



# A Novel Severe Plastic Deformation Technique with Potential for Producing Relatively Long Ultrafine Grained Tubes

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Eftekhari M<sup>1</sup>

Faraji G<sup>1\*</sup>

Bahrami M<sup>1</sup>

### How to cite this article

Eftekhari M, Faraji G, Bahrami M. A Novel Severe Plastic Deformation Technique with Potential for Producing Relatively Long Ultrafine Grained Tubes. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(10):661-672.

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

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran. P.O.Box 14395-515 Tehran, Iran.

Phone: -

Fax: -

ghfaraji@ut.ac.ir

### Article History

Received: 7 May, 2021

Accepted: 7 June, 2021

ePublished: 8 August, 2021

## ABSTRACT

In the present study, hydrostatic tube cyclic extrusion compression process has been introduced as a novel severe plastic deformation which possesses the capability of severe plastic deformation and improvement of microstructure and mechanical properties of tubular components by utilizing pressurized fluid and appropriate pressing load. In addition, this process has the potential to produce relatively long tubes. In this research, the microstructural and mechanical properties of pure copper tubes produced by hydrostatic tube cyclic extrusion compression process were examined experimentally. The results denoted the successful performance of the process on pure copper tube with a significant improvement in the microstructure and mechanical properties. This process increased the ultimate strength, the yield strength, and the hardness value of pure copper by 1.57, 1.85 and 1.86 times, respectively, with a low loss of ductility. In addition, an ultrafine grain structure with an average size of about 990 nm were formed, while the average value of grain size in the unprocessed tube was about 40  $\mu\text{m}$ . The formation stages of the observed microstructure are as follows; creation of high density of dislocations, dislocations coalescence and formation of tangled structures, arranging of dislocations and formation of low angle boundaries, formation of grains to diminish the strain energy, creation of new dislocations and their movement toward the boundaries.

**Keywords** Severe Plastic Deformation, Tube, Pure Copper, Mechanical Properties, Ultra-Fine Grain

## CITATION LINKS

[1] Experimental investigation of the effect... [2] Study of Microstructure and mechanical... [3] Effects of PTCAP as a severe plastic... [4] Evaluation of the effects... [5] Experimental Investigation of the Effects... [6] Severe plastic deformation of metals... [7] Accumulative spin-bonding... [8] Development of a novel severe... [9] Tubular channel angular pressing... [10] Parallel tubular channel angular... [11] Tube cyclic expansion extrusion... [12] Tubular pure copper grain... [13] Fabrication of ultra-fine grained... [14] Hydrostatic tube cyclic expansion... [15] Microstructure and Mechanical Properties... [16] Processing and characterization... [17] Enhanced Hot Tensile Ductility... [18] Producing Thin-Walled Tube... [19] Nanostructured pure copper fabricated... [20] Effect of Deep Cryogenic Treatment... [21] Experimental study... [22] Microstructure and mechanical behavior... [23] Equal-Channel Angular Pressing... [24] Direct influence of recovery behaviour... [25] Microstructure and mechanical properties... [26] Dislocation density of pure copper processed... [27] Nano-grained copper strip produced... [28] Severe mechanical anisotropy of high-strength... [29] Strengthening mechanisms in nanostructured aluminum... [30] High-strength, high-conductivity ultra-fine... [31] A study of the interactive effects of strain... [32] An Investigation of mechanical properties in... [33] Hydrostatic radial forward tube extrusion... [34] Repetitive forging using... [35] High Pressure Torsion Extrusion... [36] Production of nanostructure copper... [37] Mechanical Properties and Microstructure... [38] Twist channel angular pressing... [39] Microstructural evolution... [40] Experimental and numerical analyses ... [41] Hot tensile deformation behavior... [42] Mechanical properties and microstructural ... [43] Hall-Petch relation and boundary ... [44] Effect of stacking fault energy ...

## معرفی یک روش تغییر شکل پلاستیکی شدید جدید با پتانسیل تولید لوله‌های فوق ریزدانه نسبتاً بلند

محمد افتخاری

دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

قادر فرجی\*

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

مصطفی بهرامی

کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

### چکیده

در پژوهش حاضر، روش جدیدی به نام فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، معرفی شده است که با بهره‌گیری از سیال تحت فشار و نیز با نیروی مناسب پرس، علاوه بر این که قابلیت تغییر شکل پلاستیکی شدید و بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات لوله‌ای شکل را دارد بلکه پتانسیل تولید لوله‌هایی با طول نسبتاً بلند را نیز دارا می‌باشد. در این پژوهش، با انجام آزمون‌های تجربی معین، خواص ریزساختاری و خواص مکانیکی لوله‌هایی از جنس مس خالص که مورد انجام فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک واقع شده بودند، مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهدات حاکی از آن بود که این فرآیند با موفقیت بر روی مس خالص انجام گرفت و خواص ریزساختاری و خواص مکانیکی آن، بهبود قابل توجهی پیدا کرد. برای مثال، پس از انجام این فرآیند، استحکام نهایی مس، ۱/۵۷ برابر، استحکام تسلیم، ۱/۸۵ برابر و سختی، ۱/۸۶ برابر شد و نیز افت داکتیلیتی پایینی مشاهده گردید. همچنین، پس از انجام این فرآیند، ساختاری با سلول‌های فوق ریز با اندازه‌ی میانگین در حدود ۹۹۰ نانومتر ایجاد شد. این در حالی بود که میانگین اندازه‌ی دانه برای لوله‌ی فرآیند نشده در حدود ۴۰ میکرومتر بود. روال تشکیل ریزساختار مشاهده شده، عبارت است از: تولید چگالی زیادی از نابه‌جایی‌ها، برخورد نابه-جایی‌ها به هم و تشکیل ساختارهای در هم تنیده شده، آرایش گرفتن نابه-جایی‌ها و تشکیل مرزهای کم-زاویه و سپس تشکیل سلول‌ها به منظور تقلیل انرژی کرنش، ایجاد نابه‌جایی‌های جدید و حرکت آن‌ها به سوی مرزها.

**کلیدواژه‌ها:** تغییر شکل پلاستیکی شدید، لوله، مس خالص، خواص مکانیکی، فوق ریزدانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷

\* نویسنده مسئول: ghfaraji@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید، از جمله روش‌های کارا در تولید مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار هستند که در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها، با ریزدانه کردن ساختار ماده، باعث بهبود چشم‌گیر خواص مکانیکی آن می‌شوند. اساس کار روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید، اعمال کرنش بالا به ماده بدون ایجاد تغییر ابعادی در قطعه‌ی تولید شده است. لذا یک قطعه را می‌توان چندین بار تحت فرآیند قرار داد تا میزان بالایی کرنش پلاستیکی به آن اعمال شود. این فرآیندها با توجه به

شکل محصول نهایی آن (حجیم، ورق و لوله) دسته‌بندی می‌شوند [1-5]. برخی از روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید معروفی که امروزه برای قطعات حجیم و ورق استفاده می‌شوند عبارت‌اند از: فشار در کانال زاویه‌دار مساوی، پیچش فشار بالا، انبساط و روزنرانی متناوب، اکستروژن شدن و فشار متوالی، نورد اتصال جمعی.

در پژوهش حاضر، به تغییر شکل پلاستیکی شدید قطعات لوله‌ای شکل پرداخته شده است. در زمینه‌ی تغییر شکل پلاستیکی شدید لوله‌ها، توت و همکاران [6] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش پیچش لوله در فشار بالا موفق به تولید لوله‌های فوق ریزدانه شدند. محبی و همکاران [7] در سال ۲۰۱۰ فرآیندی به نام چرخش اتصال جمعی برای تولید لوله‌های فوق ریزدانه ارائه دادند. زنگی آبادی و همکاران [8] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش فشار در کانال لوله‌ای که با تغییر زاویه‌ی حرکت لوله در قالب همراه است، لوله‌هایی با خواص مکانیکی بالا تولید کردند. فرجی و همکاران [9] در سال ۲۰۱۱ فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای را معرفی نمودند که در این فرآیند، با استفاده از یک قالب با طراحی ساده و اقتصادی، لوله‌هایی با استحکام بالا قابل تولید است. فرجی و همکاران [10] در سال ۲۰۱۲ فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای به صورت موازی را برای تولید لوله‌های فوق ریزدانه معرفی کردند که در آن، برخی از مشکلات روش قبلی، از جمله نیروی بالای فرآیند، تاحد زیادی مرتفع شده بود. بابایی و همکاران در سال ۲۰۱۴ با معرفی دو روش انبساط و اکستروژن شدن متناوب لوله [11] و تراکم و اکستروژن شدن متناوب لوله [12] توانستند حرکت مهمی در جهت تولید لوله‌هایی با خواص مکانیکی بالا انجام دهند. جعفرزاده و همکاران [13] در سال ۲۰۱۵ با معرفی روش انبساط و انقباض تناوبی، موفق به تولید لوله‌هایی فوق ریزدانه شدند. یکی از محدودیت‌های اصلی فرآیندهای مذکور، عدم قابلیت آن‌ها در تولید لوله‌هایی با طول‌های بلند است که ناشی از وجود اصطکاک زیاد است. در تغییر شکل پلاستیکی شدید لوله‌های بلند، به علت افزایش سطح تماس لوله و قالب و متعاقباً، افزایش نیروی اصطکاک، نیروی لازم برای شکل‌دهی نیز به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد. این مسئله، علاوه بر الزام استفاده از پرس‌های قوی‌تر، باعث افزایش احتمال کمانش و شکست سنبه و نیز افزایش احتمال شکست قطعات قالب ناشی از فشار بالا خواهد شد. همچنین، در مواردی که لازم است فرآیند در دماهای بالا انجام شود (مانند آلیاژهای منیزیم)، افزایش دما باعث افزایش ضریب اصطکاک بین لوله و قالب شده که این مسئله به نوبه‌ی خود، تغییر شکل پلاستیکی شدید لوله‌های با طول بلند را دشوارتر نموده و نیز موجب افزایش بیشتر نیروی پرس خواهد شد. از طرفی، وجود اصطکاک، باعث غیریکنواختی کرنش در سطح قطعه نسبت به مرکز آن شده و نیز صافی سطح قطعه را تضعیف می‌کند. از دیدگاه صنعتی نیز روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدیدی که فقط قابلیت اجرا بر روی لوله‌هایی با

انجام پیوسته‌ی انبساط لوله و نیز افزایش فشار هیدرواستاتیک فرآیند استفاده شده است. همچنین، با توجه به نتایج حاصل و مقایسه آن‌ها با نتایج روش‌های دیگر تغییرشکل پلاستیک شدید لوله‌ها، مشخص می‌شود که فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله می‌تواند به خواص منحصر به فردی منجر شود از جمله این که قطعات تولید شده با این فرآیند، علاوه بر داشتن استحکام و سختی بالا، دارای داکتیلیتی و درصد ازدیاد طول بالایی نیز هستند که از نظر کاربردهای صنعتی، بسیار حائز اهمیت است. در یک نگاه کلی، فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله یک روش تغییرشکل پلاستیک شدید جدید، پیشرفته و مطابق نیاز روز است که پتانسیل‌های تولید لوله‌هایی با طول نسبتاً بلند و خواص منحصر به فرد را دارد. در واقع، این فرآیند با تولید لوله‌هایی بلندتر نسبت به روش‌های سنتی قبلی، می‌تواند پتانسیل‌های صنعتی‌سازی نیز داشته باشد. همچنین در این فرآیند به دلیل وجود فشار هیدرواستاتیک بالاتر نسبت به عموم روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید ابداع شده برای لوله، لوله‌هایی از جنس ترد را راحت‌تر و با کیفیت‌تر می‌توان تولید نمود زیرا فشار هیدرواستاتیک بالا باعث به تاخیر افتادن و جلوگیری از جوانه‌زنی و رشد ترک می‌شود. همچنین تحت تأثیر فشار هیدرواستاتیک بالای این فرآیند، تعداد مراحل بیشتری از فرآیند بر روی ماده قابل انجام است که منجر به بهبود بیشتر ریزساختار و خواص مکانیکی آن خواهد شد. در این مطالعه، به منظور مطالعه‌ی قابلیت‌های فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله در بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی لوله، این فرآیند بر روی لوله‌ای از جنس مس خالص انجام شد. سپس مشخصه‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی قطعات مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در نهایت، نتایج حاصله با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه گردید.

## ۲- مراحل و شرایط انجام آزمون‌های تجربی

در پژوهش حاضر، از لوله‌هایی از جنس مس خالص (با خلوص ۹۹/۹۰ درصد) به عنوان ماده اولیه برای انجام فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله استفاده شد. لوله‌ها ابتدا به طول ۱۰۰ میلی‌متر، قطر بیرونی ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی-متر، توسط ماشینکاری، آماده شدند و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد آنیل گردیدند<sup>[14]</sup>. سپس، فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله طی یک مرحله، در دمای اتاق، بر روی نمونه‌های اولیه انجام شد. در این فرآیند، از روغن هیدرولیک به عنوان سیال و از یک پلیمر مخصوص (PTFE) برای تهیه نشت‌بندها استفاده شد. قطعات اصلی قالب از جنس فولاد گرم کار (H13) ساخته شدند. نیروی پرس لازم برای انجام فرآیند در حدود ۱۵ تَن بود. برای اعمال فشار در پشت قطعه در حین انجام فرآیند، از یک سیستم پاورپک متصل به یک جک

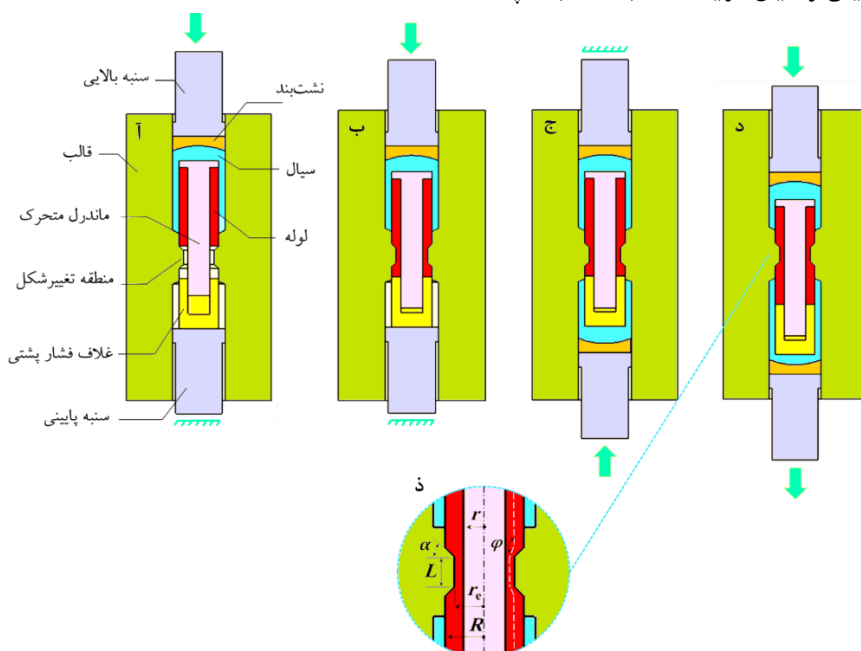
طول کوتاه را دارند برای تولیدات انبوه و پیوسته مناسب نیستند و موجب افزایش زمان و هزینه‌ی تولید لوله‌های فوق ریزدانه می‌شوند. لذا امروزه با توجه به این که تقاضا برای استفاده از لوله‌های با خواص مکانیکی بالا در بخش‌های مختلف صنعت در حال افزایش است، لزوم ابداع روشی که قابلیت تغییر شکل پلاستیک شدید لوله‌های با طول بلند را داشته باشد، بیش از پیش احساس می‌شود. چنین روشی از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه بوده و برای تولید در مقیاس انبوه مناسب خواهد بود. در این رابطه، مهم‌ترین، بهترین و مؤثرترین تدبیری که می‌توان اتخاذ نمود تقلیل یا حذف اثر نیروی اصطکاک در این فرآیندها است. اخیراً، فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید جدیدی به نام فرآیند انبساط و اکستروژن تناوبی هیدرواستاتیک لوله (HTCEE) توسط سوارآبادی و همکاران<sup>[14, 15]</sup> معرفی گردیده است که در این فرآیند، با بهره‌گیری از سیال تحت فشار، اصطکاک بین قطعه و قالب حذف گردیده است. این مسئله باعث کاهش نیروی شکل‌دهی شده و امکان تولید لوله‌های بلندتر را تسهیل می‌کند. این فرآیند در برابر روش پیشنهادی در پژوهش حاضر دارای چند محدودیت مهم است: اولاً، این فرآیند به دلیل عدم اعمال فشار پشتی بر روی قطعه در جریان فرآیند، فشار هیدرواستاتیک پایینی نسبت به روش پیشنهادی در پژوهش حاضر دارد. همچنین، در برخی از مراحل این فرآیند، تنش‌های کششی به لوله وارد می‌شود که وجود این تنش‌ها می‌تواند باعث محدودتر شدن تعداد مراحل قابل انجام بر روی لوله شود. زیرا تنش‌های کششی در بروز جوانه‌زنی و رشد ترک مؤثر هستند. ثانیاً، در این فرآیند با انتخاب نامناسب پارامترهایی چون ضریب اصطکاک، جنس لوله و مخصوصاً ابعاد هندسی ناحیه‌ی انبساط قالب (شامل شعاع گوشه‌ها، زوایای ورودی و خروجی، قطر انبساط و طول انبساط)، احتمال تهی یا نیمه‌تهی شدن بخش انبساطی لوله در حین انجام فرآیند، وجود دارد که باعث می‌شود فرآیند با موفقیت انجام نشود. ثالثاً، در حین انجام این فرآیند بر روی برخی از جنس‌های ترد، احتمال شکست قطعه وجود دارد. به این صورت که پس از انجام کامل مرحله‌ی انبساط و در مراحل آغازین مرحله‌ی انقباض، گاهاً خود قطعه، ماده‌ی منبسط شده در ناحیه‌ی انبساط را سوراخ کرده و از داخل آن عبور می‌نماید یا اینکه بعضاً ترک‌هایی داخل و روی لوله ایجاد می‌شود.

نوآوری اصلی پژوهش حاضر، معرفی یک فرآیند جدید تغییرشکل پلاستیک شدید، به نام فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک، برای لوله‌هاست که در آن سعی شده است تا مشکلات و محدودیت‌های روش‌های پیشین مرتفع شود. همچنین، این فرآیند، پتانسیل بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی لوله‌های نسبتاً بلند را دارا است. در این فرآیند، از سیال تحت فشار به منظور حذف اثر نیروی اصطکاک، از ماندل متحرک در داخل لوله به منظور کاهش فشار و از اعمال فشار پشتی مدام به قطعه برای

در کانال ورودی تعبیه شد، استفاده می‌شود. در این حالت، با اعمال فشار بر روی سنبه‌ی پایینی، سیال موجود در کانال خروجی، تحت فشار قرار می‌گیرد و آماده‌ی انتقال فشار پشتی به قطعه اعمال می‌شود. فشار پشتی توسط یک جک هیدرولیک دیگر تامین می‌شود.

در مرحله‌ی چهارم، بنا به شکل ۱-د، مجموعه‌ی شامل لوله، ماندرل متحرک و غلاف، با هم و توسط جک ماشین پرس و جک هیدرولیک دوم حرکت داده می‌شوند. در این حالت، سیال و غلاف با اعمال فشار پشتی به لوله باعث انبساط پیوسته‌ی ماده‌ای که پس از گذر از قسمت گلوبی قالب، پیوسته در حال اکسترود شدن است، می‌شود تا در نهایت لوله در کانال خروجی به همان قطر و ضخامت اولیه‌ی خود برسد. در نهایت، لوله‌ای با همان ابعاد اولیه‌ی قبل از فرآیند، تولید می‌شود. پس از اتمام مرحله‌ی چهارم، یک مرحله از فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید اکسترود شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک بر روی لوله انجام شده است. به منظور انجام مراحل بعدی فرآیند که با هدف اعمال کرنش‌های پلاستیک بیشتر بر روی لوله و افزایش بیشتر خواص مکانیکی لوله صورت می‌گیرد، تنها کافی است بدون خارج کردن لوله از قالب، فقط جهت حرکت سنبه‌های پایین و بالا معکوس شود و این بار، سنبه‌ای که در سمت مقابل قرار دارد نقش اعمال گر فشار پشتی را برعهده گیرد. شکل ۲، تصویر قطعات قالب و شکل ۳، تصویر لوله بعد از انجام فرآیند نشان داده شده است. با در نظر گرفتن تغییر شکل یکنواخت، کرنش معادل ناشی از فقط یک بار منبسط یا اکسترود شدن ماده، از معادله (۱) بدست می‌آید<sup>[11]</sup>:

دو طرفه استفاده شد. برای اعمال حرکت اصلی (حرکت رفت) از یک ماشین پرس با توان اسمی ۱۰۰ تن استفاده شد. در شکل ۱، نمای شماتیک فرآیند اکسترود شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله به همراه مراحل کاری آن، نشان داده شده است. روال انجام فرآیند چنین است که نخست، بنا به شکل ۱-الف، لوله روی یک ماندرل متحرک سوار شده و در داخل قالب قرار داده می‌شود. پس فضای بین لوله و قالب با سیال پر می‌شود. در فرآیند اکسترود شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، همین سیال است که پس از قرارگیری تحت فشار خارجی، نیروی شکل‌دهی لوله را تامین می‌کند و از تماس فیزیکی لوله و قالب جلوگیری می‌کند. به منظور جلوگیری از نشت سیال از کناره‌های سنبه، از یک نشت‌بند در فضای بین سیال و سنبه استفاده می‌شود. همچنین، به منظور هدایت ماندرل و نیز تامین فشار لازم برای انبساط لوله‌ی اکسترود شده در مرحله‌ی بعد، از یک غلاف در کانال خروجی استفاده می‌شود. در مرحله‌ی دوم، بنا به شکل ۱-ب، سنبه بالایی، در حالتی که غلاف در مکان خود توسط سنبه پایینی ثابت نگه داشته شده است، به مقدار معینی توسط جک ماشین پرس، پایین آورده می‌شود که در نتیجه‌ی این حرکت، لوله پس از گذر از قسمت گلوبی، اکسترود شده و دچار کاهش ضخامت و کاهش قطر خارجی می‌شود و سپس در ادامه، پس از برخورد به غلاف، منبسط می‌گردد. به محض اینکه لوله به صورت کامل، در کانال خروجی، منبسط شد و فضای انبساطی واقع در کانال خروجی قالب را پر نمود، مرحله‌ی بعد آغاز می‌شود. در مرحله‌ی سوم، بنا به شکل ۱-ج، فضای بین لوله و قالب با سیال پر می‌شود و به منظور جلوگیری از نشت سیال از کناره‌های سنبه‌ی پایینی، در فضای بین سنبه‌ی پایینی و سیال، از یک نشت‌بند مشابه آنچه که



شکل ۱) قالب و مراحل اجرای فرآیند اکسترود شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله



شکل ۳) تصویر لوله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک شده

جوانه‌زنی و رشد ترک می‌شود که خود دو مزیت مهم دارد: اولاً، تعداد مراحل بیش‌تری از فرآیند و در نتیجه، کرنش بیش‌تری می‌توان به قطعه، بدون ایجاد ترک در قطعه، اعمال نمود. ثانیاً موجب تسهیل تغییر شکل پلاستیک شدید قطعات ترد می‌شود.

با هدف بررسی خواص کششی قطعات، آزمون کشش در دمای محیط و با نرخ متوسط کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش در راستای طولی (موازی محور لوله)، با استفاده از برش وایر-کات استخراج گردیدند. این نمونه‌ها با ابعاد طول گیج ۶ میلی‌متر، عرض گیج ۳ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر تهیه شدند. به منظور مطالعه‌ی تاثیر فرآیند بر مقدار سختی قطعات، از آزمون میکروسختی‌سنجی ویکرز استفاده شد. برای انجام آزمون، نمونه‌های مناسب از لوله‌ها در راستای ضخامت (راستای عمود بر محور لوله) مقطع زده شده و استخراج شد. بعد از آماده سازی سطح نمونه‌ها، فرآیند مانت و سپس عملیات سنباده‌زنی انجام گردید. در نهایت، آزمون توسط دستگاه میکروسختی‌سنجی ویکرز مدل ولپرت (Wolpert machine) انجام گرفت. در این آزمون، میزان بار اعمالی ۱۰۰ گرم و زمان توقف سنجه بر روی قطعه ۱۰ ثانیه بود. سختی در ۶ نقطه در طول ضخامت لوله اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری استفاده شد، نمونه‌ها در جهت محور اصلی لوله و عمود بر جهت آن (راستای ضخامت) مقطع زده شدند.

عملیات سنباده زنی با استفاده از کاغذهای سیلیم کاربرد تا شماره ۵۰۰۰ انجام شد. نمونه‌ها پس از پولیش مکانیکی با استفاده از محلول مناسب، حکاکی شدند. ترکیب شیمیایی محلول حکاکی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب، ۱۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید و ۲/۵ گرم کلرید آهن بود. البته تازه بودن محلول، تاثیر قابل توجهی بر کیفیت ریزساختار مشاهده شده دارد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات ریزساختاری ناشی از انجام فرآیند، از تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری یا تی‌ای‌ام استفاده شد. در این راستا، نمونه‌های دیسک-شکل کوچک از نواحی نزدیک به قطر بیرونی لوله با استفاده از روش پانچ کردن، استخراج شد. سپس،



شکل ۴) اجزای قالب فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله

همچنین، کرنش معادلی که حاصل از یک بار تغییر زاویه‌ی حرکت ماده در کانال می‌باشد از معادله‌ی (۲) بدست می‌آید [11]. در فرمول (۲)،  $\varphi$  بیانگر زاویه کانال و  $\psi$  بیانگر زاویه گوشه است که در این پژوهش، مقدار زاویه گوشه صفر در نظر گرفته می‌شود.

فرمول کرنش معادل فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله حاصل جمع مولفه‌های کرنش ناشی از چهار بار تغییر زاویه‌ی ماده در حین حرکت در کانال و نیز ناشی از دو مرحله‌ی اکستروژن و انبساط ماده است. کرنش معادل فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله از معادله‌ی (۳) قابل محاسبه است. در این معادله،  $N$  نشان‌دهنده‌ی تعداد مراحل انجام فرآیند است. بنا به شکل ۱-۳، مقدار پارامترهای قالب،  $r$ ،  $R$ ،  $\alpha$ ،  $L$ ،  $re$  و  $\phi$  به‌ترتیب برابر با ۱۰ میلی‌متر، ۷/۵ میلی‌متر، ۹ میلی‌متر، ۷ میلی‌متر، ۴۵ درجه و ۱۵۵ درجه است. با لحاظ کردن اندازه‌ی پارامترهای قالب در معادله‌ی (۳)، مقدار کرنش معادل، پس از یک و دو مرحله از فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، به‌ترتیب حدوداً برابر با مقادیر ۲/۱۵ و ۴/۳ بدست می‌آید.

در فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، به دلیل استفاده از سیال تحت فشار بین قطعه و قالب، اصطکاک بین قطعه و قالب در مناطق تحت تماس با سیال، تقریباً حذف گردیده است. لذا نیروی لازم برای انجام فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله در مقایسه با روش‌های سنتی و اصطکاک، به طرز قابل توجهی پایین است. این مسئله موجب شده است که نیروی فرآیند تقریباً مستقل از طول لوله باشد و در نتیجه، تولید لوله‌هایی با طول بلند در این فرآیند به آسانی انجام شود. همچنین، در این فرآیند، به دلیل اعمال فشار پستی به قطعه توسط جک هیدرولیک، مقادیر بالایی از تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری بر قطعه اعمال می‌شود که موجب جلوگیری و تاخیر در

$$\varepsilon_1 = \ln \left( \frac{A}{A_0} \right) = \ln \left( \frac{R^2 - r^2}{r_e^2 - r^2} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \cot \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \csc \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \left( \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

$$\varepsilon_T = 2N \times \ln \left( \frac{R^2 - r^2}{r_e^2 - r^2} \right) + 4N \times \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \left( \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

مشاهده شده است [3-15]. در فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، کرنش‌های برشی، نقش کلیدی در ریزدانه کردن ساختار دارند [12, 15]. در حین فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، زمانی که لوله از منطقه‌ی تغییرشکل عبور می‌کند، تحت کرنش‌های برشی واقع گردیده و چگالی نابه‌جایی‌های آن افزایش می‌یابد. همچنین در اثر این عبور، دانه‌های بزرگ اولیه ریز شده و دانه‌های کوچکتر بوجود می‌آیند.

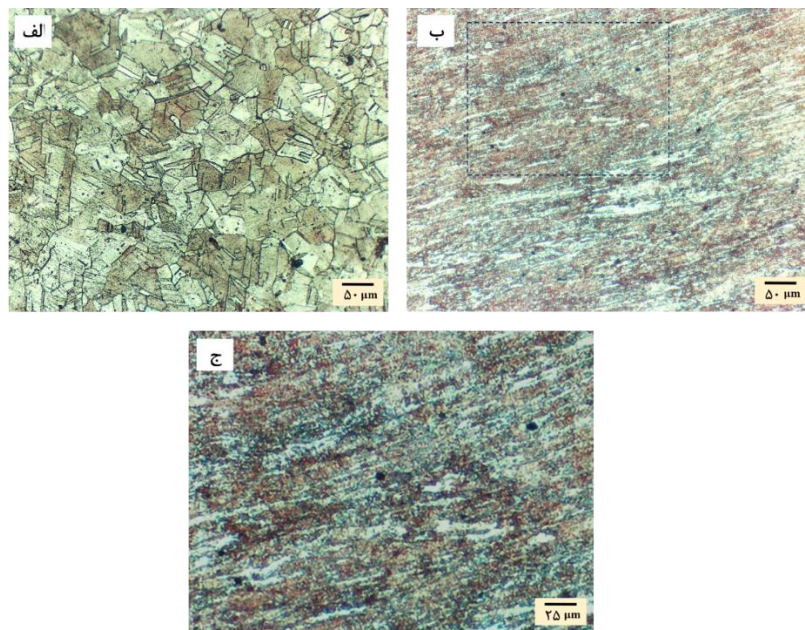
با توجه به شکل ۴، یک ریزساختار فوق ریزدانه در نمونه‌ی فرآیند شده، با میکروسکوپ نوری مشاهده شد. در این بخش، بررسی‌های دقیق‌تر و با جزئیات بیشتری بر روی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ تی‌ای‌ام انجام شده است. شکل ۵، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (تی‌ای‌ام)، در مقطع موازی ضخامت لوله (جهت عمود بر محور لوله)، از ریزساختار لوله‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده را در دو منطقه از سطح قطعه نشان می‌دهد. تصویر ۵-ب، مربوط به منطقه‌ی نزدیک‌تر به سطح خارجی لوله است. بنا به شکل ۵-الف، سلول‌های فوق ریز به اندازه‌ی میانگین حدوداً ۹۹۳ نانومتر، که توسط شبکه‌ی شلوغی از نابه‌جایی‌های در هم تنیده شده (Tangled dislocations) احاطه شده‌اند، ایجاد شده است. به عبارت دیگر، در جریان تغییرشکل، تجمع تعداد زیادی از نابه‌جایی‌ها در دیواره‌ی سلول‌ها باعث تشکیل دیواره‌های سلولی (با چگالی بالای نابه‌جایی) با ضخامت معین می‌شود. با اعمال کرنش‌های کم در مراحل آغازین فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، نابه‌جایی‌های در هم تنیده شده تشکیل می‌شوند. سپس با افزایش مقدار کرنش در جریان ادامه‌ی

به منظور بررسی‌های ریزساختار به کمک میکروسکوپ تی‌ای‌ام، نمونه‌ها با استفاده از محلول ترکیبی با ۲۵٪ فسفریک اسید، ۲۵٪ اتانول و ۵۰٪ آب، الکترو-پولیش شدند. درنهایت، تصاویر ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ تی‌ای‌ام مدل تکنای (FEI Tecnai) و با ولتاژ ۲۰۰ کیلوولت گرفته شد.

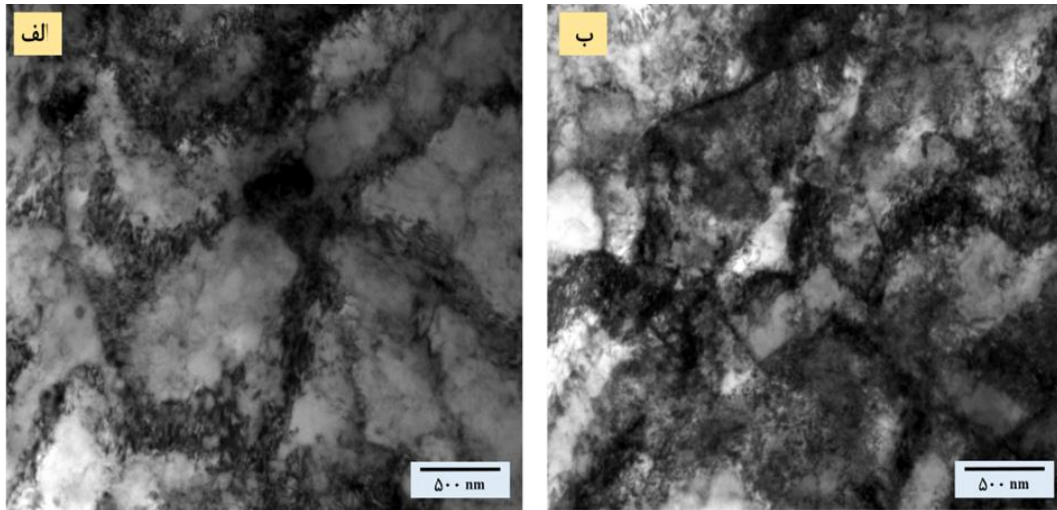
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ نتایج بررسی ریزساختار

شکل ۴، نتایج بررسی‌های میکروسکوپ نوری، در مقطع موازی ضخامت لوله (جهت عمود بر محور لوله)، برای لوله‌ی آنیل فرآیند نشده و لوله‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، مشهود است. شکل ۴-ج، تصویری با بزرگ‌نمایی بالا از منطقه‌ی مشخص شده در شکل ۴-ب است. بنا به شکل ۴-الف، ریزساختار نمونه‌ی آنیل فرآیند نشده شامل دانه‌های درشت با میانگین اندازه دانه‌ی ۴۱ میکرومتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴-ج مشاهده می‌شود، پس از انجام اولین مرحله از فرآیند، اندازه‌ی دانه، شدیداً کاهش یافته و ریزساختار فوق ریزدانه‌ای شکل گرفته است. در این شکل، دانه‌هایی با اندازه‌ی بسیار ریز تا دانه‌هایی با اندازه‌ی مقداری بزرگ‌تر که شکل کشیده شده‌ای (ناشی از کرنش اعمالی) دارند، قابل مشاهده هستند. مشابه این تصاویر میکروسکوپ نوری، در مطالعات دیگران [12, 14, 15] نیز مشاهده شده‌اند. کاهش اندازه‌ی دانه پس از انجام فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، در تحقیقات بسیاری از جمله [15-17] گزارش شده است. انجام مراحل بیشتر فرآیند می‌تواند به ریزساختار فوق ریزدانه‌تر، همگن‌تر و هم‌محورتری منجر شود. چنین اتفاقی در بسیاری از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید



شکل ۴) تصاویر میکروسکوپ نوری برای الف) لوله‌ی آنیل فرآیند نشده، ب) لوله‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده و ج) تصویر با بزرگ‌نمایی بالا از منطقه‌ی مشخص شده در شکل ب



شکل ۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (تی‌ای‌ام)، از ریزساختار لوله‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، در دو منطقه‌ی مختلف از سطح قطعه. تصویر (ب) مربوط بخش نزدیک‌تر به سطح خارجی لوله است.

می‌کنند که در نهایت منجر به تشکیل سلول‌های ناهه‌جایی می‌شود. در این جریان، دو نوع ناحیه با چگالی ناهه‌جایی کم (در داخل سلول) و زیاد (در نواحی مرزی سلول) در ساختار دیده می‌شود. با ادامه‌ی تغییرشکل در جریان انجام فرآیند، شمار زیادی از ناهه‌جایی‌ها در دیواره‌ی سلول‌ها تجمع می‌یابند که در نهایت موجب تبدیل تدریجی این دیواره‌ها به مرزهای زاویه‌ی کم (LABs) و تشکیل زبردانه‌ها می‌شوند. در این شرایط، با ادامه‌ی تغییرشکل، تعداد زبردانه‌ها افزایش می‌یابد. زمانی که ماده از نواحی برشی قالب عبور می‌کند و تحت تنش‌ها و کرنش‌های برشی قرار می‌گیرد، چرخش نسبی زبردانه‌ها نسبت به هم اتفاق می‌افتد. در مطالعات انجام شده گزارش شده است که این روال و نیز ادامه‌ی تغییرشکل می‌تواند با چرخش نسبی زبردانه‌ها و افزایش زاویه‌ی ناهم‌جهتی بین آن‌ها باعث تبدیل برخی از مرزهای زاویه‌ی کم به مرزهای زاویه‌ی بالا و گسترش ساختار فوق ریزدانه شود [12, 15, 25]. مشاهده شده است که با اعمال مراحل بیشتر فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، میزان درصد مرزدانه‌های زاویه‌ی بالا در ساختار افزایش می‌یابد. این به‌خاطر افزایش ناهم‌جهتی و افزایش چرخش زبردانه‌ها تحت تاثیر تجمع کرنش است [12, 26].

### ۳-۲- خواص مکانیکی بدست آمده از آزمون کشش و میکروسختی-سنجی

شکل ۶، نتایج آزمون کشش برای نمونه‌ی آنیل فرآیند نشده و نمونه‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، نشان داده شده است. بنا به شکل ۶، پس از انجام فرآیند، استحکام ماده افزایش می‌یابد. این مسئله، اتفاق رایجی است که در دیگر روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید نیز مشاهده می‌شود [15-17, 27]. مطابق شکل ۶، پس از یک مرحله فرآیند، مقدار استحکام تسلیم از ۱۵۴ مگاپاسکال به ۲۸۴ مگاپاسکال و مقدار استحکام نهایی از ۲۲۳ مگاپاسکال به ۳۵۰

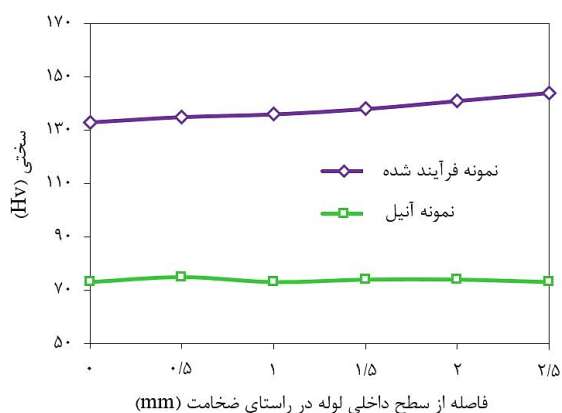
انجام مرحله اول فرآیند، شمار زیادی از ناهه‌جایی‌ها، مرزها و دیواره‌های سلول‌ها و زبردانه‌ها (Subgrains) را ایجاد می‌کنند. چنین ریزساختاری در تحقیقات دیگران [18-21] نیز مشاهده شده است. همچنین، در ریزساختار نمونه‌ی فرآیند شده مشاهده می‌شود که برخلاف مرز سلول‌ها، تعداد ناهه‌جایی کمتری در داخل سلول‌ها وجود دارد. مشاهده شده است که با افزایش تعداد مراحل فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید و متعاقباً با اعمال کرنش بیشتر به ماده، چگالی ناهه‌جایی‌ها در داخل سلول‌ها کاهش می‌یابد. این اتفاق در تحقیقات دیگران نیز گزارش شده است. این پدیده می‌تواند ناشی از بازیابی دینامیکی (Dynamic recovery) که متفاوت از بازیابی حرارتی است، باشد که موجب برقراری تعادل بین تولید و از بین رفتن ناهه‌جایی‌ها، و نیز بین ساطع کردن (Emission) و جذب (Absorption) ناهه‌جایی‌ها از داخل سلول‌ها/زبردانه‌ها به مرز آن‌ها باشد. در نهایت، این فرآیند بازیابی که شامل تولید ناهه‌جایی در داخل سلول‌ها و جذب آن‌ها در مرزها است، می‌تواند به افزایش ناهم‌جهتی (Misorientation) مرزها و تشکیل دانه‌ها منجر شود [22-24]. در تصویر ۵-ج که مربوط به منطقه‌ی نزدیک‌تری به سطح خارجی لوله است، عموماً، شبکه‌ی شلوغ‌تری از ناهه‌جایی‌های در هم تنیده شده در ریزساختار و داخل سلول‌ها مشاهده می‌شود. از آن‌جا که این ناحیه، در حین فرآیند، کرنش بیشتری نسبت به مناطق داخلی‌تر تجربه کرده است لذا چگالی زیادی از ناهه‌جایی‌ها در آن ایجاد شده است. در شکل ۵-ج، علاوه بر مشاهدات مذکور، مرز دانه‌ها هم بیشتر نمایان است. همچنین، تجمع تعداد زیادی ناهه‌جایی در اطراف مرز دانه‌ها قابل مشاهده است.

در حین انجام گام‌های نخستین فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید، چگالی ناهه‌جایی‌ها در ساختار افزایش می‌یابد. سپس ناهه‌جایی‌ها شروع به برخورد با هم و در هم تنیده شدن می‌کنند و سپس به‌منظور کاهش انرژی، آرایش‌های نسبتاً منظمی را ایجاد

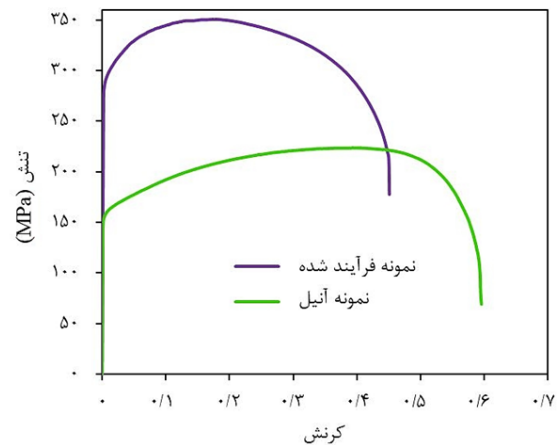
تغییر شکل پلاستیک شدید است که در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است.

در حین انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، جذب شدن نابه‌جایی‌ها به سمت مرز دانه‌ها، عمدتاً یک فرآیند بازیابی موثر است که باعث بروز کرنش سختی کمتری می‌شود [32]. این کرنش-سختی محدود مواد فوق‌ریزدانه منجر به داکتیلیتی کم و شروع زودهنگام گلوپی در مقایسه با ماده‌ی درشت‌دانه‌ی اولیه می‌شود [24]. در جدول ۱، درصد ازدیاد طول، استحکام و سختی نمونه‌ی فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده با نتایج فرآیندهای دیگر انجام شده بر روی مس خالص، مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در مقایسه با فرآیندهای دیگر، نمونه‌ی حاصل از پژوهش حاضر، دارای بیشترین درصد ازدیاد طول است. همچنین مشاهده می‌شود که استحکام نهایی نمونه‌ی فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده به-طرز قابل توجهی بالا است. لذا، این فرآیند پتانسیل تولید لوله‌هایی با استحکام بالا (۳۵۰ مگاپاسکال) و داکتیلیتی خوب (۴۵ درصد) را دارد. این ویژگی می‌تواند یکی از مزایای مهم فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله محسوب شود زیرا دستیابی به ترکیبی از استحکام بالا و داکتیلیتی بالا، امروزه یکی از چالش‌های مهم و ضروری برای کاربردهای صنعتی و نظامی فلزات و آلیاژها می‌باشد. این ویژگی فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، عمدتاً به تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری بالای موجود در این فرآیند، مربوط است. تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری می‌توانند جوانه‌زنی ترک را به تاخیر بیاورند؛ همچنین، با بستن ترک‌ها و سایر عیوب موجود، می‌توانند از رشد و گسترش ترک‌ها جلوگیری کنند [33]. این مسئله می‌تواند منجر به بروز داکتیلیتی و شکل‌پذیری خوب و استحکام بالاتر در مواد شود.

شکل ۷، نتایج آزمون سختی سنجی در دمای اتاق، شامل تغییرات میکروسختی در امتداد ضخامت، برای نمونه آنیل فرآیند نشده



شکل ۷) نمودار تغییرات سختی در امتداد ضخامت برای نمونه‌ی آنیل فرآیند نشده و نمونه‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده



شکل ۶) نمودار تنش مهندسی-کرنش مهندسی حاصل از آزمون کشش برای نمونه‌ی آنیل فرآیند نشده و نمونه‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده

مگاپاسکال افزایش می‌یابد. افزایش استحکام مس خالص پس از انجام فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، عمدتاً به استحکام-بخشی مرزدانه‌ای (Grain boundary strengthening) و استحکام-بخشی نابه‌جایی (Dislocation strengthening) مربوط است [19]. [26]. در استحکام بخشی مرزدانه‌ای، مرز دانه‌ها، مشابه آن‌چه که در تصاویر تی‌ای‌ام مشاهده شد، همانند یک سد در برابر حرکت نابه‌جایی‌ها عمل کرده و تحرک آن‌ها را محدود می‌کند. این مسئله باعث افزایش استحکام ماده می‌شود.

فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید که فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله نیز جزو آن‌هاست، با کاهش اندازه‌ی دانه‌ها/زیردانه‌ها و به تبع آن، با افزایش مرزهای دانه‌ها/زیردانه‌ها، باعث افزایش استحکام بخشی مرزدانه‌ای می‌شوند. همچنین، رابطه‌ی هال-پچ (Hall-Petch relationship) موید آن است که با کاهش اندازه‌ی دانه‌ها، استحکام افزایش می‌یابد [28]. [29]. استحکام بخشی نابه‌جایی یا استحکام بخشی کرنشی که ناشی از به‌وجود آمدن چگالی زیادی از نابه‌جایی‌هاست، علت دیگر افزایش استحکام در فلزات تغییر شکل پلاستیک شدید شده است. بنا به تصاویر تی‌ای‌ام که در بخش نتایج ریزساختاری آورده شد، نابه‌جایی‌های با هم برخورد کرده و در هم تنیده شده و نیز سلول-های نابه‌جایی، نقش عمده را در افزایش استحکام نمونه‌ی فرآیند شده، دارند. همچنین، گزارش شده است که در مراحل آغازین فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، نقش استحکام بخشی نابه‌جایی در افزایش استحکام، برجسته‌تر از نقش استحکام بخشی مرزدانه‌هاست. با این وجود، در تعداد مراحل بالا، استحکام بخشی مرزدانه‌ای و ریزدانه شدن، نقش اصلی را در افزایش استحکام ایفا می‌کند [30, 31]. مطابق شکل ۶، نمونه‌ی فرآیند شده، کرنش سختی (Strain hardening) کمتری نسبت به نمونه‌ی آنیل فرآیند نشده، تجربه کرده است. این رفتار، یک اتفاق رایج در فرآیندهای



فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده با نتایج فرآیندهای دیگر انجام شده بر روی مس خالص مقایسه شده است. همان‌طور که مشهود است، در مقایسه با فرآیندهای دیگر، نمونه‌ی فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، سختی بالای قابل توجهی دارد. این مسئله نیز می‌تواند مزیت دیگر این فرآیند باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به معرفی فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله و بررسی تاثیر آن بر ریزساختار و خواص مکانیکی مس خالص پرداخته است. برخی از مهم‌ترین نتایج به-دست آمده شامل موارد زیر است:

۱- فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله روشی مناسب برای تولید لوله‌های فوق ریزدانه می‌باشد. همچنین، این فرآیند، پتانسیل‌های لازم برای تولید لوله‌هایی با طول نسبتاً بلند را دارا می‌باشد.

۲- از آنجایی که در این فرآیند، از سیال تحت فشار بین لوله و قالب استفاده شده است لذا تقریباً هیچ اصطکاکی در این مناطق وجود ندارد. این ویژگی باعث شده است که نیروی لازم برای شکل-دهی در این فرآیند، در مقایسه با روش‌های رایج تغییرشکل پلاستیک شدید و نیز در مقایسه با روش‌های بدون استفاده از سیال، به مقدار قابل ملاحظه‌ی پایین‌تر باشد. به بیان دیگر، در این فرآیند، نیروی لازم برای شکل‌دهی تقریباً مستقل از طول نمونه است. لذا در این فرآیند، تولید لوله‌های بلندتر راحت‌تر قابل انجام است.

۳- پس از انجام فرآیند، ریزدانه‌ی قابل توجهی رخ داده است. بنا به مشاهدات میکروسکوپ‌های نوری و تی‌ای‌ام، یک ساختار فوق ریزدانه شامل سلول‌های فوق ریز با اندازه‌ی میانگین در حدود ۹۹۰ نانومتر تشکیل شده است. این در حالی است که میانگین اندازه دانه‌ی برای قطعه‌ی آنیل فرآیند نشده در حدود ۴۰ میکرومتر است.

و نمونه‌ی یک مرحله فرآیند اکستروژن شدن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، نشان داده شده است. بنا به شکل ۷، پس از انجام فرآیند، سختی ماده به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. چنین رفتاری در فرآیندهای دیگر تغییرشکل پلاستیک شدید [15-17, 41] نیز مشاهده شده است. این افزایش سختی به افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها، تشکیل زیردانه‌ها، ریزدانه شدن ساختار، افزایش میزان مرزها، کارسختی و تبلور مجدد دینامیکی، در حین انجام تغییرشکل پلاستیک شدید مربوط است [12, 15, 42]. همچنین، بنا به رابطه‌ی هال-پچ برای سختی، با کاهش اندازه‌ی دانه، مقدار سختی افزایش می‌یابد [43]. در شکل ۷، پس از یک مرحله فرآیند، مقدار میانگین سختی از ۷۴ ویکرز به ۱۳۸ ویکرز رسیده است. افزایش ناگهانی سختی بلافاصله پس از انجام فرآیند، به سرعت بالای کرنش سختی یا سختی ناشی از نابه‌جایی‌ها مربوط است. در این حالت، چگالی زیادی از نابه‌جایی‌ها به سرعت تولید می‌شود [15, 39]. مطابق شکل ۷، یک مرحله فرآیند، موجب توزیع غیریکنواخت سختی در امتداد ضخامت لوله (از سطح داخلی تا سطح خارجی لوله) می‌شود. به این صورت که نواحی نزدیک به سطح خارجی لوله که در حین فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید، کرنش بالاتری را تجربه کرده‌اند، سختی بیشتری هم دارند. نوسانات مشاهده شده در نمودارهای توزیع سختی در راستای ضخامت، می‌تواند مربوط به مناطق دارای دانه‌های درشت‌تر (که سختی کمتری دارند) یا مناطق دارای چگالی کمتر نابه‌جایی باشد. گزارش شده است که با افزایش تعداد مراحل فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید، مقدار سختی، تمایل به رسیدن به یک حالت اشباع را دارد؛ به طوری که با افزایش تعداد مراحل مقدار افزایش سختی نسبت به مرحله قبلی، کاهش می‌یابد [12, 15-17]. این پدیده عمدتاً به چگالی در حالت تعادل نابه‌جایی‌ها مربوط است که نتیجه‌ی برقراری تعادل بین تولید نابه‌جایی (ناشی از کرنش اعمالی) و از بین رفتن نابه‌جایی‌ها (ناشی از فرآیند بازیابی دینامیکی) می‌باشد [30, 44]. در جدول ۱، مقدار سختی نمونه‌ی

**جدول ۱) مقایسه استحکام کششی نهایی، درصد ازدیاد طول و سختی نمونه‌ی فرآیند شده در پژوهش حاضر، با خواص بدست آمده از مطالعات پیشین بر روی مس خالص.**

شماره	فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول (درصد)	سختی (ویکرز)	مرجع
۱	مرحله فرآیند حاضر	۳۵۰	۴۵	۱۳۸	پژوهش حاضر
۲	مرحله ۱ HTCEE	۳۴۵	۴۱	۱۳۳	[15]
۳	مرحله ۱ RF	۲۹۵	۱۸	۷۰	[34]
۴	مرحله ۱ HPTE	-	-	۱۲۱	[35]
۵	مرحله ۱ PTCAE	۴۳۰	۳۷	-	[36]
۶	مرحله ۱ ECAP	۳۱۴	۹/۵	-	[37]
۷	مرحله ۱ ECAP	-	-	۱۱۵	[23]
۸	مرحله ۱ TCEC	۲۷۳	۱۸	۸۰	[12]
۹	مرحله ۱ Twist CAP	۳۱۸	۲۸	۱۰۵	[38]
۱۰	مرحله ۱ ARB	۳۵۷	۲/۵	۱۱۲	[39]
۱۲	مرحله ۱ ECFE	۲۴۵	۱۵	۱۰۹	[40]

- in extrusion process of ECAPed nanostructured Titanium. *Modares Mechanical Engineering*. 2017; 17(4):52-60.
- 2- Nikbakht S, Eftekhari M, Faraji G. Study of Microstructure and mechanical properties of pure commercial titanium via combination of Equal channel angular pressing and Extrusion. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(1):453-61.
- 3- Fata A, Eftekhari M, Mosavi M. Effects of PTCAP as a severe plastic deformation method on the mechanical and microstructural properties of AZ31 magnesium alloy. *Modares Mechanical Engineering*. 2018; 17(12):409-16.
- 4- Eftekhari M, Fata A, Mosavi M. Evaluation of the effects of a combined severe plastic deformation method on the hot deformation behavior of Mg-3Al-1Zn magnesium alloy. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(5):100-7.
- 5- Motallebi Savarabadi M, Faraji G, Eftekhari M. Experimental Investigation of the Effects of Two-Pass Hydrostatic Cyclic Expansion Extrusion Process on the Mechanical Properties and Microstructure of Pure Copper Tubes. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 ;20(4):933-41.
- 6- Tóth LS, Arzaghi M, Fundenberger JJ, Beausir B, Bouaziz O, Arruffat-Massion R. Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting. *Scripta Materialia*. 2009;60(3):175-7.
- 7- Mohebbi MS, Akbarzadeh A. Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;528(1):180-8.
- 8- Zangiabadi A, Kazeminezhad M. Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP). *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(15):5066-72.
- 9- Faraji G, Mashhadi MM, Kim HS. Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*. 2011;65(19-20):3009-12.
- 10- Faraji G, Babaei A, Mashhadi MM, Abrinia K. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*. 2012;77:82-5.
- 11- Babaei A, Mashhadi MM, Jafarzadeh H. Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Journal of Materials Science*. 2014;49(8):3158-65.
- 12- Babaei A, Mashhadi MM. Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2014; 24(6):623-30.
- 13- Jafarzadeh H, Abrinia K. Fabrication of ultra-fine grained aluminium tubes by RTES technique. *Materials Characterization*. 2015;102:1-8.
- 14- Savarabadi MM, Faraji G, Zalnezhad E. Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;785:163-8.

۴- روال ریز شدن ساختار ماده، بنا به مشاهدات میکروسکوپی و نیز بررسی مطالعات دیگران، به ترتیب عبارت است از: تولید چگالی زیادی از نابه‌جایی‌ها در گام‌های نخستین فرآیند، برخورد نابه‌جایی‌ها به هم و تشکیل ساختارهای در هم تنیده شده، آرایش گرفتن نابه‌جایی‌ها و تشکیل مرزهای کم-زاویه و سپس تشکیل سلول‌ها به منظور تقلیل انرژی کرنش، ایجاد نابه‌جایی‌های جدید و حرکت آن‌ها به سوی مرزها. در مطالعات انجام شده گزارش شده است که این روال و نیز ادامه‌ی تغییرشکل می‌تواند با چرخش نسبی زیردانه‌ها و افزایش زاویه‌ی ناهم‌جهتی بین آن‌ها باعث تبدیل برخی از مرزهای زاویه‌ی کم به مرزهای زاویه‌ی بالا و گسترش ساختار فوق ریزدانه شود.

۵- پس از انجام فرآیند، مقدار استحکام تسلیم از ۱۵۴ مگاپاسکال به ۲۸۴ مگاپاسکال و مقدار استحکام نهایی از ۲۲۳ مگاپاسکال به ۳۵۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین، در مقایسه با فرآیندهای دیگر محققین، افت داکتیلیتی پایینی در نمونه‌ی فرآیند شده مشاهده می‌شود که عمدتاً به فشار هیدرواستاتیک بالای موجود در این فرآیند مربوط است.

۶- پس از انجام فرآیند، میانگین مقدار سختی در راستای ضخامت لوله از ۷۴ ویکرز به ۱۳۸ ویکرز رسیده است. توزیع سختی در راستای ضخامت و در جهت گذر از سطح داخلی لوله به سمت سطح خارجی آن، سیری صعودی دارد.

#### علائم

$d$	اندازه میانگین دانه (m)
$r$	شعاع داخلی (mm)
$R$	شعاع خارجی (mm)
$r_e$	شعاع اکستروژن شدن (mm)
$L$	طول اکستروژن شدن (mm)

#### علائم یونانی

$\alpha$	زاویه اکستروژن شدن (° درجه)
$\varphi$	زاویه شمول (° درجه)

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

**تعارض منافع:** بدین وسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر، هیچ‌گونه تضاد منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

**سهام نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**منابع مالی:** هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Eftekhari M, Faraji G, Shapoorgan O, Baniassadi M. Experimental investigation of the effect of temperature

- process. *Materials Science and Engineering*: A. 2008; 473(1-2):28-33.
- 28- Tavakkoli V, Afrasiab M, Faraji G, Mashhadi MM. Severe mechanical anisotropy of high-strength ultrafine grained Cu-Zn tubes processed by parallel tubular channel angular pressing (PTCAP). *Materials Science and Engineering*: A. 2015;625:50-5.
- 29- Huang X, Kamikawa N, Hansen N. Strengthening mechanisms in nanostructured aluminum. *Materials Science and Engineering*: A. 2008;483:102-4.
- 30- Hosseini SA, Manesh HD. High-strength, high-conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process. *Materials & Design*. 2009;b 30(8):2911-8.
- 31- Brown TL, Saldana C, Murthy TG, Mann JB, Guo Y, Allard LF, King AH, Compton WD, Trumble KP, Chandrasekar S. A study of the interactive effects of strain, strain rate and temperature in severe plastic deformation of copper. *Acta Materialia*. 2009; 57(18):5491-500.
- 32- Fattah-alhosseini A, Ansari AR, Mazaheri Y, Karimi M, Haghshenas M. An Investigation of mechanical properties in accumulative roll bonded nano-grained pure titanium. *Materials Science and Engineering*: A. 2017;688:218-24.
- 33- Jamali SS, Faraji G, Abrinia K. Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;88(1-4):291-301.
- 34- Babaei A, Faraji G, Mashhadi MM, Hamdi M. Repetitive forging (RF) using inclined punches as a new bulk severe plastic deformation method. *Materials Science and Engineering*: A. 2012;558:150-7.
- 35- Ivanisenko Y, Kulagin R, Fedorov V, Mazilkin A, Scherer T, Baretzky B, Hahn H. High pressure torsion extrusion as a new severe plastic deformation process. *Materials Science and Engineering*: A. 2016;664:247-56.
- 36- Shamsborhan M, Ebrahimi M. Production of nanostructure copper by planar twist channel angular extrusion process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;682:552-6.
- 37- Janeček M, Čížek J, Dopita M, Král R, Srba O. Mechanical properties and microstructure development of ultrafine-grained Cu processed by ECAP. In *Materials science forum 2008* (Vol. 584, pp. 440-445). Trans Tech Publications Ltd.
- 38- Kocich R, Greger M, Kurša M, Szurman I, Macháčková A. Twist channel angular pressing (TCAP) as a method for increasing the efficiency of SPD. *Materials Science and Engineering*: A. 2010; 527(23):6386-92.
- 39- Fattah-Alhosseini A, Imantalab O, Mazaheri Y, Keshavarz MK. Microstructural evolution, mechanical properties, and strain hardening behavior of ultrafine grained commercial pure copper during the accumulative roll bonding process. *Materials Science and Engineering*: A. 2016;650:8-14.
- 40- Ebrahimi M, Djavanroodi F. Experimental and numerical analyses of pure copper during ECPE process as a novel severe plastic deformation method.
- 15- Savarabadi MM, Faraji G, Eftekhari M. Microstructure and mechanical properties of the commercially pure copper tube after processing by hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE). *Metals and materials international*. 2019:1-15.
- 16- Eftekhari M, Faraji G, Nikbakht S, Rashed R, Sharifzadeh R, Hildyard R, Mohammadpour M. Processing and characterization of nanostructured Grade 2 Ti processed by combination of warm isothermal ECAP and extrusion. *Materials Science and Engineering*: A. 2017;703:551-8.
- 17- Fata A, Eftekhari M, Faraji G, Mashhadi MM. Enhanced hot tensile ductility of Mg-3Al-1Zn alloy thin-walled tubes processed via a combined severe plastic deformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018;27(5):2330-7.
- 18- Chengpeng W, Fuguo L, Jinghui L. Producing thin-walled tube of pure copper by severe plastic deformation of shear extrusion. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2015;44(10):2391-5.
- 19- Bagherpour E, Qods F, Ebrahimi R, Miyamoto H. Nanostructured pure copper fabricated by simple shear extrusion (SSE): A correlation between microstructure and tensile properties. *Materials Science and Engineering*: A. 2017;679:465-75.
- 20- Wei KX, Chu ZQ, Wei W, Du QB, Alexandrov IV, Hu J. Effect of deep cryogenic treatment on microstructure and properties of pure copper processed by equal channel angular pressing. *Advanced Engineering Materials*. 2019;21(7):1801372.
- 21- Li J, Li F, Zhao C, Chen H, Ma X, Li J. Experimental study on pure copper subjected to different severe plastic deformation modes. *Materials Science and Engineering*: A. 2016;656:142-50.
- 22- Purcek G, Saray O, Nagimov MI, Nazarov AA, Safarov IM, Danilenko VN, Valiakhetov OR, Mulyukov RR. Microstructure and mechanical behavior of UFG copper processed by ECAP following different processing regimes. *Philosophical Magazine*. 2012; 92(6):690-704.
- 23- Edalati K, Imamura K, Kiss T, Horita Z. Equal-channel angular pressing and high-pressure torsion of pure copper: evolution of electrical conductivity and hardness with strain. *Materials Transactions*. 2012; 53(1):123-7.
- 24- Alawadhi MY, Sabbaghianrad S, Huang Y, Langdon TG. Direct influence of recovery behaviour on mechanical properties in oxygen-free copper processed using different SPD techniques: HPT and ECAP. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017;6(4):369-77.
- 25- Torabzadeh Kashi H, Bahrami M, Shahbazi Karami J, Faraji G. Microstructure and mechanical properties of the ultrafine-grained copper tube produced by severe plastic deformation. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*. 2017;14(2):32-40.
- 26- Miyajima Y, Okubo S, Abe H, Okumura H, Fujii T, Onaka S, Kato M. Dislocation density of pure copper processed by accumulative roll bonding and equal-channel angular pressing. *Materials Characterization*. 2015;104:101-6.
- 27- Shaarbaf M, Toroghinejad MR. Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding

- Progress in Natural Science: Materials International. 2014;24(1):68-74.
- 41- Eftekhari M, Fata A, Faraji G, Mashhadi MM. Hot tensile deformation behavior of Mg-Zn-Al magnesium alloy tubes processed by severe plastic deformation. Journal of Alloys and Compounds. 2018;742:442-53.
- 42- Azimi A, Tutunchilar S, Faraji G, Givi MB. Mechanical properties and microstructural evolution during multi-pass ECAR of Al 1100-O alloy. Materials & Design. 2012 Dec 1;42:388-94.
- 43- Hansen N. Hall-Petch relation and boundary strengthening. Scripta materialia. 2004;51(8):801-6.
- 44- Jamaati R, Toroghinejad MR. Effect of stacking fault energy on mechanical properties of nanostructured FCC materials processed by the ARB process. Materials Science and Engineering: A. 2014; 606:443-50.