



# Mechanical and Microstructural Properties Evaluation of AISI4130 Steel After Backward Flow Forming Process

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Soleymani V.<sup>1</sup>,  
Faraji G.\*

### How to cite this article

Soleymani V, Faraji G. Mechanical and Microstructural Properties Evaluation of AISI4130 Steel After Backward Flow Forming Process. Modares Mechanical Engineering, 2023;23(03):183-190.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

ghfaraji@ut.ac.ir

### Article History

Received: October 05, 2022

Accepted: January 07, 2023

ePublished: March 15, 2023

## ABSTRACT

Flow forming is one of the advanced methods for producing low thickness cylindrical parts. The dimensional accuracy of pipes produced by the flow forming method is much higher than other methods and this method is widely used in the aerospace industry. In this research, the effect of number flow forming passes has been investigated on the mechanical properties and microstructure of AISI4130 steel. Three stages of thickness reduction have been successfully completed and in the fourth stage, the tube was fractured. In the first stage of this pass, the desired steel thickness has changed from 14.2 mm to 9.3 mm. In the second stage, the thickness reached 2.6 mm, in the third stage to a thickness of 2.3 mm and in the fourth stage by reaching 1.8 mm thick, there has been a tear in the pipe. During the flow forming process, the maximum amount of 84.5% thickness reduction can be achieved. To achieve a higher percentage of thickness reduction, it is necessary to re-anneal the flow formed sample. To investigate the tensile properties, tensile tests have been done through both longitudinal and circumferential directions. According to the results, it was found that the flow forming operation on this steel has increased the hardness, and yield and ultimate strength of the material at every stage. Also, the hard work done at every stage on this steel by maintaining the ferritic pearlite-ferritic structure has caused finer grain structure and elongation of the grains.

**Keywords** Cold Hardening, Flow Forming, Mechanical Properties, Microstructure, Thickness Reduction

## CITATION LINKS

1- Study on the mechanism of force calculations in flow forming: a review. 2- Spinning of tubes, A Review. 3- Effect of flow-forming parameters on surface quality, geometrical precision and mechanical properties of titanium tube. 4- The Effect of Elasto-Plastic Properties of Materials on their formability by flow forming. 5- Maximum reduction in power spinning of tubes. 6- An investigation of the development of defects during flow forming of high strength thin wall steel tubes. 7- Tubes pinnability of AA 2024 and 7075 aluminum alloy. 8- Fabrication of 2024 aluminum spun tube using a thermomechanical treatment process. 9- Effect of spinning deformation on microstructure evolution and mechanical property of TA15 titanium alloy. 10- Effect of heat treatment of preform on the mechanical properties of flow formed AISI 4130 Steel Tubes—a theoretical and experimental assessment. 11- Microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy tube fabricated by hot flow forming. 12- Effects of Pre-Form Thickness Variations on Product Thickness Accuracy in Multi-Rollers Flow-Forming. 13- Experimental study of thickness reduction effects on mechanical properties and spinning accuracy of aluminum 7075-O, during flow forming. 14- The influence of roller force imbalance on product thickness accuracy in multi-roller flow forming. 15- An investigation of the surface quality of burnished AISI 4340 steel. 16- Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes. 17- Mechanical characterization of flow formed FCC alloys. 18- Investigation of the effect of roller inclination angle on the forming forces during & splined mandrel flow forming operation. 19- Flow forming of tubes-a review. 20- Rifling by flow forming. 21- Flow-forming optimization based on hardness of flow-formed AISI321 tube using response surface method. 22- Steel Tables and Standards (3).

## ارزیابی خواص مکانیکی و ریز ساختار فولاد AISI4130 بعد از فرآیند فلو فرمینگ معکوس لوله

وحید سلیمانی<sup>۱</sup>، قادر فرجی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> انشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه پردیس تهران

### چکیده

فلو فرمینگ، یکی از روش های پیشرفته برای تولید قطعات استوانه ای با ضخامت کم می باشد. دقت ابعادی لوله های تولید شده با روش فلو فرمینگ نسبت به سایر روش ها بسیار بالاتر بوده و این روش کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا دارد. در این پژوهش اثر تعداد پاس فرآیند فلو فرمینگ بر روی خواص مکانیکی و دانه بندی ساختار فولاد AISI4130 مورد بررسی قرار گرفته است. سه مرحله کاهش ضخامت با موفقیت انجام شده و در مرحله چهارم، لوله دچار پارگی شد. در مرحله اول این فرآیند ضخامت فولاد مورد نظر از مقدار ۱۴/۲ میلی متر به ۹/۳ میلی متر تغییر یافته است. در مرحله دوم ضخامت به ۶/۲ میلی متر و در مرحله سوم به ضخامت ۲/۳ میلی متر رسیده است و در مرحله چهارم با رسیدن به ضخامت ۱/۸ میلی متر، در لوله پارگی به وجود آمده است. نتایج نشان داد که با استفاده از فرآیند فلو فرمینگ حداکثر مقدار ۸۴/۵ درصد کاهش ضخامت قابل دستیابی است. برای دستیابی به درصد کاهش ضخامت بیشتر لازم است لوله فلو فرم شده، مجدداً عملیات حرارتی آنیل شود. برای بررسی خواص مکانیکی، آزمون کشش در دو جهت طولی و محیطی انجام شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که عملیات فلو فرمینگ، بر روی این فولاد، در هر مرحله موجب افزایش سختی و افزایش استحکام تسلیم و نهایی ماده اولیه شده است. همچنین کار سختی انجام شده در هر مرحله بر روی این فولاد با حفظ ساختار پرلیتی فریتی، موجب ریزتر شدن ساختار دانه بندی و کشیدگی دانه ها شده است.

**کلیدواژه ها:** فلو فرمینگ، کار سختی، خواص مکانیکی، ریزساختار، درصد کاهش ضخامت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

\*نویسنده مسئول: ghfaraji@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

فرآیند فلو فرمینگ، روش مدرن، پیشرفته و بهبود یافته روش شکل دهی چرخشی فلزات است که یکی از قدیمی ترین روش های شکل دهی بدون براده برداری است [1]. در روش شکل دهی چرخشی فلزات، با استفاده از یک اهرم شکل دهنده به صورت دستی یا خودکار، ورق گسترده ای را بر روی یک قالب دوار فشار می دهند تا شکل قالب مورد نظر را به خود بگیرد [2]. در فرآیند فلو فرمینگ، یک لوله جدار ضخیم (پیش تولید) بر روی یک سمبه دوار قرار گرفته و با استفاده از غلتک، تحت فشار و نیرو، بر روی سمبه جریان می یابد و با کاهش ضخامت لوله، بر طول آن افزوده می شود، به طوری که قطر داخلی لوله ثابت می ماند [3]. در مواقعی که نسبت طول به قطر قطعه کار یا سمبه زیاد باشد، از دو یا سه

غلتک برای اعمال نیرو استفاده می شود. با این روش اثرات خیز سمبه ناشی از نیروهای وارده از سوی غلتک ها خنثی می شود. در فلو فرم با استفاده از سه غلتک، امتداد محورهای اعمال نیرو و مرکز لوله به هم می رسند و با یکدیگر زاویه ۱۲۰ درجه می سازند و همواره دو غلتک نقش پایدار کننده و تکیه گاه را انجام می دهند (شکل ۱).



شکل ۱) غلتک های سه تایی در فلو فرم [4]

در فرآیند فلو فرمینگ، برای کاهش مقادیر نیروهای وارده به غلتک، طی چند مرحله کاهش ضخامت لوله پیش تولید صورت می گیرد. مقدار این کاهش ضخامت در هر مرحله به مولفه های زیادی از جمله خواص مکانیکی پیش تولید، سرعت پیشروی، مقدار باردهی غلتک ها و ... بستگی دارد [5-6]. امروزه اکثر ماشین های فلو فرم برای کنترل و نظارت بر فرآیند فلو فرمینگ به سیستم های کنترل عددی مجهز شده اند.

بر اساس جهت جریان مواد و جهت حرکت غلتک، دو روش فلو فرمینگ وجود دارد. در صورتی که جهت جریان فلز با جهت حرکت غلتک یکسان باشد، فرآیند فلو فرمینگ، مستقیم نامیده می شود و در صورتی که این دو جهت در خلاف یکدیگر باشند، فرآیند فلو فرمینگ، معکوس نامیده می شود.

محققین زیادی بر روی اثر پارامترهای مختلف فلو فرمینگ بر خواص فلزات یا آلیاژهای فلزی کار کرده اند. چانگ و همکاران [7-8] طی بررسی های انجام شده بر روی آلومینیوم AA7075 و AA2024 نشان دادند که فرآیند فلو فرمینگ، موجب ریزدانه شدن ساختار دانه ها شده و استحکام تسلیم و چقرمگی را افزایش می دهد. چن و همکاران [9] طی بررسی انجام شده بر روی تیتانیوم TA15 نشان دادند، فرآیند فلو فرمینگ اندازه دانه ها را کاهش می دهد و همچنین مقدار سختی را افزایش می دهد. رجان و همکاران [10] نشان دادند که عملیات حرارتی و افزایش استحکام اولیه لوله پیش تولید فولاد AISI4130، موجب بهبود خواص مکانیکی بعد از عملیات فرآیند فلو فرمینگ می گردد. وانگ و همکاران [11] اثر

قوی می‌باشد و از طرفی برای مباحث کشش برای این فولاد در یک مرحله بیش از ۳۰٪ توصیه نشده و احتمال پارگی در آن وجود دارد. در این پژوهش بیشترین استحکام خواص مکانیکی مورد نیاز با حداکثر درصد کاهش ضخامت در طی چند مرحله مورد بررسی قرار گرفته شده است تا حداکثر مقدار استحکام دهی و درصد کاهش ضخامت قابل دستیابی ارائه شود.

## ۲- مواد و روش آزمون

فولاد AISI4130 استحکام مخصوص (نسبت استحکام به وزن) بالایی دارد. این فولاد از قابلیت جوش‌پذیری خوبی برخوردار بوده و در رده فولاد های کم آلیاژ و عملیات پذیر قرار می‌گیرد و با انجام عملیات حرارتی کوئنچ تمپر می‌توان استحکام کششی و نهایی تا مقدار ۱۴۰۰ مگاپاسکال افزایش داد. فولاد AISI4130، دارای مقدار کربن متوسط و مقادیر کرم و مولیبدن قابل توجه می‌باشد. مقادیر ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این فولاد در جداول ۱ و ۲ [22] ارائه شده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فولاد AISI4130 [22]

عناصر	تجربی	استاندارد
Fe	۹۷	۹۸/۲۲
Cr	۰/۹۱۲	۰/۸ - ۱/۱
Mn	۰/۴۳۴	۰/۴ - ۰/۶
C	۰/۲۹۵	۰/۲۸ - ۰/۳۳
Mo	۰/۱۸۰	۰/۱۵ - ۰/۲۵
Si	۰/۱۸۲	۰/۱۵ - ۰/۳۵
Ni	۰/۱۳۸	۰/۰۲۵
P	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲
S	۰/۰۲۰	۰/۰۲۵
Cu	۰/۰۰۶	۰/۰۲۵

جدول ۲) خواص مکانیکی فولاد AISI4130 [22]

سختی برینل (HB)	ازدیاد طول نسبی %	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	عملیات
۱۹۷	۲۲/۵	۴۳۶/۴	۶۶۸/۸	نرماله
۱۵۶	۲۸/۲	۳۳۰	۵۶۰/۵	آنیل

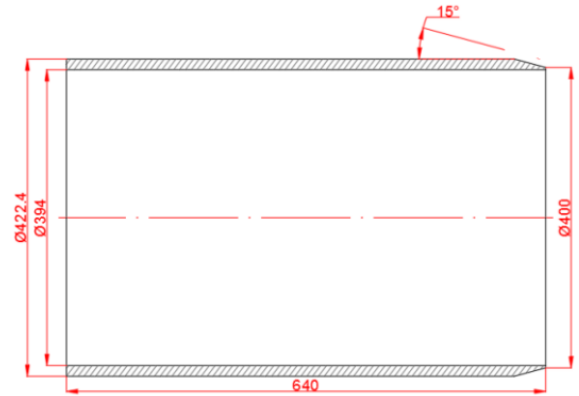
## ۲-۱- آماده سازی مواد اولیه

لوله پیش‌فرم از میلگرد فولاد AISI4130 آنیل شده تهیه شد و برای اطمینان از عدم وجود ترک و یا سایر عیوب احتمالی، تحت آزمون غیر مخرب (ولتراسونیک) قرار گرفته است. برای انجام بهینه فرآیند فلورمینگ زاویه لبه پیش‌فرم طوری طراحی شده است که غلتک‌ها بهترین زاویه برخورد با لوله را داشته باشند. همانطوریکه در شکل ۲ نشان داده شده است، این زاویه برابر ۱۵ درجه می‌باشد. همچنین صافی سطح، یکی از نکات مهم طراحی و تولید پیش‌تولید می‌باشد، به طوریکه مقدار صافی سطح نباید کمتر از سه مثلث یا  $Rz=0.6$  میکرومتر باشد [18].

پارامترهای فرآیندی نظیر دما، کاهش ضخامت، سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر روی خصوصیات ساختار ریز دانه شدن لوله منیزیمی AZ80 در فرآیند فلورمینگ گرم را مورد بررسی قرار دادند. بررسی آنها نشان داد چنانچه پارامترهای فرآیندی در فلورمینگ مناسب و بهینه انتخاب شوند، می‌توان به خواص مکانیکی بالایی دست یافت. جعفری‌ندوشن و فرزین [12] به بررسی تأثیر تغییرات ضخامت پیش تولید بر ضخامت قطعات نهایی پرداختند نتایج بدست آمده بیانگر آن است که تغییرات ضخامت در پیش تولید موجب تغییرات ضخامت با همان توزیع در قطعه نهایی می‌شود. ولی دامنه تغییرات ضخامت کاهش می‌یابد. ملاداودی و جوانرودی [13] به بررسی اثر کاهش ضخامت بر روی خواص مکانیکی و دقت ابعادی آلومینیوم AA7075 آنیل شده پرداختند. نتایج نشان دهنده آن است که، کاهش ضخامت پیش‌تولید لوله، استحکام تسلیم و نهایی، سختی و کشیدگی اندازه دانه‌ها در جهت حرکت غلتک‌ها را افزایش می‌دهد. جعفری‌ندوشن و فرزین [14] به بررسی تأثیر عدم توازن نیروی غلتک‌ها بر دقت ضخامت محصول پرداختند و نشان دادند که عدم تعادل نیرویی بین غلتک‌ها موجب تغییرات ضخامت در طول قطعه نهایی می‌شود. بوذاریپور و الیاسی [15] به بررسی عوامل موثر بر کیفیت سطح صیقلی فولاد AISI 4340 پرداختند نتایج بدست آمده بیانگر آن است که، تأثیرگذارترین پارامترها، ناهم‌واری و عدم گردی سطح می‌باشد و افزایش تعداد مراحل بیشترین تأثیر را بر سختی سطح دارد. محبی و اکبرزاده [16] با استفاده از پین که به صورت طولی و عرضی در قطعه پیش‌تولید اولیه جاسازی شده بود به اندازه‌گیری کرنش‌های طولی و عرضی ایجاد شده در فرآیند فلورمینگ پرداختند. نتایج آلمان محدود حاصل از بررسی این محققان با نیروهای به دست آمده به روش تجربی، تطابق مناسبی با یکدیگر دارند. حق شناس و کلاوسن [17] به بررسی رفتار کارسختی آلیاژهای FCC نظیر آلیاژ آلومینیوم AA5052, AA6061، برنج ۷۰/۳۰ و مس خالص در طی فرآیند فلورمینگ پرداختند. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که میزان استحکام تسلیم و نهایی در جهت محوری برای تمام نمونه‌ها نسبت به جهت شعاعی افزایش بیشتری داشته است و به دلیل جریان بیشتر مواد در جهت محوری نسبت به جهت شعاعی، کار سختی در جهت محوری بیشتر از جهت شعاعی بوده است.

با توجه به اینکه فرآیند استحکام دهی فولاد AISI4130 با عملیات حرارتی کوئنچ تمپر همراه با مشکلات ناخواسته بسیار زیادی از جمله افزایش اعوجاج، افزایش دو پهنی و تغییر طول لوله همراه می‌باشد، در پژوهش حاضر با استفاده از عملیات کارسردی بر روی فولاد AISI4130 با حفظ شرایط هندسی از جمله اعوجاج و دوپهنی خواص مکانیکی آن (استحکام تسلیم و نهایی)، ارزیابی شد. افزایش استحکام تسلیم و نهایی قطعه به همراه درصد کاهش ضخامت زیاد در یک مرحله نیازمند دستگاه پرس کشش بسیار

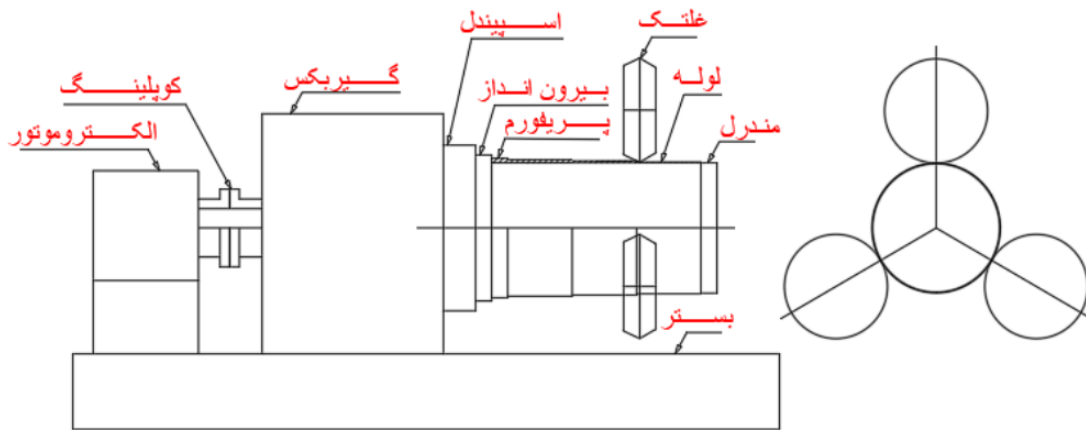
زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر می‌باشد. زوایای حمله غلتک-های اول تا سوم به ترتیب ۲۵، ۱۸ و ۲۵ درجه انتخاب شده و شعاع درگیری نوک غلتک ۵ میلی متر می‌باشد. کلیه پارامترهای موثر مانند سرعت پیشروی و سرعت دورانی در طی انجام کلیه مراحل ثابت در نظر گرفته شده است. مقدار باردهی هر یک از غلتک‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که نیروهای وارده بر روی هر سه غلتک یکسان باشد به همین منظور برای اطمینان از توزیع یکنواخت نیرو، بر روی هر یک از غلتک‌ها در کلیه مراحل فرآیند فلورمینگ مقادیر شدت جریان مصرف شده توسط الکتروموتور متصل به گیربکس و پیچ بال اسکرو به عنوان شاخص اندازه‌گیری مقدار نیروی اعمال شده در نظر گرفته شده است. طرح دستگاه فلورم به همراه نحوه قرار گرفتن لوله پیش فرم بر روی سمبه (مندرل) در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲) پریفرم (واحد ابعاد، میلی متر می‌باشد).

۲-۲- روش انجام عملیات فلورمینگ

در این پژوهش، از فرآیند فلورمینگ معکوس استفاده گردید. دستگاه مورد استفاده، دستگاه فلورم CNC، دارای سه غلتک با

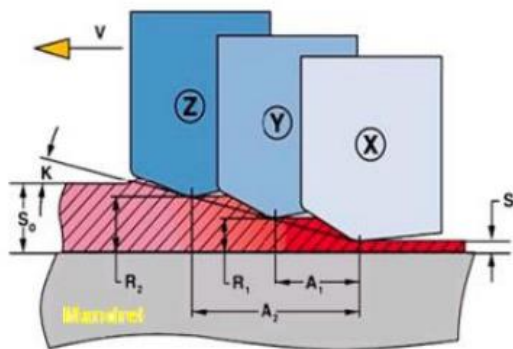


شکل ۳) شماتیک دستگاه فلو فرمینگ

شکل ۵ پارگی شد. با توجه به اینکه قطعه لوله فلورمینگ شده در مرحله چهارم دچار تخریب و پارگی گردید، لذا کلیه نمونه برداری‌ها برای سه مرحله اول انجام گرفته است.

۲-۳- آزمون کشش

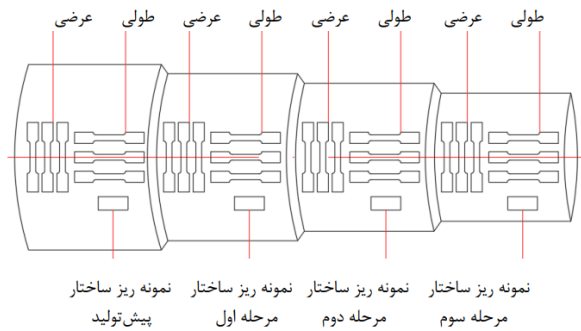
از کلیه مقاطع لوله تهیه شده با استفاده از سنگ برش نمونه برداری شده است. در شکل ۶ بخش برش خورده لوله جهت نمونه برداری نشان داده شده است.



شکل ۴) موقعیت غلتک‌ها [20]

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است نحوه چیدمان غلتک‌ها در محور طولی دستگاه طوری طراحی می‌شود که هر یک از غلتک‌ها در هر مرحله فرآیند فلورمینگ، مقدار کاهش ضخامت مورد نظر را انجام دهد بطوریکه مقادیر نیروهای یکسانی بر روی هر یک از غلتک‌ها اعمال گردد. مجموع مقادیر نیروهای وارده بر روی سمبه باید طوری باشد که موجب خمش و یا تغییر شکل سمبه نگردد. فاصله این غلتک‌ها در محور طولی از مهمترین مباحث یکنواختی سطح تولید قطعه کار می‌باشد. به طوری که سطح قطعه لوله نهایی تولید شده از یکنواختی قابل قبولی برخوردار باشد [19]. مقدار فاصله طولی غلتک‌ها به مقدار ۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر، ابتدا لوله پیش‌تولید بر روی سمبه دستگاه فلورم قرار گرفته و چهار مرحله فرآیند فلورمینگ شکل دهی بر روی آن انجام می‌گیرد. در مرحله اول، ضخامت لوله پیش‌تولید از ۱۴/۲ میلی‌متر به ۹/۳ میلی‌متر (۳۵٪) کاهش یافت و در مرحله دوم ضخامت آن به ۶/۲ میلی‌متر (۵۶٪) کاهش یافت. در مرحله سوم ضخامت آن به ۲/۲ میلی‌متر (۱۵/۸۴٪) کاهش یافت (جدول ۳). در مرحله چهارم در حین کاهش ضخامت، لوله دچار مطابق



شکل ۷) نحوه نمونه برداری آزمون کشش براساس استاندارد ASTM E8 برای ضخامت کمتر از ۶ میلی متر و نمونه برداری ریز ساختار

### ۲-۵- ریز ساختار

نمونه‌های مورد نظر برای تعیین ریز ساختار، بعد از تهیه مانت، با قرار دادن یک قطعه کوچک از ماده در داخل یک قالب که با رزین پر شده است، با استفاده از سمباده‌ها و پولیش نهایی مطابق شکل ۸ پرداخت گردید. با استفاده از استاندارد ASTM F407-07 توسط ماده نایتال ۲٪ (محلول نایتال ۲٪ که شامل ۲ درصد حجمی اسید نیتريك غلیظ در الکل می‌باشد) تهیه شد و مرحله اچ انجام گردید.



شکل ۸) نمونه های مانت متالوگرافی

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریز ساختار

شکل ۹- الف تصویر ریز ساختار قطعه پیش تولید را قبل از عملیات فلورمینگ نشان می‌دهد که ساختار آن پرلیتی به همراه فریت های مرز دانه ای و ردیف دانه های فریت می‌باشد. ساختار طولی مرحله سوم فرآیند فلورمینگ در شکل ۹- ب نشان داده شده است که در آن نوع بافت کشیده پرلیتی به همراه فریت های مرز دانه ای و ردیف های دانه های کشیده فریت می‌باشد. همانطوریکه مشاهده می‌شود در کلیه مراحل، ساختار در جهت طولی شروع به تغییر شکل داده و طول دانه ها افزایش می‌یابد، در صورتیکه در جهت محیطی اندازه دانه ها در حال کوچک شدن بوده و نهایتاً شکل منظمی بصورت بافت های کشیده شده پرلیتی در جهت طولی بدست می‌آید. در فرآیند فلورمینگ با کشیدگی دانه در جهت طولی لوله سبب افزایش استحکام نهایی محصول می‌گردد.

جدول ۳) درصد کاهش ضخامت در مراحل مختلف فلورم

پیش تولید	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	ضخامت (میلی متر)
۱۴/۲	۹/۳	۶/۲	۲/۳	ضخامت کاهش ضخامت نسبت به مرحله قبل
۰	۳۵	۳۳	۶۳	ضخامت کاهش ضخامت نسبت به ضخامت پیش تولید



شکل ۵) نمونه پیش تولید و لوله تولید شده

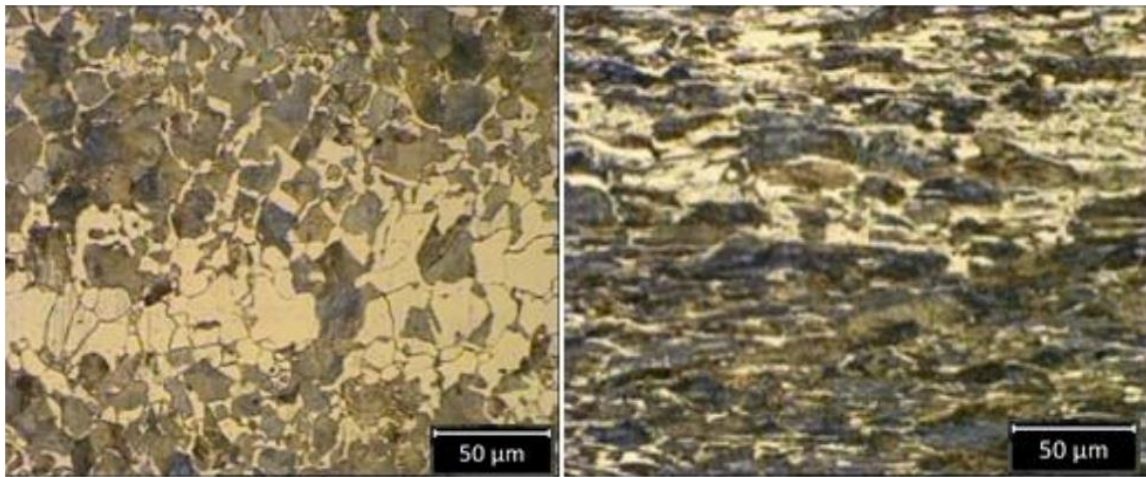


شکل ۶) برش لوله تولید شده برای تهیه نمونه برداری آزمون کشش

نحوه نمونه برداری آزمون های کششی و مشخصات نمونه کشش با مقطع چهار گوش بر اساس استاندارد ASTM E8 مطابق شکل ۷ تهیه شده است. دستگاه کشش مورد استفاده محصول شرکت سنتام و مدل STM-150 بوده است. نرخ کشش، ۰/۰۱ میلی متر بر ثانیه انتخاب شد و هر آزمون سه مرتبه تکرار شد.

#### ۴-۲- سختی سنجی

برای هر مرحله از لوله پیش تولید فلورم شده، یک نمونه برای اندازه گیری مقدار سختی بر اساس معیار برینل انتخاب شده و با استفاده از دستگاه آزمون سختی سنج دیجیتال مدل SUH 200 ، سختی آن اندازه گیری شد.



ب

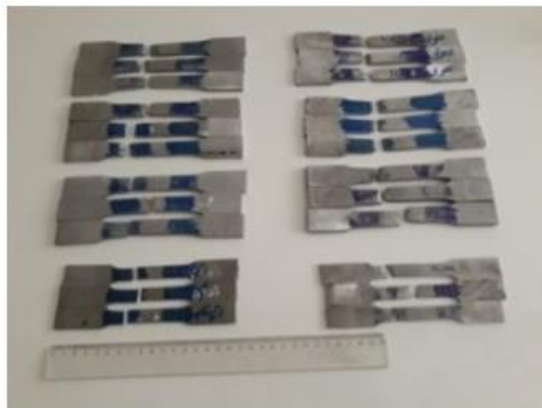
الف

شکل ۹) ریز ساختار قطعه الف) پیش تولید ب) فلو فرم شده برای سه پاس که در جهت طولی نسبتاً کشیده شده پربیتی به همراه فریت مرز دانه ای هستند.

### ۲-۳- خواص مکانیکی

در شکل ۱۰ نمونه های آزمون کشش قبل و بعد از آزمون نشان داده شده است. در شکل ۱۱ نتایج آزمون کشش برای مراحل مختلف در دو حالت طولی و محیطی آورده شده است.

فرآیند فلوفرمینگ سبب تغییر ساختار و ریزتر شدن دانه بندی فولاد مورد نظر می شود [7]. همچنین عملیات فلوفرمینگ بیش از آن که تغییر فاز فولاد را به همراه داشته باشد، منجر به تغییر دانه بندی و تغییر شکل (کشیدگی) دانه ها می گردد.

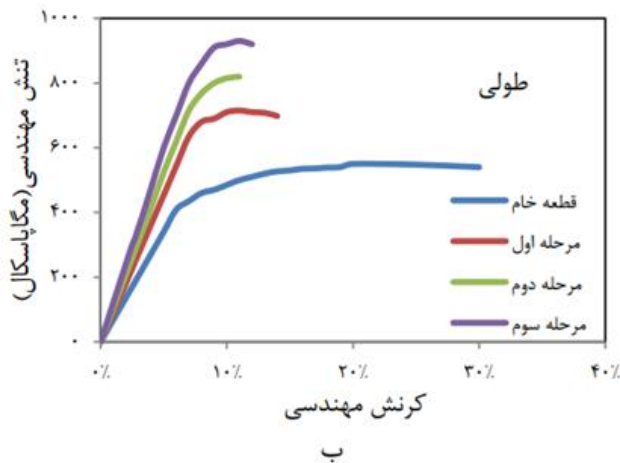


ب

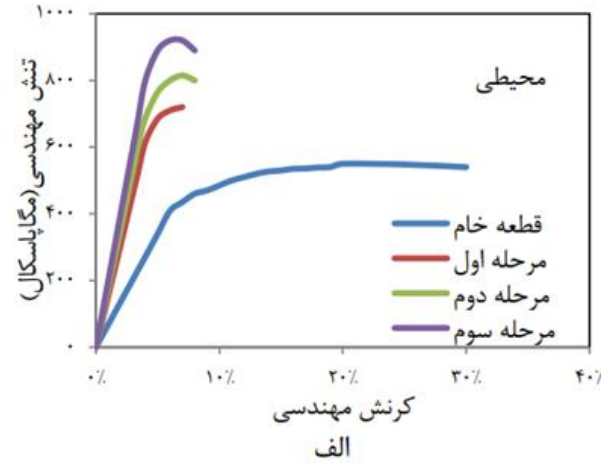


الف

شکل ۱۰) الف) نمونه برداری آزمون کشش ب) نمونه ها بعد از آزمون کشش



ب



الف

شکل ۱۱) نمودار تنش- کرنش الف) طولی ب) محیط

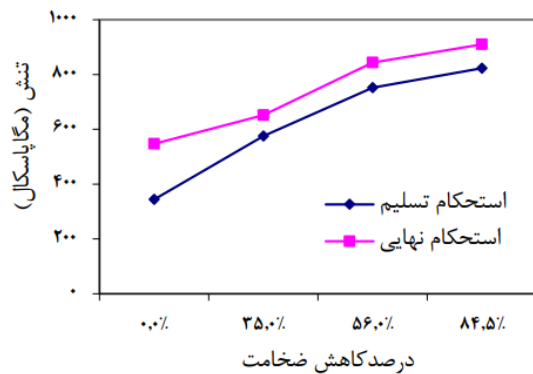
استحکام تسلیم و کاهش قابلیت افزایش طول نسبی، مقدار سختی افزایش یافته و میزان افزایش سختی در مرحله اول بیشتر از مقدار افزایش در مراحل بعدی می باشد. مطابق مطالعه رزانی و همکاران<sup>[21]</sup>، پارامترهای زیادی از فرآیند فلورمینگ بر سختی فولاد AISI4130 مؤثر هستند و نشان می دهند که با افزایش سرعت دورانی سنبه و کاهش ضخامت دیواره، سختی لوله فلورم شده افزایش می یابد که با نتیجه به دست آمده با این پژوهش همخوانی دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در این پژوهش را به طور خلاصه می توان به شرح ذیل بیان نمود:

۱- فرآیند فلورمینگ در سه مرحله با درصد کاهش ضخامت مجموعاً ۸۴/۵ درصد با موفقیت روی فولاد AISI4130 انجام گردید.

۲- بخاطر تغییرات متفاوت ریزساختار در دو راستای طولی و محیطی در فرآیند فلورمینگ، مقدار استحکام تسلیم و نهایی در جهت طولی و محیطی با هم متفاوت می باشد اگرچه این تفاوت بسیار کم می باشد.



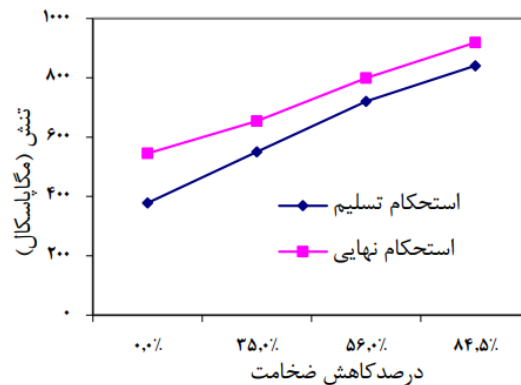
ب

همانطور که در شکل ۱۲ الف و ب نشان داده شده است، مقادیر استحکام تسلیم و نهایی در نمونه آزمون های طولی و محیطی با توجه به نمونه برداری هر مرحله از فرآیند فلورمینگ، افزایش می یابد. در هر مرحله کاهش ضخامت مقادیر استحکام تسلیم و نهایی تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد.

همان گونه که از نتایج، مشاهده می شود، با کاهش ضخامت نمونه ها، فاصله بین مقدار استحکام تسلیم و نهایی کم می شود. با توجه به سازوکار بیان شده توسط بیلینا و همکاران<sup>[4]</sup>، فولاد AISI4130 در ابتدا شکل پذیری خوبی داشته و با ادامه فرآیند، از میزان شکل پذیری کاسته می شود. همچنین مشاهده می شود که تغییرات استحکام نهایی و تسلیم در دو راستای طولی و محیطی تقریباً مشابه می باشند.

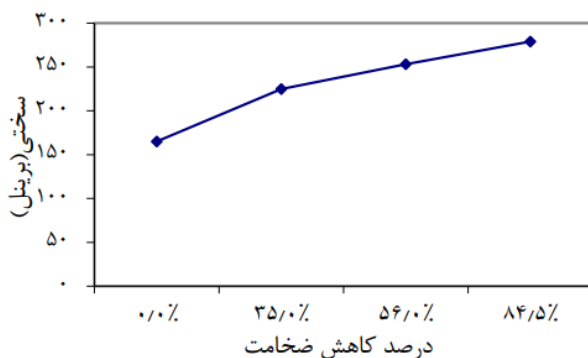
نتایج تغییر طول نسبی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با افزایش خواص مکانیکی (استحکام تسلیم و نهایی) در نمونه های طولی و محیطی در هر مرحله عملیات فلورمینگ، مقدار ازدیاد طول نسبی کاهش می یابد و این نشان دهنده ترد شدن لوله تولید شده در هر مرحله کاهش ضخامت و عملیات فلورمینگ می باشد.

نتایج سختی سنجی نمونه های مختلف در شکل ۱۴ ارائه شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود با افزایش

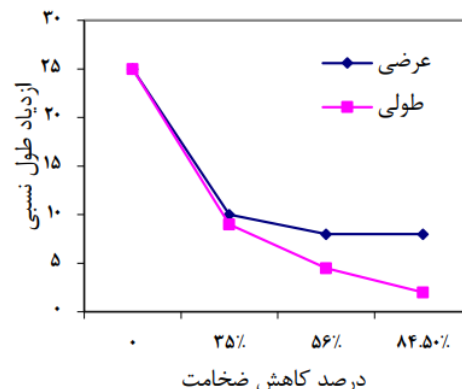


الف

شکل ۱۲) تغییرات استحکام با مقدار درصد کاهش ضخامت در راستای الف) طولی، ب) محیطی



شکل ۱۴) سختی نمونه فلورم شده با تغییرات درصد کاهش ضخامت



شکل ۱۳) تغییر طول نسبی نمونه فلورم شده با تغییرات درصد کاهش ضخامت

alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2007;17(6):1205-11.

10- Rajan KM, Deshpande PU, Narasimhan K. Effect of heat treatment of preform on the mechanical properties of flow formed AISI 4130 Steel Tubes—a theoretical and experimental assessment. Journal of Materials Processing Technology. 2002; 125:503-11.

11- Cao Z, Wang F, Wan Q, Zhang Z, Jin L, Dong J. Microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy tube fabricated by hot flow forming. Materials & Design. 2015; 67:64-71.

12- jafari Nodoshan R, Farzin M. Effects of Pre-Form Thickness Variations on Product Thickness Accuracy in Multi-Rollers Flow-Forming. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 2013; 44(2): 103-112.

13- Molladavoudi HR, Djavanroodi F. Experimental study of thickness reduction effects on mechanical properties and spinning accuracy of aluminum 7075-O, during flow forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011; 52:949-957.

14- jafari Nodoshan R, Farzin M. The influence of roller force imbalance on product thickness accuracy in multi-roller flow forming, Imam Hossein University Journal of Mechanical&Aerospace Engineering, 2012; 7:123-142

15- Boozarpoor M, Elyasi M, Hosseinzadeh M. An investigation of the surface quality of burnished AISI 4340 steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2018; 232(3):299-313.

16- Mohebbi MS, Akbarzadeh A. Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes. Journal of Materials Processing Technology. 2010; 210(2):389-95.

17- Haghshenas M, Klassen RJ. Mechanical characterization of flow formed FCC alloys. Materials Science and Engineering: A. 2015; 641:249-55.

18- Vriens BC, Haghshenas M, Klassen RJ. Investigation of the effect of roller inclination angle on the forming forces during a splined mandrel flow forming operation. Journal of Manufacturing Processes. 2015; 19:183-6.

19- Sivanandini M, Dhama SS, Pabla BS. Flow forming of tubes-a review. Int J Sci Eng Res. 2012; 3(5):1-11.

20- GÜN B, GÜVEL I. Rifling by flow forming. 21- Razani NA, Jalali Aghchai A, Mollaei Dariani B. Flow-forming optimization based on hardness of flow-formed AISI321 tube using response surface method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014; 70:1463-71.

22- A. Valinejad (1381), Steel Tables and Standards (3), Tehran, Iran: Tehran

۳- در هر مرحله کاهش ضخامت، استحکام تسلیم و نهایی در هر دو جهت طولی و محیطی افزایش می‌یابد.

۴- در هر مرحله کاهش ضخامت، با روش فلوفرمینگ مقادیر سختی، افزایش می‌یابد و و میزان افزایش سختی در مرحله اول بیشتر از مقدار افزایش در مراحل بعدی می باشد.

۵- برای فولاد AISI4130 با استحکام تسلیم اولیه اعلام شده درصد کاهش ضخامت بیش از ۸۴/۵٪ با توجه به بالا رفتن سختی قطعه، احتمال تخریب و پارگی در قطعه وجود دارد.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.

**تعارض منافع:** در مورد پژوهش حاضر، هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی وجود ندارد.  
**منابع مالی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

#### منابع

1- Venka`Q1teshwarlu GG, Ramesh Kumar K, Janardhan Reddy TA, Gopi G. Study on the mechanism of force calculations in flow forming: a review. Int J Adv Res Eng Technol. 2013;4(3):194-201.

2- Kalpakjian S, Rajagopal S. Spinning of tubes: a review. Journal of applied metalworking. 1982;2(3):211-23.

3- Ebrahimi M, Tabei KH, Naseri R, Djavanroodi F. Effect of flow-forming parameters on surface quality, geometrical precision and mechanical properties of titanium tube. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2018;232(6):702-8.

4- Bylya OI, Khismatullin T, Blackwell P, Vasin RA. The effect of elasto-plastic properties of materials on their formability by flow forming. Journal of Materials Processing Technology. 2018; 252:34-44.

5- Kalpakcioglu S. Maximum reduction in power spinning of tubes. 1964; 86:49-54.

6- Rajan KM, Narasimhan K. An investigation of the development of defects during flow forming of high strength thin wall steel tubes. Practical Failure Analysis. 2001; 1:69-76.

7- Chang SC, Huang CA, Yu SY, Chang Y, Han WC, Shieh TS, Chung HC, Yao HT, Shyu GD, Hou HY, Wang CC. Tube spinnability of AA 2024 and 7075 aluminum alloys. Journal of Materials Processing Technology. 1998; 80:676-82.

8- Chang SC, Wang CC, Huang CA, Chang Y, Chen TL. Fabrication of 2024 aluminum spun tube using a thermomechanical treatment process. Journal of Materials Processing Technology. 2001;108(3):294-9.

9- Xu WC, Shan DB, Wang ZL, Yang GP, Yan LÜ, Kang DC. Effect of spinning deformation on microstructure evolution and mechanical property of TA15 titanium