (14)$$

در این رابطه σ_x تنش طولی، $\sigma_c = \alpha \sigma_x$ تنش حلقوی، $\sigma_r = 0$ تنش شعاعی و Y تنش سیلان ماده است.

در این تحلیل برای بیان مدل ماده، از مدل صلب، موم‌سان کامل یا تنش سیلان ثابت استفاده شده است. در مدل‌های تقریبی می‌توان از کرنش سختی صرف نظر نمود و از رابطه (۱۵) استفاده کرد:

$$\bar{\sigma} = Y \quad (15)$$

چون محدوده کرنش در فرآیند معلوم است، مقدار Y را می‌توان به گونه‌ای انتخاب نمود که کار محاسبه شده از این رابطه با کار انجام شده در فرآیند واقعی یکسان باشد، یعنی سطح زیر منحنی تقریبی با سطح زیر منحنی واقعی یکسان بوده و سطوح هاشور خورده در شکل ۴ مساوی باشند [۱۴]. بدین ترتیب با محاسبه Y ، مقدار تنش طول σ_{xm} (تنش طولی به واسطه گشتاور خم‌کاری) به صورت رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$\sigma_{xm} = \pm \frac{Y}{\sqrt{(1-\alpha+\alpha^2)}} \quad (16)$$

که علامت \pm نشان‌دهنده کششی و فشاری بودن تنش در انحنای بیرونی و درونی است.

انحنای داخلی و خارجی لوله می‌باشد. توزیع کرنش محوری در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۴].

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (26)$$

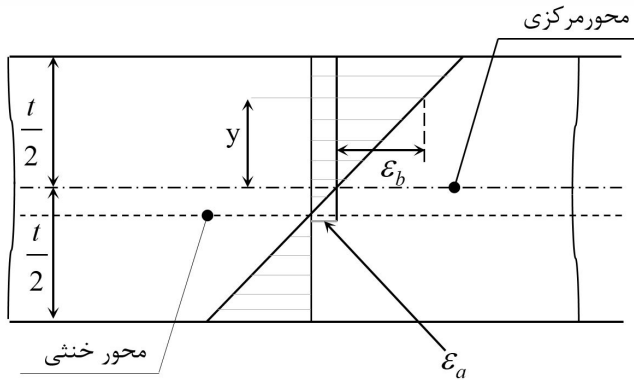


Fig. 6. Distribution of axial strain in the bent tube

شکل ۶: توزیع کرنش محوری در لوله خمیده

در محاسبه کرنش طبق تعریف مرسوم در آنالیز شکل‌دهی ε_1 کرنش حقیقی در راستای طولی لوله یا کرنش محوری است. ε_2 کرنش حقیقی در راستای محیطی یا کرنش حلقوی و ε_3 کرنش حقیقی در راستای ضخامت دیواره لوله یا کرنش شعاعی است.

با محاسبه کرنش خم‌کاری در انحنای داخلی و خارجی و کرنش غشایی در وسط لوله، کرنش محوری لوله مطابق رابطه (۲۷) به دست می‌آید.

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{L_s}{L_0}\right) + \ln\left(1 + \frac{y}{R_b}\right) \quad (27)$$

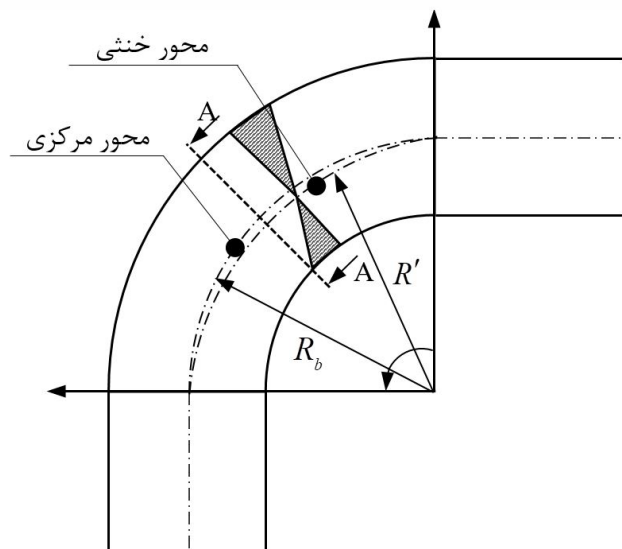


Fig. 5. Tube geometry and its cross-section after bending

شکل ۵: هندسه لوله و سطح مقطع آن بعد از خم‌کاری

قالب خم به عنوان شعاع خم‌کاری (R_b) نشان داده شده است. محور خنثی بعد از خم‌کاری به سمت انحنای داخلی منتقل می‌شود. فاصله بین مرکز انحنای خم تا محور خنثی منتقل شده R' نامیده شده است.

طبق روش انجل^۱ و همکاران [۱۶] بیش‌ترین مقدار تغییر مکان تار خنثی از روی کرنش محوری در انحنای داخلی و انحنای خارجی محاسبه شده است.

$$\ln\left[\frac{R_b + r}{R'}\right] = -\ln\left[\frac{R_b - r}{R'}\right] \quad (22)$$

از رابطه (۲۲)، R' به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{R_b + r}{R'} = \frac{R'}{R_b - r} \quad (23)$$

$$R' = \sqrt{(R_b + r) \cdot (R_b - r)} \quad (24)$$

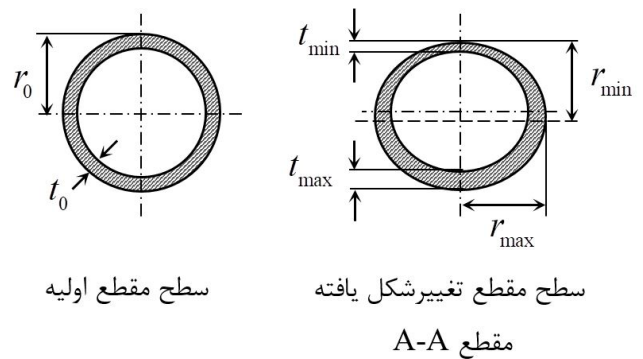
در نتیجه بیش‌ترین تغییر مکان تار خنثی پس از خم e_i خواهد شد.

$$e_i = R_b - R' \quad (25)$$

که e_i فاصله تغییر مکان تار خنثی با استفاده از هندسه لوله تغییر شکل یافته در زاویه خم‌کاری ۹۰ درجه است.

۲-۵ محاسبه کرنش‌ها

در خم‌کاری لوله با توجه به تغییر مکان تار خنثی کرنش محوری از دو قسمت تشکیل می‌شود. یک قسمت کرنش در سطح میانی لوله یا کرنش غشایی است (ε_a) و قسمت دیگر کرنش خم‌کاری است (ε_b) که کرنش در



به صورت رابطه (۳۶) به دست می آید.

$$t_{new} = t_0 \times e^{-(1+\beta)\varepsilon_1} \quad (36)$$

بنابراین ضخامت لوله بعد از خم کاری، در زاویه φ از سطح مقطع لوله با جاگذاری رابطه های (۱۹) و (۲۰) در رابطه ی (۳۳) و سپس جاگذاری رابطه های (۲۷) و (۳۳) در رابطه ی (۳۶) توسط رابطه (۳۷) به دست می آید.

$$t_\varphi = t_0 \times \left(\frac{\sigma_{xm} (2\alpha - 1) + \frac{P_i r}{2t} (2\alpha + 3)}{\sigma_{xm} (\alpha - 2) + \frac{P_i r}{2t} \alpha} - 1 \right) \times \frac{R_b + r \cos \varphi}{\sqrt{(R_b + r) \cdot (R_b - r)}} \quad (37)$$

اعوجاج سطح مقطع به وسیله تنش حلقوی روی لوله ایجاد می شود و از روی کرنش حلقوی ε_2 طبق رابطه (۳۸) به دست می آید.

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{r_{new}}{r_0} \quad (38)$$

که شعاع اولیه لوله و شعاع لوله بعد از تغییر شکل است. در این صورت شعاع لوله بعد از تغییر شکل، با برابر قرار دادن رابطه های (۳۴) و (۳۸) به صورت رابطه (۳۹) به دست می آید.

$$r_{new} = r_0 \times e^{(\beta)\varepsilon_1} \quad (39)$$

بنابراین شعاع لوله بعد از خم کاری، در زاویه φ از سطح مقطع لوله با جاگذاری رابطه های (۱۹) و (۲۰) در رابطه ی (۳۳) و سپس جاگذاری رابطه های (۲۷) و (۳۳) در رابطه ی (۳۹) توسط رابطه (۴۰) به دست می آید.

$$r_\varphi = r_0 \times \left(\frac{\sigma_{xm} (2\alpha - 1) + \frac{P_i r}{2t} (2\alpha + 3)}{\sigma_{xm} (2 - \alpha) - \frac{P_i r}{2t} \alpha} \right) \times \frac{R_b + r \cos \varphi}{\sqrt{(R_b + r) \cdot (R_b - r)}} \quad (40)$$

برای محاسبه درصد تغییرات ضخامت دیواره لوله از رابطه (۴۱) استفاده شده است.

$$\hat{1} = \frac{t_{new} - t_0}{t_0} \times 100 \quad (41)$$

که t_0 ضخامت اولیه لوله و t_{new} ضخامت دیواره بعد از خم کاری است؛ بنابراین درصد تغییرات ضخامت در قوس بیرونی مثبت و در قوس درونی منفی است.

$$L_s = R_b \times \theta \quad (28)$$

$$L_0 = R' \times \theta \quad (29)$$

که در این معادلات، L_s طول خط مرکزی لوله خمیده است. L_0 طول اولیه لوله و R_b و R' به ترتیب شعاع خم کاری و شعاع خم پس از تغییر مکان تار خنثی هستند. y همان گونه که قبلاً بیان شده است فاصله بین هر نقطه تا خط مرکزی لوله است و طبق رابطه (۳۰) محاسبه می شود.

$$y = r \cos \varphi \quad (30)$$

که φ زاویه محیطی در سطح مقطع لوله و r شعاع لوله است؛ بنابراین در قوس بیرونی مثبت و در قوس درونی منفی است.

در ادامه با استفاده از قانون سیلان لوی - میززا^۱ به محاسبه کرنش ε_2 و ε_3 پرداخته می شود.

طبق قانون سیلان لوی - میززا، کرنش های شعاعی ε_2 و ضخامتی ε_3 به صورت رابطه های (۳۱) و (۳۲) به دست می آیند:

$$\varepsilon_2 = \frac{2\sigma_c - (\sigma_x + \sigma_r)}{2\sigma_x - (\sigma_c + \sigma_r)} \varepsilon_1 \quad (31)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{2\sigma_r - (\sigma_x + \sigma_c)}{2\sigma_x - (\sigma_c + \sigma_r)} \varepsilon_1 \quad (32)$$

برای ساده سازی، رابطه (۳۳) را می توان استفاده کرد:

$$\beta = \frac{2\sigma_c - \sigma_x}{2\sigma_x - \sigma_c} \quad (33)$$

بدین ترتیب ε_2 و ε_3 به صورت رابطه (۳۴) به دست می آیند:

$$\varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1 \text{ و } \varepsilon_3 = -(1 + \beta) \varepsilon_1 \quad (34)$$

۲-۶- تغییرات ضخامت دیواره و اعوجاج سطح مقطع

تغییرات ضخامت دیواره و اعوجاج سطح مقطع را می توان از تنش ها و کرنش های ایجاد شده به سبب بارگذاری، به دست آورد. در این صورت ضخیم شدگی در انحنای درونی و نازک شدگی در انحنای بیرونی از روی کرنش شعاعی به دست می آید:

کرنش در راستای ضخامت ε_3 طبق رابطه (۳۵) به دست می آید.

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t_{new}}{t_0} \quad (35)$$

که t_0 ضخامت اولیه لوله و t_{new} ضخامت دیواره بعد از تغییر شکل است. ضخامت لوله بعد از تغییر شکل، با برابر قرار دادن رابطه های (۳۴) و (۳۵)

کرنش آن، نمونه‌هایی از لوله طبق استاندارد ASTM-A370 که در شکل ۸ نشان داده شده است، بریده شدند. برای انجام آزمایش کشش لوله، مطابق استاندارد دو عدد مندرل ساخته شد که در دو انتهای لوله قرار می‌گیرد. سپس نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه آزمایش کشش یونیورسال SANTAM مدل STD-600 ۶۰ تن، تا حد پارگی کشیده شدند. شکل ۹ نمودار تنش-کرنش حقیقی و جدول ۱ خلاصه مشخصات مکانیکی و فیزیکی به دست آمده از آزمایش کشش لوله را نشان می‌دهد. خصوصیات مکانیکی لوله مطابق جدول ۱ به نرم افزار اعمال گردید. برای بیان رفتار ماده طی شبیه‌سازی فرآیند خم کاری، جنس لوله یک ماده الاستو-پلاستیک با کرنش سختی همسانگرد فرض شده است. برای توصیف این رفتار، مطابق با رابطه (۴۳) از معادله کرنش سخت سوئیفت استفاده شده است.

$$\bar{\sigma} = k (\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^n = 274.282 (\bar{\varepsilon} + 0.203)^{0.286} \quad (43)$$

در این رابطه k ضریب استحکام، ε_0 کرنش اولیه و n توان کارسختی نامیده می‌شود.

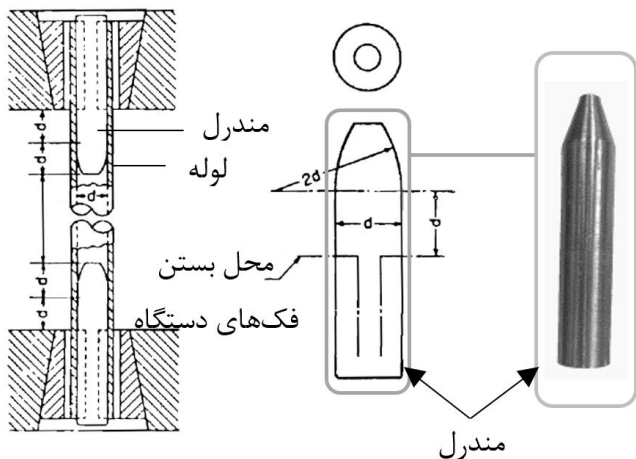


Fig. 8. Dimensions of the tensile test sample according to ASTM-A370 standard

شکل ۸: ابعاد نمونه آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM-A370

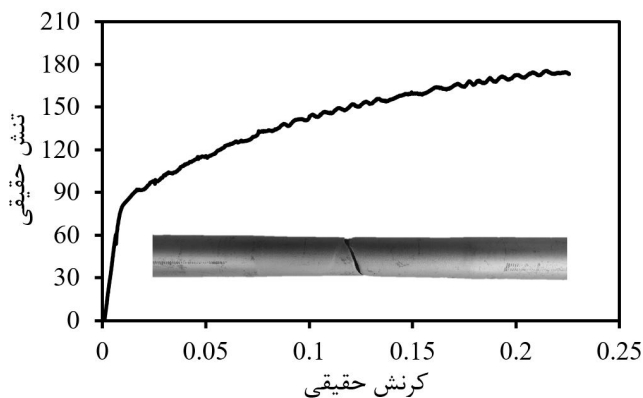


Fig. 9. true stress-strain curve for a 6063 aluminum tube

شکل ۹: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش لوله آلومینیوم ۶۰۶۳

برای ارزیابی مقدار تغییر شکل نامطلوب سطح مقطع لوله‌ی تغییر شکل یافته، پارامتر عدم دایروی بودن سطح مقطع تعریف شده است؛ که این فاکتور با ψ نشان داده شده و از رابطه (۴۲) پیروی می‌کند:

$$\psi = \frac{r_{max} - r_{min}}{r_0} \times 100 \quad (42)$$

که r_0 شعاع اولیه لوله، r_{max} شعاع بزرگ‌تر و r_{min} شعاع کوچک‌تر سطح مقطع لوله تغییر شکل یافته هستند که در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

پس از ارائه مدل تحلیلی، با کوچک‌تر شدن شعاع خم و با توجه به اینکه وجود اصطکاک و قالب جاروب‌کن طی عملیات خم کاری، باعث تغییر جریان ماده لوله در انحنای داخلی خم می‌شوند، شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی دقیق‌تری از توزیع ضخامت در انحنای داخلی لوله ارائه می‌دهد.

در این پژوهش، فرآیند خم کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۱-۶،۱۴ شبیه‌سازی شده است. برای مدل‌سازی فرآیند، مطابق با نحوه عملکرد اجزای مختلف دستگاه خم کاری کششی دورانی، اجزای مختلف قالب و نحوه حرکت آن‌ها شامل: قالب خم، قالب نگه‌دارنده، قالب جاروب‌کن و قالب فشار مدل شده‌اند. در شکل ۷ مدل شبیه‌سازی شده فرآیند خم کاری لوله به همراه فشار سیال داخلی نشان داده شده است. لوله به صورت سه‌بعدی پوسته‌ای^۱ و شکل‌پذیر^۲ و سایر اجزای قالب به صورت پوسته‌ای صلب و گسسته^۳ در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. همچنین به دلیل تقارن هندسی مدل، فقط نیمی از هندسه اجزا مدل شده است.

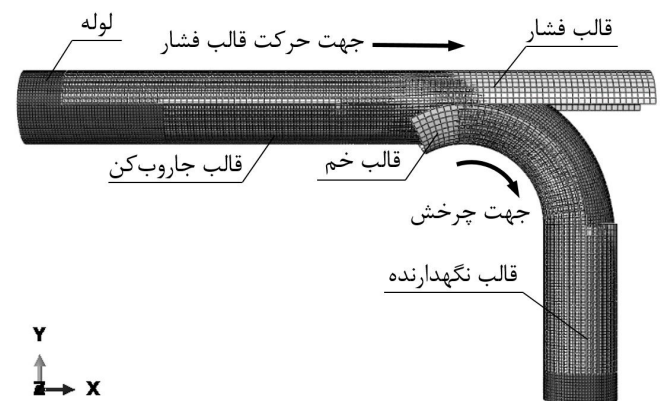


Fig. 7. Simulated model of bending process under internal fluid pressure

شکل ۷: مدل شبیه‌سازی شده فرآیند خم کاری به همراه فشار سیال داخلی لوله

به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله و به دست آوردن نمودار تنش-

- 1 Shell
- 2 3D deformable
- 3 3D discrete rigid

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

Table 1. Summary of mechanical and Physical properties of aluminum tube used in experiments

مقدار	پارامتر
۱۴۰/۸۹۱	استحکام کشش نهایی، UTS (MPa)
۹۰/۱۱۴	تنش تسلیم ۰/۲ درصد، σ_y (MPa)
۲۶	حداکثر ازدیاد طول، (%)
۰/۲۸۶	نمای کرنش سختی، n
۲۷۴/۲۸۲	ضریب استحکام، K (MPa)
۶۸/۳	مدول یانگ، E (GPa)
۰/۳۳	ضریب پواسون، ν
۲۹۶۰	چگالی، ρ (kg/m ³)

S4R و برای قالب‌ها که به صورت پوسته‌ای صلب و گسسته مدل شده‌اند، از المان چهار گره‌ای R3D4 استفاده شده است. برای به دست آوردن ابعاد و تعداد المان‌ها، مدل‌هایی با عدد دانه‌بندی مختلف (۰/۰۰۴، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱) شبیه‌سازی شدند؛ که برای به دست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی از همگرایی کرنش در انحنای بیرونی لوله خمیده استفاده شد و در نهایت با بررسی نتایج مقدار ۰/۰۰۱ برای عدد دانه‌بندی لوله و ۰/۰۰۲ برای عدد دانه‌بندی قالب‌ها انتخاب شد.

۴- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش، برای انجام همه آزمایش‌ها، از لوله آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳ با قطر خارجی نامی ۲۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره نامی ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است. طی آزمایش‌های تجربی انجام شده، لوله‌ها در شعاع خم ۴۰ میلی‌متر و با زاویه خم ۹۰ درجه، توسط یک دستگاه کنترل عددی خم کاری کششی دورانی لوله خم شدند. همچنین جهت مهار لوله از درون، فشارهای داخلی ایجاد شده مجموعه ۰، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳/۸، ۳/۳ و ۳/۷ مگاپاسکال در نظر گرفته شد.

۴-۱- دستگاه آزمایش

تمامی آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه کنترل عددی خم لوله شوزتنگ^{۱۰} مدل 50BR3 انجام شد. شکل ۱۰ دستگاه مورد نظر را نشان می‌دهد. این دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها به یک واحد کامپیوتری متصل بوده و کلیه حرکات قالب‌ها توسط واحد کامپیوتری قابل کنترل است. سرعت قالب‌ها در این دستگاه متغیر است و با استفاده از واحد کنترل متصل به آن قابل تنظیم می‌باشد.

هنگام انجام آزمایش‌ها، میزان سرعت قالب فشار و قالب خم‌کن

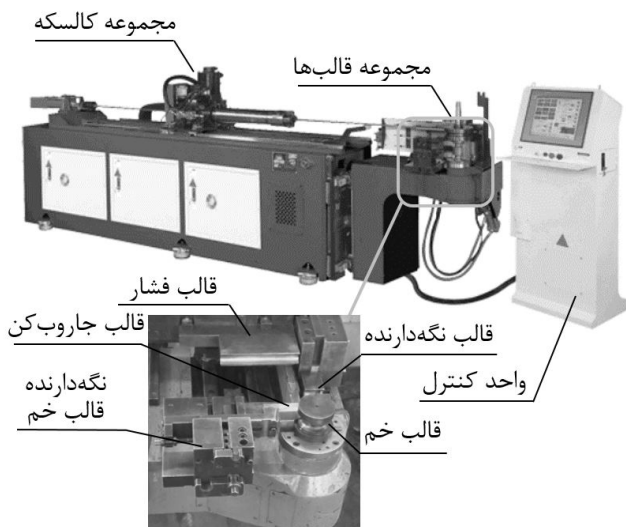


Fig. 10. Numerical control machine tube bending shuz tung 50BR3 model
شکل ۱۰: دستگاه کنترل عددی خم لوله شوزتنگ مدل 50BR3

از آنجایی که قالب‌ها به صورت صلب مدل شده‌اند، خواص مکانیکی به آن نسبت داده نشد.

در این پژوهش، انجام شبیه‌سازی فرآیند در یک گام^۱ تنظیم شده است و با توجه به نوع فرآیند که در حالت سرد انجام شده و تغییر شکل ماده زیاد است، از گزینه حل صریح دینامیکی^۲ استفاده شد. برای تعریف تماس‌های جفت سطوح قالب/لوله، از تماس سطح به سطح^۳ و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی^۴ استفاده شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، در سطوح قالب خم/لوله، قالب فشار/لوله و قالب جاروب‌کن/لوله از مدل اصطکاکی کلمب^۵ و شرایط تماسی پنالتی استفاده شده است؛ اما در تعریف مشخصات تماسی سطح قالب نگه‌دارنده/لوله، چون در عمل برای جلوگیری از لغزش لوله، سطح قالب نگه‌دارنده شیاردار است و توسط نیروی هیدرولیکی، لوله روی قالب خم محکم می‌شود، از مدل خشن^۶ استفاده شد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده در زمینه^۷ خم کاری لوله به روش کششی دورانی و مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی، به دلیل آن که سطوح قالب و لوله آغشته به روغن بودند، برای سطوح تماس قالب خم/لوله و قالب جاروب‌کن/لوله ضریب اصطکاک ۰/۱ و برای سطح تماس قالب فشار/لوله ضریب اصطکاک ۰/۰۵ تعریف شد. در محیط بار^۸، برای شرایط مرزی و نحوه بارگذاری، فشار سیال با استفاده از قید فشار به سطح داخلی لوله وارد شد. حرکت قالب خم به صورت دورانی حول محور Z و قالب فشار بر حسب شعاع خم و هم‌زمان با قالب خم، به صورت خطی در راستای محور x اعمال گردید. در قسمت المان‌بندی، برای لوله پوسته‌ای تحت تغییر شکل، المان

- 1 Step
- 2 Dynamic Explicit
- 3 Surface to surface
- 4 Kinematic Contact method
- 5 Coulomb
- 6 Rough
- 7 Load

بدون فشار سیال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می گردد به دلیل نبودن فشار سیال یا مندرل، مقطع لوله از حالت دایروی خارج شده است.



Fig. 12. Sample formation in non-pressure fluid conditions

شکل ۱۲: شکل گیری نمونه در حالت بدون فشار سیال

جهت بهبود سطح مقطع لوله، فشار سیال ۱ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت مشاهده شد که در مقطع A-A (میان خم؛ زاویه θ برابر ۴۵ درجه)، قطر لوله در راستای آزاد شکل دهی از ۱۷/۳۸ میلی متر در حالت بدون بار به ۱۹/۴۹ میلی متر در فشار ۱ مگاپاسکال بهبود پیدا کرد؛ اما درصد نازک شدگی در انحنا خارجی از ۹/۸۵ درصد به ۱۱/۷۶ درصد افزایش یافته است. شکل ۱۳ لوله شکل داده شده در فشار ۱ مگاپاسکال را نشان می دهد.

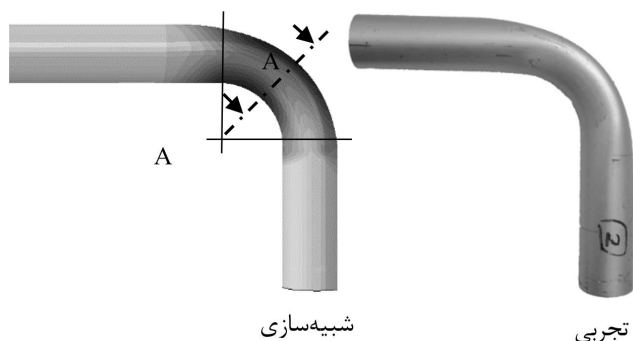


Fig. 13. tube formed at a pressure of 1 MPa

شکل ۱۳: لوله شکل داده شده در فشار ۱ MPa

افزایش فشار سیال در سطح داخلی، با هدف بهبود سطح مقطع لوله تا حد شکست لوله ادامه داده شد. تا اینکه در فشار ۳/۷ مگاپاسکال به پارگی لوله منجر شد. لوله های شکل داده شده در فشارهای مختلف در شکل ۱۴ مشاهده می گردد.

۵- نتایج و بحث

در این قسمت، ابتدا مدل تحلیلی و شبیه سازی عددی مورد راستی آزمایی قرار گرفته است. راستی آزمایی مدل تحلیلی با مقایسه پیش بینی های مدل تحلیلی با یک نمونه نتایج تجربی منتشر شده انجام شده است. برای

به گونه ای تنظیم شد که سرعت نسبی بین آن ها صفر شود و در نتیجه لغزشی بین لوله و قالب فشار وجود نخواهد داشت. در تمامی آزمایش های انجام شده سرعت قالب خم و سرعت قالب فشار به ترتیب ۳ و ۰/۰۴ در دستگاه وارد شد. این کمیت های ورودی دستگاه، دارای واحد نمی باشند و در کارگاه با عنوان سرعت شناخته می شوند.

۴-۲ سیستم تأمین فشار

برای تأمین فشار اولیه از یک واحد تأمین فشار^۱ کارگاهی که تنها قابلیت اعمال فشاری ثابت را در طی فرآیند دارد استفاده شد. شکل ۱۱ این واحد را نشان می دهد. برای ایجاد فشار مورد نظر درون لوله، پس از ورود روغن به درون لوله و هواگیری، درپوش آن بسته شد. سپس فشار سیال با استفاده از فشارسنج و شیر اطمینان، روی میزان دلخواه تنظیم گردید و در تمام طول کورس خم کاری فشار ثابت نگه داشته شد. برای تنظیم فشار سیال درون لوله، فشار به وسیله پمپ روغن افزایش داده می شود و سپس با شیر اطمینان، مقدار سطح فشار کنترل می شود. همچنین برای اندازه گیری فشار سیال داخلی از یک فشارسنج ۰-۴۰ بار، با دقت ۱ بار استفاده شد.



Fig. 11. Pressure supply unit

شکل ۱۱: واحد تأمین فشار

برای آب بندی^۲ دو انتهای لوله از مهره، ماسوره و بوش استاندارد استفاده شد. بدین ترتیب نمونه ها در فشارهای ثابت داخلی ۰، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳/۸، ۳/۳ و ۳/۷ مگاپاسکال و با زاویه ۹۰ درجه، خم کاری شد.

۴-۳ نحوه شکل گیری لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ در فرآیند خم کاری به همراه فشار سیال داخلی

ابتدا به منظور مشاهده نحوه شکل گیری نمونه در خم ایجاد شده، نمونه بدون اعمال فشار سیال داخلی به وسیله دستگاه خم کاری کششی دورانی لوله در زاویه ۹۰ درجه شکل داده شد. نحوه شکل گیری نمونه در حالت

- 1 Power pack
- 2 Sealing

جدول ۲: هندسه و مشخصات جنس لوله استفاده شده توسط خدایاری [۱۷]

Table 2. Geometric and material properties used by Khodayari [17]

A573-81 65	جنس لوله
۲۱۹/۴۰۰	مدول یانگ E (N/mm^2)
۲۷۰	تنش تسلیم (N/mm^2)
۵۰	شعاع قالب خم (mm)
$1/5 \times 20 \varnothing$	اندازه (mm)

شده است.

خدایاری [۱۷] لوله‌ها را بدون فشار سیال داخلی، با زاویه ۹۰ درجه و در نسبت خم ۲/۵ توسط یک ماشین خم کاری کششی دورانی خم نمود. این محقق در آزمایش‌های خود از قالب جاروب کن استفاده نکرد. قالب‌های به کار گرفته شده توسط خدایاری شامل: قالب خم، قالب نگه‌دارنده و قالب فشار می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، پیش‌بینی‌های مدل حاضر در حالت بدون فشار سیال داخلی، مطابقت خوبی با نتایج تجربی خدایاری دارد. در ادامه به منظور بررسی اثر فشار سیال داخلی بر پارامترهای فرآیند، شرایط خم کاری آزمایش‌های خدایاری، به همراه فشار سیال داخلی در نظر گرفته شده است.

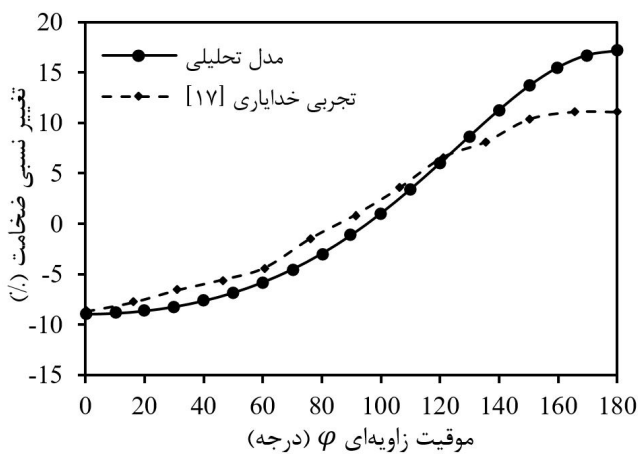


Fig. 15. Comparison of the predicted thickness by the analytical model with the experimental results of Khodayari

شکل ۱۵: مقایسه پیش‌بینی ضخامت توسط مدل تحلیلی و نتایج تجربی خدایاری

مدل ارائه شده در این پژوهش، نازک‌شدگی را با دقت زیادی پیش‌بینی می‌کند اما ضخیم‌شدگی پیش‌بینی شده توسط این مدل در انحنای داخلی بیشتر از نتایج تجربی است و این به سبب اثر اصطکاک است. فرض عدم اصطکاک (ضریب اصطکاک برابر صفر)، باعث انباشت ماده در انحنای داخلی با فشار بزرگ‌تری می‌شود. درحالی‌که نیروی اصطکاک حرکت ملایم‌تری را برای جریان ماده به وجود می‌آورد. طی شکل‌دهی، لوله در انحنای خارجی با قالب‌ها در تماس نیست و ماده لوله به صورت آزاد جریان می‌یابد درحالی‌که

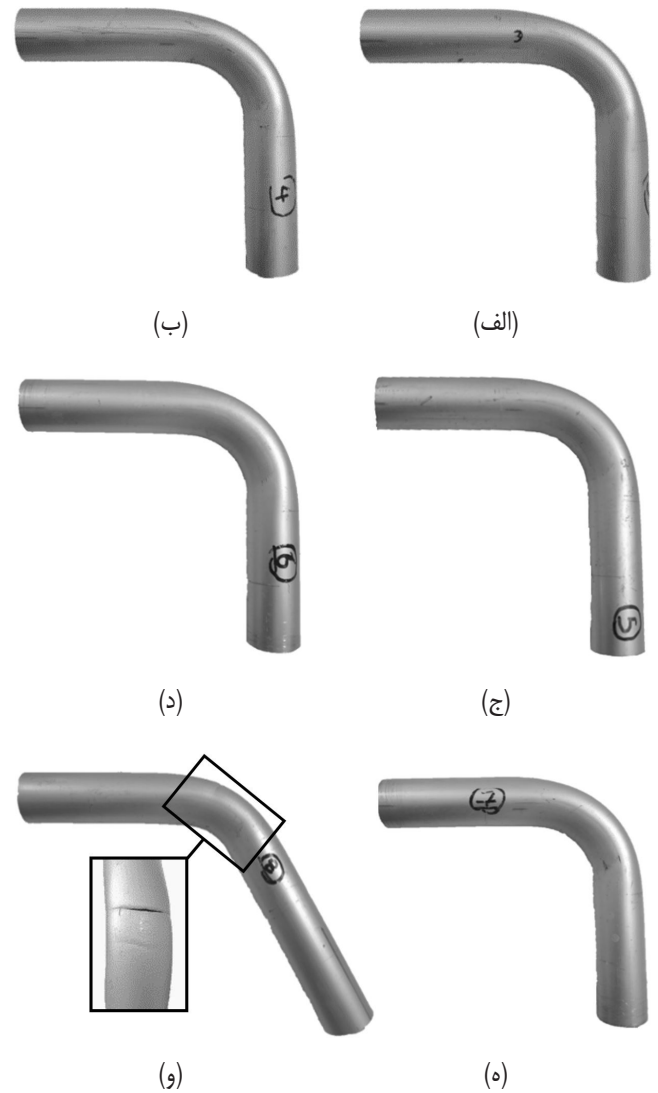


Fig. 14. tubes formed at various pressures a-1.5 MPa, b-2 MPa, c-2.5 MPa, d-2.8 MPa, e-3.3 MPa, and f-3.7 MP

شکل ۱۴: لوله‌های شکل داده شده در فشارهای مختلف الف-۱/۵MPa، ب-۲MPa، ج-۲/۵MPa، د-۲/۸MPa، ه-۳/۳MPa، و و-۳/۷MPa

راستی آزمایشی شبیه‌سازی عددی انجام گرفته، نتایج توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع به دست آمده توسط مدل شبیه‌سازی شده، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در ادامه، پارامترهای فرآیند در خم کاری لوله آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳ تحت فشار سیال داخلی توسط مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی شده و نتایج به دست آمده از پیش‌بینی به صورت مقایسه نمودارهای تحلیلی، شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- راستی آزمایشی مدل تحلیلی

با توجه به اینکه آزمایش‌های تجربی انجام شده در این پژوهش، یک خم با شعاع بحرانی و به همراه قالب جاروب کن و فشار داخلی است، بنابراین پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی ارائه شده، ابتدا با نتایج تجربی به دست آمده توسط خدایاری [۱۷] مقایسه شده که شرایط خم کاری آن در جدول ۲ آورده

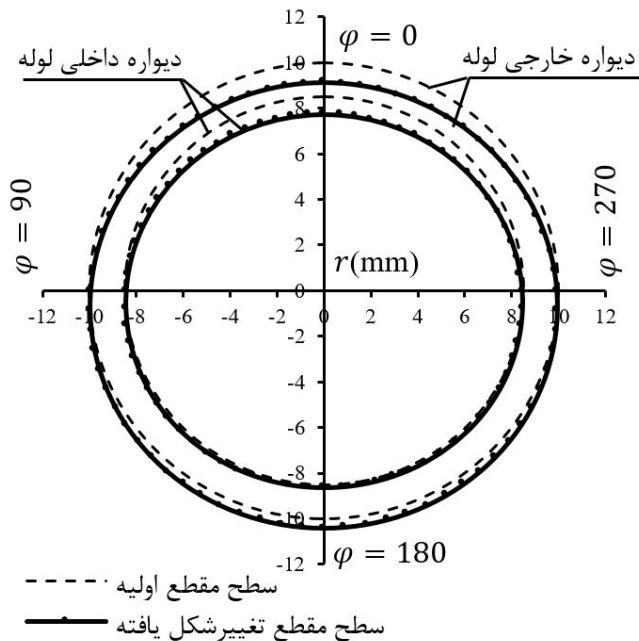


Fig. 17. comparison between the deformed cross section of the predicted by Analytical model with initial tube cross section

شکل ۱۷: مقایسه بین سطح مقطع تغییرشکل یافته پیش‌بینی شده توسط مدل تحلیلی با سطح مقطع اولیه لوله

تار خنثی در توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع در نظر گرفته شده است و برای بیان کرنش‌ها به جای رابطه کرنش مهندسی، از رابطه کرنش حقیقی استفاده شد.

جدول ۳: مقایسه نتایج تجربی خدایاری با نتایج به دست آمده از مدل‌های تحلیلی تانگ [۷]، وانگ و آگاروال [۱۱] و مدل تحلیلی حاضر

Table 3. Comparison of Khodayari's experimental results with the results of analytical models Tang [7], Wang and Agarwal [11] and present analytical model

اعوجاج (%) سطح مقطع	ضخیم‌شدگی (%) $\phi=180$	نازک‌شدگی (%) $\phi=0$	
۹/۹۳۶	۱۱/۰۴۴	-۸/۶۷۴	تجربی خدایاری [۱۷]
-	۱۴/۳۸۳	-۹/۲۵	مدل تانگ [۷]
۶	۱۷/۶۲۸	-۱۰	مدل وانگ و آگاروال [۱۱]
۷/۲۰۴	۱۷/۱۴۲	-۸/۹۳۳	مدل حاضر

تغییرشکل پلاستیک، از معیار تسلیم فون میز برای به دست آوردن تنش‌های طولی و حلقوی استفاده کردند. همچنین در مدل تحلیلی آن‌ها از جابجایی تار خنثی صرف نظر شده است و برای بیان کرنش‌ها از رابطه کرنش مهندسی استفاده گردیده است؛ اما در مدل تحلیلی ارائه شده تأثیر جابجایی تار خنثی در توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع در نظر گرفته شده است و برای بیان کرنش‌ها به جای رابطه کرنش مهندسی، از رابطه کرنش حقیقی استفاده شد.

لوله در انحنای داخلی در تماس با قالب‌ها است که بر جریان ماده لوله در این ناحیه اثر می‌گذارد.

برای اعوجاج سطح مقطع، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع اندازه‌گیری شده در میانه خم ($\theta=45$ درجه)، طبق نتایج تجربی خدایاری $\psi=9/936\%$ است. درحالی که طبق مدل ارائه شده، عدم دایروی بودن سطح مقطع $\psi=7/204\%$ پیش‌بینی شده است. شکل ۱۶ پیش‌بینی مدل تحلیلی از سطح مقطع لوله خم شده توسط خدایاری را در میانه خم با استفاده از رابطه‌های (۳۷) و (۴۰) نشان می‌دهد. در شکل ۱۷ این سطح مقطع با سطح مقطع اولیه لوله مقایسه شده است.

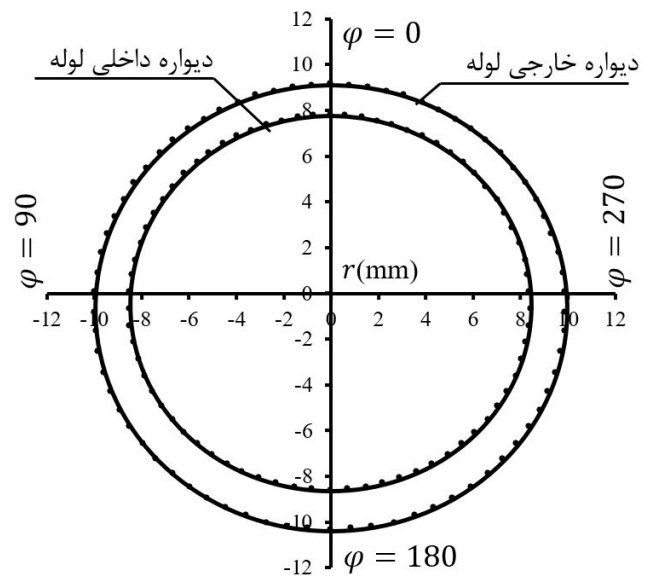


Fig. 16. Analytical model prediction from bent tube cross section by Khodayari in the middle of bend region (section A-A)

شکل ۱۶: پیش‌بینی مدل تحلیلی از سطح مقطع لوله خم شده توسط خدایاری در میانه خم (مقطع A-A)

در ادامه با استفاده از رابطه‌های (۴۱) و (۴۲) درصد عدم دایروی بودن سطح مقطع ψ و تغییرات ضخامت دیواره لوله ξ به دست آمده است. سپس همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است نتایج تجربی خدایاری با نتایج به دست آمده از مدل‌های تحلیلی تانگ [۷]، وانگ و آگاروال [۱۱] و مدل تحلیلی حاضر مقایسه شده است. مشاهده می‌گردد مدل تحلیلی ارائه شده نسبت به مدل‌های پیشین به پیش‌بینی‌های دقیق‌تری منجر می‌شود.

هر سه مدل بر مبنای تئوری تغییرشکل پلاستیک توسعه داده شده‌اند با این تفاوت که: در مدل تانگ، از تئوری حداکثر تنش برشی (ترسکا) برای به دست آوردن تنش مؤثر استفاده شده و از جابجایی تار خنثی چشم‌پوشی شده است. وانگ و آگاروال با در نظر گرفتن گشتاور خم کاری به عنوان تنها عامل تغییرشکل پلاستیک، از معیار تسلیم فون میز برای به دست آوردن تنش‌های طولی و حلقوی استفاده کردند. همچنین در مدل تحلیلی آن‌ها از جابجایی تار خنثی صرف نظر شده است و برای بیان کرنش‌ها از رابطه کرنش مهندسی استفاده گردیده است؛ اما در مدل تحلیلی ارائه شده تأثیر جابجایی

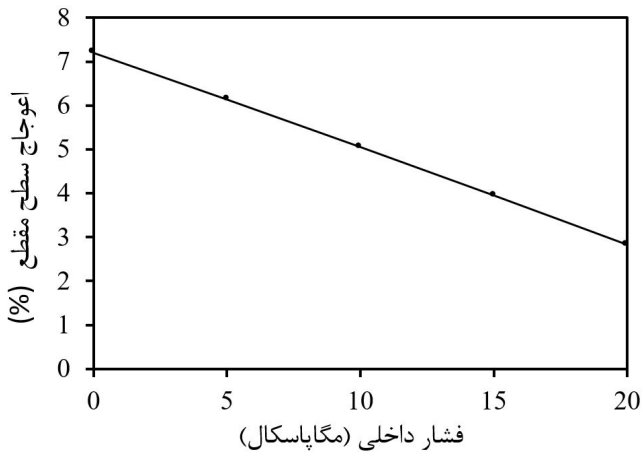


Fig. 19. Effect of the internal pressure on the cross-section distortion

شکل ۱۹: اثر فشار داخلی روی اعوجاج سطح مقطع لوله

مشاهده می‌گردد با افزایش فشار داخلی از ۰ تا ۲۰ مگاپاسکال، درصد اعوجاج سطح مقطع از ۷/۲۰۴ درصد به ۲/۸۲۲ درصد کاهش می‌یابد. در روش مرسوم برای جلوگیری از اعوجاج سطح مقطع از مندرل‌های فلزی استفاده می‌شود. آشکار است که استفاده از فشار سیال به جای مندرل فلزی، بر توزیع تنش و جریان ملایم‌تر ماده در جداره لوله تأثیر مفیدی خواهد داشت.

۵-۲- راستی‌آزمایی شبیه‌سازی عددی فرآیند خم‌کاری لوله آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳

برای راستی‌آزمایی شبیه‌سازی عددی انجام‌گرفته، نتایج توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع به‌دست آمده توسط مدل شبیه‌سازی شده، در حالت فشار داخلی برابر با ۲ مگاپاسکال، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل ۲۰ مشاهده می‌گردد نتایج شبیه‌سازی حاضر مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. به‌طوری‌که حداکثر اختلاف کمتر از ۶/۵ درصد است. عوامل زیادی می‌تواند خطاها را به‌وجود بیاورد که می‌توان، فرض تنش صفحه‌ای بودن و همسانگرد بودن جنس لوله، عدم یکنواختی جنس لوله فراهم‌شده برای آزمایش‌ها، عدم دقت هندسه لوله فراهم‌آمده در دایروی بودن و یکنواختی ضخامت لوله، عدم دقت در ابعاد هندسی قالب‌هایی که آزمایش‌ها به‌وسیله آن‌ها انجام‌شده، عدم یکنواختی ضرایب اصطکاک در سطح قالب‌ها و عدم یکنواختی در سرعت خم دستگاه خم‌کن لوله را نام برد.

۵-۳- پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم‌کاری لوله آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳ در فرآیند خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی

در این قسمت، خم‌کاری لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی به همراه فشار سیال داخلی، به‌وسیله پیش‌بینی پارامترهای فرآیند امکان‌سنجی شده و سپس نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی به‌دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده است.

در بین پارامترهای مورد بررسی، پیش‌بینی درصد نازک‌شدگی از اهمیت بالاتری برخوردار است؛ زیرا زمانی که محصول نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد به علت عبور سیال در طی زمان، پوسیدگی و نازک‌شدگی بیش‌ازحد دیواره عامل شکست لوله می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، پیش‌بینی نازک‌شدگی دیواره لوله در انحنا خارجی به‌وسیله مدل تحلیلی ارائه‌شده تنها ۰/۲۵۹ درصد با نتایج تجربی اختلاف دارد.

۵-۱-۱- اثر فشار داخلی

به‌منظور بررسی اثر فشار سیال داخلی بر توزیع ضخامت و اعوجاج سطح مقطع لوله خمیده، پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی برای فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی، شرایط خم‌کاری آزمایش‌های خدایاری، به همراه فشار سیال داخلی در نظر گرفته شده است.

۵-۱-۲- اثر فشار داخلی روی تغییرات ضخامت دیواره

شکل ۱۸ تغییرات بیشترین ضخامت ($\phi=180^\circ$) و کمترین ضخامت ($\phi=0^\circ$) دیواره لوله را برحسب فشار داخلی در سطح مقطع A-A (میان‌خم) نشان می‌دهد.

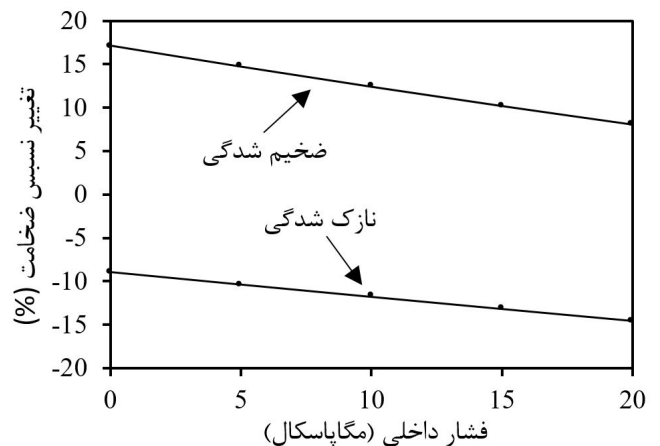


Fig. 18. Effect of the internal pressure on the change of the wall thickness

شکل ۱۸: اثر فشار داخلی روی تغییرات ضخامت دیواره لوله

مشاهده می‌گردد با افزایش فشار داخلی از ۰ تا ۲۰ مگاپاسکال درصد ضخیم‌شدگی از ۱۷/۱۴۲ درصد به ۸/۰۰۷ درصد کاهش می‌یابد؛ بنابراین با افزایش فشار داخلی تمایل به چروکیدگی در انحنا داخلی کاهش‌یافته است. اما افزایش فشار داخلی، ضخامت دیواره لوله را در انحنا خارجی کاهش می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش فشار داخلی از ۰ تا ۲۰ مگاپاسکال درصد نازک‌شدگی از ۸/۹۳۳- درصد به ۱۴/۵۹۸- درصد افزایش می‌یابد.

۵-۱-۳- اثر فشار داخلی بر تغییر شکل سطح مقطع

شکل ۱۹ میزان اعوجاج سطح مقطع لوله در میان‌خم را نشان می‌دهد.

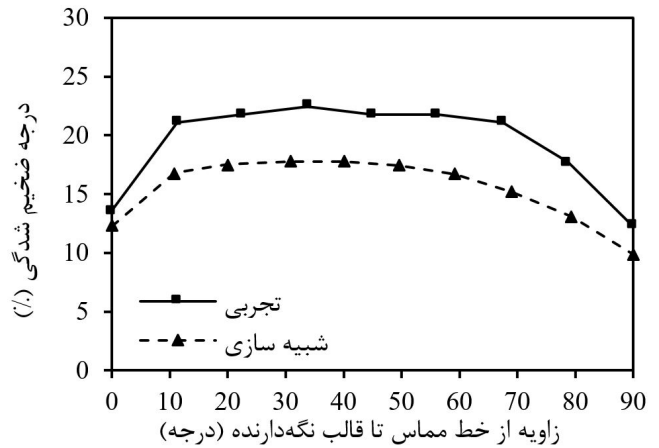
× قطر خارجی) میلی‌متر است؛ بنابراین، با استفاده از رابطه‌های (۳۷) و (۴۰) مدل تحلیلی حاضر، می‌توان ضخیم‌شدگی، نازک‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع را در فشارهای داخلی مختلف به‌دست آورد. برای محاسبه مقدار ضخیم‌شدگی با استفاده از مدل تحلیلی ارائه‌شده، زاویه φ برابر ۱۸۰ درجه و برای محاسبه مقدار نازک‌شدگی زاویه φ برابر ۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای محاسبه اعوجاج سطح مقطع، r_{min} در زاویه $\varphi=0$ درجه و r_{max} با توجه به جابجایی تار خنثی در زاویه $\varphi=95$ درجه محاسبه می‌شود. برای محاسبه Y ، با برابر قرار دادن مساحت سطح زیر منحنی بیان‌شده برای مدل کرنش سختی ماده با معادله سوئیفت و منحنی تقریبی، مقدار تنش سیلان ثابت $Y=119/834\text{MPa}$ به‌دست می‌آید.

شکل ۲۱ مقدار ضخیم‌شدگی، نازک‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع به‌دست آمده توسط مدل تحلیلی را در میانه خم برای فشارهای ۰ تا ۴ مگاپاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فشار داخلی از ۰ تا ۴ مگاپاسکال حداکثر ضخیم‌شدگی از ۴۱/۶۷۷ درصد به ۲۸/۰۰۱ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه نسبت خم ۱/۶ می‌باشد. درصد بالای ضخیم‌شدگی وقوع چروکیدگی در انحنای داخلی را پیش‌بینی می‌کند؛ بنابراین طبق پیش‌بینی انجام‌گرفته توسط مدل تحلیلی، برای خم کاری لوله به قطر ۲۵ میلی‌متر با شعاع خم کاری ۴۰ میلی‌متر، استفاده از قالب جاروب‌کن توصیه می‌شود. شکل ۲۲ وقوع چروکیدگی در صورت عدم استفاده از قالب جاروب‌کن را به‌صورت تجربی نشان می‌دهد. همچنین با افزایش فشار داخلی از ۰ به ۴ مگاپاسکال مقدار نازک‌شدگی در انحنای خارجی لوله از ۱۴/۰۴۴ درصد به ۱۸/۹۹۷ درصد افزایش می‌یابد. مدل تحلیلی حاضر، کاهش اعوجاج سطح مقطع لوله را از ۱۳/۶۹۸ درصد به ۹/۲۴۵ درصد با افزایش فشار داخلی از ۰ به ۴ مگاپاسکال پیش‌بینی می‌کند؛ بنابراین برای داشتن یک سطح مقطع مطلوب با درصد عدم دایروی بودن حدود ۱۰٪، فشار مناسب برای شکل‌دهی در حدود ۳/۵ مگاپاسکال است که در ادامه در مقایسه با نتایج تجربی، مشاهده می‌گردد پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی دقت خوبی را ارائه می‌دهد.

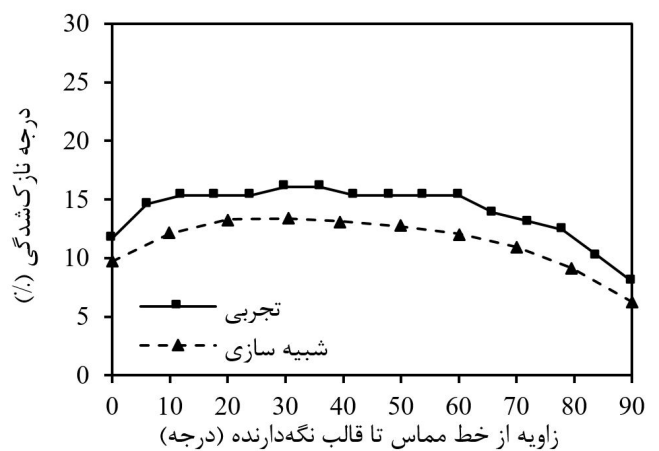
۵-۳-۲- پیش‌بینی توسط شبیه‌سازی عددی

پس از پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل تحلیلی، خم کاری لوله آلومینیومی به‌وسیله شبیه‌سازی المان محدود امکان‌سنجی می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲۲ مشاهده شد، در صورت عدم استفاده از قالب جاروب‌کن چروکیدگی در انحنای داخلی اتفاق می‌افتد. شکل ۲۳ پیش‌بینی احتمال وقوع چروکیدگی در انحنای داخلی را توسط شبیه‌سازی عددی، در صورت عدم استفاده از قالب جاروب‌کن نشان می‌دهد.

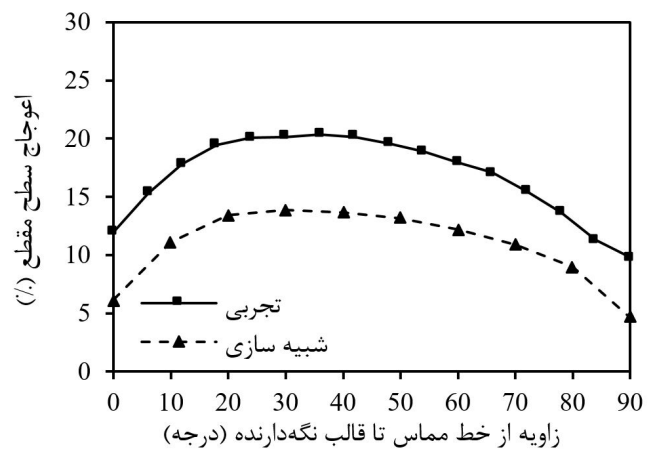
شکل ۲۴ مقدار ضخیم‌شدگی، نازک‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع به‌دست آمده توسط شبیه‌سازی فرآیند خم کاری را در فشارهای ۰ تا ۴ مگاپاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فشار داخلی از ۰ تا ۴ مگاپاسکال حداکثر ضخیم‌شدگی از ۱۸/۴۶۵ درصد به ۱۶/۵۵۳ درصد کاهش



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 20. Comparison of simulation results with experimental results, a- Thickening, b- thinning, c- cross-section distortion

شکل ۲۰: مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی، الف- ضخیم‌شدگی، ب- نازک‌شدگی، ج- اعوجاج سطح مقطع

۵-۳-۱- پیش‌بینی توسط مدل تحلیلی

لوله موردنظر به ابعاد نامی $40 \times 1/5 \times 25$ (شعاع خم \times ضخامت دیواره

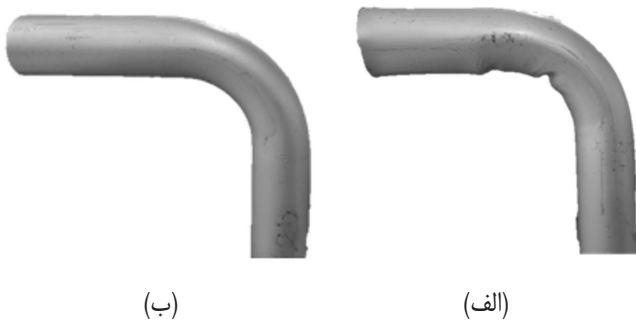


Fig. 22. Effect of using wiper die on tube bending, A-without wiper die, B- with wiper die

شکل ۲۲: تأثیر استفاده از قالب جاروب‌کن در خم‌کاری لوله، الف- بدون قالب جاروب‌کن، ب- با قالب جاروب‌کن

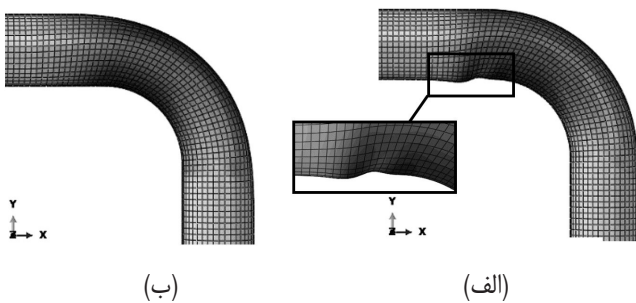


Fig. 23. Effect of using wiper die on tube bending, A-without wiper die, B- with wiper die

شکل ۲۳: تأثیر استفاده از قالب جاروب‌کن در خم‌کاری لوله، الف- بدون قالب جاروب‌کن، ب- با قالب جاروب‌کن

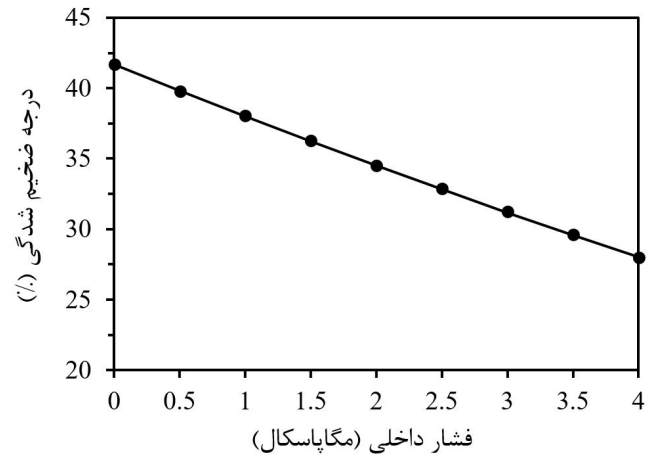
داخلی از ۰ به ۴ مگاپاسکال، مقدار نازک‌شدگی در انحنای خارجی لوله را از ۱۰/۵۸۵ درصد به ۱۴/۶۲۰ درصد افزایش داده و اعوجاج سطح مقطع لوله را از ۲۴/۲۹۳ درصد به ۹/۰۶۷ درصد کاهش می‌دهد؛ بنابراین با توجه به نتایج شبیه‌سازی و در نظر گرفتن مقدار عدم دایروی بودن ۱۰٪ برای یک سطح مقطع مطلوب، فشار مناسب برای شکل‌دهی حدود ۳/۵ مگاپاسکال پیش‌بینی می‌شود. بدین ترتیب پس از پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم‌کاری لوله آلومینیومی توسط مدل تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود، در ادامه به مقایسه نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی پرداخته می‌شود.

۴-۵- مقایسه نتایج تجربی با نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی

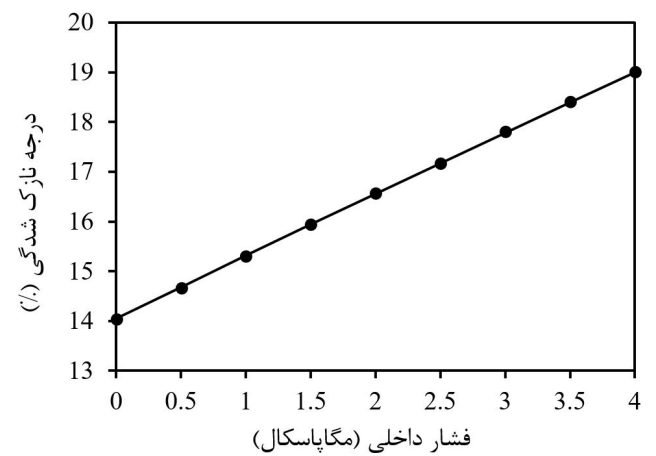
پس از پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی، در این قسمت نتایج به‌دست آمده از پیش‌بینی‌ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۴-۵-۱- اثر فشار داخلی روی تغییر شکل سطح مقطع

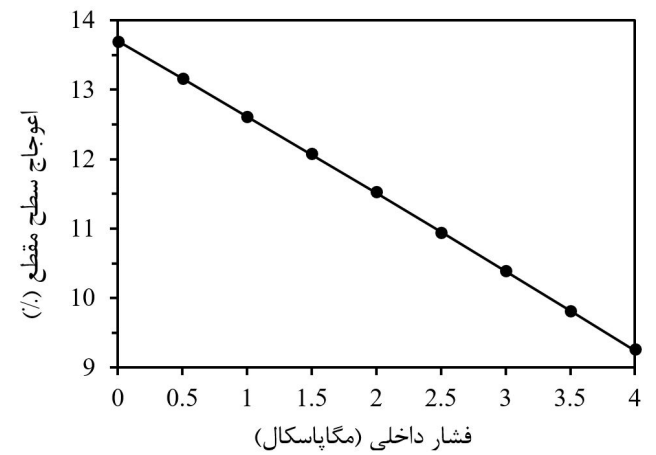
شکل ۲۵ تأثیر فشار داخلی روی اعوجاج سطح مقطع لوله ψ را نشان می‌دهد. همان‌گونه مشاهده می‌شود در آزمایش‌های تجربی با افزایش فشار داخلی از ۰ به ۳/۳ مگاپاسکال، میزان اعوجاج سطح مقطع لوله به‌صورت تقریباً خطی از ۳۵ درصد به ۱۳/۴ درصد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، با



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 21. Effect of internal pressure on multiple defects, a- thickening, b- thinning, c- cross-section distortion

شکل ۲۱: تأثیر فشار داخلی بر عیوب سه‌گانه، الف- ضخیم‌شدگی، ب- نازک‌شدگی، ج- اعوجاج سطح مقطع

می‌یابد؛ بنابراین با توجه به نقش مؤثر قالب جاروب‌کن در کنترل جریان ماده، چروکیدگی در انحنای داخلی لوله برطرف می‌گردد. همچنین، افزایش فشار

شبیه‌سازی و تحلیلی در شکل ۲۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد در حالت بدون فشار داخلی که اعوجاج سطح مقطع شدیدی رخ داده است پیش‌بینی‌ها دقت خوبی ندارد، اما با افزایش فشار و کاهش شدت تغییر شکل سطح مقطع لوله، مدل تحلیلی و شبیه‌سازی انجام‌گرفته پیش‌بینی مناسبی را ارائه می‌دهند. عواملی زیادی برای ایجاد خطا بین نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی وجود دارد؛ که فرضیات در نظر گرفته‌شده، عدم دقت در هندسه مقطع لوله و کیفیت قالب‌ها از مهم‌ترین آن‌ها هستند.

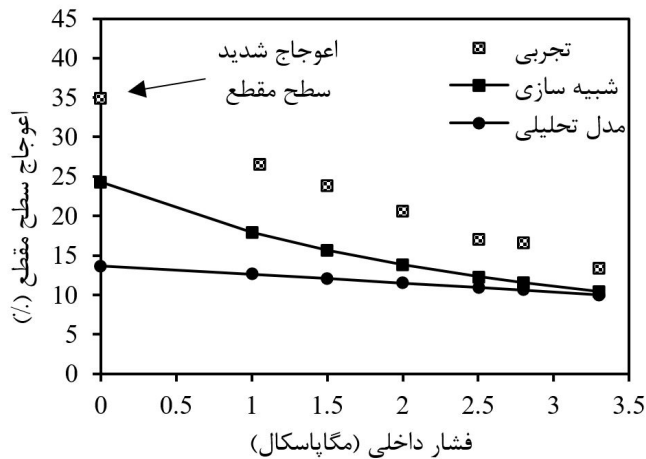


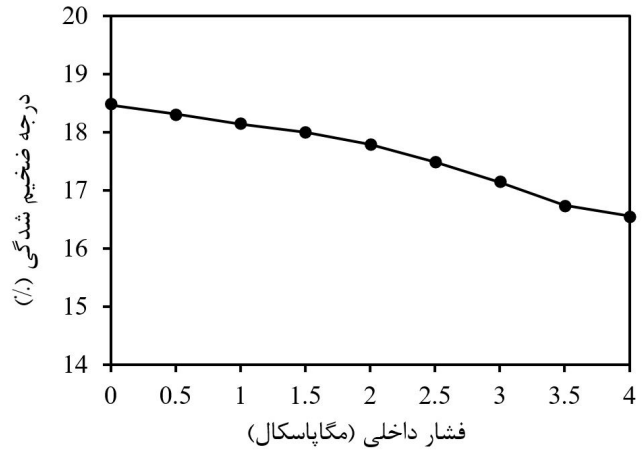
Fig. 25. Effect of internal pressure on cross-sectional distortion

شکل ۲۵: تأثیر فشار داخلی روی اعوجاج سطح مقطع

۵-۴-۲- اثر فشار داخلی روی تغییرات ضخامت دیواره شکل ۲۶ تغییرات ضخامت دیواره را برحسب فشار داخلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد همچنان که فشار داخلی از ۰ به ۳/۳ مگاپاسکال افزایش می‌یابد، درجه نازک‌شدگی دیواره از ۹/۸۵ درصد به ۱۸/۲۵ درصد افزایش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش فشار، درجه ضخیم‌شدگی از ۲۲/۴۴ درصد به ۲۱/۳۸ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین، شکل ۲۶ مقایسه نتایج به‌دست آمده در حالت تجربی را با نتایج به‌دست آمده توسط مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمودار درجه ضخیم‌شدگی پیش‌بینی‌شده توسط مدل تحلیلی، بیانگر احتمال چروکیدگی در انحنای داخلی و لزوم استفاده از قالب جاروب‌کن می‌باشد. به‌طوری‌که با به‌کاربردن قالب جاروب‌کن و نقش مؤثر آن در کنترل جریان ماده در انحنای داخلی لوله، چنان‌که نمودار شبیه‌سازی و تجربی نشان می‌دهد، ضخامت لوله در فشارهای مختلف به حالت یکنواختی می‌رسد.

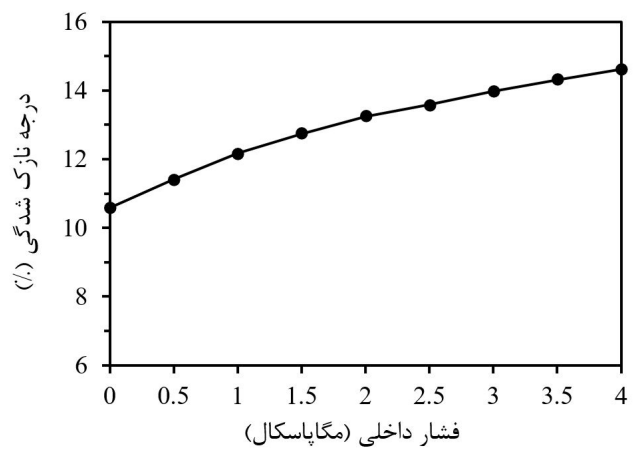
۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم‌کاری لوله، با هدف تجزیه و تحلیل ابزار و فرآیند طراحی خم لوله تحت فشار سیال داخلی، در مرحله طراحی اولیه ارائه شده است. به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم‌کاری لوله در پژوهش حاضر، ابتدا یک مدل تحلیلی برای فرآیند خم‌کاری



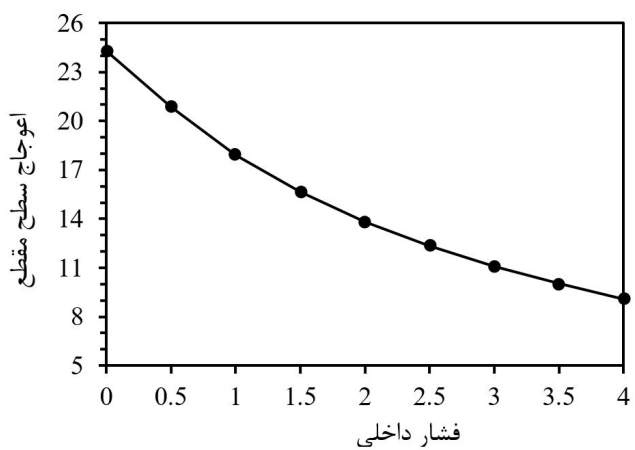
فشار داخلی (مگاپاسکال)

(الف)



فشار داخلی (مگاپاسکال)

(ب)



فشار داخلی

(ج)

Fig. 24. Effect of internal pressure on multiple defects, a- thickening, b- thinning, c- cross-section distortion

شکل ۲۴: تأثیر فشار داخلی بر عیوب سه‌گانه، الف- ضخیم‌شدگی، ب- نازک‌شدگی، ج- اعوجاج سطح مقطع

افزایش فشار داخلی از ۰ به ۳/۳ مگاپاسکال، اعوجاج سطح مقطع به میزان ۲۱/۶ درصد بهبودیافته است. همچنین، مقایسه بین نتایج تجربی با نتایج

شد؛ زیرا با بحرانی شدن نسبت خم ($R/D < 2$) و وجود اصطکاک و قالب جاروب کن طی عملیات خم کاری که باعث تغییر جریان ماده لوله در انحنای داخلی خم می‌شوند، شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی دقیق‌تری از توزیع ضخامت در انحنای داخلی لوله را ارائه می‌دهد. در نهایت پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم کاری لوله تحت فشار سیال داخلی طی یک نمونه عملی خم کاری لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ با شعاع خم بحرانی، به صورت تحلیلی، شبیه‌سازی و عملی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش در زیر آورده شده است:

۱. مدل تحلیلی ارائه شده بر پایه تئوری تغییر شکل پلاستیک، نازک‌شدگی، ضخیم‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع لوله را در ناحیه خم کاری با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند. پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی نسبت به مدل‌های تحلیلی دیگران، مطابقت بهتری با داده‌های تجربی منتشر شده و انجام شده در این پژوهش دارد؛ بنابراین مدل تحلیلی ارائه شده می‌تواند برای تجزیه و تحلیل ابزار و فرآیند طراحی خم لوله تحت فشار سیال داخلی در مرحله طراحی اولیه مورد استفاده قرار گیرد.
۲. با بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی، مشاهده گردید. با اعمال فشار سیال، نیمه پایینی لوله شکل قالب را به خود می‌گیرد و چروکیدگی در انحنای داخلی لوله بر طرف می‌شود.
۳. با کوچک شدن شعاع خم و بحرانی شدن نسبت خم کاری، به دلیل وجود اصطکاک و قالب جاروب کن طی عملیات خم کاری که باعث تغییر جریان ماده لوله در انحنای داخلی خم می‌شوند، شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی دقیق‌تری از توزیع ضخامت در انحنای داخلی لوله را ارائه می‌دهد.
۴. در صنعت امروز برای حذف چروکیدگی از مندرل تنها و یا مندرل به همراه قالب جاروب کن استفاده می‌شود که انتخاب مندرل به زاویه خم، جنس لوله، شعاع لوله و شعاع خم بستگی دارد. در پژوهش حاضر، کاربرد فشار سیال داخلی در فرآیند خم کاری کششی دورانی مورد توجه قرار گرفت. اعمال فشار داخلی به منظور کاهش اعوجاج سطح مقطع به کار برده شد که تأثیر آن طی آزمایش‌ها ارزیابی شده است.
۵. افزایش فشار داخلی باعث نزدیک شدن اندازه قطر خارجی لوله هم در راستای قطر عمودی و هم در راستای قطر افقی به قطر اولیه لوله می‌گردد و اعوجاج سطح مقطع کاهش می‌یابد. همچنین افزایش فشار داخلی درجه ضخیم‌شدگی در انحنای داخلی لوله را کاهش و درجه نازک‌شدگی در انحنای خارجی را افزایش می‌دهد؛ اما تأثیر افزایش فشار داخلی بر نازک‌شدگی دیواره لوله نسبت به ضخیم‌شدگی بیشتر است.

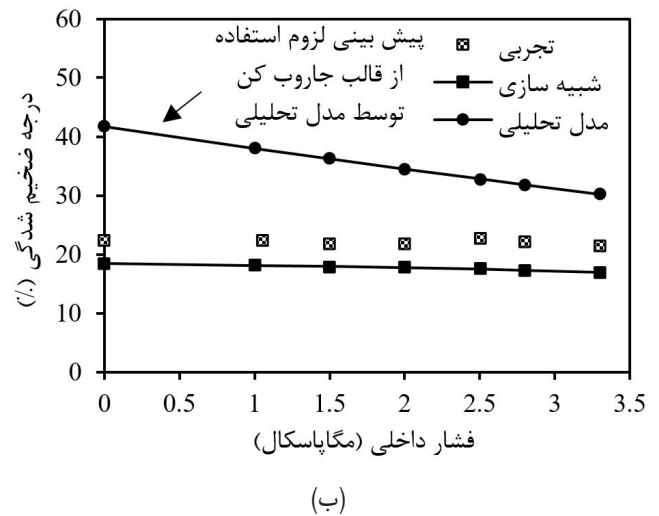
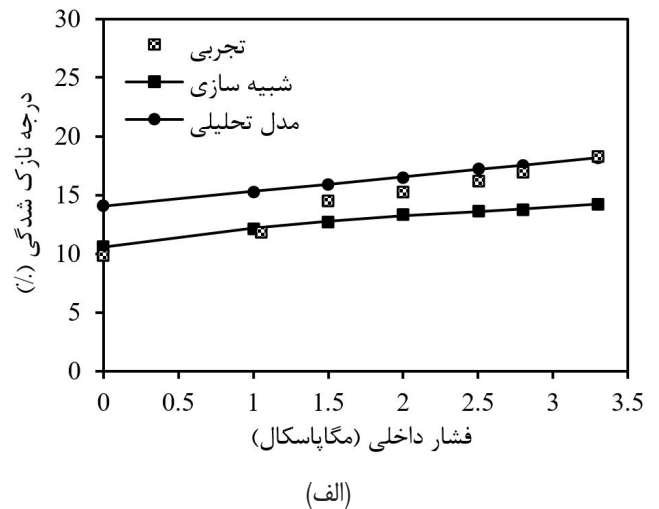


Fig. 26. Effect of the internal pressure on the change of the wall thickness a-thinning in the extrados, B-thickening in the intrados

شکل ۲۶: تأثیر فشار داخلی روی تغییرات ضخامت دیواره لوله، الف- نازک‌شدگی در انحنای خارجی، ب- ضخیم‌شدگی در انحنای داخلی

کششی دورانی لوله ارائه شد تا بتواند رفتار اعوجاج سطح مقطع و تغییرات ضخامت دیواره را تحت فشار سیال داخلی لوله پیش‌بینی نماید. به طوری که با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده و با در دست داشتن مشخصات هندسی لوله می‌توان، توزیع ضخامت و میزان اعوجاج سطح مقطع لوله تغییر شکل یافته را با دقت مناسبی پیش‌بینی نمود. مدل تحلیلی ارائه شده در این پژوهش، بر اساس تئوری تغییر شکل پلاستیک که توسط تانگ [۷] و وانگ و آگاروال [۱۱] بیان گردیده توسعه داده شده است؛ که در مقایسه با آثار منتشر شده قبلی، با استفاده کردن از معیار فون میز به جای معیار ترسکا، در نظر گرفتن تأثیر جابجایی تاریختی بر توزیع تنش و کرنش در انحنای داخلی و خارجی لوله و استفاده از رابطه کرنش حقیقی به جای رابطه کرنش مهندسی، به نتایج دقیق‌تری رسیده است.

همچنین پیش‌بینی پارامترهای فرآیند در خم کاری لوله، توسط شبیه‌سازی عددی فرآیند خم کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی انجام

فهرست علائم

σ_x	تنش طولی (MPa)		
σ_{xm}	تنش طولی به واسطه گشتاور خم کاری (MPa)	e_i	بیشترین تغییر مکان تار خنثی پس از خم (mm)
σ_{xp}	تنش طولی به واسطه فشار داخلی (MPa)	L_s	طول خط مرکزی لوله خمیده (mm)
σ	تنش مؤثر (MPa)	L_0	طول اولیه لوله (mm)
φ	زاویه محیطی روی سطح مقطع لوله	P_c	نیرو در راستای محیطی در سطح مقطع لوله (N)
ψ	درجه عدم دایروی بودن سطح مقطع	P_i	فشار داخلی (MPa)
زیرنویس		P_x	نیروی طولی داخلی (N)
Bend die	قالب خم	r	شعاع لوله از مرکز لوله تا وسط دیواره (mm)
Clamp die	(قالب نگه‌دارنده) گیره	R	شعاع خم یا شعاع قالب خم (mm)
Coulomb	کلمب	R_b	فاصله مرکز لوله تا مرکز قالب خم (mm)
Dynamic Explicit	حل صریح دینامیکی	R'	فاصله بین مرکز انحناهای خم تا محور خنثی منتقل شده (mm)
3D deformable	سه‌بعدی شکل‌پذیر	r_{new}	شعاع لوله بعد از تغییر شکل (mm)
3D discrete rigid	سه‌بعدی صلب و گسسته	t	ضخامت دیواره لوله (mm)
Kinematic contact method	روش قید جنبشی	t_{new}	ضخامت دیواره لوله بعد از تغییر شکل (mm)
Load	بار	dv	نیروی متمایل به مرکز در سطح مقطع لوله (N)
Mandrel	مندرل	y	فاصله از مرکز لوله (mm)
Power pack	واحد تأمین فشار	Y	تنش سیلان (MPa)
Pressure die	قالب فشار	علامت یونانی	
Rough	خشن		نسبت تنش حلقوی به تنش طولی
Sealing	آب‌بندی	$\alpha = (2\beta + 1) / (2 + \beta)$	α
Shell	پوسته‌ای		نسبت کرنش حلقوی به کرنش طولی
Shuz tung	شوزتنگ	$\beta = (2\alpha - 1) / (2 - \alpha)$	β
Step	گام		کرنش حقیقی در راستای طولی
Surface to surface	سطح به سطح		ε_1
Wiper die	قالب جاروب‌کن		کرنش حقیقی در راستای محیطی
			ε_2
			کرنش حقیقی در راستای شعاعی
			ε_3
			کرنش کششی در وسط لوله
			ε_t
			کرنش به واسطه خم کاری
			ε_b
			درجه تغییرات ضخامت
			ζ
			زاویه خم
			θ
			ضریب پواسون
			ν
			تنش محیطی (MPa)
			L_0
			تنش محیطی به واسطه فشار داخلی (MPa)
			σ_{cp}
			تنش هیدروستاتیکی (MPa)
			σ_h
			تنش شعاعی (MPa)
			σ_r
			تنش شعاعی به واسطه فشار داخلی (MPa)
			σ_{rp}

منابع

- [1] H. Yang, H. Li, Z. Zhang, M. Zhan, J. Liu, G. Li, Advances and trends on tube bending forming technologies, Chinese Journal of Aeronautics, 25(1) (2012) 1-12.
- [2] G.G. Miller, Tube forming processes: a comprehensive guide, Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- [3] <https://www.tubeformsolutions.com/blog/bending-tooling-components-explained>.
- [4] A. Kale, H. Thorat, Effect of precompression on ovality of pipe after bending, Journal of Pressure Vessel Technology, 131(1) (2009) 011207.
- [5] A. Veerappan, S. Shanmugam, Analysis for flexibility

- and Engineering, 128(2) (2006) 598-605.
- [12] L. Lazarescu, Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending, International journal of advanced manufacturing technology, 64(1) (2013) 85-91.
- [13] J. Soleimani, M. Elyasi, M. Hoseinzadeh, 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) (2016) 287-297.
- [14] J. Hu, Z. Marciniak, J. Duncan, Mechanics of sheet metal forming, Elsevier, 2002.
- [15] R. Agarwal, Tube bending with axial pull and internal pressure, Texas A&M University, 2004.
- [16] B. Engel, H.R. Hassan, Investigation of neutral axis shifting in rotary draw bending processes for tubes, steel research international, 85(7) (2014) 1209-1214.
- [17] G. Khodayari, How the Material Influences the Bending for Hydroforming: Effects on Ovality, Springback, and Wall Thickness in Tubes, Tube Pipe J., January, 10 (2002).
- in the ovality and thinning limits of pipe bends, Ratio, 4796(85.20) (2006) 85.20.
- [6] K. Pan, K. Stelson, On the plastic deformation of a tube during bending, Journal of Engineering for industry, 117(4) (1995) 494-500.
- [7] N. Tang, Plastic-deformation analysis in tube bending, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 77(12) (2000) 751-759.
- [8] X. Wang, J. Cao, Wrinkling limit in tube bending, Journal of engineering materials and technology, 123(4) (2001) 430-435.
- [9] M. Zhan, H. Yang, Z.-Q. Jiang, Z. Zhao, Y. Lin, A study on a 3D FE simulation method of the NC bending process of thin-walled tube, Journal of Materials Processing Technology, 129(1-3) (2002) 273-276.
- [10] J.-b. Yang, B.-h. Jeon, S.-I. Oh, The tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part, Journal of Materials Processing Technology, 111(1-3) (2001) 175-181.
- [11] J. Wang, R. Agarwal, Tube bending under axial force and internal pressure, Journal of Manufacturing Science

Please cite this article using:

J. Soleimani, M. Elyasi, M. Hosseinzadeh, An Analytical Model and Numerical Simulations to Predict Process Parameters in the Tube Bending Under Internal Fluid Pressure, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 447-466.
DOI: 10.22060/mej.2016.11547.5116

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



