



بررسی اثرات پارامترهای مؤثر در عملکرد قالب زاویه دار لوله‌ای موازی

مصطفی غدیری¹، محمود موسوی مشهدی^{2*}، مهدی غمامی³

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده فنی تهران، تهران
 - 2- استاد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده فنی تهران، تهران
 - 3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده فنی تهران، تهران
- * تهران، صندوق پستی 11155-4563، mmosavi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 04 تیر 1393
پذیرش: 01 مهر 1393
ارائه در سایت: 06 آبان 1393
کلید واژگان:
تغییر شکل پلاستیک شدید
اجزاء محدود
لوله‌های فوق ریزدانه
کانال‌های زاویه‌دار لوله‌ای موازی

چکیده

یکی از فرآیندهایی که در چند سال اخیر مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفته است فرآیند تولید فلزات ریزساختار فوق ریزدانه و نانو است. هدف از ارائه و انجام این فرآیندها عمدتاً تولید قطعات سبک‌وزن با استحکام و قابلیت اطمینان بالاست. روش‌های زیادی برای تولید مواد فلزی و بالکی شکل تا به حال ارائه شده است. ولی علی‌رغم نیاز گسترده به لوله‌های با استحکام به وزن بالا، کارهای به نسبت کمتری برای تولید لوله‌های با ساختار فوق ریزدانه و نانو ریزدانه انجام شده است. از مزایای این روش‌ها می‌توان به قابلیت صنعتی بالا، هزینه کمتر، کیفیت بالای قطعات به لحاظ همگنی اشاره نمود. به این منظور، در این پژوهش، طراحی یک قالب بهینه به منظور افزایش همگنی ریزساختار ماده و همچنین کاهش نیروی اعمالی فرآیند تولید لوله انجام شده است. قالب طراحی شده براساس فرآیند فشار در کانال‌های زاویه‌دار لوله‌ای موازی طراحی شده است. این فرآیند، به دلیل دارا بودن نیروی مورد نیاز کمتر و همگنی بیشتر نسبت به سایر فرآیندها، دارای مزیت است. زوایای کانال‌ها، زوایای انحناء گوشه‌ها، نسبت تغییر شکل و شعاع‌های کانال‌ها، ضریب اصطکاک بین لوله و کانال و تعداد پاس‌ها از جمله پارامترهای مؤثر در فرآیند فوق است. تأثیر پارامترهای فوق در میزان همگنی کرنش مؤثر و نیروی مورد نیاز فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است.

Study of effective parameters of Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP)

Mostafa Ghadiri¹, Mahmoud Mosavi Mashhadi^{2*}, Mahdi Ghamami³

1,2,3- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran
* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, mmosavi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 June 2014
Accepted 23 September 2014
Available Online 28 October 2014

Keywords:
Severe Plastic Deformation
Finite Element
Ultra-Fine Tubes
Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP)

ABSTRACT

Various methods have been proposed to produce metallic and bulk form materials. Severe plastic deformation is one way in which a great deal of mechanical work can be applied to the metal. Various methods have been proposed to produce metallic and bulk form materials. However, despite the widespread need for tubes with high strength to weight ratio, few studies and attempts have been made to produce ultra-fine and nano structures. Ultra-fine grain metal created by the process has a high resistance, therefore, it can be used as high strength steels that are being used nowadays. In this study, optimal design of a cast is done in order to increase the homogeneity of the material microstructure and reduce applied force of the pipe production process. Finite element software is used to design the desired format. Since the framework has been designed based on the pressure in angular channels with parallel tube, the channel angles, corners and curved angles, reshaping and the channel radius ratio, the coefficient of friction between the pipe and the channel and the number of passes are the parameters affecting the process. The effect of the above parameters in a homogeneous effective strain rate and force of the process has been studied.

1- مقدمه

است و در رویکرد دوم منظور این است که ماده بالک را از ابتدا به‌وسیله چینش اتم‌ها یا اجزای نانو ساختار خلق کنند [1]. در رویکرد بالا به پایین، روش‌های گوناگونی وجود دارد که دسته‌ای از آن‌ها، به‌صورت اعمال کار مکانیکی بر روی ماده هستند. یکی از روش‌های اصلی این دسته روش تغییر شکل پلاستیک شدید³ است. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید از جمله روش‌های تولید مواد نانو ساختار است که در دو

مواد نانو ساختار به موادی گفته می‌شود که ابعاد ظاهری آن‌ها به‌صورت بالک است، ولی ساختار تشکیل‌دهنده آن‌ها در ابعاد نانو قرار دارد. مواد نانو ساختار با دو رویکرد اصلی «بالا به پایین»¹ و «پایین به بالا»² ساخته می‌شوند. در رویکرد اول، منظور تغییر ساختار اندازه ماده و رساندن آن به ابعاد نانومتری

3- Severe Plastic Deformation (SPD)

1- Top – Down
2- Bottom – Up

تنش تسلیم با کاهش ریشه مربع اندازه دانه افزایش می‌یابد. کاهش اندازه دانه‌ها منجر به استحکام کششی بالاتر بدون کاهش چقرمگی می‌شود که با روش‌های تقویتی دیگر مانند عملیات حرارتی متفاوت است.

3-1- پیشینه روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید

روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید را، با توجه به هندسه محصول این فرآیند، می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود. این سه دسته شامل تغییر شکل شدید مواد بالک، ورق و تغییر شکل شدید لوله‌هاست. اگرچه این فرآیندها از نظر ماهیت تغییرات ریزساختاری تفاوت چندانی با همدیگر ندارند و همگی دچار تغییر شکل پلاستیک شدید می‌شوند، اما از نظر نحوه توزیع میدان‌های تنش و کرنش در فلز تحت تغییر شکل متفاوت خواهند بود. شکل 1 دسته‌بندی کلی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید را نشان می‌دهد.

2- فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای لوله‌ها

روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای لوله‌ها از جمله روش‌های نسبتاً جدید است و قدمت کمتری نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید دارد. اولین روش تغییر شکل پلاستیک شدید که مناسب برای تولید لوله‌های فوق ریزدانه و نانو ساختار است، توسط توت و همکارانش، در سال 2009 ارائه شده و موسوم به روش پیچش لوله فشار بالا^[5] است.

فرآیند بعدی فرآیند اسپینینگ اتصالی⁴ است. این فرآیند در سال 2010 توسط محبی و اکبرزاده [6] از دانشگاه صنعتی شریف ارائه شده است. از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات کریمی [7]، بروغنی [8] و عطایی [9] اشاره کرد. روش دیگری توسط دکتر فرجی و همکارانش [10] با نام روش فشردن در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی⁵ ارائه شده است. این روش جزو یکی از کارآمدترین فرآیندهای اصلی تغییر شکل پلاستیک شدید و روش مورد بررسی در این پژوهش است. تصویر این فرآیند در شکل 2 آورده شده است.

یکی از نکات قابل توجه در تمامی روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید عدم تغییر ابعاد اولیه قطعه است که این موضوع، علاوه بر نانو ساختار کردن و بهبود خواص ماده، از ویژگی‌های منحصر به فرد روش تغییر شکل پلاستیک شدید است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این قالب از دو سنبه استوانه‌ای شکل توخالی و یک ماندل و قالب خارجی تشکیل شده است. لوله اولیه با اندازه دانه معمولی در ابتدای فرآیند در فضای خالی مابین ماندل و قالب قرار داده می‌شود. در این مرحله فرآیند، لوله اولیه توسط سنبه استوانه‌ای توخالی

دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این فرآیندها، که با توجه به شکل محصول آن دسته‌بندی می‌شوند، در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به فلز، باعث تغییرات ریزساختاری در آن شده و ساختار ماده را تا حد نانومتری تغییر می‌دهند.

2-1- تغییر شکل پلاستیک و تغییر شکل پلاستیک شدید

هنگامی که یک فلز تغییر شکل می‌دهد، بسته به مقدار نیروی وارد شده، این تغییر می‌تواند به دو صورت در فلز اتفاق بیفتد: تغییر شکل الاستیک و یا تغییر شکل الاستیک به اضافه تغییر شکل پلاستیک. تغییر شکل الاستیک آن قسمت از تغییر شکل است که قابل بازگشت است و حالت فنری داشته و در صورتی که بار اعمالی برداشته شود، فلز تغییر شکل یافته به حالت اول باز می‌گردد. در این نوع تغییر شکل، کرنشی که به فلز وارد می‌شود متناسب با مقدار تنش وارد شده است؛ به این معنی که رابطه بین تنش و کرنش اعمالی به صورت خطی است و به شیب این خط، مدول الاستیک (E) گفته می‌شود [2]. این رابطه را می‌توان با قانون فنر (قانون هوک) معادل در نظر گرفت.

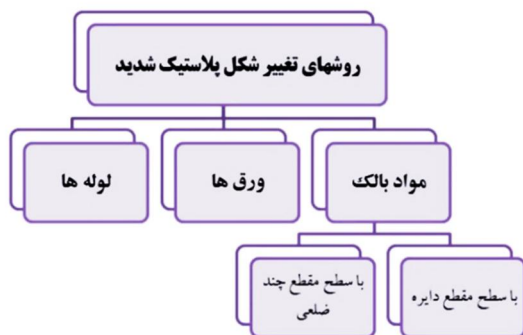
هنگامی که تنش اعمالی به فلز از حد محدوده الاستیک فراتر رود، فرآیند تغییر شکل وارد محدوده پلاستیک می‌شود [3]. تغییر شکل پلاستیک، که در ادامه تغییر شکل الاستیک می‌آید، یک فرآیند غیر قابل بازگشت است و تغییر شکل دائمی محسوب می‌شود. هنگامی که یک فلز در دماهای نه‌چندان بالا تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد، ساختار درونی فلز شروع به مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتر می‌کند؛ در نتیجه برای ادامه تغییر شکل، باید مقدار تنش بیشتری اعمال نمود. به این حالت ایجاد شده در فلز کار سختی و یا کرنش سختی¹ گفته می‌شود. در واقع، کار سختی باعث افزایش استحکام و سختی فلز در اثر تغییر شکل می‌شود [4]. در مقابل این افزایش استحکام، فلز داکتیلیته² خود را از دست می‌دهد و قابلیت تغییر شکل آن پایین می‌آید. بنابراین، این محدودیت باعث می‌شود که افزایش استحکام بیشتر فلز توسط اعمال کار مکانیکی محدود شود، چرا که باعث شکست ماده خواهد شد.

تغییر شکل شدید، در واقع مجموعه روش‌هایی است که طی آن می‌توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به فلز اعمال نمود، بدون اینکه فلز دچار شکست و ترک‌خوردگی شود. نکته جالب توجه در روش تغییر شکل پلاستیک شدید این است که نه تنها موجب افزایش استحکام فلز می‌شود، بلکه در بسیاری از موارد افت داکتیلیته حذف شده و گاهی افزایش نرمی نیز مشاهده می‌شود. این موضوع دقیقاً وجه تمایز این روش با سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک است، که علت این ویژگی خاص را باید در ساختار نانو ایجاد شده در فلز توسط روش تغییر شکل پلاستیک شدید جستجو نمود.

فلزات فوق ریزدانه ایجاد شده توسط فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. در نتیجه ممکن است از آن‌ها به عنوان فلزات مقاومت بالا هماهنگ با محیط زیست استفاده شود. ارتباط بین تنش تسلیم فلزات پلی کریستالی با قطر دانه توسط معادله پتچ-هال (معادله (1)) نشان داده می‌شود:

$$\sigma_Y = \sigma_0 + A d^{-1/2} \quad (1)$$

که در آن σ_0 تنش اصطکاکی و A یک ثابت است. با توجه به معادله (1)



شکل 1 دسته بندی روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید براساس شکل محصول

3- High Pressure Tube Twisting (HPTT)

4- Accumulative spin-bonding

5- Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP)

1- Work hardening or Strain hardening

2- Ductility

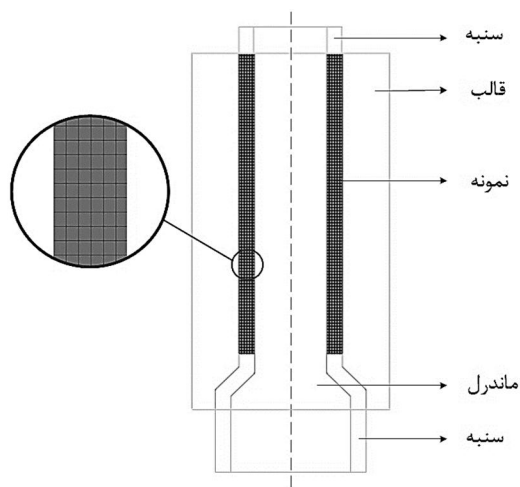
- قطعات قالب کاملاً صلب فرض شده و در حین تغییر شکل ثابت می‌مانند.
- ماده اولیه کاملاً ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است، زیرا مواد اولیه مورد استفاده کاملاً آنیل می‌شوند.
- ضریب اصطکاک در سرتاسر مدل یکنواخت است.

اصطکاک بین لوله و قالب‌ها اصطکاک کولمبی و روش پنهالتی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مقدار ضریب اصطکاک یکی از پارامترهای مورد بررسی است، لذا ضرایب اصطکاک مختلفی در مدل‌سازی مد نظر بوده است. اندازه المان‌ها پس از بررسی حساسیت برابر $0/3$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه ابعاد لوله در تمام مدل‌سازی‌ها یکسان در نظر گرفته شده، تعداد المان‌های لوله برابر 600 المان است. شکل 3 نمونه‌ای از مدل ساخته شده شامل لوله مش‌بندی شده را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بالای کرنش‌ها و تغییر شکل‌های زیاد در حین شبیه‌سازی فرآیند، برای تسهیل همگرایی از روش مش‌بندی تطبیقی⁴ یا مش‌بندی مجدد اتوماتیک⁵ استفاده شد. لوله‌ها از جنس مس آنیل شده در نظر گرفته شده‌اند و تمام قطعات قالب‌ها به‌عنوان قطعات صلب از نوع تحلیلی هستند. جدول 1 خواص الاستیک و پلاستیک مس آنیل شده (C10100) را نشان می‌دهد. این مقادیر براساس پارامترهای استاندارد برای مس‌ها آورده شده‌اند. [11]

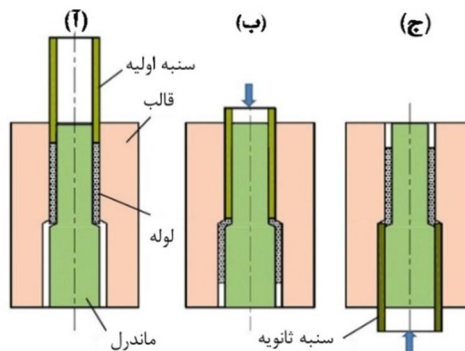
بیش از 160 مدل ساخته شده و نتایج مربوطه استخراج شده‌اند. زمان محاسبات هر شبیه‌سازی از حدود 1 تا 4 ساعت، بسته به پارامترهای مدل و پارامترهای شبیه‌سازی، متغیر است. شبیه‌سازی فرآیند در مقیاس زمانی $0/3$ ثانیه انجام گرفته که برای مدل‌سازی یک فرآیند شبه استاتیکی به‌اندازه کافی

جدول 1 خواص الاستیک و پلاستیک مس آنیل شده

پارامتر	مقدار
تنش نهایی (MPa)	242
تنش تسلیم (MPa)	69
ضریب پواسون	0/33
مدول الاستیسیته (GPa)	117
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	8940



شکل 3 نمونه‌ای از مدل ساخته شده شامل لوله مش‌بندی شده



شکل 2 مراحل مختلف فرآیند فشردن در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی [10]

اول به داخل کانال‌های زاویه‌دار موازی با دو ناحیه برشی هم محور اکستروژد می‌شود و قطر لوله اولیه تا مقدار ماکزیمم طراحی شده خود افزایش می‌یابد. در مرحله دوم فرآیند لوله مجدداً توسط سنبه استوانه‌ای توخالی دوم به داخل کانال‌های زاویه‌دار موازی با همان نواحی برشی اکستروژد می‌شود. مقطع لوله در این مرحله به‌اندازه اولیه بازگردانده می‌شود. با اعمال کرنش‌های برشی شدید در دو مرحله اندازه دانه فلز شدیداً کاهش پیدا می‌کند. این فرآیند می‌تواند به دفعات تکرار شود تا اندازه دانه لوله به مقدار مورد نیاز جهت تولید لوله فوق ریزدانه و نانو ساختار کاهش یابد.

در ادامه، به نحوه مدل‌سازی قالب و همچنین تأثیر پارامترهای مختلف و مؤثر در آن پرداخته می‌شود. از روش‌های اجزاء محدود بهره گرفته شده است و با استفاده از این روش، مقادیر کرنش اعمالی، همگنی کرنش و نیروی مورد نیاز در فرآیند برای پارامترهای مختلف محاسبه شده است. همچنین، تأثیر پارامترهای فرآیند به‌صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

2-1- مدل‌سازی قالب با استفاده از روش اجزاء محدود

روش اجزاء محدود برای محاسبه نیروی مورد نیاز، مقدار کرنش و توزیع کرنش مورد استفاده قرار گرفته و جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار اباکوس استفاده شده است. با روش اجزاء محدود بررسی پارامتریک برای تعیین تأثیر پارامترهای مختلف از جمله نسبت شعاع‌ها، زوایای گوشه‌ها، شکل کانال، زوایای انحناء و ضریب اصطکاک و همچنین روش مورد استفاده روی مقدار و توزیع کرنش، همگنی کرنش و نیروی مورد نیاز انجام گرفته است.

در تمامی مدل‌های ساخته شده از مدل‌سازی دو بُعدی هم‌محور¹ با المان‌های چهار گره² استفاده شده است. به دلیل اینکه تغییر شکل‌ها به صورت هم‌محورند، در روند بارگذاری قید حرکتی برای سنبه در نظر گرفته شده است که در جهت محور قائم اعمال می‌شود. در نمودار بارگذاری، پیشروی محوری به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. زمان $0/15$ ثانیه برای یک نیم‌پاس در نظر گرفته شده است. مدل شامل 4 قطعه است که لوله از نوع تغییر شکل‌پذیر و بقیه شامل ماندرل، قالب خارجی و سنبه استوانه‌ای توخالی به‌صورت صلب تحلیلی³ فرض شده‌اند. ماندرل و قالب خارجی با اعمال قید ثابت شده و پیشروی به سنبه استوانه‌ای توخالی اعمال می‌شود.

در مدل‌سازی فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- ضخامت اولیه لوله در همه جا یکنواخت است و برابر $2/5$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

1- Axisymmetric
2- CAX4R
3- Analytical rigid

4- Adaptive meshing
5- Automatic remeshing

4- بررسی اثرات پارامترهای مؤثر در قالب

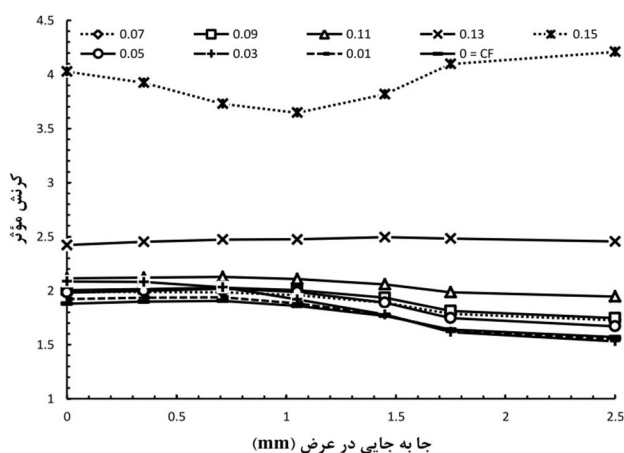
پس از اطمینان از صحت و دقت مدل اجزا محدود، تأثیر پارامترهای مختلف شامل زاویه کانال‌ها، زاویه انحناء گوشه‌ها و نسبت شعاع‌ها را بر مقدار و همگنی کرنش مؤثر و نیروی مورد نیاز فرآیند مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

4-1- بررسی تأثیر ضریب اصطکاک

کانتورهای کرنش پلاستیک میانگین حین تغییر شکل در فرآیند مورد نظر با ضرایب اصطکاک¹ مختلف در شکل 6 نشان داده شده است. جدول 2 مقادیر فرض شده برای این قالب‌هاست. در تمامی ضرایب اصطکاک، کرنش مؤثر پلاستیک در ناحیه سطح خارجی لوله کمتر از سایر نواحی است، به جز در دو حالت که ضریب اصطکاک برابر 0/13 و 0/15 است.

میزان کرنش پلاستیک محاسبه شده با استفاده از رابطه تحلیل تئوری نیز قابل محاسبه است که در اینجا برابر 1/9829 است و در شکل 7 به صورت خط افقی نشان داده شده است.

نمودارهای کرنش حاصل از روش اجزاء محدود به‌ازای ضرایب اصطکاک مختلف روند مشابهی دارند و در آن‌ها مقدار کرنش‌ها از سطح داخلی به بیرونی لوله کاهش می‌یابد. نکته‌ای که می‌توان به آن توجه کرد این است که نمودار کرنش با ضرایب اصطکاک مختلف در فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار، که توسط ناگاسکار² و همکارانش نشان داده شده است [13]، روند متفاوتی نسبت به فرآیند کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی نشان می‌دهد. کرنش بیشینه در راستای ضخامت در سطح داخلی لوله و کمینه آن در سطح بیرونی آن اتفاق می‌افتد. در سطح خارجی لوله، مقدار کرنش پلاستیک با افزایش ضریب



شکل 6 نمودار کرنش پلاستیک مؤثر با ضرایب اصطکاک مختلف

جدول 2 پارامترهای مفروض در بررسی تأثیر ضریب اصطکاک

پارامتر	مقدار
ضرایب اصطکاک	0/01 و 0/03 و 0/05 و 0/07 و 0/09 و 0/11 و 0/13 و 0/15
قطر لوله اولیه	20 میلی‌متر
ضخامت لوله	2/5 میلی‌متر
نسبت شعاع‌ها	2/5
زاویه انحناء	20 درجه
زاویه کانال	135 درجه

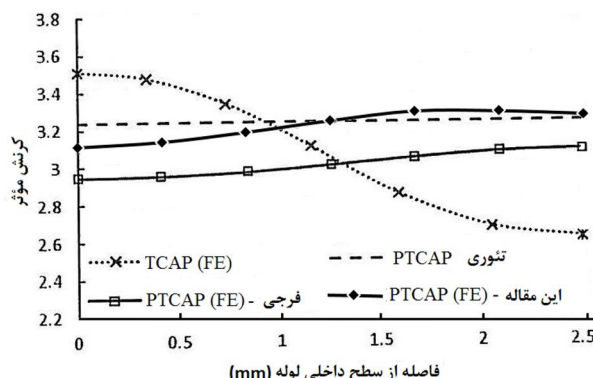
1- Friction coefficient (FC)
2- Nagaskhar

بزرگ است. همان‌طور که در تئوری حل صریح اشاره شده، هرگاه انرژی جنبشی کمتر از پنج درصد انرژی کرنشی باشد، مدل‌سازی فرآیند شبه استاتیکی است.

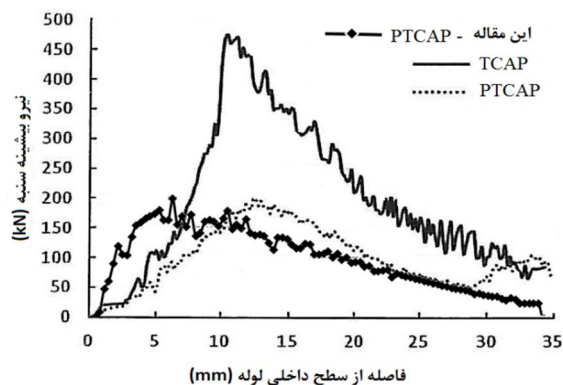
3- صحت‌سنجی و بررسی نتایج

جهت اطمینان از صحت و دقت مدل اجزا محدود به‌کار رفته در پژوهش، دو کمیت مقدار نیرو و همگنی کرنش مؤثر، به‌عنوان مهمترین پارامترهای تأثیرگذار، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل اجزا محدود مدل به‌کار رفته در این مقاله با نتایج مدل ارائه شده در رساله دکترای آقای قادر فرجی [12] مورد مقایسه قرار گرفته است. هر دو قالب از نوع PTCAP بوده و پارامترهای طراحی قالب شامل زوایای کانال‌ها، زوایای انحناء، نسبت شعاع‌های کانال و ضریب اصطکاک یکسان است. نمودار مقادیر کرنش مؤثر در راستای ضخامت لوله‌ها در هر دو مدل در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین، نمودار نیرو در ازای جابه‌جایی نیز برای این دو حالت در شکل 5 نشان داده شده است.

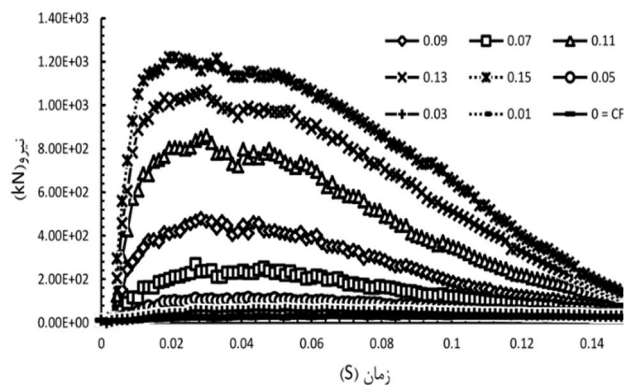
با مقایسه نتایج نمودارها، می‌توان انطباق قابل قبولی میان مدل اجزا محدود به‌کار رفته در این مقاله و نتایج آقای فرجی مشاهده نمود. شرایط اولیه و مرزی هر دو مدل یکسان بوده و از دلایل اختلاف جزئی میان نمودارها می‌توان به تفاوت در نوع و تعداد المان‌ها اشاره نمود. پس از اطمینان از صحت مدل اجزا محدود، می‌توان ادعا نمود که مراحل بعدی پژوهش شامل ایجاد شبکه عصبی مصنوعی مدل اجزا محدود و بهینه‌سازی قالب توسط الگوریتم‌های فرا اکتشافی نتایج قابل استناد ارائه خواهند داد که این کار طی مقالات جداگانه انجام گرفته است.



شکل 4 نمودار مقایسه مقدار کرنش در راستای ضخامت لوله در فرآیند PTCAP، برای مدل اجزا محدود این مقاله و آقای فرجی



شکل 5 نمودار مقایسه نیرو-جابه‌جایی در فرآیند PTCAP، برای مدل اجزا محدود این مقاله و آقای فرجی

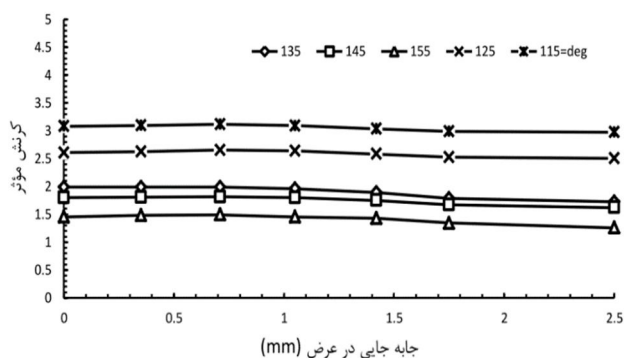


شکل 8 نمودار نیرو-زمان فرآیند شکل‌دهی مذکور به ازای ضرایب اصطکاک مختلف

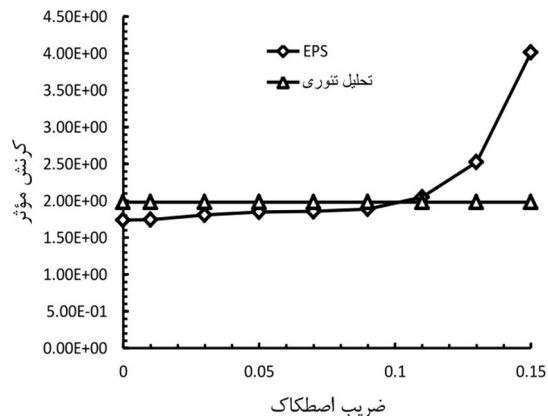
می‌شود. در زاویه 115 درجه مقدار این نازک‌شدگی کمترین مقدار را داراست. به نظر می‌رسد، به دلیل وجود فشار پشتی بیشتر، در این مورد بخشی از نازک‌شدگی جبران می‌شود. لذا، طول ناحیه غیرقابل استفاده کمتر می‌شود. به هر حال، نازک‌شدگی در نیم پاس بعدی، به دلیل اعمال کرنش‌های محیطی فشاری جبران می‌شود و تقریباً در تمامی حالت‌ها لوله بعد از هر پاس کامل به اندازه اولیه باز می‌گردد. فقط در مورد زاویه 115 درجه انتهای دنباله‌ای لوله باز هم شکل مناسبی ندارد و مقداری از طول لوله فاقد قابلیت استفاده است. با افزایش زاویه انتهای دنباله‌ای لوله به شکل اولیه نزدیک‌تر می‌شود. مقدار نازک‌شدگی در زاویه 155 درجه بیشترین مقدار و در زاویه 115 درجه کمترین مقدار است. شکل 9 نمودار کرنش مؤثر را در راستای ضخامت لوله برای زوایای مختلف کانال نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه کانال مقدار کرنش مؤثر کاهش می‌یابد. تا زاویه 135 درجه مقدار کرنش در سطح داخلی لوله مقدار ناچیزی بیشتر از مقدار کرنش در سطح خارجی است. در زوایای بیش از 135 درجه این روند تغییر می‌کند و اختلاف کرنش بین ناحیه داخلی و خارجی بیشتر می‌شود. شاید تشکیل فضای خالی گوشه دوم کوچک‌تر در زوایای بالای 135 درجه بتواند دلیل این امر باشد. شکل 10 تأثیر زاویه کانال بر نمودار نیرو-زمان را نشان می‌دهد. افزایش زاویه کانال باعث کاهش نیروی مورد نیاز فرآیند می‌شود. لذا، به لحاظ تجهیزات مورد نیاز و هزینه فرآیند انتخاب زوایای بیشتر مطلوب‌تر است. همچنین، در این نمودارها مقدار نیرو در بخش انتهایی کاهش می‌یابد. دلیل آن نیز می‌تواند مباحث مربوط به نیروی اصطکاک، که در قسمت قبل توضیح داده شد، باشد.

4-3- بررسی تأثیر نسبت شعاع

جهت بررسی تأثیر شعاع‌ها در روش فشردن در کانال زاویه دار لوله‌ای موازی،



شکل 9 نمودار کرنش مؤثر در راستای ضخامت لوله به ازای زوایای مختلف کانال



شکل 7 تاثیر ضریب اصطکاک بر مقدار کرنش مؤثر حاصل از روش اجزا محدود در

مقایسه با مقدار تئوری

اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که مقدار میانگین کرنش حاصل از روش اجزا محدود تقریباً با اختلاف اندکی بر مقدار حاصل از تحلیل تئوری منطبق است. از دلایل اختلاف مقدار تئوری با نمودارهای حاصل از اجزا محدود این است که در تحلیل‌های تئوری هنگام محاسبه کرنش از تأثیرات اصطکاک و رفتار ماده صرف‌نظر شده است. لذا، کرنش مؤثر پلاستیک تئوری به صورت خط افقی نمایش داده می‌شود.

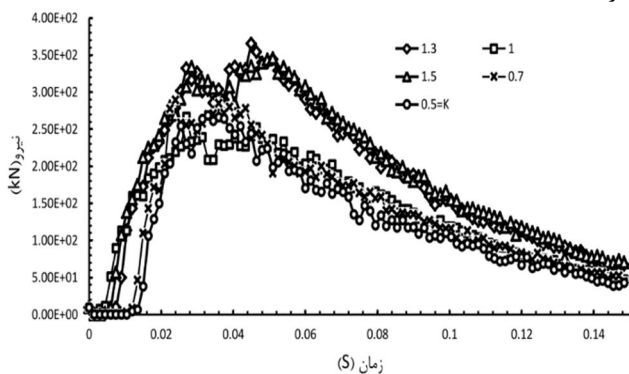
شکل 8 نمودارهای نیرو-زمان در فرآیند مذکور را به ازای ضرایب اصطکاک مختلف نشان می‌دهد. نیروی مورد نیاز با افزایش ضریب اصطکاک، به دلیل انرژی تلف شده اضافی در سطوح تماس قالب و قطعه کار، افزایش می‌یابد [14]. مشاهده می‌شود که نمودارهای نیرو-زمان در ناحیه انتهایی به مقدار مشخصی همگرا می‌شوند. اگر فرض کنیم اصطکاک میان لوله و قالب از نوع کولمبی باشد، نیروی اصطکاک به ضریب اصطکاک و نیروی عمودی وابسته است. همچنین، اگر لوله را به دو بخش قبل و بعد از گوشه (ناحیه تغییر قطر) تقسیم کنیم، فشار هیدرواستاتیک در ناحیه قبل بیشتر خواهد بود، در حالی که مقدار آن در بخش بعد از گوشه اول تمایل به صفر شدن دارد. بدین معنی که نیروی عمودی در بخش قبل از گوشه اول بالاتر است و در بخش بعد تقریباً صفر است. با پیشرفت فرآیند، طول لوله در بخش قبل از گوشه اول کاهش می‌یابد و از آنجا که طول کلی لوله ثابت است، طول لوله در بخش بعدی افزایش می‌یابد. این موضوع بدین معنی است که نیروی عمودی با پیشرفت فرآیند کاهش می‌یابد و در نتیجه با فرض ضریب اصطکاک ثابت نیروی اصطکاک، که بخش مهمی از نیروی کل است، کاهش می‌یابد. در نتیجه نیروی کل در تمامی نمودارها کاهش یافته و همگرا می‌شود. نکته دیگر این است که نسبت نیروی اصطکاک به نیروی کل در ضرایب اصطکاک بیشتر، بالاتر است. لذا، مقدار کاهش نیرو، در نمودارهای مربوط به ضرایب اصطکاک بیشتر، سریع‌تر از سایر نمودارهاست. تأثیر ضریب اصطکاک بر نیروی مورد نیاز در فرآیند شکل‌دهی در شکل 8 نشان داده شده است. با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی بیشینه مورد نیاز برای عبور دادن لوله از قالب افزایش می‌یابد.

4-2- بررسی تأثیر زاویه کانال‌ها

جهت بررسی تأثیر زاویه کانال در فرآیند شکل‌دهی مورد نظر، 5 زاویه مختلف در نظر گرفته شده است. با افزایش زاویه کانال، سطح کرنش اعمال شده در انتهای هر دو نیم پاس کاهش می‌یابد. در انتهای نیم پاس اول، مقداری نازک‌شدگی در اثر کرنش‌های محیطی کششی در اثر افزایش قطر مشاهده

ضخامت و همچنین بیشتر از $1/3$ ضخامت، تقریباً، بهترین و مقدار K برابر با ضخامت، یعنی 1 ، بدترین همگنی کرنش را نشان می‌دهند. شکل 12 تأثیر مقدار K بر نمودار نیرو-زمان را نشان می‌دهد. تمام نمودارها روند تقریباً مشابهی دارند و اختلاف در موقعیت نیروی حداکثر به‌خاطر افزایش طول مسیر طی شده لوله بین دو گوشه قالب در مقادیر K بیشتر است و باعث کشیده شدن نمودار به سمت راست می‌شود. از روی نمودار حداکثر می‌توان دریافت که تقریباً با افزایش K نیروی بیشینه افزایش می‌یابد. لذا، در این موقعیت با در نظر گرفتن همگنی کرنش و حداکثر نیرو می‌توان به این جمع‌بندی رسید که انتخاب مقدار K کمتر از $0/7$ ضخامت و بیشتر از $1/3$ ضخامت بهترین انتخاب، به لحاظ نیروی کم و همگنی کرنش زیاد، است.

مشاهده می‌شود که تغییر زاویه انحناء تأثیری چندان محسوس بر مقدار کرنش در سطح داخلی لوله ندارد و افزایش زاویه انحناء باعث کاهش مقدار کرنش مؤثر در سطح بیرونی لوله می‌شود. این بدین معنی است که همگنی کرنش با افزایش زاویه انحناء کاهش می‌یابد. شکل 13 تغییرات کرنش مؤثر میانگین و ضریب ناهمگنی کرنش را بر حسب تغییر زاویه انحناء قالب نشان می‌دهد. مقدار کرنش میانگین با افزایش زاویه انحناء تا 20 درجه کاهش می‌یابد، ولی افزایش بیش از آن تقریباً تأثیری ندارد. ضریب ناهمگنی کرنش با افزایش زاویه انحناء تا 20 درجه افزایش یافته، ولی افزایش بیش از آن تقریباً بی‌تأثیر است. این بدین معنی است که همگنی کرنش در زوایای انحناء کمتر بهتر است. شکل 14 تأثیر زاویه انحناء را بر نمودار نیرو-زمان فرآیند نشان می‌دهد. مقایسه نمودارهای مربوط به زوایای مختلف انحناء نشان می‌دهد که تغییر زاویه انحناء در انتخاب زاویه مناسب طراحی تأثیرگذار نیست. لذا، تنها عامل مؤثر همگنی کرنش است و از این دیدگاه انتخاب زاویه کم، نزدیک به صفر، مناسب است.



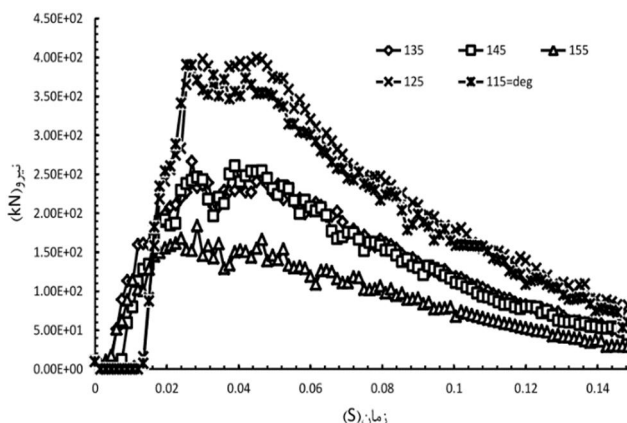
شکل 12 تأثیر مقدار K بر نمودار نیرو-زمان

جدول 4 پارامترهای فرض شده برای بررسی تأثیر زاویه انحناء

مقدار	پارامتر
35 و 25 و 20 و 15 و 5	زوایای انحناء
20 میلی‌متر	قطر لوله اولیه
2/5 میلی‌متر	ضخامت لوله
0/07	ضریب اصطکاک
2/5	نسبت شعاع‌ها
135 درجه	زاویه کانال

نسبت شعاع‌های اولیه و نهایی لوله را با پارامتر $K = R_2 - R_1$ نشان می‌دهیم. مقدار K را به‌عنوان نسبتی از ضخامت در نظر می‌گیریم. در این قسمت، پارامترهای طراحی مطابق جدول 3 هستند که در آن فقط مقدار K متغیر است. شکل 11 تأثیر مقدار K بر مقدار کرنش در راستای ضخامت لوله تحت فرآیند را نشان می‌دهد.

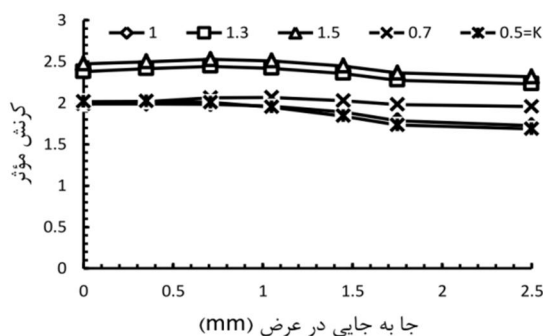
افزایش مقدار K و به‌عبارتی افزایش مقدار نسبت شعاع‌ها باعث افزایش مقدار کرنش مؤثر می‌شود. این افزایش نه به‌خاطر کرنش برشی اعمالی در گوشه‌ها، بلکه به‌خاطر افزایش مقدار کرنش عمودی در اثر افزایش قطر لوله است. مقدار کرنش مؤثر میانگین تقریباً به‌صورت خطی با افزایش مقدار K افزایش می‌یابد. از آنجایی که کرنش مؤثر کل شامل مؤلفه‌های برشی حاصل از گوشه‌ها و عمودی حاصل از افزایش قطر است، دلیل افزایش با روند خطی نیز به افزایش سهم کرنش عمودی از مقدار کل کرنش مؤثر برمی‌گردد. همچنین، با توجه به شکل، روند مشخصی برای نمودار تأثیر مقدار K بر ضریب ناهمگنی کرنش مشاهده نمی‌شود، ولی مقدار K کمی کمتر از $0/7$



شکل 10 تأثیر زاویه کانال بر نمودار نیرو-زمان فرآیند شکل‌دهی مذکور

جدول 3 پارامترهای فرض شده برای بررسی تأثیر نسبت شعاع

مقدار	پارامتر
1/5 و 1/3 و 0/7 و 0/5	نسبت شعاع‌ها \times ضخامت
20 میلی‌متر	قطر لوله اولیه
2/5 میلی‌متر	ضخامت لوله
0/07	ضریب اصطکاک
20 درجه	زاویه انحناء
135 درجه	زاویه کانال



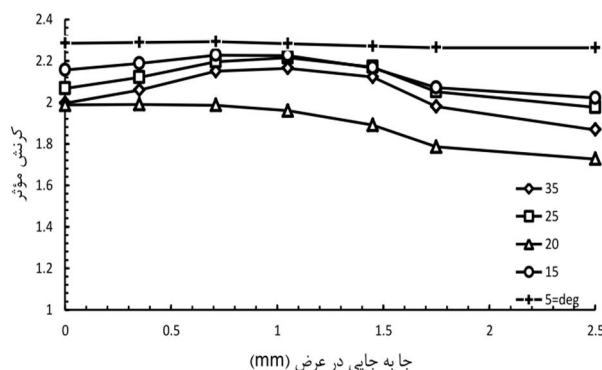
شکل 11 تأثیر مقدار K بر مقدار کرنش در راستای ضخامت لوله

مقایسه با سایر فرآیندها به میزان محسوسی کاهش می‌یابد.

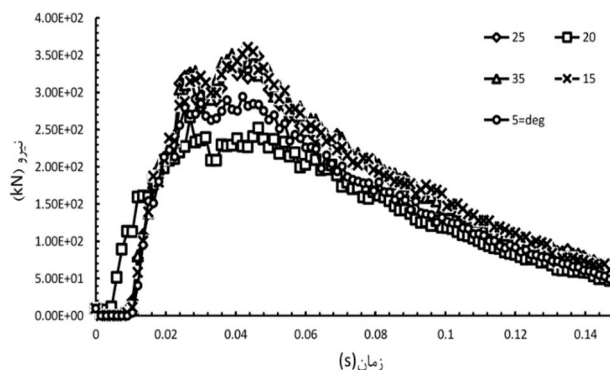
- همگنی کرنش در فرآیند فشار در کانال‌های زاویه‌دار لوله‌ای موازی در مقایسه با سایر فرآیندها بسیار بهتر است.
- افزایش زاویه کانال در روش فشار در کانال‌های زاویه‌دار لوله‌ای موازی باعث کاهش کرنش اعمالی در انتهای هر دو نیم سیکل فرآیند می‌شود.
- افزایش انحناء باعث کاهش همگنی کرنش می‌شود. لذا، توصیه می‌شود زاویه انحناء هرچه کمتر نزدیک به صفر در نظر گرفته شود.
- از دیدگاه نیروی مورد نیاز کمتر و همگنی کرنش بهتر، زاویه انحناء صفر بهترین انتخاب است، اما، با توجه به نتایج به‌دست آمده و شرایط ساخت، کمی انحناء لازم است. چنانچه در جواب‌های حاصل از بهینه‌سازی این میزان حدوداً 5 درجه بود.
- بررسی نسبت شعاع، که با پارامتر K نشان داده می‌شود، نشان داد که بهترین همگنی کرنش مربوط به مقادیر K کمتر از 0/7 ضخامت و برای بدترین حالت برابر 1 ضخامت است. البته این نکته باید اشاره شود که در K های بزرگ‌تر از 1/3 ضخامت هم نتایج مشابه و مطلوبی به‌دست آمد.

6- مراجع

- [1] R. Z. Valiev, T. G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, Vol. 51, pp. 881-981, 2006.
- [2] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7th Edition, USA: Wiley, 2007.
- [3] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd Edition, USA: McGraw Hill, 1986.
- [4] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 4th Edition, USA: Cambridge University Press, 2011.
- [5] L. Toth, M. Arzaghi, J. Fundenberger, B. Beausir, O. Bouaziz, R. Arruffatmassion, Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting, *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 175-177, 2009.
- [6] 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, pp. 180-188, 2010.
- [7] G. Karimi, A. Bakhtiari, A. Keshavarz, Modeling and multiobjective optimization of twist extrusion process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 60-73, 2013.
- [8] P. Kahhal, S. Y. Ahmadi Brooghani, H. D. Azodi, Multi-objective optimization of sheet metal forming die using FEA coupled with RSM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 47-57, 2013.
- [9] H. M. Najafabadi, A. A. Atai, M. Sharififar, Numerical and Experimental Investigation of Incremental Sheet Metal Forming Parameters and Multi-objective Optimization Using Neural-genetic Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 167-174, 2014.
- [10] 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, pp. 82-85, 2012.
- [11] F. matoofi, *Key to Nonferrous Materials*, Tehran: Fadak Isatis Publication, 2007.
- [12] Gh. Faraji, *Development of tubular channel angular pressing process for fabrication of UFG and Nano-Structured tubes with analysis and experiments*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, 2012.
- [13] A. V. Nagasekhar, S. C. Yoon, Y. Tick-Hon, H. S. Kim, An experimental verification of the finite element modelling of equal channel angular pressing, *Computational Materials Science*, Vol. 46, No. 2, pp. 347-351, August 2009.
- [14] Z. C. Wang, P. B. Prangnell, Microstructure refinement and mechanical properties of severely deformed Al-Mg-Li alloys, *Materials Science and Engineering*, Vol. 328, No. 1, pp. 87-97 A, May 2002.



شکل 13 تأثیر زاویه انحناء بر مقدار کرنش در راستای ضخامت لوله



شکل 14 تأثیر زاویه انحناء بر نمودار نیرو- جا به جایی

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مواد فلزی چندکریستالی، با ریزساختار فوق ریزدانه و نانو، دارای خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای در مقایسه با فلزات چندکریستالی معمولی هستند. روش‌های نسبتاً زیادی جهت تولید مواد فلزی بالکی شکل تا به حال ارائه شده است. روش‌های ارائه شده دارای معایبی مانند قابلیت صنعتی پایین، هزینه بالا، کیفیت پایین قطعات و نیاز به تجهیزات پیچیده هستند. پارامترهای مختلفی در روش فشار در کانال‌های زاویه‌دار لوله‌ای موازی مؤثرند. در این فرآیند زوایای کانال‌ها، زوایای انحناء گوشه‌ها، نسبت تغییر شکل، ضرایب اصطکاک و تعداد پاس از پارامترهای مهم مربوط به طراحی قالب هستند. دیگر پارامترهای فرآیندی شامل تعداد پاس، جنس لوله، نرخ کرنش در این فرآیند ثابت فرض شده است. مطالعه عددی این روش و بررسی پارامترهای مؤثر در آن با استفاده از نرم‌افزار المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزاء محدود و تأثیر پارامترهای قالب ذکر می‌شود.

- ضریب اصطکاک تأثیر بسزایی بر نیروی مورد نیاز فرآیند دارد و تمام نمودارهای نیروی مربوط به تمامی ضرایب اصطکاک در انتهای فرآیند به مقدار نیروی مربوط به حالت بدون اصطکاک همگرا می‌شوند.
- نیروی مورد نیاز فرآیند فشار در کانال‌های زاویه‌دار لوله‌ای موازی در