



# Investigating the Effect of Heat Treatment in Hydraulic Rotary Draw Bending of AA6063 Tubes

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Elyasi M<sup>1</sup>,  
 Modanloo V<sup>2</sup>,  
 Akhoundi B<sup>2</sup>  
 Talebi Ghadikolaee H<sup>3</sup>,  
 Ahmadi Khatir F<sup>4</sup>

### How to cite this article

Elyasi M, Modanloo V, Akhoundi B, Talebi Ghadikolaee H, Ahmadi Khatir F. Investigating the Effect of Heat Treatment in Hydraulic Rotary Draw Bending of AA6063 Tubes. Modares Mechanical Engineering, 2023; 23 (04):257-264.

## ABSTRACT

Thin-walled tube bending is one of the important processes for manufacturing parts in the automotive and aerospace industries. This paper investigates the effect of heat treatment on the bendability of thin-walled tubes made of AA6063 alloy. With the hydro rotary draw bending process, the cross-section ovality of the as-received, annealed, and artificial aged tubes has been examined at different fluid pressures. In the experiments, the tube diameter to tube thickness ratio was 13.88. Also, the critical bending ratio was 1.6, and the bending angle was 90 degrees. By examining the results, it has been found that heat treatment and fluid pressure had an important effect on the quality of the bent tubes. By increasing the fluid pressure to 3.6 MPa, critical cross-section ovality has decreased in all specimens. The maximum decrease of cross-section ovality is obtained in the annealed sample by 49%. Also, in the artificially aged specimens, the critical cross-section ovality decreases by about 45%. It has also been observed that at a pressure of 3.6 MPa, the critical cross-section ovality of the annealed sample has improved by 19% compared to the artificially aged specimens.

**Keywords** Bending, Heat treatment, Fluid pressure, Ovality

## CITATION LINKS

1- Work hardening and plastic anisotropy of... 2- An analytical model and numerical simulations to predict of... 3- Development of bending of AISI 304L micro-tubes with micro-wire mandrel and... 4- Mechanical property and microstructure evolution of aged 6063 aluminum alloy under high strain rate deformation. 5- The study on improvement of aluminium alloy for engineering application. 6- Improvement of rotary draw bending of commercial pure titanium tubes with resistance deformation and using steel ball. 7- Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel. 8- Improvement of the rotary draw bending process in rectangular tubes by using internal fluid pressure. 9- Embedding of internal fluid pressure investigation in mandrel through... 10- Tube bending under axial force and internal pressure. 11- Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes. 12- Effect of heat treatment on the bending behavior of aluminum alloy tubes. 13- The effect of anisotropy on wrinkling of tube under rotary draw bending. 14- Experimental and Numerical Investigation on the Heat Treatment Effects of AA6063 Aluminum Alloy Tubes during Rotary Draw Bending.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

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

<sup>3</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### \*Correspondence

Address: Babol Noshirvani University of Technology, Shariati st Babol, Iran  
 elyasi@nit.ac.ir

### Article History

Received: January 12, 2023

Accepted: March 03, 2023

ePublished: April 25, 2023

## بررسی تاثیر عملیات حرارتی در خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی لوله‌های AA۶۰۶۳

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

۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۴ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

خمکاری لوله‌های جدار نازک یکی از فرآیندهای مهم برای ساخت قطعات در صنایع خودروسازی و هوافضا می باشد. این مقاله به بررسی اثر عملیات حرارتی روی خم‌پذیری لوله‌های جدار نازک آلومینیومی از جنس آلیاژ AA۶۰۶۳ می‌پردازد. با استفاده از فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌های آلومینیومی نمونه اولیه، آنیل شده و پیرسازی مصنوعی شده در فشارهای سیال مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌های تجربی، نسبت قطر به ضخامت لوله‌ها ۱۳/۸۸، نسبت خم بحرانی ۱/۶، قالب فشار ثابت و زاویه خم ۹۰ درجه در نظر گرفته شدند. با بررسی نتایج مشخص شد که عملیات حرارتی و فشار سیال تاثیر بسزایی در کیفیت لوله‌های خم شده دارند. با افزایش فشار سیال تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی در همه نمونه‌ها کاهش یافته به طوریکه بیشترین میزان کاهش در نمونه آنیل شده به میزان ۴۹٪ رخ داده است. همچنین در نمونه پیرسازی شده میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی حدود ۴۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که در فشار ۳/۶ مگاپاسکال، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی نمونه آنیل شده در مقایسه با نمونه پیرسازی شده به میزان ۱۹٪ بهبود یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** خمکاری، عملیات حرارتی، فشار سیال، عدم دایروی بودن

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲

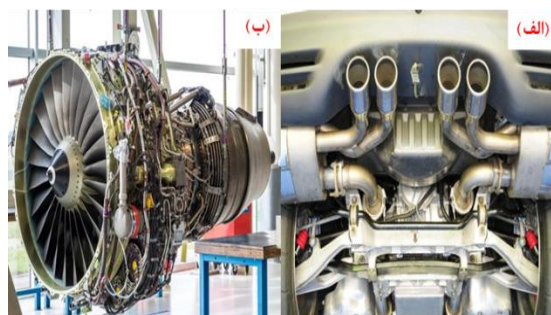
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

\* نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

### ۱- مقدمه

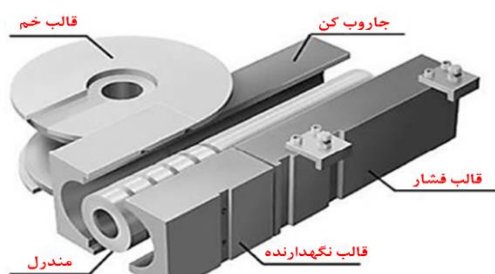
در سال‌های اخیر، آلیاژهای آلومینیومی به علت استحکام به وزن بالا، قابلیت شکل‌دهی مناسب و مقاومت خوردگی خوب در برابر عوامل محیطی، عملکرد بهتری نسبت به سایر مواد سازه‌های سبک وزن از خود نشان داده‌اند [1]. این ویژگی‌ها موجب گسترده شدن کاربرد آلیاژهای آلومینیوم در حوزه صنعت هوافضا، صنعت اتومبیل‌سازی و کابل سیمی فشار قوی شده است [2]. در بین آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای سری ۲۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ قابلیت سخت شدن از طریق فرآیند رسوب سختی را دارند. اینگونه آلیاژهای آلومینیومی را آلیاژهای حرارتی‌پذیر می‌نامند. آلیاژهای آلومینیوم/سیلیسیوم/منیزیم تحت عنوان آلیاژهای آلومینیوم سری ۶۰۰۰ شناخته می‌شوند [3]. این آلیاژها استحکام متوسطی دارند، عملیات حرارتی پذیرند، شکل‌پذیری آنها خوب است و مقاومت به خوردگی مناسبی دارند [4]. دو عنصر منیزیم و

سیلیسیوم در طی عملیات حرارتی پیرسختی باعث استحکام و بهبود خواص مکانیکی این دسته از آلیاژها می‌شوند. آلیاژهای آلومینیوم AA6061 و AA6063 از معروفترین آلیاژهای این گروه می‌باشند که بیشترین کاربرد را در صنایع دارد [5]. فرآیند خمکاری لوله به طور گسترده در ساخت قطعاتی در صنایع مختلف مانند خودروسازی، هواپیماسازی، سیستم‌های هیدرولیک و پمپ‌ها، بویلرها و مبدل‌های حرارتی، نیروگاه‌ها، لوله کشی در دریاها و دیگر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد [6]. شکل (۱) کاربرد خمکاری لوله در صنایع مختلف (خودروسازی و هوافضا) را نشان می‌دهد.



شکل (۱) کاربرد خمکاری لوله در صنایع مختلف الف: خودروسازی، ب: هوافضا [6]

با افزایش روز افزون نیاز صنایع مختلف به لوله‌های خم شده مستحکم و در عین حال کم وزن، توجه محققان به این بخش از شکل‌دهی فلزات افزایش یافته و در طول دهه‌های گذشته روش‌های مختلفی برای خم کردن لوله‌ها ابداع شده و پژوهشگران بسیاری در حال تحقیق برای بهبود این روش‌ها و ساخت دستگاه‌های جدید برای رفع این نیاز هستند. در این بین، خمکاری کششی دورانی لوله به دلیل هزینه کم، دقت و سرعت بالای شکل‌دهی، به ویژه در سال‌های اخیر و با تجهیز شدن آن به سیستم‌های کنترل عددی یکی از پیشرفته‌ترین فرآیندهای خمکاری لوله‌های جدار نازک محسوب می‌شود [7]. شکل (۲) شماتیک و اجزای فرآیند خمکاری کششی دورانی لوله را نشان می‌دهد.



شکل (۲) شماتیک و اجزای فرآیند خمکاری کششی دورانی [2]

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی انجام شده است. زرتشتیان و همکاران [8] تاثیر فشار

سرت و همکاران [12] تاثیر عملیات حرارتی بر روی رفتار خمکاری لوله‌های آلومینیومی ۶۰۸۲ را به صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها رفتار لوله‌های حالت اولیه، آنیل و پیرسازی شده را با استفاده از آزمون خمش بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با انجام عملیات آنیل، استحکام ماده کاهش و در نتیجه میزان تغییرشکل افزایش می‌یابد.

حسن‌پور و همکاران [13] تاثیر ناهمسانگردی بر روی میزان چروکیدگی لوله‌ها در فرآیند خمکاری کششی دورانی را به صورت شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافته‌اند که با افزایش مقدار ناهمسانگردی نرمال، میزان چروکیدگی لوله کاهش خواهد یافت.

رضایی آشتیانی و همکاران [14] اثر عملیات حرارتی را در فرآیند خمکاری کششی دورانی را بر روی آلیاژ AA6063 در زوایای خمکاری و شعاع خم متفاوت بررسی کردند. در این مطالعه، اثرات عملیات حرارتی آلیاژ آلومینیوم بر فرآیند خمکاری لوله و بدون استفاده از مندرل بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که در مقایسه با قطعات آنیل شده و اکستروژ شده، نازک شدن دیوار کاهش می‌یابد در حالی که مقدار اعوجاج و برگشت فنری در لوله‌های پیرسازی شده مصنوعی افزایش یافت. همچنین در هر مورد درصد نازک شدن دیواره، با افزایش شعاع خم شدگی کاهش یافت و تاثیر شعاع خم در کاهش اعوجاج ناحیه خم بیشتر بود. بررسی زاویه خم نشان داد که نرخ برگشت فنری نیز با افزایش خم کاهش یافته است.

با وجود تحقیقات متعدد در زمینه شبیه‌سازی فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی، در زمینه تاثیر عملیات حرارتی بر روی کیفیت لوله‌های خم شده با این فرآیند مطالعات اندکی گزارش شده است. به عبارت دیگر، با بررسی انواع سیکل‌های عملیات حرارتی می‌توان تشخیص داد که هر نوع عملیات حرارتی چه تاثیری در ناحیه خمکاری دارد و چگونه می‌توان به خم مورد نظر با یک سیکل عملیات حرارتی از پیش تعیین شده رسید. تفاوت بارز این مقاله با پژوهش‌های پیشین در حوزه خمکاری، بررسی تاثیر سیکل‌های عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی مصنوعی شده و مقایسه آن با خمکاری نمونه‌های بدون عملیات حرارتی در فشارهای سیال مختلف بر روی کیفیت لوله‌های خم شده آلومینیومی از جنس آلیاژ AA6۰۶۳ با استفاده از آزمون‌های تجربی است. در واقع این پژوهش، شرایط خمکاری و عیوب بوجود آمده از آن را با عملیات حرارتی و بدون عملیات حرارتی در حضور فشار سیال در فشارهای مختلف نشان می‌دهد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این مقاله از لوله جدار نازک آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۳ با نسبت قطر به ضخامت ۱۳/۸۸، قطر خارجی ۲۵ و ضخامت دیواره ۱/۸ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین نسبت شعاع خم به قطر

داخلی سیال را بر کیفیت خم لوله آلومینیومی در خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی، با روش شبیه‌سازی عددی و تجربی بررسی کرد. لوله مورد آزمایش آنها از جنس Al6063-0 با مقطع چهارگوش بود و برای اینکه بتوانند تاثیر فشار داخلی بر خمکاری لوله‌های چهارگوش را بررسی کنند سیستم آبنبدی جدیدی را برای لوله‌های چهارگوش ارائه دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش فشار داخلی عیوب نازک‌شدگی دیواره در انحنای بیرونی خم افزایش و ضخیم‌شدگی دیواره در انحنای درونی خم کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفتند که عیب تغییر سطح مقطع در ناحیه خم، با افزایش فشار داخلی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. سلیمانی و همکاران [9] یک مدل تحلیلی بر پایه تئوری تغییرشکل پلاستیک به منظور پیش‌بینی اعوجاج سطح مقطع و تغییرات ضخامت لوله آلومینیومی ۵۰۵۲ ارائه دادند. آنها همچنین به شبیه‌سازی فرآیند خمکاری لوله با حضور مندرل و فشار سیال پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با بکارگیری فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خمکاری کششی دورانی لوله، حداکثر میزان نازک‌شدگی دیواره به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. ولی از سوی دیگر، استفاده از سیال به جای مندرل منجر به افزایش حداکثر ضخیم‌شدگی انحنای داخلی و حداکثر اعوجاج سطح مقطع می‌شود.

وانگ و آگاروال [10] خمکاری لوله تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی را به روش خمکاری کششی دورانی به صورت تحلیلی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافته‌اند که تغییر شکل سطح مقطع و تغییر ضخامت را می‌توان با نیروی محوری و فشار داخلی کنترل نمود. آنها ابتدا اثر اعمال نیروی محوری را بررسی و مشاهده کردند که توسط نیروی معادل ۱۲/۹ کیلونیوتن چروک در شعاع داخلی نمونه از بین رفت. سپس خمکاری لوله را با فشار داخلی و بدون نیروی محوری بررسی کردند که نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در فشار ۱۰ مگاپاسکال چروک از بین می‌رود. همچنین در صورت اعمال همزمان فشار داخلی ۴ مگاپاسکال و نیروی محوری ۱۲/۹ کیلونیوتن چروک از بین می‌رود.

الیاسی و همکاران [11] فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی لوله جدار نازک آلومینیومی ۸۱۱۲ را به صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها به منظور دستیابی به نسبت خم کمینه و فشار سیال بیشینه از معیار گلوبی در شبیه‌سازی استفاده کردند. آنها دریافته‌اند که کوچکترین نسبت قابل دستیابی برای خمکاری برابر ۱/۶ و بیشترین فشار داخلی قابل اعمال برابر ۱/۵ مگاپاسکال می‌باشد. صرف نظر از نسبت خم، با افزایش فشار سیال ضخیم‌شدگی بیشینه در انحنای داخلی کاهش و نازک‌شدگی بیشینه در انحنای خارجی افزایش می‌یابد. همچنین میزان بیضوی شدن سطح مقطع با کاهش نسبت خم و افزایش فشار سیال افزایش می‌یابد.

خنک شدند. همچنین جهت پیرسازی مصنوعی لوله‌ها، نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۵۲۰ درجه سانتیگراد در داخل کوره اکساتیون 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) دستگاه خمکاری دورانی کششی هیدرولیکی استفاده شده

جدول ۲) جدول طراحی آزمایش تست‌های انجام شده

ردیف	فشار داخلی (مگاپاسکال)	نوع عملیات حرارتی
۱	۰	نمونه خام
۲	۰	آنیل
۳	۰	پیرسازی شده
۴	۱	نمونه خام
۵	۱	آنیل
۶	۱	پیرسازی شده
۷	۱/۸	نمونه خام
۸	۱/۸	آنیل
۹	۱/۸	پیرسازی شده
۱۰	۳/۲	نمونه خام
۱۱	۳/۲	آنیل
۱۲	۳/۲	پیرسازی شده
۱۳	۳/۶	نمونه خام
۱۴	۳/۶	آنیل
۱۵	۳/۶	پیرسازی شده

به منظور تعیین خواص لوله‌ها در حالت نمونه اولیه، آنیل شده و پیرسازی شده از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM-A37 و بر روی پرس ۲۵ تن سنتام استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری عدم دایرویی بودن سطح مقطع در مقطع بحرانی لوله خم شده از دستگاه پروفایل پروژکتور با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. همچنین موقعیت آغاز تا پایان اندازه‌گیری روی لوله از صفر تا ۹۰ درجه از سمت قالب فشار در جهت خم تا قالب نگهدارنده تقسیم شده که در شکل (۴) نشان داده شده است.

برابر ۱/۶، شعاع خم ۴۰ میلی‌متر و زاویه خم ۹۰ درجه می‌باشد. ترکیبات شیمیایی لوله استفاده شده در آزمایشات با استناد به آزمون کوانتومتری در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱) ترکیبات شیمیایی لوله AA۶۰۶۳ (درصد وزنی)

آلمینیوم	کروم	روی	آهن	سیلیسیوم	منیزیم
پایه	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۴۹

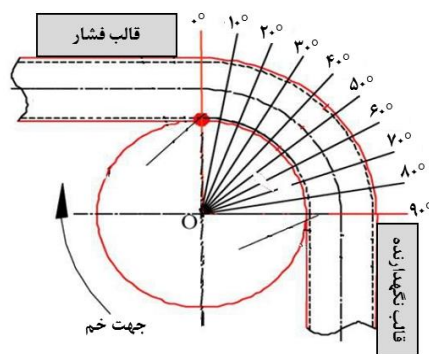
شکل (۳) قسمت‌های مختلف دستگاه خمکاری دورانی کششی هیدرولیکی استفاده شده را نشان می‌دهد. جنس کلیه اجزای قالب فولاد MO40 می‌باشد. قالب این فرآیند دارای سه جز اصلی غلتک، قالب نگهدارنده و قالب فشار می‌باشد. غلتک که شعاع آن، شعاع خمکاری محسوب می‌شود و گشتاور خمشی از این قطعه به لوله وارد می‌شود. قالب نگهدارنده خم که همواره لوله را به غلتک فشرده و لوله توسط آن در حین خمکاری مهار می‌شود. قالب فشار که با اعمال فشار به ناحیه‌ای از لوله که قرار است خم شود، باعث می‌شود لوله در هنگام خمکاری از محل قرارگیری خود خارج نشده و ثابت بماند. همچنین سطح بیرونی لوله را با هدف کاهش نازک‌شدگی به ناحیه خم تغذیه کرده و لوله را در مقابل گشتاوری که قالب خم در حین فرآیند خمکاری به آن وارد می‌کند، نگه می‌دارد. فشار عملیات خمکاری در این دستگاه توسط یک واحد هیدرولیک تامین می‌شود و نیروی ایجاد شده توسط چرخنده شانه‌ای به قالب خم منتقل شده و باعث چرخش قالب خم می‌شود. مراحل انجام خمکاری به این صورت است که ابتدا لوله بین قالب خم و قالب نگهدارنده قرار می‌گیرد. سپس با بستن پیچ‌های قالب نگهدارنده و قالب فشار، نمونه در جای خود ثابت شده در نهایت با روشن شدن دستگاه و حرکت ساعتگرد قالب خم، لوله تا ۹۰ درجه خم می‌شود. برای جلوگیری از مسطح شدن لوله و رسیدن به خمی با کیفیت‌تر، از اعمال فشار داخلی روغن به عنوان مندرل استفاده شده است. بدین صورت درون لوله با روغن پر شده و پس از هواگیری فشار درون لوله با استفاده فشارسنج و شیر اطمینان تنظیم شده است. روغن به کار رفته در آزمایش‌ها SAE20W50 می‌باشد. برای آب‌بندی از مهره و ماسوره، درپوش فلزی و پوش استاندارد استفاده شده است. در این مقاله مطابق با جدول (۲) تعداد ۱۵ آزمایش تجربی در فشارهای صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال برای نمونه‌های خام، آنیل و پیرسازی شده انجام شده که هر آزمایش ۳ بار تکرار شده است (مجموعاً ۴۵ آزمایش انجام شده است). در این مقاله جهت عملیات حرارتی لوله‌ها از دو فرآیند آنیل و پیرسازی مصنوعی استفاده شد. نمونه‌ها قبل از خمکاری در دما و زمان‌های مختلف درون کوره اکساتیون مدل EX1500-33L قرار گرفت. جهت آنیل کردن لوله‌ها، نمونه‌ها در دمای ۴۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت در داخل کوره قرار داده شده و بعد از اتمام این زمان، کوره خاموش شده و نمونه‌ها داخل کوره

اولین نکته مهمی که از بررسی این سه شکل دریافت می‌شود این است که در خمکاری در تمام فشارهای داخلی، بیشترین مقدار عدم دایروی بودن سطح مقطع در تمامی حالت‌ها یعنی نمونه اولیه، آنیل شده و پیرسازی شده در زاویه ۴۰ درجه اتفاق می‌افتد. می‌توان نتیجه گرفت که در این فرآیند، محل بیشترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع صرف نظر از فشار داخلی و عملیات حرارتی‌های مختلف، همواره در زاویه ۴۰ درجه رخ داده و سطح مقطع این زاویه، سطح مقطع بحرانی از لحاظ عدم دایروی بودن می‌باشد.

مطابق با شکل (۷)، مشاهده می‌شود که با افزایش فشار از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی نمونه اولیه در حدود ۴۵٪ کاهش می‌یابد. برای نمونه آنیل شده، با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگاپاسکال میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی در حدود ۴۹٪ کاهش می‌یابد که در شکل (۸) نشان داده شده است.



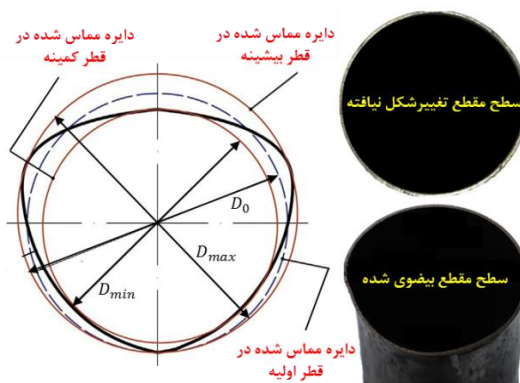
شکل ۸) لوله‌های خم شده اولیه، آنیل و پیرسازی شده در فشارهای سیال مختلف



شکل ۴) موقعیت زاویه‌ای نقاط در امتداد خم از سمت قالب فشار تا قالب نگهدارنده  
لازم به ذکر است که پارامتر عدم دایروی بودن ( $\psi$ ) با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید:

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

که در آن  $D_{min}$  و  $D_{max}$  به ترتیب قطر اولیه لوله، قطر بیشینه و قطر کمینه روی سطح مقطع لوله بعد از عملیات خمکاری می‌باشند که در شکل (۵) نشان داده شده است.

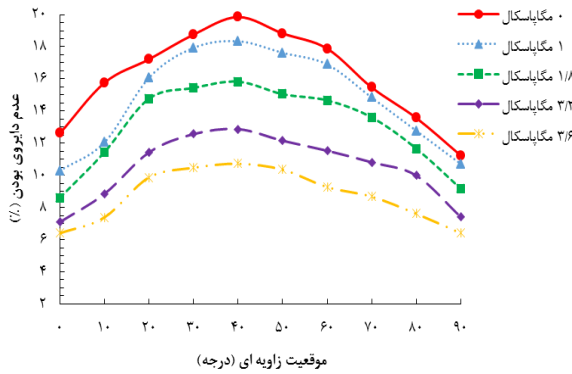


شکل ۵) پارامترهای لوله قبل و بعد از خمکاری

### ۳- نتایج و بحث

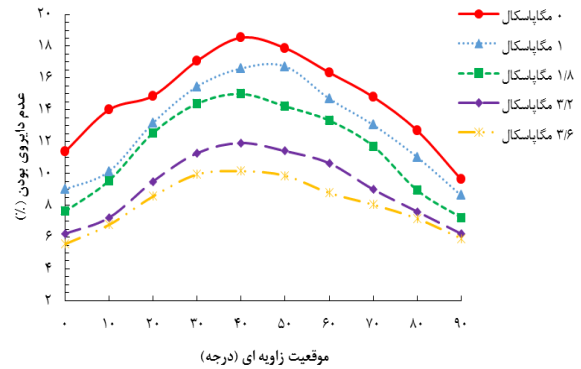
پیش از انجام آزمایش‌ها، فشارهای مختلفی جهت خمکاری لوله مورد نظر بررسی شد. با بررسی نتایج دیده شد که در فشارهای بالاتر از ۳/۶ مگاپاسکال، در لوله پارگی رخ می‌دهد. لذا جهت بررسی تاثیر فشار در خمکاری، فشارهای سیال صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش‌های خمکاری کششی دورانی در فشارهای سیال مختلف برای نمونه‌های اولیه، آنیل و پیرسازی شده انجام شد که نمونه‌های خم شده در شکل (۶) نشان داده شده است. شکل‌های (۷) تا (۹) میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع را بر حسب موقعیت زاویه‌ای مقطع به ترتیب برای نمونه‌های اولیه، آنیل و پیرسازی شده در فشارهای سیال صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶ مگاپاسکال را نشان می‌دهند.

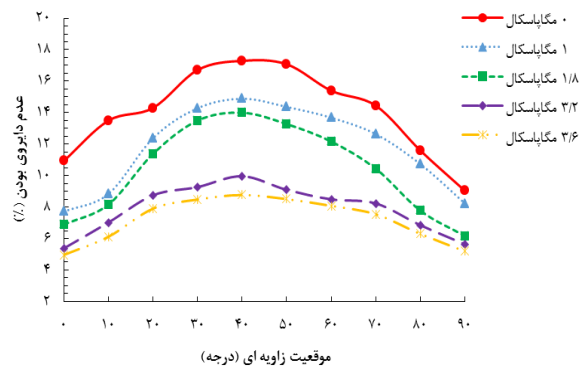


شکل ۹) درصد عدم دایروی بودن سطح مقطع در فشارهای مختلف برای نمونه‌های پیرسازی شده

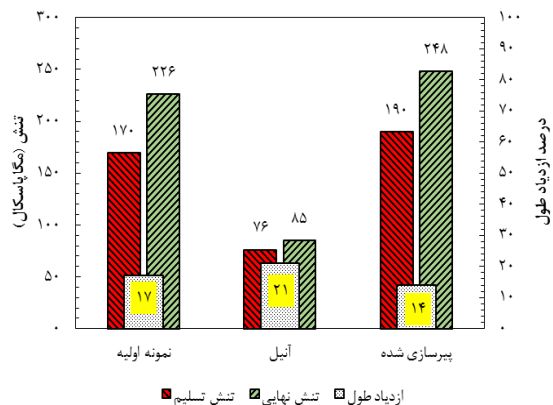
همچنین مقایسه خواص نمونه پیرسازی شده با نمونه اولیه نشان می‌دهد که تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب ۱۲٪ و ۱۰٪ افزایش و همچنین میزان ازدیاد طول حدود ۱۸٪ کاهش یافته‌اند. لذا در شرایط یکسان (از نظر فشار داخلی) میزان تغییرشکل‌پذیری لوله آلومینیومی افزایش و در نتیجه میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، عملیات حرارتی پیرسازی باعث تقویت خواص مکانیکی ماده می‌شود. استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی افزایش یافته و میزان افزایش طول کاهش می‌یابد. در نتیجه مقاومت ماده در برابر تغییرشکل و نهایتاً میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع افزایش می‌یابد.



شکل ۷) درصد عدم دایروی بودن سطح مقطع در فشارهای مختلف برای نمونه‌های اولیه



شکل ۸) درصد عدم دایروی بودن سطح مقطع در فشارهای مختلف برای نمونه‌های آنیل شده



شکل ۱۰) خواص مکانیکی لوله‌های مختلف

جدول (۳) مقایسه بیشینه عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی را برای نمونه‌های مختلف (مطابق با جدول ۲، آزمایش‌های انجام شده) نشان می‌دهد. طبق جدول، کمترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع با مقدار ۸/۷۷٪ مربوط به آزمایش شماره ۱۴ می‌باشد. در این آزمایش، لوله آلومینیومی تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفته و فشار داخلی سیال ۳/۶ مگا پاسکال می‌باشد. از این رو، می‌توان لوله خم شده تحت عملیات حرارتی آنیل و فشار شکل-دهی ۳/۶ مگا پاسکال را به عنوان با کیفیت‌ترین حالت خم از نقطه

همچنین طبق شکل (۹)، با افزایش فشار سیال از صفر تا ۳/۶ مگا پاسکال، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی نمونه پیرسازی شده به میزان ۴۶٪ کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، طبق شکل‌های (۷) تا (۹)، میزان عدم دایروی بودن در نمونه‌های اولیه، از ۱۸/۵۴٪ به ۱۰/۱۵٪، در نمونه‌های آنیل شده، از ۱۷/۳۰٪ به ۸/۷۷٪ و در نمونه‌های پیرسازی شده از ۱۹/۸۵٪ به ۱۰/۷۲٪ بهبود (کاهش) یافته است. با مقایسه نتایج عدم دایروی بودن سطح مقطع در فشارهای مختلف، مشاهده می‌شود که به طور کلی عدم دایروی بودن سطح مقطع نمونه آنیل شده از دیگر نمونه‌ها کمتر می‌باشد. همچنین عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله پیرسازی شده از دیگر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد. در توجیه این نتایج می‌توان چنین گفت که خواص مکانیکی لوله آلومینیومی در حالت آنیل شده تضعیف می‌شود.

پس از آنیل کردن لوله‌ها، استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی کاهش یافته و میزان ازدیاد طول افزایش می‌یابد که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مطابق با شکل، تنش تسلیم و تنش نهایی نمونه آنیل شده در مقایسه با نمونه اولیه به ترتیب ۵۵٪ و ۶۲٪ کاهش می‌یابند در حالیکه میزان ازدیاد طول آن حدود ۲۴٪ افزایش یافته است.

مگاپاسکال برای اعمال فشار استفاده شد. با بررسی نتایج مشخص شد که بیشترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع در زاویه ۴۰ درجه از سمت قالب فشار به سمت قالب نگهدارنده رخ داد. لذا سطح مقطع مربوط به این زاویه به عنوان سطح مقطع بحرانی در نظر گرفته شد.

۴- افزایش فشار سیال منجر به بهبود میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌ها در تمامی حالت‌ها شد. در بیشترین فشار سیال یعنی ۳/۶ مگاپاسکال، کمترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی مربوط به لوله آنیل به میزان ۸/۷۷٪ و بیشترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی متعلق به لوله پیرسازی شده با مقدار ۱۰/۷۲٪ به دست آمد.

**تائیدیه‌های 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- Khadyko M, Myhr OR, Hopperstad OS. Work hardening and plastic anisotropy of naturally and artificially aged aluminium alloy AA6063. *Mechanics of Materials*. 2019 1;136:103069.
- 2- Soleimani J, Elyasi M, Hoseinzadeh M. An analytical model and numerical simulations to predict of process parameters in the tube bending under internal fluid pressure. *Amirkabir Mechanical Engineering Technology Journal*. 2018 23;10.
- 3- Roein M, Elyasi M, Mirnia MJ. Development of bending of AISI 304L micro-tubes with micro-wire mandrel and investigation of its effective parameters. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021 1;64:723-38.
- 4- Ye T, Wu Y, Liu A, Xu C, Li L. Mechanical property and microstructure evolution of aged 6063 aluminum alloy under high strain rate deformation. *Vacuum*. 2019 1;159:37-44.
- 5- Udoe NE, Inegbenebor AO, Fayomi OS. The study on improvement of aluminium alloy for engineering application: A Review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019 11;10(3).
- 6- Taghizadeh Rami F, Elyasi M. Improvement of rotary draw bending of commercial pure titanium tubes with resistance deformation and using steel ball. *Modares Mechanical Engineering*. 2022 10;22(6):371-80.
- 7- Roein M, Elyasi M, Mirnia MJ. Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021 1;66:27-38.
- 8- Zardoshtian A, Sabet H, Elyasi M. Improvement of the rotary draw bending process in rectangular tubes by using internal fluid pressure. *The International Journal*

نظر عدم دایروی بودن سطح مقطع در نظر گرفت. همچنین بیشترین میزان عدم دایروی بودن برای نمونه آنیل (۱۷/۳۰٪) مربوط به آزمایش شماره ۲ می‌باشد که در آن فشار داخلی سیال صفر مگاپاسکال می‌باشد. برای نمونه‌های خام، کمترین و بیشترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع به ترتیب متعلق به آزمایش‌های شماره ۱۳ (۱۰/۱۵٪) و شماره ۱ (۱۸/۵۴٪) می‌باشد. علاوه، برای لوله‌های پیرسازی شده کمترین و بیشترین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع به ترتیب متعلق به آزمایش‌های شماره ۱۵ (۱۰/۷۲٪) و شماره ۳ (۱۸/۵۴٪) می‌باشد.

جدول ۳) مقایسه بیشینه عدم دایروی بودن سطح مقطع بحرانی

شماره آزمایش	بیشینه عدم دایروی بودن (%)
۱	۱۸/۵۴
۲	۱۷/۳۰
۳	۱۹/۸۵
۴	۱۶/۶۱
۵	۱۴/۸۹
۶	۱۸/۳۵
۷	۱۵
۸	۱۴
۹	۱۵/۸۳
۱۰	۱۱/۹۲
۱۱	۹/۹۶
۱۲	۱۲/۸۸
۱۳	۱۰/۱۵
۱۴	۸/۷۷
۱۵	۱۰/۷۲

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر عملیات حرارتی بر روی کیفیت خم‌پذیری لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۳ بررسی شده است. در ابتدا لوله‌ها تحت عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی مصنوعی قرار گرفتند و سپس آزمون کشش بر روی آنها انجام شد. نتایج کلی این پژوهش به شرح زیر خلاصه شده است:

- ۱- نتایج آزمون کشش نشان داد که با اعمال عملیات حرارتی آنیل روی لوله‌ها، تنش تسلیم به میزان ۵۵٪ و تنش نهایی به میزان ۶۲٪ کاهش و میزان ازدیاد طول به میزان ۲۴٪ افزایش یافته است.
- ۲- عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی منجر به افزایش استحکام تسلیم به میزان ۱۲٪ و استحکام نهایی به میزان ۱۰٪ و همچنین کاهش شکل‌پذیری به میزان ۱۸٪ شده است.
- ۳- با استفاده از فرآیند خمکاری کششی دورانی هیدرولیکی، میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع لوله‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. از فشارهای داخلی سیال صفر، ۱، ۱/۸، ۳/۲ و ۳/۶

- of Advanced Manufacturing Technology. 2018 ;95:697-705.
- 9- Soleimani J, Elyasi M, Hosseinzadeh M. Embedding of internal fluid pressure investigation in mandrel through tube rotary draw bending of thin-walled tubes with critical bend radius. Modares Mechanical Engineering. 2016 10;16(9):287-97.
- 10- Wang J, Agarwal R. Tube bending under axial force and internal pressure.
- 11- Elyasi M, Paluch M, Hosseinzadeh M. Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;88:3307-18.
- 12- Sert A, Gürgen S, Çelik ON, Kuşhan MC. Effect of heat treatment on the bending behavior of aluminum alloy tubes. Journal of Mechanical Science and Technology. 2017;31:5273-8.
- 13- Hasanpour K, Barati M, Amini B, Poursina M. The effect of anisotropy on wrinkling of tube under rotary draw bending. Journal of Mechanical Science and Technology. 2013;27:783-92.
- 14- Ashtiani HR, Moghaddam S. Experimental and Numerical Investigation on the Heat Treatment Effects of AA6063 Aluminum Alloy Tubes during Rotary Draw Bending. Iranian Journal of Materials Science and Engineering. 2022;19(1).