

بررسی تجربی رفتار شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳ عملیات حرارتی شده با استفاده

### از فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی

مجید الیاسی<sup>۱</sup>، وحید مدانلو<sup>۲\*</sup>، فرزاد احمدی خاتیر<sup>۳</sup>، حسین طالبی قادیکلایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۴</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

#### چکیده

در این مقاله، شکل‌پذیری لوله‌های جدارنازک آلومینیومی با استفاده از فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی بررسی شده است. در ابتدا، لوله‌های آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳ با نسبت قطر به ضخامت ۱۳/۸۸ و قطر خارجی ۲۵ میلی‌متر تحت عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی مصنوعی قرار گرفتند. سپس، آزمایش‌های خمکاری بر روی نمونه‌های اولیه و عملیات حرارتی شده در فشارهای سیال صفر، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال انجام شد. پس از انجام آزمایش‌های تجربی، میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌های خم‌شده اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل نشان داد که برای همه نمونه‌ها بیشینه نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی در زاویه ۴۰ درجه نسبت به قالب فشار رخ می‌دهد. همچنین مشخص شد که عملیات حرارتی و فشار سیال روی هم اثر متقابل دارند به‌طوری‌که در فشار کمینه یعنی صفر مگاپاسکال، تاثیر عملیات حرارتی خیلی محسوس نیست ولی در فشار بیشینه یعنی ۳/۶ مگاپاسکال، تاثیر آن قابل توجه می‌باشد. در فشار سیال بیشینه، عملیات حرارتی پیرسازی منجر به کاهش نازک‌شدگی به میزان ۷٪ و عملیات حرارتی آنیل منجر به افزایش نازک‌شدگی به میزان ۱۳٪ نسبت به نمونه اولیه می‌شوند. به علاوه، میزان ضخیم‌شدگی لوله‌های پیرسازی و آنیل شده نسبت به نمونه اولیه به ترتیب به میزان ۵٪ افزایش و ۱۶٪ کاهش می‌یابند.

**کلمات کلیدی:** خمکاری لوله؛ عملیات حرارتی؛ شکل‌پذیری؛ فشار سیال بیشینه.

#### Experimental investigation of the formability of heat treated AA6063 tubes using hydraulic rotary draw bending process

Majid Elyasi<sup>1</sup>, Vahid Modanloo<sup>2\*</sup>, Farzad Ahmadi Khatir<sup>3</sup>, Hossein Talebi Ghadikolaei<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

<sup>2</sup> Assist. Prof., Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

<sup>3</sup> Assist. Prof., Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>4</sup> Assist. Prof., Mechanical Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran

#### Abstract

In this paper, formability of thin-walled aluminum tubes has been investigated using the hydraulic rotary draw bending process. First, AA6063 tubes with a ratio of diameter to thickness of 13.88, and outer diameter of 25 mm were subjected to annealing and artificial aging heat treatments. Then, bending experiments were performed on as-received and heat-treated samples at fluid pressures of 0, 1, 1.8, 3.2, and 3.6 MPa. After performing the experiments, the amount of thinning and thickening of the bent tubes were measured. The obtained results showed that for all samples, the maximum thinning and thickening occur at an angle of 40 degrees to the pressure die. Also, the heat treatment and the fluid pressure have interaction effects, so the effect of the heat treatment is not very noticeable at the pressure of 0 MPa, but its effect is remarkable at the maximum pressure of 3.6 MPa. At maximum fluid pressure, the thinning reduces by 7% under aging heat treatment and with annealing heat treatment, the thinning increases by 13% compared to the as-received sample. In addition, compared to the as-received sample, the thickening of aged tubes increases by 5% and decreases by 16%, respectively.

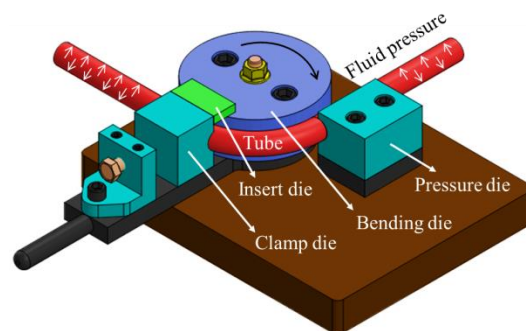
**Keywords:** Tube Bending; Heat Treatments; Formability; Maximum Fluid Pressure.

## ۱- مقدمه

رسیدن به خواص مطلوب فیزیکی و مکانیکی بسیار رایج و پرکاربرد است [۱۴]. از میان آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای سری ۶۰۰۰ مانند ۶۰۶۱ و ۶۰۶۳ به دلیل وجود عناصر سیلیسیوم و منیزیم عملیات حرارتی پذیرند و کاربرد بسیاری در صنایع هوافضا و خودروسازی دارند [۱۵]. عملیات حرارتی آلومینیوم انواع مختلفی داشته و هرکدام اثرات ریزساختاری متفاوتی دارد که از جمله عملیات حرارتی پرکاربرد می‌توان به آنیل کردن (بازپخت) و پیرسازی (رسوب سختی) اشاره نمود [۱۶]. عملیات آنیل شامل گرم کردن ماده تا دمایی مناسب، نگهداری در آن دما در زمان مشخص و کافی و سپس سرد کردن آن با سرعت مناسب تا دمای محیط است [۱۷]. این عملیات عموماً برای نرم کردن مواد فلزی انجام می‌شود و در نتیجه آن خواصی مانند قابلیت کار سرد بهبود می‌یابد [۱۸]. در عملیات پیرسازی نیز ماده در یک مدت مشخص تا یک دمای معلوم در منطقه تک فازی حرارت داده شده و در آب سریع سرد می‌شود [۱۹]. اگر این عملیات در دمای محیط و در حالت خود به خودی و به عبارتی بدون عملیات گرمایی انجام شود به آن عملیات پیرسازی طبیعی و اگر با حرارت دادن قطعه در دماهای پایین انجام شود به آن عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی گفته می‌شود که برای افزایش استحکام فلز استفاده می‌شود [۲۰].

با افزایش روز افزون نیاز صنایع هوافضا و خودروسازی به لوله‌های خم‌شده با نسبت استحکام به وزن بالا، پژوهشگران این حوزه در طول دهه‌های گذشته به دنبال ارائه روش‌های موثری برای خم کردن لوله‌های آلومینیومی می‌باشند [۲۱]. از جمله عیوب رایج در فرآیند خمکاری لوله‌های آلومینیومی می‌توان به برگشت فتری، چروکیدگی، عدم دایروی شدن سطح مقطع (Ovality) یا بیضی‌گون شدن، پارگی و تغییرات ضخامت اشاره نمود که عمده پژوهش‌های پیشین به منظور جلوگیری و به حداقل رساندن عیوب مذکور انجام شده که در ادامه به چند نمونه پرداخته خواهد شد. رضایی آشتیانی و مقدم [۲۲] به بررسی تاثیر عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی در خمکاری کششی دورانی لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۳ به صورت شبیه‌سازی و تجربی پرداختند. آنها در آزمایش‌های خود از مندرل به عنوان محیط واسطه استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که میزان نازک‌شدگی دیواره با افزایش شعاع خم و کاهش زاویه خم افزایش می‌یابد. به علاوه عملیات حرارتی پیرسازی

خمکاری به عنوان یکی از فرآیندهای شکل‌دهی لوله در بسیاری از صنایع هواپیمایی، خودروسازی و پزشکی کاربردهای فراوانی دارد [۱]. تولید چنین لوله‌هایی به ویژه زمانی که با شکل‌های پیچیده، افزایش مقاومت در مقابل خمش، جلوگیری از آسیب و ایجاد اتصال همراه شود نیازمند دقت بیشتری است [۲]. روش‌های متفاوتی برای خمکاری لوله وجود دارد که هرکدام از آنها بر اساس کاربرد خم و نوع مواد اولیه، کاربردهای متفاوتی دارند [۳]. رایج‌ترین روش‌های خمکاری عبارت است از خمکاری پرس [۴]، خمکاری فشاری [۵]، خمکاری غلتکی [۶]، خمکاری لیزری [۷]، خمکاری القایی حرارتی [۸]، خمکاری کششی دورانی [۹] و خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی [۱۰]. از بین روش‌های مذکور، خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی طی سال‌های اخیر از جایگاه ویژه‌ای در میان پژوهشگران برخوردار شده است [۱۱]. این روش در مقایسه با سایر روش‌های خمکاری لوله به دلیل اعمال فشار داخلی سیال دارای مزایایی از جمله دقت بالا، برگشت فتری کمتر، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر، تولید خم با کیفیت مناسب و امکان کنترل جریان ماده در ناحیه خم می‌باشد [۱۲]. شکل ۱ خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



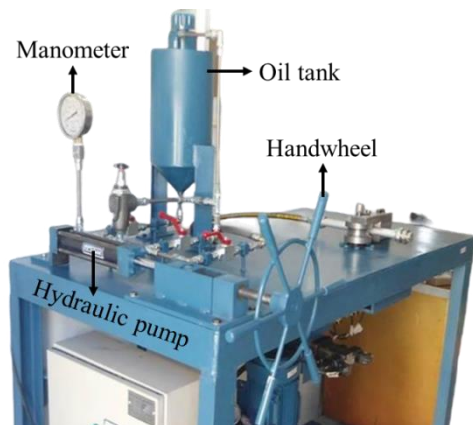
شکل ۱- شماتیک خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل برخورداری از مزایایی همچون قابلیت شکل‌دهی مناسب، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی خوب از جمله گزینه‌های مناسب برای خمکاری لوله به روش خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی می‌باشند [۱۳]. عملیات حرارتی آلیاژهای آلومینیوم جهت

آلومینیومی پرداختند. آنها در پژوهش خود از پلیمرهای PMMA، PVC و PTFE به عنوان ماده پرکننده در آزمایش‌ها استفاده کردند. آنها با استفاده از یک مدل اجزای محدود فرآیند را با موفقیت شبیه‌سازی نمودند. آنها به این نتیجه دست یافتند که میزان چروکیدگی لوله با کاهش لقی و افزایش نسبت ضخامت کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از ضریب اصطکاک ۰/۱۲ منجر به کمترین مقدار چروکیدگی خواهد شد. رادیانتو و همکاران [۲۸] خمکاری لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۱ با استفاده از خمکاری کششی دورانی به کمک مندرل را به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. خروجی مورد نظر در پژوهش آنها میزان برگشت فنری لوله در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی فرآیند بدون مندرل، برگشت فنری به میزان ۱/۱۳٪ با حداکثر ضخامت ۳/۳۱ میلی‌متر و حداقل ضخامت ۲/۸ میلی‌متر حاصل شد. زمانیکه از مندرل به عنوان محیط واسطه استفاده شود، برگشت فنری به میزان ۱۲/۳۱٪ با حداکثر ضخامت ۳/۲۱ میلی‌متر و حداقل ضخامت ۲/۷۵ میلی‌متر به دست آمد.

همانطور که مشاهده می‌شود، تاکنون تحقیقات متعددی از سوی پژوهشگران برای فرآیند خمکاری کششی دورانی لوله‌های آلایز آلومینیوم گزارش شده است. با این وجود، در زمینه بررسی تاثیر عملیات حرارتی و فشار داخلی سیال بر روی نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۳ در خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی مطالعات اندکی گزارش شده است. خمکاری لوله‌های عملیات حرارتی شده از این جهت حائز اهمیت است که اگر پس خمکاری، لوله‌های اولیه خم‌شده تحت عملیات خمکاری قرار گیرند ممکن است تغییرات ضخامت، نازک‌شدگی بیش از حد و در نتیجه پارگی در این لوله‌ها رخ دهد. همچنین از آنجا که در خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی از فشار سیال به عنوان محیط واسطه استفاده می‌شود، این پارامتر بر روی تغییرات ضخامت لوله‌های اولیه و عملیات حرارتی شده تاثیرگذار خواهد بود. در این مقاله، در ابتدا لوله‌های اولیه از جنس آلومینیوم ۶۰۶۳ با نسبت قطر به ضخامت ۱۳/۸۸، قطر خارجی ۲۵ و ضخامت ۱/۸ میلی‌متر تحت عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی مصنوعی قرار می‌گیرند. سپس آزمایش‌های خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی بر روی لوله‌ها در فشارهای سیال صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال انجام خواهد شد. در نهایت میزان نازک‌شدگی

منجر به کاهش میزان نازک‌شدگی می‌شود. میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع نیز با افزایش زاویه و شعاع خم کاهش می‌یابد. عملیات حرارتی آنیل نیز منجر به کاهش میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌ها می‌شود. همچنین میزان برگشت فنری لوله‌ها با افزایش زاویه خم و کاهش شعاع خم کاهش می‌یابد. بیشترین میزان برگشت فنری مربوط به لوله پیرسخت شده می‌باشد. الیاسی و همکاران [۲۳] به بررسی تاثیر عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی مصنوعی بر روی میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۳ پرداختند. نتایج آنها نشان داد که عملیات حرارتی و فشار سیال تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌های خم‌شده دارند. با افزایش فشار سیال میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌ها در کاهش می‌یابد. در فشار سیال بیشینه یعنی ۳/۶ مگاپاسکال، لوله آنیل شده کمترین میزان عدم دایروی بودن را به میزان ۸/۷۷٪ به خود اختصاص داد. همچنین بیشترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی (۱۰/۷۲٪) برای لوله پیرسخت شده حاصل شد. ترونوال و همکاران [۲۴] به مطالعه مقایسه‌ای خمکاری فشاری دورانی و خمکاری کششی دورانی لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۰ از نوع T4 پرداختند. در پژوهش آنها قطر و ضخامت لوله به ترتیب ۶۰ و ۳ میلی‌متر بود. آنها موفق شدند با روش خمکاری فشاری لوله‌هایی با برگشت فنری کم نسبت به حالت خمکاری کششی تولید کنند. تاثیر عملیات حرارتی بر روی رفتار خمکاری لوله‌های آلومینیومی ۶۰۸۲ توسط سرت و همکاران [۲۵] مورد مطالعه قرار گرفت. آنها فرآیند خمکاری سه‌نقطه لوله‌های حالت اولیه، آنیل و پیرسازی شده را به صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها به این نتیجه دست یافتند که با انجام عملیات حرارتی آنیل، استحکام ماده کاهش و در نتیجه میزان تغییرشکل افزایش می‌یابد. آریایی و باستی [۲۶] یک مطالعه مروری بر نقش پارامترهای موثر بر خمکاری کششی دورانی لوله انجام دادند. آنها تاثیر جنس ماده، اصطکاک بین لوله و قالب‌ها، لقی، هندسه لوله و سایر پارامترهای خمکاری را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها بیان نمودند که اگر طراح تاثیر پارامترهای مختلف در لوله را بداند، می‌تواند با تعیین بهینه آنها از بروز عیوب رایج در خمکاری لوله‌های جدار نازک جلوگیری کرده و یا آنها را به تعویق بیندازد. سان و همکاران [۲۷] به بررسی تاثیر خمکاری کششی دورانی لوله‌های دولایه



شکل ۲- قسمت‌های مختلف دستگاه خمکاری

در ادامه، به منظور تعیین خواص لوله‌های اولیه و عملیات حرارتی شده، آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM-A37 با استفاده از دستگاه پرس ۲۵ تن سنتام انجام شد. خواص مکانیکی لوله‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی لوله‌های مختلف

نوع لوله	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	ازدیاد طول (%)
اولیه	۱۷۰	۲۲۶	۱۷
آنیل شده	۷۶	۸۵	۲۱
پیرسازی شده	۱۹۰	۲۴۸	۱۴

به منظور بررسی اثر فشار سیال بر روی شکل پذیری لوله‌های آلومینیومی، تعداد ۱۵ آزمایش تجربی در فشارهای صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال برای نمونه‌های اولیه، آنیل و پیرسازی شده در نظر گرفته شد. مقادیر فشار داخلی سیال بر اساس تجربه پژوهش‌های پیشین نویسندگان و همچنین آزمایش‌های مقدماتی با در نظر گرفتن فشار پارگی لوله‌ها انتخاب شد. همچنین لازم به ذکر است که هر آزمایش ۳ بار تکرار شده است (مجموعاً ۴۵ آزمایش انجام شد). جدول ۳ آزمایش‌های طراحی شده را نشان می‌دهد.

ضخیم‌شدگی نمونه‌های خم‌شده استخراج و تاثیر عملیات حرارتی و فشار سیال بر روی رفتار شکل پذیری لوله‌ها مشخص خواهد شد.

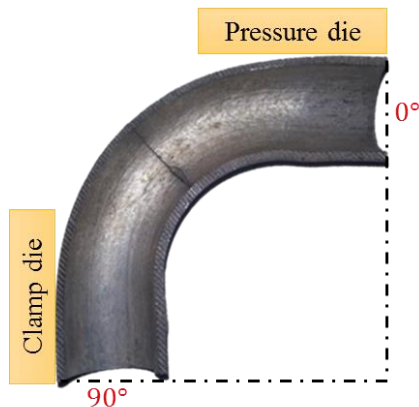
## ۲- مراحل تجربی

در این مقاله، از لوله آلیاژ آلومینیومی ۶۰۶۳ برای انجام آزمایش‌های خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی استفاده شد که در جدول ۱ مشخصات هندسی آن و همچنین قالب مورد استفاده آمده است.

جدول ۱- ابعاد لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ و قالب خمکاری

پارامتر	مقدار (واحد)
ضخامت	۱/۸ (میلی‌متر)
قطر خارجی	۲۵ (میلی‌متر)
نسبت قطر به ضخامت (D/t)	۱۳/۸۸
زاویه خم	۹۰ (درجه)
شعاع خم	۴۰ (میلی‌متر)
نسبت شعاع خم به قطر (R/t)	۱/۶

شکل ۲ قسمت‌های مختلف دستگاه خمکاری استفاده شده را نشان می‌دهد. کلیه اجزای قالب از جنس فولاد MO40 می‌باشند. همچنین از روغن SAE20W50 برای انجام آزمایش‌های خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی استفاده شد. به علاوه از مهره و ماسوره، درپوش فلزی و بوش استاندارد برای آب‌بندی استفاده شد. از دو فرآیند آنیل و پیرسازی مصنوعی برای عملیات حرارتی لوله‌های آلومینیومی استفاده شد. لوله‌های اولیه، در دماها و زمان‌های مختلف درون کوره Exciton مدل EX1500-33L قرار گرفتند. به منظور انجام عملیات حرارتی آنیل، لوله‌ها در دمای ۴۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت در داخل کوره قرار داده شده و بعد از اتمام این زمان، کوره خاموش و لوله‌ها داخل کوره خنک شدند. به علاوه، برای انجام عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی، لوله‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۵۲۰ درجه سانتیگراد در داخل کوره حرارت داده و با آب صفر درجه بلافاصله خنک شدند. سپس به مدت ۸ ساعت در دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شدند.



شکل ۳- موقعیت اندازه‌گیری روی لوله خم شده

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۴ لوله‌های خم شده اولیه، آنیل و پیرسازی شده را در فشارهای صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال می‌دهد. شکل-های ۵ تا ۷ میزان نازک‌شدگی را بر حسب موقعیت زاویه‌ای مقطع به ترتیب برای لوله‌های اولیه، آنیل و پیرسازی شده در فشارهای سیال صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال را نشان می‌دهند. همچنین در شکل‌های ۸ تا ۱۰ میزان ضخیم‌شدگی لوله‌های اولیه، آنیل و پیرسازی شده به ترتیب نشان داده شده است. نکته قابل توجه‌ای که از بررسی این شش شکل دریافت می‌شود این است که در تمام حالات صرفنظر از نظر نوع لوله و فشار سیال، بیشینه نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی در زاویه ۴۰ درجه رخ می‌دهد. در نتیجه این زاویه به عنوان زاویه بحرانی در نظر گرفته شد. مطابق با شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان نازک‌شدگی بحرانی نمونه اولیه در حدود ۱۵۰٪ افزایش می‌یابد. برای نمونه آنیل شده نیز با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان نازک‌شدگی بحرانی در حدود ۱۷۱٪ افزایش یافته که در شکل ۶ نشان داده شده است. به علاوه، همانطور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان نازک‌شدگی بحرانی نمونه پیرسازی شده در حدود ۱۵۴٪ افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، مطابق با شکل‌های ۵ تا ۷، میزان نازک‌شدگی بحرانی در لوله‌های اولیه از ۶/۶۶٪ به ۱۶/۶۸٪، در لوله‌های آنیل شده از ۶/۹۵٪ به ۱۸/۸۴٪ و در لوله‌های پیرسازی شده از ۶/۱۲٪ به ۱۵/۵۲٪ افزایش یافته است.

جدول ۳- طرح آزمایش‌های تجربی

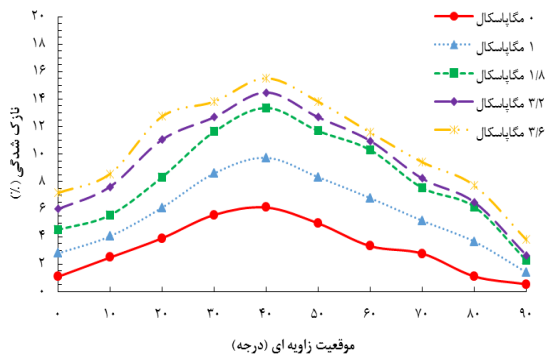
شماره آزمایش	فشار سیال (مگاپاسکال)	نوع لوله
۱	۰	اولیه
۲	۰	آنیل شده
۳	۰	پیرسازی شده
۴	۱	اولیه
۵	۱	آنیل شده
۶	۱	پیرسازی شده
۷	۱/۸	اولیه
۸	۱/۸	آنیل شده
۹	۱/۸	پیرسازی شده
۱۰	۳/۲	اولیه
۱۱	۳/۲	آنیل شده
۱۲	۳/۲	پیرسازی شده
۱۳	۳/۶	اولیه
۱۴	۳/۶	آنیل شده
۱۵	۳/۶	پیرسازی شده

پس از انجام آزمایش‌ها، برای اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌های خم شده، لوله‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات از وسط برش داده شده و ضخامت آنها با استفاده از کولیس ساعتی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پارامترهای نازک‌شدگی ( $\xi$ )، ضخیم‌شدگی ( $\zeta$ ) و بیضی‌گون شدن ( $\psi$ ) به ترتیب با استفاده از روابط (۱) تا (۳) بدست می‌آیند که در آنها  $t_{min}$ ،  $t_0$  و  $t_{max}$  به ترتیب ضخامت اولیه لوله، ضخامت کمینه و ضخامت بیشینه لوله خم شده می‌باشند. همچنین  $D_{max}$ ،  $D_0$  و  $D_{min}$  به ترتیب قطر اولیه لوله، قطر بیشینه و قطر کمینه لوله خم شده می‌باشند. به علاوه موقعیت آغاز تا پایان اندازه‌گیری روی لوله خم شده از زاویه صفر تا ۹۰ درجه از سمت قالب فشار در جهت خم تا قالب نگهدارنده تقسیم شده که در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$\xi = \frac{t_0 - t_{min}}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

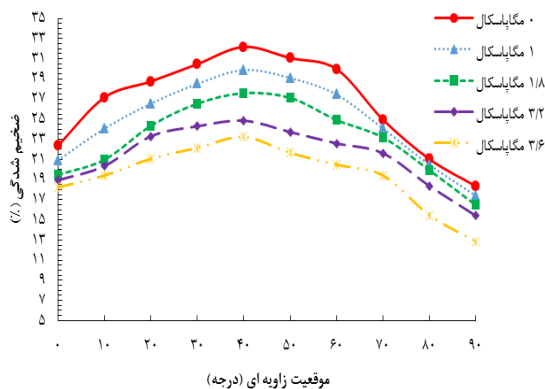
$$\zeta = \frac{t_{max} - t_0}{t_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\psi = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_0} \times 100 \quad (3)$$

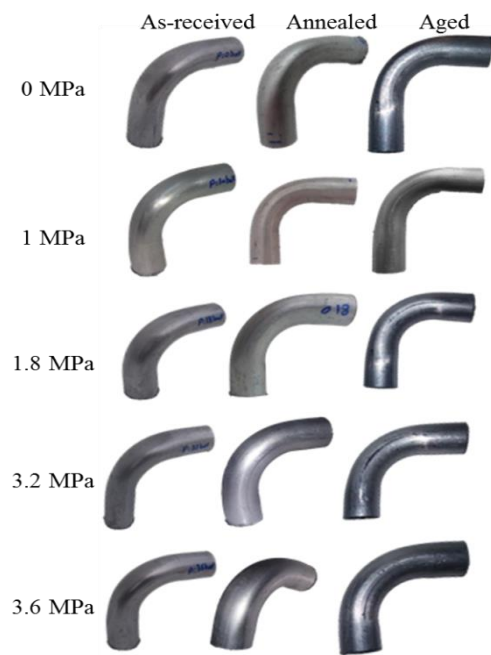


شکل ۷- میزان نازک شدگی لوله های پیرسخت شده در فشارهای سیال مختلف

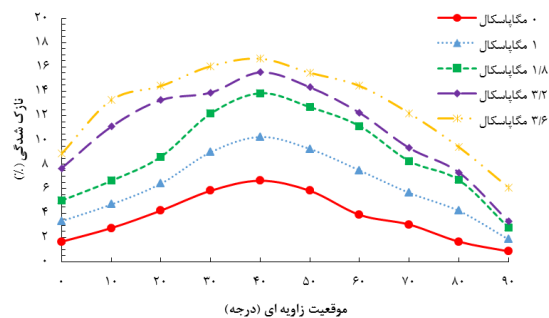
مطابق با شکل ۸ مشاهده می شود که با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان ضخیم شدگی بحرانی نمونه اولیه در حدود ۲۸٪ کاهش می یابد. برای نمونه آنیل شده نیز با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان ضخیم شدگی بحرانی در حدود ۳۸٪ کاهش یافته که در شکل ۹ نشان داده شده است. به علاوه، همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان ضخیم شدگی بحرانی نمونه پیرسازی شده در حدود ۲۵٪ کاهش می یابد. به عبارت دیگر، مطابق با شکل ۸ تا ۱۰، میزان ضخیم شدگی بحرانی در لوله های اولیه از ۳۲/۱۸٪ به ۲۳/۲۴٪، در لوله های آنیل شده از ۳۱/۴۵٪ به ۱۹/۴۱٪ و در لوله های پیرسازی شده از ۳۲/۶۷٪ به ۲۴/۴۱٪ کاهش یافته است.



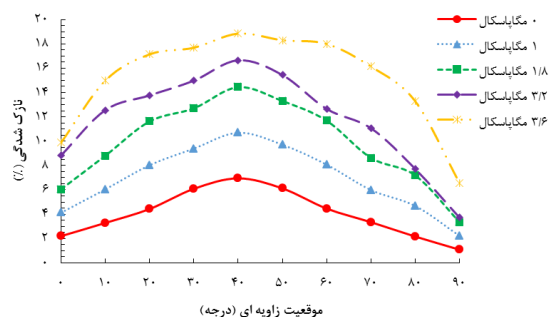
شکل ۸- میزان ضخیم شدگی لوله های اولیه در فشارهای سیال مختلف



شکل ۴- لوله های خم شده در فشارهای مختلف

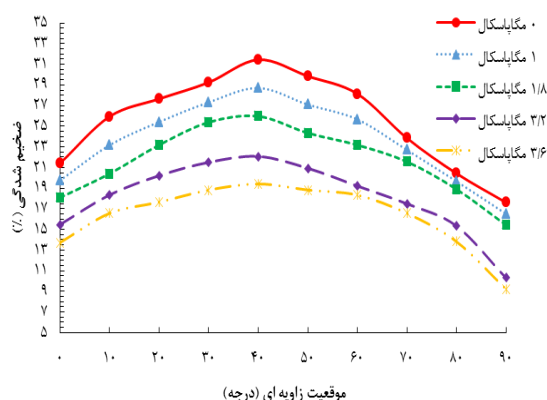


شکل ۵- میزان نازک شدگی لوله های اولیه در فشارهای سیال مختلف

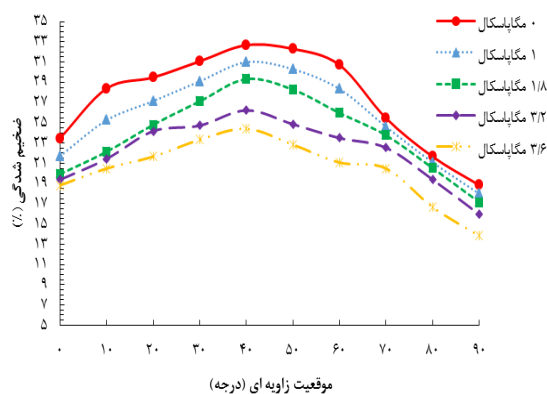


شکل ۶- میزان نازک شدگی لوله های آنیل شده در فشارهای سیال مختلف

در مقایسه با لوله اولیه به ترتیب ۵۵٪ و ۶۲٪ کاهش می‌یابند در حالیکه میزان ازدیاد طول آن حدود ۲۴٪ افزایش یافته است. همچنین مقایسه خواص لوله پیرسازی شده با لوله اولیه نشان می‌دهد که تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب ۱۲٪ و ۱۰٪ افزایش و همچنین میزان ازدیاد طول حدود ۱۸٪ کاهش یافته‌اند. در نتیجه، در فشار سیال یکسان میزان تغییرشکل-پذیری لوله آلومینیومی افزایش و در نتیجه میزان نازک‌شدگی افزایش و میزان ضخیم‌شدگی کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، عملیات حرارتی پیرسازی باعث تقویت خواص مکانیکی ماده می‌شود. به عبارت دیگر استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی ماده افزایش یافته و میزان افزایش طول آن کاهش می‌یابد. در نتیجه مقاومت ماده در برابر تغییرشکل و نهایتاً نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. مقایسه میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی بحرانی برای لوله‌های مختلف در فشارهای سیال متفاوت مطابق با طرح آزمایش‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کمترین میزان نازک‌شدگی با مقدار ۶/۱۲٪ مربوط به آزمایش شماره ۳ می‌باشد. در این آزمایش، لوله آلومینیومی تحت عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی قرار گرفته و فشار سیال صفر مگاپاسکال می‌باشد. همچنین بیشترین میزان نازک‌شدگی نیز مربوط به آزمایش شماره ۱۴ می‌باشد که در آن لوله تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفته و فشار داخلی سیال ۳/۶ مگاپاسکال می‌باشد. برای خروجی ضخیم‌شدگی نیز کمترین (۱۹/۴۱٪) و بیشترین (۳۲/۶۷٪) مقدار به ترتیب مربوط به آزمایش‌های شماره ۱۴ و ۳ می‌باشد. در این آزمایش‌ها، همانطور که پیشتر ذکر گردید لوله‌ها به ترتیب آنیل شده و پیرسخت شده می‌باشند. برای لوله‌های اولیه، کمترین و بیشترین میزان نازک‌شدگی به ترتیب متعلق به آزمایش‌های شماره ۱ (۶/۶۶٪) و شماره ۱۳ (۱۶/۶۸٪) می‌باشد. به علاوه، کمترین و بیشترین میزان ضخیم‌شدگی به ترتیب مربوط به آزمایش‌های شماره ۱۳ (۲۳/۲۴٪) و شماره ۱ (۳۲/۱۸٪) می‌باشد.



شکل ۹- میزان ضخیم‌شدگی لوله‌های آنیل شده در فشارهای سیال مختلف



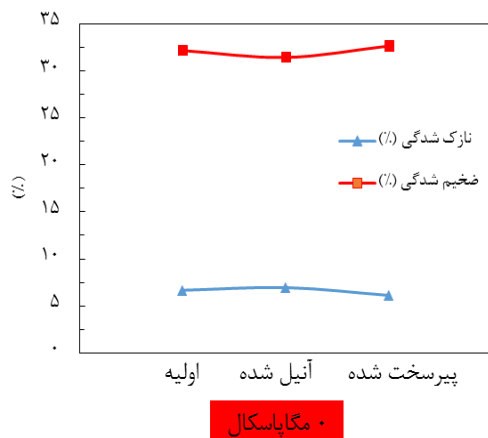
شکل ۱۰- میزان ضخیم‌شدگی لوله‌های پیرسخت شده در فشارهای سیال مختلف

با مقایسه نتایج نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌های مختلف در فشارهای سیال متفاوت، مشاهده می‌شود که به طور کلی میزان نازک‌شدگی لوله آنیل شده از دیگر لوله‌ها بیشتر و میزان نازک‌شدگی لوله پیرسخت شده از دیگر لوله‌ها کمتر می‌باشد. در حالیکه برای ضخیم‌شدگی رفتار به صورت معکوس می‌باشد. بدینگونه که میزان ضخیم‌شدگی لوله آنیل شده از دیگر لوله‌ها کمتر و میزان ضخیم‌شدگی لوله پیرسخت شده از دیگر لوله‌ها بیشتر می‌باشد. در توجیه نتایج به دست آمده می‌توان چنین گفت که خواص مکانیکی لوله آلومینیومی با انجام عملیات حرارتی آنیل تضعیف می‌شود. پس از آنیل کردن نمونه‌ها، از طرفی استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی کاهش یافته و از طرف دیگر میزان ازدیاد طول افزایش می‌یابد. مطابق با جدول ۲، تنش تسلیم و تنش نهایی لوله آنیل شده

جدول ۴- مقایسه میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی بحرانی برای لوله‌های مختلف در فشارهای متفاوت

شماره آزمایش	نازک‌شدگی (%)	ضخیم‌شدگی (%)
۱	۶/۶۶	۳۲/۱۸
۲	۶/۹۵	۳۱/۴۵
۳	۶/۱۲	۳۲/۶۷
۴	۱۰/۲۵	۲۹/۸۹
۵	۱۰/۷۰	۲۸/۷۱
۶	۹/۷۴	۳۱/۰۰
۷	۱۳/۸۴	۲۷/۵۹
۸	۱۴/۴۴	۲۵/۹۷
۹	۱۳/۳۶	۲۹/۳۲
۱۰	۱۵/۵۵	۲۴/۸۶
۱۱	۱۶/۶۵	۲۲/۰۸
۱۲	۱۴/۴۹	۲۶/۲۳
۱۳	۱۶/۶۸	۲۳/۲۴
۱۴	۱۸/۸۴	۱۹/۴۱
۱۵	۱۵/۵۲	۲۴/۴۱

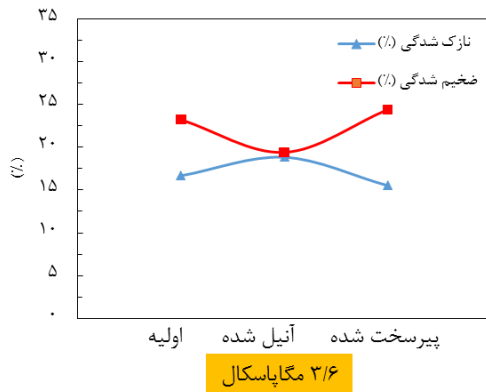
نظر گرفته شد. مقایسه بیضی‌گون شدن لوله‌های اولیه و عملیات حرارتی شده آنیل و پیرسخت شده در شکل ۱۶ نشان داده شده است. طبق شکل، صرفنظر از میزان فشار سیال، کمترین میزان بیضی‌گون شدن در حالت آنیل رخ می‌دهد که ناشی از افزایش شکل‌پذیری در اثر عملیات حرارتی آنیل می‌باشد. در فشار سیال ۳/۶ مگاپاسکال میزان بیضی‌گون شدن برای لوله‌های اولیه، و آنیل و پیرسخت شده به ترتیب برابر با ۱۰/۱۵، ۸/۷۷ و ۱۰/۷۲ بدست آمد. همچنین در فشار سیال صفر مگاپاسکال مقدار بیضی‌گون شدن لوله‌های اولیه، آنیل و پیرسخت شده به ترتیب ۱۸/۵۴، ۱۷/۳۰ و ۱۹/۸۵ بدست آمد. با بررسی نتایج مشخص شد که در حالت بهینه (آنیل) شکل‌دهی لوله، با افزایش فشار داخلی سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان بیضی‌گون شدن در حدود ۰/۴۹ کاهش می‌یابد.



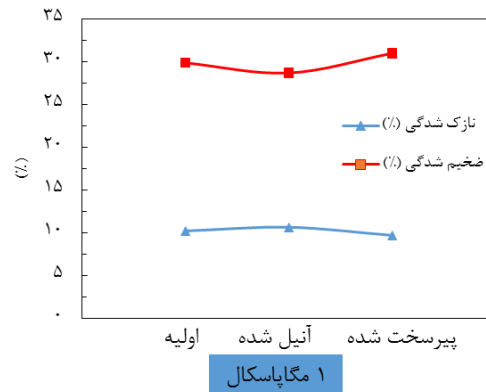
شکل ۱۱- مقایسه میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌ها در فشار صفر مگاپاسکال

در مرحله بعد، شرایط مناسب شکل‌دهی لوله‌ها باید انتخاب گردد. اصولاً در فرآیند خمکاری لوله، هرگاه بیشینه نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی کمترین اختلاف را با یکدیگر داشته باشند خم مطلوب به دست خواهد آمد [۲۹]. به بیان دیگر، در این حالت لوله با توزیع ضخامت یکنواخت‌تری در نواحی داخلی و خارجی خم شکل گرفته است. شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ اثر متقابل پارامترهای فشار داخلی سیال و نوع عملیات حرارتی را با توجه به نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌های خم شده نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌ها، مشاهده می‌شود که کمترین اختلاف بین بیشینه نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی در همه فشارها در حالت آنیل به دست می‌آید. همچنین با افزایش فشار داخلی سیال از ۰ تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان این اختلاف کاهش می‌یابد. اختلاف بین بیشینه نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌های خم‌شده در حالت آنیل در فشارهای صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال به ترتیب برابر با ۲۴/۵۰، ۱۸/۰۱، ۱۱/۵۲، ۵/۴۳ و ۰/۵۷ می‌باشد. همانطور که مشخص است، کمترین اختلاف بین بیشینه نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی در فشار سیال ۳/۶ مگاپاسکال و عملیات حرارتی آنیل بدست می‌آید. لذا این حالت به عنوان بهترین حالت شکل‌دهی لوله‌ها در

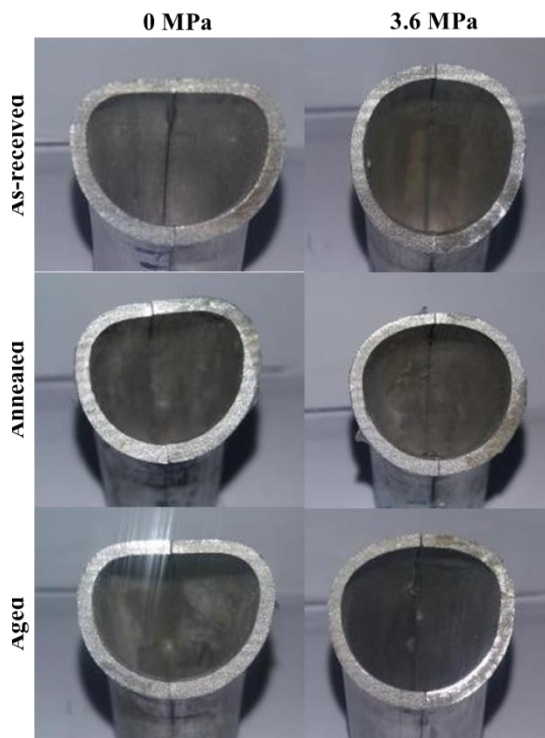




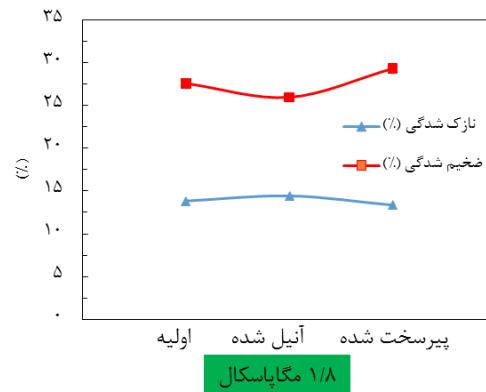
شکل ۱۵- مقایسه میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌ها در فشار ۳/۶ مگاپاسکال



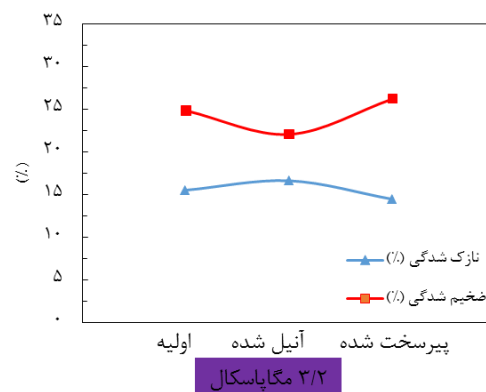
شکل ۱۲- مقایسه میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌ها در فشار ۱ مگاپاسکال



شکل ۱۶- مقایسه بیضی‌گون شدن لوله‌ها در فشارهای صفر و ۳/۶ مگاپاسکال



شکل ۱۳- مقایسه میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌ها در فشار ۱/۸ مگاپاسکال



شکل ۱۴- مقایسه میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله‌ها در فشار ۳/۲ مگاپاسکال

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی مصنوعی بر روی رفتار شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۳ در فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. از فشارهای سیال صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲

- [3] Razali NA, Chung SH, Chung WJ, Joun MS (2022) Implicit elastoplastic finite element analysis of tube-bending with an emphasis on springback prediction. *The Int J Adv Manu Tech* 120(9-10):6377-6391.
- [4] Nakajima K, Utsumi N, Yoshida M (2013) Suppressing method of the cross section deformation for extruded square tubes in press bending. *Int J Prec Eng and Manu* 14:965-970.
- [5] Song HW, Xie W, Zhang SH, Jiang W, Lăzărescu L, Banabic D (2021) Granular media filler assisted push bending method of thin-walled tubes with small bending radius. *Int J Mech Sci* 198:106365.
- [6] Wang A, Xue H, Saud S, Yang Y, Wei Y (2019) Improvement of springback prediction accuracy for Z-section profiles in four-roll bending process considering neutral layer shift. *J Manu Proc* 48:218-227.
- [7] Safari M (2020) A study on the laser tube bending process: Effects of the irradiating length and the number of irradiating passes. *Iran J Mater Form* 7(1):46-53.
- [8] Garcia PS, Pardal JM, Tavares SS, de Souza LR, Meireles AM, Souza MC, Areiza MC, de Brito Martins TR (2022) Induction bending effects on mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel UNS S31803 pipes. *The Int J Adv Manu Tech* 121(11-12):8329-8340.
- [9] Safdarian R (2019) Failure prediction of superheater tubes in rotary tube bending process using GTN damage model. *Trans the India Inst Met* 72(2):475-486.
- [10] Elyasi M, Paluch M, Hosseinzadeh M (2017) Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes. *The Int J Adv Manu Tech* 88:3307-3318.
- [11] Zardoshtian A, Sabet H, Elyasi M (2018) Improvement of the rotary draw bending process in rectangular tubes by using internal fluid pressure. *The Int J Adv Manu Tech* 95:697-705.
- [12] Roein M, Elyasi M, Mirnia MJ (2021) Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel. *J Manu Proc* 66:27-38.
- [13] Vesenjak M, Duarte I, Baumeister J, Göhler H, Krstulović-Opara L, Ren Z (2020) Bending performance evaluation of aluminium alloy tubes filled with different cellular metal cores. *Comp Struc* 234:111748.
- [14] Baghdadi AH, Rajabi A, Selamat NF, Sajuri Z, Omar MZ (2019) Effect of post-weld heat treatment on the mechanical behavior and dislocation density of friction stir welded Al6061. *Mater Sci and Eng: A* 754:728-734.
- [15] Baruah M, Borah A (2020) Processing and precipitation strengthening of 6xxx series
- و ۳/۶ مگاپاسکال برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد که:
۱. آنیل کردن لوله‌های اولیه منجر به کاهش تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب به میزان ۵۵ و ۶۲٪ و همچنین افزایش ازدیاد طول به میزان ۲۴٪ می‌شود. همچنین، با پیرسازی مصنوعی لوله‌های اولیه، استحکام تسلیم به میزان ۱۲٪ و استحکام نهایی به میزان ۱۰٪ افزایش و همچنین شکل‌پذیری به میزان ۱۸٪ کاهش می‌یابد.
  ۲. بیشینه نازک‌شدگی و بیشینه ضخیم‌شدگی برای همه لوله‌ها (اولیه، آنیل شده و پیرسخت شده) و در همه فشارهای سیال، در زاویه ۴۰ درجه از سمت قالب فشار به سمت قالب نگهدارنده رخ می‌دهد.
  ۳. عملیات حرارتی و فشار سیال روی هم اثر متقابل دارند به طوری‌که در فشار سیال کمینه یعنی صفر مگاپاسکال، تاثیر عملیات حرارتی خیلی محسوس نیست ولی در فشار سیال بیشینه یعنی ۳/۶ مگاپاسکال، تاثیر عملیات حرارتی قابل توجه می‌باشد.
  ۴. افزایش فشار سیال منجر به افزایش میزان نازک‌شدگی لوله‌ها در تمامی حالت‌ها می‌شود. در بیشترین فشار سیال یعنی ۳/۶ مگاپاسکال، بیشترین میزان نازک‌شدگی متعلق به لوله آنیل شده به میزان ۱۸/۸۴٪ و کمترین میزان نازک‌شدگی مربوط به لوله پیرسازی شده به میزان ۱۵/۵۲٪ می‌باشد.
  ۵. افزایش فشار سیال منجر به کاهش میزان ضخیم‌شدگی لوله‌ها در تمامی حالت‌ها می‌شود. در فشار سیال بیشینه (۳/۶ مگاپاسکال)، کمینه ضخیم‌شدگی (۱۹/۴۱٪) متعلق به لوله آنیل شده و بیشینه ضخیم‌شدگی (۲۴/۴۱٪) مربوط به لوله پیرسخت شده می‌باشد.
- مراجع**
- [1] Imhan KI, Baharudin BT, Zakaria A, Ismail MI, Alsabti NM, Ahmad AK (2017) Investigation of material specifications changes during laser tube bending and its influence on the modification and optimization of analytical modeling. *Opt & Las Tech* 95:151-156.
- [2] Modanloo V, Elyasi M, Talebi Ghadikolaee H, Ahmadi Khatir F, Akhouni B (2023) The use of MCDM techniques to assess fluid pressure on the bending quality of AA6063 heat-treated tubes. *J Eng Res*.

- [23] Elyasi M, Modanloo V, Talebi Ghadikolaee H, Ahmadi Khatir F, Akhouni B (2023) Investigating the effect of heat treatment in hydraulic rotary draw bending of AA6063 tubes. *Modares Mech Eng* 23(4):257-264.
- [24] Tronvoll SA, Ma J, Welo T (2023) Deformation behavior in tube bending: a comparative study of compression bending and rotary draw bending. *The International J Adv Manu Tech* 124(3-4):801-816.
- [25] Sert A, Gürgen S, Çelik ON, Kuşhan MC (2017) Effect of heat treatment on the bending behavior of aluminum alloy tubes. *J Mech Sci and Tech* 31:5273-5278.
- [26] Aryayi M, Basti A (2018) An overview of the role of effective parameters on the tube rotary draw bending. *Mech Eng* 27(1):7-14.
- [27] Sun H, Li H, Gong F, Liu Y, Li G, Fu M (2022) Filler parameters affected wrinkling behavior of aluminum alloy double-layered gap tube in rotary draw bending process. *The International J Adv Manu Tech* :1-6.
- [28] Radyantho KD, Londen BI, Febritasari R (2021) Experimental study of Mandrel's effect on rotary draw bending process of aluminium 6061 pipe. *InAIP Conf Proc* 2384(1):060005.
- [29] Soleimani J, Elyasi M, Hosseinzadeh M (2018) An analytical model and numerical simulations to predict process parameters in the tube bending under internal fluid pressure. *Amirkabir J Mech Eng* 50(3):447-466.
- aluminium alloys: A review. *Int J Mater Sci* 1(1):40-48.
- [16] Fiocchi J, Tuissi A, Biffi CA (2021) Heat treatment of aluminium alloys produced by laser powder bed fusion: A review. *Mater & Des* 204:109651.
- [17] Hua L, Hu X, Han X (2020) Microstructure evolution of annealed 7075 aluminum alloy and its influence on room-temperature plasticity. *Mater & Des* 196:109192.
- [18] Emadi M, Beheshti H, Heidari-Rarani M, Aboutalebi FH (2019) Experimental study of collapse mode and crashworthiness response of tempered and annealed aluminum tubes under axial compression. *J Mech Sci and Tech* 33:2067-2074.
- [19] Reza-E-Rabby M, Wang T, Canfield N, Roosendaal T, Taysom BS, Graff D, Herling D, Whalen S (2022) Effect of various post-extrusion tempering on performance of AA2024 tubes fabricated by shear assisted processing and extrusion. *CIRP J Manu Sci and Tech* 37:454-463.
- [20] Zhang L, Li K, He H, Li LX (2021) Influence of prolonged natural aging followed by artificial aging on tensile properties and compressive behavior of a thin-walled 6005 aluminum alloy tube. *J Centr South Uni* 28(9):2647-2659.
- [21] Taghizadeh Rami F, Elyasi M (2022) Improvement of rotary draw bending of commercial pure titanium tubes with resistance deformation and using steel ball. *Modares Mech Eng* 22(6):371-380.
- [22] Ashtiani HR, Moghaddam S (2022) Experimental and Numerical Investigation on the Heat Treatment Effects of AA6063 Aluminum Alloy Tubes during Rotary Draw Bending. *Iran J Mater Sci and Eng* 19(1):1-14.