



## مطالعه تجربی و عددی تأثیر مکانیکی روش افزایش و کاهش تناوبی قطر (CFS) جهت تولید لوله‌های مسی مستحکم

حسام تراب زاده کاشی<sup>1</sup>، جواد شهبازی کرمی<sup>2</sup>، کرامت ملک زاده فرد<sup>3\*</sup>

1- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استاد، مجتمع دانشگاهی هوا فضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-1774، kmalekzadeh@mut.ac.ir

### کلیدواژگان

تغییر شکل پلاستیک شدید  
مواد ریزدانه  
لوله مستحکم  
مس خالص  
خواص مکانیکی

### چکیده

در این پژوهش روش جدید تغییرشکل پلاستیک شدید تحت عنوان "افزایش و کاهش تناوبی قطر" برای تولید لوله‌های ریزدانه شده بر روی لوله‌های مسی انجام گرفته است. شبیه‌سازی اجزای محدود این روش، تأثیر پارامترهای مختلف طراحی را به طور کامل مشخص کرده است. این روش از دو نیم سیکل تشکیل شده است. در نیم‌سیکل اول لوله بر روی ماندنرل افزایش قطر، فشار داده می‌شود که بدین ترتیب در نواحی برشی، تنش کششی همراه با برش ایجاد و قطر لوله افزایش می‌یابد. در نیم سیکل بعدی لوله درون قالب کاهش قطر به صورتی که در همان نواحی برشی تنش فشاری همراه با برش ایجاد شود، رانده می‌شود تا قطر لوله به مقدار اولیه برسد. این فرایند می‌تواند به صورت متناوب بر روی لوله اجرا شود تا به کرنش اعمالی بیشتر و به تبع آن اندازه دانه ریزتر و در نهایت خواص مکانیکی بهتر دست یافت. نمودار تنش-کرنش حقیقی لوله‌ها از جنس مس خالص در پاس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصله حاکی از افزایش استحکام لوله‌ها در پاس‌های بالاتر بود به صورتیکه مقدار حد تسلیم و استحکام کششی از حالت اولیه 120 مگاپاسکال و 180 مگاپاسکال پس از یازده پاس به ترتیب به مقادیر 185 مگاپاسکال و 285 مگاپاسکال افزایش یافته است. از طرفی دیگر مقدار درصد تغییر طول نهایی پس از انجام فرایند کاهش یافته است. متوسط سختی لوله‌ها در امتداد ضخامت نیز پس از انجام یازده پاس، از 96 ویکرز به 127 ویکرز رسیده است.

## Experimental and numerical study of mechanical influence of cyclic flaring and sinking (CFS) method to produce strong copper tubes

Hessam Torabzadeh Kashi<sup>1</sup>, Javad Shahbazi Karami<sup>2</sup>, Keramat Malakzade Fard<sup>3\*</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Faculty of aerospace, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B.15875-1774, Tehran, Iran, kmalekzadeh@mut.ac.ir

### Keywords

Severe plastic deformation  
Fine-grain materials  
Strong tubes  
pure copper  
Mechanical properties

### Abstract

In this research, a novel severe plastic deformation (SPD) method entitled cyclic flaring and sinking (CFS) is presented for producing of the fine-grained copper tubes. Finite element simulation has determined the influence of design parameters. CFS process includes two different flaring and sinking half-cycles. At flaring half cycle, the flaring punch with two stepped regions is pressed into the tube. Shear and normal tensile strains are applied as a result of the existence of shear zones and increase in the tube diameter. In the second half cycle, the tube is then pressed to sinking die that applies same shear strains and normal compression strain so that the initial diameter of the tube is achieved and high plastic strain is applied. This process can be run periodically on the tube to exert more strain and consequently finer grain size and ultimately achieve better mechanical properties. The true stress-strain curve of pure copper tubes was studied in different cycles. Results show the increasing strength in upper cycles if the yield and ultimate strength were significantly increased to 185 Mpa, and 285 Mpa, respectively from the initial values of 120 Mpa, and 180 Mpa. On the other hand, the elongation to failure was decreased after the process. The average hardness along thickness has reached to 127Hv after eleven cycles from 96 Hv.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Torabzadeh Kashi, J. Shahbazi Karami, K. Malakzade Fard, Experimental and numerical study of mechanical influence of cyclic flaring and sinking (CFS) method to produce strong copper tubes, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 20-27, 2016 (in Persian)

## 1- مقدمه

لوله‌ای به صورت موازی<sup>6</sup> توسط فرجی و همکارانش ابداع و ارائه شد [13]. بابایی و همکاران در سال 2014 با دو روش نوین انبساط و روزنرانی متناوب لوله<sup>7</sup> و تراکم و روزنرانی متناوب لوله<sup>8</sup> توانستند گامی نوآورانه در جهت تولید لوله‌های مستحکم بردارند [14, 15]. جعفرزاده و همکاران روشی را تحت عنوان انبساط و انقباض تناوبی معرفی نموده‌اند و توانسته‌اند با این روش به موفقیت‌هایی در تولید لوله‌های فوق ریزدانه دست یابند [16]. به تازگی نیز تراب زاده و همکاران توانستند با اصلاح عملکرد فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای، روشی تحت عنوان افزایش و کاهش تناوبی قطر<sup>9</sup> معرفی نمایند [17]. در روش افزایش و کاهش تناوبی قطر با حذف نیروهای اصطکاک اضافی و اعمال تدریجی کرنش، علاوه بر عدم نیاز به تجهیزات با توناژ بالا، می‌توان به لوله‌های نانو ساختار با طول بلندتر نسبت به سایر روش‌ها دست یافت.

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، روش افزایش و کاهش تناوبی قطر از دو نیم سیکل تشکیل شده است. در ابتدای فرایند لوله بر روی سنبه افزایش قطر<sup>10</sup> فشار داده می‌شود می‌شود که بدین ترتیب نواحی برشی با تنش کششی همراه با برش روی لوله ایجاد می‌شود و قطر لوله نیز افزایش می‌یابد. در نیم سیکل دوم لوله درون قالب کاهش قطر<sup>11</sup> به صورتی که در همان نواحی برشی تنش فشاری همراه با برش ایجاد شود، رانده می‌شود تا بتوان ضمن دستیابی به قطر اولیه لوله، کرنش پلاستیک بالایی اعمال کرد. انجام این فرایند به صورت تناوبی و در تعداد سیکل بالاتر می‌تواند کرنش اعمالی را به صورت تدریجی افزایش دهد تا به خواص مکانیکی مناسبتری در لوله دست یافت.

کرنش پلاستیک معادل را در یک نیم سیکل و در نواحی برشی مانند آنچه که در روش PTCAP صورت گرفته است [5]، می‌توان به صورت رابطه (1) محاسبه کرد (با توجه به:  $\psi_1 = \psi_2 = 0^\circ$ ):

$$\bar{\epsilon}_T = \sum_{i=1}^2 \left[ \frac{2 \cot(\varphi_i / 2)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

لذا با استفاده از رابطه (2) می‌توان مجموع کرنش پلاستیک معادل را پس از انجام  $N$  پاس فرایند CFS بدست آورد:

$$\bar{\epsilon}_{TN} = 2N \left\{ \sum_{i=1}^2 \left[ \frac{2 \cot(\varphi_i / 2)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1} \right\} \quad (2)$$

مواد فوق ریزدانه به عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی آنها در مقایسه با مواد درشت دانه بطور قابل ملاحظه‌ای بالا است. در عین حالیکه استحکام در مواد فلزی فوق ریز دانه بسیار بالاتر از مواد درشت دانه است [1]، قابلیت شکل‌پذیری آنها نیز در حد خوبی می‌باشد [2]. همچنین مواد فوق ریزدانه حتی در دماهای پایین‌تر و نرخ کرنش‌های بالاتر، خاصیت شکل‌پذیری عالی از خود نشان می‌دهند [3]. برای توسعه فرایندهای تولید مواد فلزی فوق ریزدانه تحقیقات زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و حتی صنعتی صورت گرفته است. استحکام به وزن فلزات فوق ریزدانه و نانو ساختار بسیار بالاتر و در مواردی در حدود 2-5 برابر استحکام به وزن همان فلز با اندازه دانه معمولی می‌باشد. در مواد فوق ریزدانه، خواص دیگری مانند ریز ساختار هم‌محور و همگن و با مرزدانه‌هایی با زوایای ترجیحی بالا وجود دارند [4, 5]. حضور درصد بیشتری از دانه‌ها با مرزدانه‌های با زوایای بزرگتر، از اهمیت ویژه‌ای در حصول خواص مطلوب برخوردار است. در این ارتباط، تحقیقات ثابت شده است که یکی از موثرترین روش‌های فرآوری مواد فلزی فوق ریزدانه اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>1</sup> می‌باشد [6]. در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید وجود فشار هیدرواستاتیکی زیاد به همراه کرنش برشی شدید باعث تولید عیوب با چگالی بالا مخصوصاً نابجایی در شبکه کریستالی می‌گردد [7]. از طرفی دیگر وجود فشار هیدرواستاتیک مانع از ایجاد ترک در ماده می‌شود که امکان ایجاد تغییر شکل‌های شدید در مواد با شکل‌پذیری کم را فراهم می‌کند [8].

در دهه اخیر با توجه به نیاز روز افزون قطعات لوله‌ای با استحکام بالا، تحقیقاتی در جهت تولید لوله‌های فوق ریزدانه صورت گرفته است. توس لوله‌های فوق ریزدانه را با استفاده از روش پیچش لوله در فشار بالا<sup>2</sup> تولید نمود [9]. محبی روشی جدید تحت عنوان چرخش اتصال تجمعی<sup>3</sup> جهت تولید این نوع لوله‌ها معرفی کرد [10]. زنگی آبادی و همکارانش با استفاده از روش فشار در کانال لوله‌ای<sup>4</sup> اقدام به تولید لوله‌های با استحکام بالا کردند [11]. فرجی و همکاران فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای<sup>5</sup> را به عنوان روشی بهینه، ارزان و با قابلیت صنعتی ابداع نمودند [12]. در سال 2012 فرایند فشار در کانال زاویه‌دار

<sup>6</sup> Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP)

<sup>7</sup> Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE)

<sup>8</sup> Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC)

<sup>9</sup> Cyclic flaring and sinking (CFS)

<sup>10</sup> Flaring punch

<sup>11</sup> Sinking die

<sup>1</sup> Severe Plastic Deformation (SPD)

<sup>2</sup> High-pressure tube twisting (HPTT)

<sup>3</sup> Accumulative spin-bonding (ASB)

<sup>4</sup> Tube Channel Pressing (TCP)

<sup>5</sup> Tube Channel Angular Pressing (TCAP)

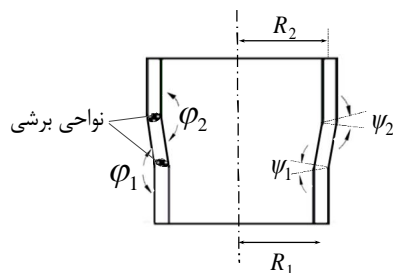


Fig. 2 Geometric parameters of cyclic flaring and sinking

شکل 2 متغیرهای هندسی فرایند افزایش و کاهش تناوبی قطر

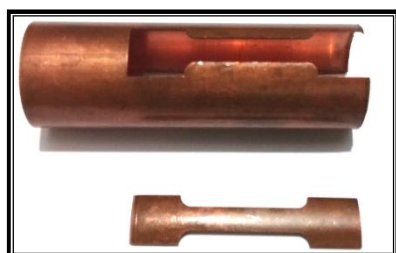


Fig. 3 Tensile test specimen cut from tube

شکل 3 نمونه تست کشش بریده شده از لوله

### 3- شبیه‌سازی اجزا محدود

برای شبیه‌سازی عددی فرایند از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس<sup>1</sup> 6-10 استفاده شده و نوع حل صریح<sup>2</sup> بوده است. به علت استفاده از مولیبدن دی‌سولفید به عنوان روان‌کار، ضریب اصطکاک کولمب ( $\mu$ ) برابر 0/05 فرض شده است [18]. در این شبیه‌سازی از مدل متقارن محوری استفاده شده و نوع المان برای لوله، سه گره‌ای<sup>3</sup> در نظر گرفته شده است. تمامی پارامترهای ورودی در نرم‌افزار شبیه‌ساز در جدول 1 آورده شده است.

### 4- نتایج و بحث

#### 4-1- خواص مکانیکی

شکل 4- الف نشانگر نمودارهای تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش در دمای اتاق و پس از انجام پاس‌های مختلف فرایند CFS می‌باشد. نتایج استخراجی از این نمودارها برای مقادیر حد تسلیم، استحکام کششی و درصد تغییر طول نهایی در شکل 4- ب نشان داده شده است. حد تسلیم (در کرنش 0/2 درصد) قبل از انجام فرایند CFS، 120 مگاپاسکال بوده است که پس از انجام سه، هفت و یازده پاس به ترتیب تا مقادیر 165، 183، 185 مگاپاسکال افزایش یافته است. مانند سایر روش‌های SPD، کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش چگالی نابجایی‌ها سبب افزایش حد تسلیم و استحکام کششی خواهد شد [2].

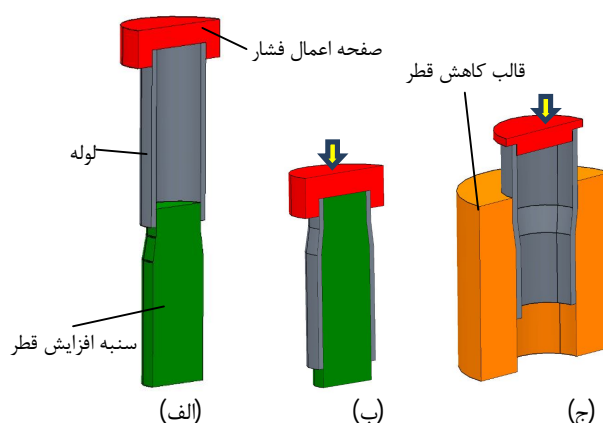


Fig. 1 Schematic of CFS process. (a) initial state, (b) the flaring (first half-cycles) and (c) the sinking (second half-cycles)

شکل 1 شماتیک فرایند افزایش و کاهش تناوبی قطر الف- حالت اولیه ب- افزایش قطر (نیم‌سیکل اول) ج- کاهش قطر (نیم‌سیکل دوم)

در این پژوهش، با قرار دادن مقادیر متغیرها در رابطه (2)، مقدار کرنش پلاستیک معادل اعمال شده به لوله، پس از انجام یک پاس فرایند CFS، برابر 0/45 می‌شود که در نهایت با انجام یازده پاس بر روی لوله‌های مسی مقدار کرنش پلاستیک معادل تا حدود 5 اعمال شد.

### 2- آزمایش‌ها

در این مقاله برای بررسی روش CFS لوله‌ای از جنس مس خالص استفاده شده است. قطر خارجی لوله 11 میلی‌متر و ضخامت آن 1/2 میلی‌متر و طول آن 70 میلی‌متر انتخاب شد. سنبه افزایش قطر و قالب کاهش قطر هر دو از جنس فولاد VCN 150 با سختی 25 راکول سی ساخته شده است. همان‌طور که متغیرهای ابعادی نواحی برشی در شکل 2 ملاحظه می‌شود، مقدار زوایای گوشه ( $\psi_1 = \psi_2$ ) برابر صفر درجه و مقدار زوایای کانال ( $\phi_1 = \phi_2$ ) برابر 170 درجه در نظر گرفته شده است. نسبت تغییر شکل که همان مقدار اختلاف شعاع‌های لوله قبل و بعد از نیم سیکل اول  $K = R_2 - R_1$  می‌باشد، برابر ضخامت لوله ( $t$ ) در نظر گرفته شده است.

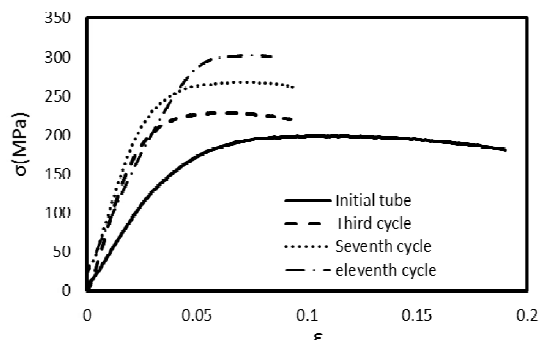
برای انجام فرایند CFS، از پرس با مکانیزم پیچی و با سرعت 150 میلی‌متر بر دقیقه و در دمای اتاق استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 3 مشخص است نمونه تست کشش پس از انجام تعداد پاس‌های مختلف در جهت طولی از لوله بریده شد تا بتوان چگونگی تأثیرات فرایند روی خواص مکانیکی لوله‌ها را بررسی کرد. نمودار تنش-کرنش حقیقی لوله‌ها با استفاده از آزمون کشش در دمای اتاق و با نرخ کرنش  $10^{-5}$  بر ثانیه بدست آمده و در نرم‌افزار شبیه‌سازی وارد شده است.

<sup>1</sup> ABAQUS 6-10

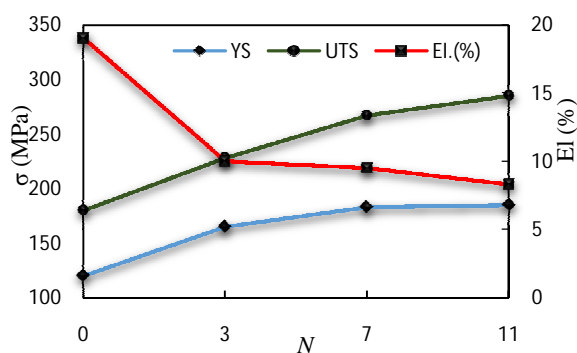
<sup>2</sup> Explicit

<sup>3</sup> CAX3

شده است. کرنش پلاستیک معادل در پاس اول در امتداد ضخامت لوله، دارای کمترین مقدار 0/42 و بیشترین مقدار 0/48 است، بنابراین مقدار بازه تغییرات کرنش پلاستیک معادل برابر  $\pm 0/03$  است که همگنی کرنش اعمالی در روش CFS را نشان می‌دهد. همگنی کرنش پلاستیک معادل به عنوان یک مزیت روش‌های تولید لوله‌های فوق ریزدانه مطرح است چرا که می‌تواند باعث یکنواختی خواص مکانیکی در لوله شود.



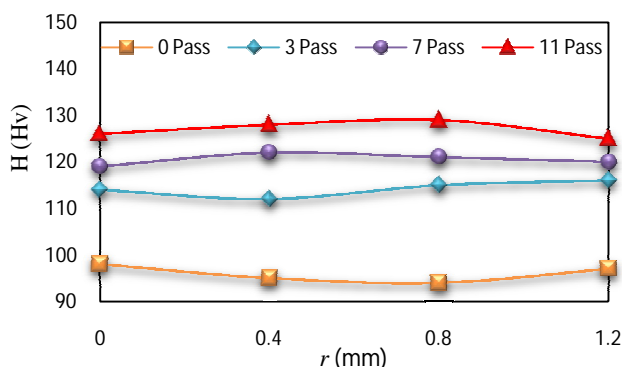
(الف)



(ب)

**Fig. 4** (a) True stress strain curves of different cycles of CFS, (b) Yield strength, ultimate strength and elongation at failure of different cycles.

شکل 4 الف - نمودارهای تنش-کرنش حقیقی پس از پاس‌های مختلف فرایند افزایش و کاهش تناوبی قطر ب - حد تسلیم، استحکام کششی و درصد تغییر طول نهایی در پاس‌های مختلف



**Fig. 5** Hardness distribution along tube thickness in different cycles.

شکل 5 توزیع سختی در امتداد ضخامت لوله در پاس‌های مختلف

جدول 1 خواص مکانیکی مس خالص و پارامترهای ورودی در نرم‌افزار شبیه‌سازی

**Table. 1** Mechanical properties of pure copper and input parameters in simulation software

پارامتر	مقدار
(ρ) چگالی	8940 کیلوگرم بر مترمکعب
(ν) ضریب پواسون	0.34
(E) مدول یانگ	110 گیگا پاسکال
(μ) ضریب اصطکاک	0.05
زاویه کانال (φ <sub>1</sub> =φ <sub>2</sub> )	145, 150, 155, 160, 165, 170, 175 (درجه)
زاویه گوشه (ψ <sub>1</sub> =ψ <sub>2</sub> )	0, 10, 20, 30 (درجه)
نسبت تغییر شکل (K)	0.6t, 0.8t, t, 1.2t, 1.4t

توجه شود که افزایش استحکام در پاس‌های پایین‌تر بیشتر رخ می‌دهد و هرچه تعداد پاس‌ها افزایش می‌یابد نرخ کرنش سختی کاهش خواهد یافت. به طوریکه می‌توان گفت هرچه استحکام بیشتر، کرنش سختی کمتر می‌شود [19]. اولیه به مقدار 10 درصد رسیده است. در نهایت پس از انجام یازده پاس فرایند CFS، می‌توان به حد تسلیم 185 مگاپاسکال و استحکام کششی 285 مگاپاسکال دست یافت که نسبت به حالت اولیه لوله به ترتیب 55% و 50% افزایش داشته‌اند. از طرفی دیگر تغییر طول نهایی نمونه‌های تست کشش از 14 درصد به حدود 8 درصد رسیده است. در این حالت با افزایش استحکام، ناپایداری یا شروع گلوبی شدن زودتر رخ می‌دهد و از شکل پذیری ماده کاسته می‌شود [10].

آزمون میکروسختی ویکرز<sup>1</sup> در مقطع عرضی لوله به صورت میانگینی از پنج نقطه انجام شد. مقادیر مختلف سختی در لوله‌ها پس از انجام تعداد پاس‌های متفاوت در شکل 5 مشهود است. افزایش قابل توجهی در مقدار سختی ویکرز پس از انجام یازده پاس ایجاد ایجاد شده است به طوریکه میانگین سختی در امتداد ضخامت لوله از 96 ویکرز در حالت اولیه به 127 ویکرز می‌رسد. البته این نرخ افزایش سختی در پاس‌های بعدی کاهش می‌یابد. افزایش سختی لوله‌ها بر اثر تغییر شکل پلاستیک شدید ماده و به علت بهبود دانه‌بندی و کاهش اندازه دانه‌های ماده رخ می‌دهد [4].

#### 2-4- شبیه‌سازی اجزای محدود

##### 1-2-4- کرنش پلاستیک معادل در آزمایش‌های تجربی

توزیع کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله در پاس‌های اول، دوم و سوم مطابق آزمایش‌های تجربی، تحت شبیه‌سازی اجزا محدود قرار گرفت که در شکل 6 نشان داده

<sup>1</sup> Vickers microhardness test

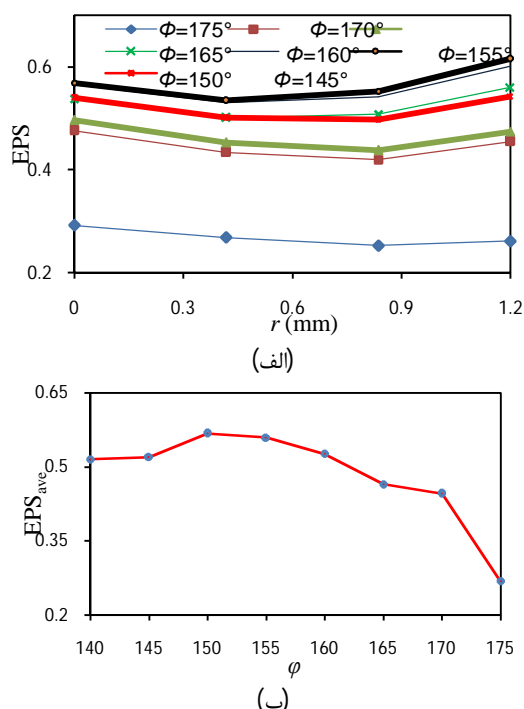


Fig. 7 (a) Channel angle influence on plastic strain distribution, (b) channel angle influence on average plastic strain

شکل 7 الف - اثر زاویه کانال بر روی توزیع کرنش پلاستیک ب- اثر زاویه کانال بر روی متوسط کرنش پلاستیک

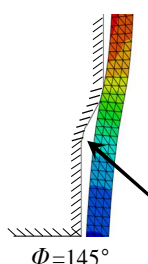


Fig. 8 Contact between flaring punch and tube in channel angle of 145°  
شکل 8 تماس بین سنبه افزایش قطر و لوله در زاویه کانال 145 درجه

در شبیه‌سازی این فرایند بر روی آلومینیوم 1050 مشخص شده است که در زوایای کانال کمتر از 155 نقص در اعمال کرنش وجود خواهد داشت [17]، بنابراین کمترین زاویه‌ای که نقص اعمال کرنش رخ نمی‌دهد بستگی به جنس ماده دارد. به طوریکه هرچه استحکام ماده بیشتر باشد کمترین زاویه‌ای که در آن نقص اعمال کرنش رخ نمی‌دهد، کاسته خواهد شد و فرایند در بازه زاویه کانال بیشتری عملکرد صحیحی خواهد داشت.

#### 3-2-4- تأثیر زاویه گوشه<sup>2</sup> ( $\phi_1=\phi_2=170, K=t, \psi=\psi_1=\psi_2$ )

شکل 9- الف توزیع کرنش پلاستیک معادل پس از یک پاس را در امتداد ضخامت لوله در زوایای گوشه مختلف نشان می‌دهد.

از طرفی دیگر میانگین کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت، در پاس اول برابر 0/44 است که این مقدار با مقدار بدست آمده از تحلیل محاسباتی که برابر 0/45 بود، مطابقت دارد. همان‌طور که از مقادیر کرنش پلاستیک معادل در پاس‌های مختلف مشهود است، با افزایش تعداد پاس‌ها، ناهمگنی در کرنش اعمالی افزایش خواهد یافت.

#### 4-2-2- تأثیر زاویه کانال<sup>1</sup> ( $\psi_1=\psi_2=0^\circ, K=t, \phi=\phi_1=\phi_2$ )

شکل 7- الف تأثیر زاویه کانال ( $\phi$ ) را بر روی توزیع کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله، پس از پاس اول فرایند CFS نشان می‌دهد. همچنین متوسط کرنش پلاستیک در زوایای کانال مختلف در شکل 7- ب آورده شده است. در زوایای کانال بزرگتر از 150 درجه، همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش زاویه کانال، متوسط کرنش پلاستیک کاهش می‌یابد [20]، اما این روند در زوایای کانال کمتر از 155 درجه صدق نمی‌کند. جهت توضیح تأثیر زوایای کانال کمتر از 150 درجه بر روی کرنش پلاستیک معادل باید به چگونگی تماس بین لوله و قالب توجه کرد. شکل 8 تماس ناقص بین قالب و سنبه در زاویه کانال 145 درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است در زوایای کانال کوچکتر از 150 درجه، تماس بین سنبه و لوله به خوبی ایجاد نمی‌شود و در این حالت بین سنبه و لوله فاصله می‌افتد (پیکان سیاه) و تنها بخشی از کرنش پلاستیکی که از رابطه (2) بدست می‌آید، به لوله اعمال می‌شود. بنابراین کرنش پلاستیک معادل در زوایای کمتر از 150 کاهش می‌یابد و دیگر با روند مشخصی تغییر نخواهد کرد. نقص در اعمال کرنش پلاستیک در زوایای کانال پایین به علت عدم وجود فشار هیدروستاتیک بر سطح بیرونی لوله در روش CFS رخ می‌دهد.

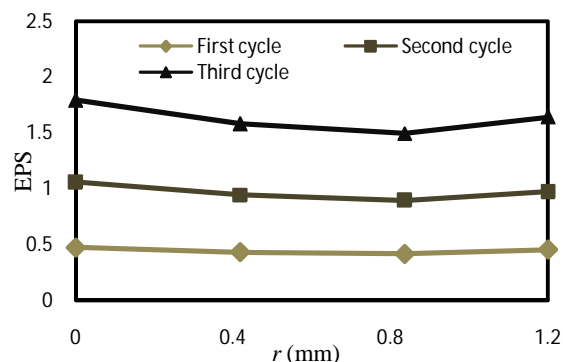


Fig. 6 Equivalent plastic strain along tube thickness in different cycles.  
شکل 6 کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله و در تعداد پاس‌های مختلف

<sup>2</sup> Corner angle ( $\psi$ )

<sup>1</sup> Channel angle ( $\phi$ )

تأثیر نسبت تغییر شکل بر روی کرنش پلاستیک در امتداد ضخامت لوله پس از یک پاس فرایند CFS در شکل 10 - الف نشان داده شده است. همان‌طور که با توجه به رابطه (2) انتظار می‌رفت، با افزایش مقدار  $K$ ، کرنش پلاستیک در امتداد ضخامت لوله افزایش می‌یابد. احتمالاً با افزایش مقدار  $K$  و تغییر نسبت شعاع‌های  $R_1$  و  $R_2$ ، بخشی از کرنش پلاستیک معادل که از کرنش عمودی ناشی می‌شود، افزایش می‌یابد [20].

شکل 10- ب نیز اثر پارامتر  $K$  بر متوسط کرنش پلاستیک و شاخص ناهمگنی کرنش را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار  $K$ ، متوسط کرنش پلاستیک تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد در صورتی که شاخص ناهمگنی کرنش با روندی نامشخص افزایش یافته است. به طور کلی می‌توان کمترین ناهمگنی کرنش را در نسبت تغییر شکل کمتر از  $0/6t$  مشاهده کرد.

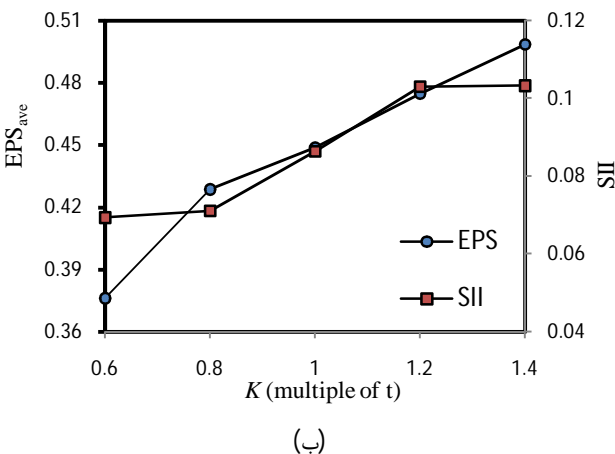
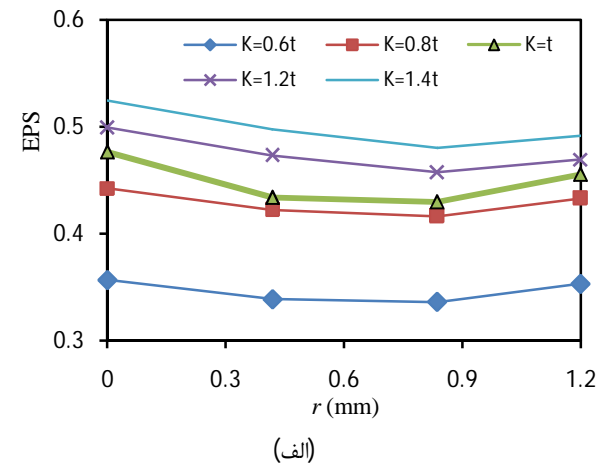


Fig. 9 Deformation ratio influence on plastic strain distribution, (b) Deformation ratio influence on average plastic strain and Strain Inhomogeneity Index

شکل 10 الف- اثر نسبت تغییر شکل بر روی توزیع کرنش پلاستیک ب- اثر نسبت تغییر شکل بر روی متوسط کرنش پلاستیک و شاخص ناهمگنی کرنش

## 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید با عنوان

همان‌طور که مشهود است با افزایش زاویه گوشه، تراز کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت کاهش می‌یابد. در شکل 9- ب کرنش متوسط در امتداد ضخامت لوله نیز به صورت تابعی از زاویه گوشه نشان داده شده است که با افزایش زاویه گوشه به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد. شکل 9- ب اثر زاویه گوشه را بر شاخص ناهمگنی کرنش<sup>1</sup> که از تقسیم اختلاف بیشینه و کمینه کرنش بر کرنش متوسط روی ضخامت لوله بدست می‌آید، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، کمترین مقدار ناهمگنی در زاویه گوشه 10 درجه ایجاد می‌شود و پس از آن با افزایش زاویه گوشه، ناهمگنی کرنش افزایش می‌یابد.

## 4-2-4- تأثیر نسبت تغییر شکل<sup>2</sup> ( $\phi_1=\phi_2=170^\circ, \psi_1=\psi_2=0^\circ$ )

برای بررسی تأثیر نسبت تغییر شکل، پارامتر  $K=R_2-R_1$  تعریف شده است. مقادیر مختلف  $K$  به صورت مضاربی از ضخامت (t) و به اندازه‌ی  $0/6t, 0/8t, 1/2t$  و  $1/4t$  در شبیه‌سازی اعمال گردید.

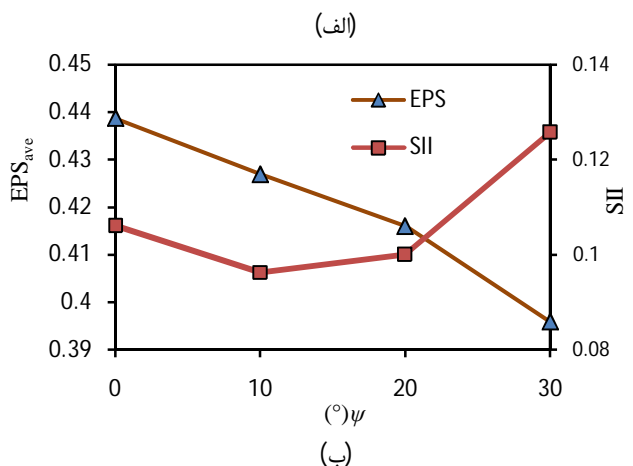
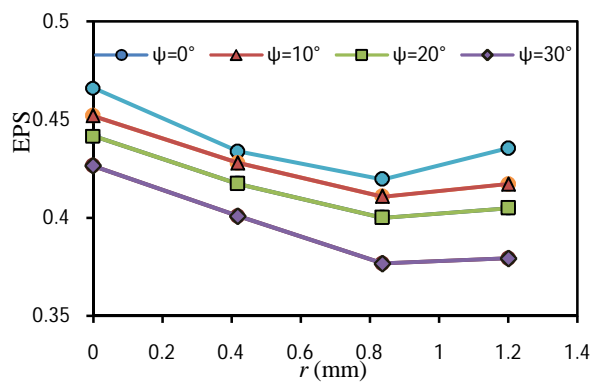


Fig. 9 (a) Corner angle influence on plastic strain distribution, (b) corner angle influence on average plastic strain and Strain Inhomogeneity Index

شکل 9 الف- اثر زاویه گوشه بر روی توزیع کرنش پلاستیک ب- اثر زاویه گوشه بر روی متوسط کرنش پلاستیک و شاخص ناهمگنی کرنش

<sup>1</sup> Strain inhomogeneity index (IIS)

<sup>2</sup> Deformation ratio (K)

زاویه کانال (درجه)	$\varphi$	افزایش و کاهش تناوبی قطر برای تولید لوله‌های ریزدانه مورد
تنش (Mpa)	$\sigma$	استفاده قرار گرفت. این روش با موفقیت بر روی لوله از جنس
کرنش	$\varepsilon$	مس خالص تا یازده پاس انجام گرفت. خواص مکانیکی لوله‌ها در
کرنش پلاستیک معادل		اثر روش CFS به شکل چشمگیری بهبود پیدا کرد، به صورتی
ضریب اصطکاک	$\mu$	که حد تسلیم و استحکام کششی مس خالص به ترتیب تا مقادیر

### 7- مراجع

[1] M. Kawasaki, T. Langdon, Principles of superplasticity in ultrafine-grained materials, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 5, pp. 1782-1796, 2007/03/01, 2007. English

[2] K. Máthi, J. Gubicza, N. H. Nam, Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 394, No. 1-2, pp. 194-199, 5/17/, 2005.

[3] H. Matsunoshita, K. Edalati, M. Furui, Z. Horita, Ultrafine-grained magnesium-lithium alloy processed by high-pressure torsion: Low-temperature superplasticity and potential for hydroforming, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 640, pp. 443-448, 7/29/, 2015.

[4] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 3//, 2000.

[5] A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon, Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, No. 6, pp. 893-979, 8//, 2008.

[6] I. Sabirov, M. Y. Murashkin, R. Z. Valiev, Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 560, pp. 1-24, 1/10/, 2013.

[7] R. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. Langdon, M. Zechetbauer, Y. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *JOM*, Vol. 58, No. 4, pp. 33-39, 2006/04/01, 2006. English

[8] A. P. Zhilyaev, B. K. Kim, J. A. Szpunar, M. D. Baró, T. G. Langdon, The microstructural characteristics of ultrafine-grained nickel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 391, No. 1-2, pp. 377-389, 1/25/, 2005.

[9] L. S. Tóth, M. Arzaghi, J. J. Funderberger, B. Beausir, O. Bouaziz, R. Arruffat-Massion, Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting, *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 3, pp. 175-177, 2//, 2009.

[10] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 1, pp. 180-188, 11/25/, 2010.

185 و 285 مگاپاسکال افزایش یافت. مقدار سختی لوله از 96 ویکرز در حالت اولیه پس از انجام یازده پاس به 127 ویکرز رسید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود روش CFS به صورت زیر بدست آمد:

- در زوایای کانال کمتر از 150 درجه به علت عدم وجود فشار هیدروستاتیک بر سطح بیرونی لوله، اعمال کرنش پلاستیک به صورت ناقص رخ می‌دهد. از این رو روش CFS برای جنس مس خالص در زوایای کانال بالای 150 درجه کاربرد دارد.

- کرنش پلاستیک معادل با افزایش زاویه گوشه، به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد و کمترین مقدار ناهمگنی در زاویه گوشه 10 درجه ایجاد می‌شود.

- با افزایش مقدار  $K$ ، کرنش پلاستیک معادل افزایش می‌یابد و کمترین ناهمگنی کرنش در نسبت تغییر شکل کمتر از  $0/6t$  رخ می‌دهد.

- مقدار بازه تغییرات کرنش پلاستیک معادل در امتداد ضخامت لوله پس از انجام یک پاس فرایند CFS برابر  $\pm 0/03$  است که نشانگر همگنی خوب کرنش اعمالی در این روش است.

### 6- فهرست علائم

تغییر طول نهایی	El
کرنش پلاستیک معادل	EPS
متوسط کرنش پلاستیک معادل	EPS <sub>ave</sub>
سختی (Hv)	H
نسبت تغییر شکل	K
تعداد پاس	N
شعاع اولیه لوله	R <sub>1</sub>
شعاع ثانویه لوله	R <sub>2</sub>
فاصله از سطح داخلی لوله (mm)	r
شاخص ناهمگنی کرنش	SII
ضخامت لوله	t
استحکام نهایی (Mpa)	UTS
حد تسلیم (Mpa)	YS
زاویه گوشه (درجه)	$\psi$

### علائم یونانی

- of Materials Science*, Vol. 49, No. 8, pp. 3158-3165, 2014/04/01, 2014. English
- [16] H. Jafarzadeh, K. Abrinia, Fabrication of ultra-fine grained aluminium tubes by RTES technique, *Materials Characterization*, Vol. 102, No. 0, pp. 1-8, 4//, 2015.
- [17] H. Torabzadeh, G. Faraji, Cyclic flaring and sinking (CFS) as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 411-416, 07/13, 2015. (in persian)
- [18] M. Kamachi, M. Furukawa, Z. Horita, T. G. Langdon, Equal-channel angular pressing using plate samples, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 361, No. 1-2, pp. 258-266, 11/25/, 2003.
- [19] S. A. Hosseini, H. D. Manesh, High-strength, high-conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 2911-2918, 9//, 2009.
- [20] G. Faraji, M. Mousavi Mashhadia, Plastic deformation analysis in parallel tubular channel angular pressing (PTCAP), *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 4, pp. 23-32, 2013.
- [11] A. Zangiabadi, M. Kazeminezhad, Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 15, pp. 5066-5072, 6/15/, 2011.
- [12] G. Faraji, M. M. Mashhadi, H. S. Kim, Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Letters*, Vol. 65, No. 19-20, pp. 3009-3012, 10//, 2011.
- [13] G. Faraji, A. Babaei, M. M. Mashhadi, K. Abrinia, Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Letters*, Vol. 77, No. 0, pp. 82-85, 6/15/, 2012.
- [14] A. Babaei, M. M. Mashhadi, H. Jafarzadeh, Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 598, No. 0, pp. 1-6, 3/26/, 2014.
- [15] A. Babaei, M. M. Mashhadi, H. Jafarzadeh, Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Journal*