

تحلیل عددی و تجربی شکل‌دهی لوله‌های مسی مستطیلی بوسیله غلتک کاری متوالی لوله مدور پر شده با بیسموت

علی بصیرت نیا^۱، محسن لوح موسوی^{۲*}

* نویسنده مسئول: Loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

شکل دهی غلتکی، لوله‌های مستطیلی، نوردهی سرد، شکل‌دهی مجدد لوله، روش اجزای محدود

ساخت لوله‌های مربعی و مستطیلی به دلیل کاربرد فراوان آنها در صنایعی که نیاز به فشار و درجه حرارت بالا دارند، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های مختلفی برای ساخت لوله‌های چهار گوش وجود دارد از جمله اکستروژن، کشش و فشار. روش دیگری که در سال‌های اخیر بر روی آن مطالعاتی صورت گرفته است، شکل‌دهی مجدد لوله‌های دوار و تبدیل آن به مقطع مربع و یا مستطیل است. در این تحقیقات روش‌هایی که پیشنهاد شده است همگی برای تولید لوله‌های مربعی کاربرد دارد و امکان تولید لوله‌های مستطیلی با استفاده از آن روش‌ها وجود ندارد. روشی که در این پژوهش معرفی می‌شود عبارت است از پر کردن لوله با بیسموت و غلتک کاری در سه مرحله متوالی. در این پژوهش ابتدا در نرم افزار Abaqus فرآیند مورد نظر شبیه‌سازی می‌شود و سپس توسط آزمون تجربی یک نمونه واقعی ساخته می‌شود. نمونه ساخته شده از لحاظ ابعادی مورد بررسی قرار می‌شود و با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مقایسه می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش پر کردن لوله توسط بیسموت و عبور از سه غلتک، روشی مناسب برای ساخت لوله‌های جدار نازک با مقطع مستطیل شکل است.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۱- مقدمه

لوله‌های چهار گوش به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شود. از سطح داخلی این لوله‌ها به عنوان مسیر حرکت سیال، مسیر هدایت امواج الکتریکی و یا به عنوان قالب انجامد استفاده می‌گردد. روش‌های مختلفی شامل اکستروژن، کشش و فشار (سرد و گرم) و فورج برای تهیه این لوله‌ها به کار می‌رود. یکی دیگر از این روش‌ها شکل‌دهی غلتکی لوله مدور و تبدیل آن به لوله چهار گوش می‌باشد. به وسیله این فرآیند می‌توان به محصولی با دقت ابعادی، خواص مکانیکی مانند سختی و استحکام بیشتر دست یافت به علاوه محصولات بدست آمده توسط این روش لوله‌های چهار گوش بدون درز است که از لوله گرد ریخته‌گری شده بدست می‌آیند. علی‌رغم قدمت و کاربرد روز افزون شکل‌دهی غلتکی سرد، تعداد کارهای عملی و تحقیقاتی انجام شده در این زمینه، خصوصاً شکل‌دهی مجدد لوله‌های گرد به غیر گرد، در مقایسه با سایر فرآیندهای شکل‌دهی فلزات کم است. پیش از این، روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی متفاوتی برای بررسی فرآیند شکل‌دهی غلتکی لوله انجام گردیده است که همگی به مقاطع مربعی و چند ضلعی‌های منظم پرداخته‌اند. نتایج بدست آمده برخی از این تحقیقات با اندازه‌گیری تجربی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

کیوچی [۲۱] تاثیر متغیرهای فرآیند و برنامه عبور لوله برای حالتی که در آن لوله دوار اولیه با جداره نازک به لوله ای با مقطع مربعی تبدیل می‌شود را در مورد فرآیند نورد غلتکی سرد به صورت آزمایشی و تقریبی مورد بررسی و تحقیق قرار داد. توزیع تغییر ضخامت دیواره در سطح مقطع لوله برای هر مرحله از فرآیند شکل‌دهی، تاثیرات نحوه عبور لوله از غلتک‌ها بر روی شعاع گوشه‌های سطح مقطع مربعی محصول و به دست آمدن حداقل شعاع گوشه‌ها مورد تحقیق قرار گرفت.

ون [۳] در مورد استفاده از طراحی‌های پیشرفته ابزار برای شکل‌دهی لوله گرد به لوله‌های مربعی بحث کرده است. با استفاده از این یک روش شبیه‌سازی عددی، مثل روش اجزا محدود، مقدار انقباض محیطی لوله را در این فرآیند محاسبه نموده و ابعاد گرد اولیه لوله را به دست آورده است. وی تاثیر پارامترهای مانند ابعاد لوله نهایی، مقدار تغییر شکل در هر مرحله، تعداد مراحل و... را بر روی گوشه‌های لوله بررسی کرده است.

اونادا و همکاران [۵ و ۴] ویژگی‌های تغییر شکل لوله‌های فولادی گرد که به وسیله فرآیند شکل‌دهی اکستروژن به لوله‌های مربعی تبدیل می‌شوند را با توجه با اندازه‌گیری‌های تجربی و نتایج محاسبه شده بوسیله روش اجزا محدود برای ماده صلب-پلاستیک مورد بحث قرار دادند.

بایومی [۶] یک روش تحلیلی برای تولید لوله‌های چند ضلعی منظم فلزی از لوله گرد به روش کشش سرد با عبور از درون یک مجموعه غلتک‌های تخت و در طی یک مرحله ارائه داد. این حل بر بدست آوردن یک میدان سرعت مجاز مبتنی است که شرایط دینامیکی برای ایجاد مؤلفه‌های نرخ کرنش را ارضا می‌کند. اثرات شکل مقطع خروجی، میزان اصطکاک در سطح تماس لوله و غلتک، شعاع غلتک و ضخامت دیواره بر روی میزان بار وارده بر غلتک‌ها و نیروی کشش مورد نیاز برای انجام فرآیند تحقیق شده است.

مسلمی نائینی [۷] یک شبیه‌سازی عددی جدید و ساده به نام FDM برای تحلیل دوبعدی تغییر شکل الاستیک-پلاستیک لوله در فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله گرد به لوله‌های گرد فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله‌های گرد به لوله‌های غیر گرد با استفاده از ترکیب روش اجزا محدود و روش تفاضل محدود تعیین کرد.

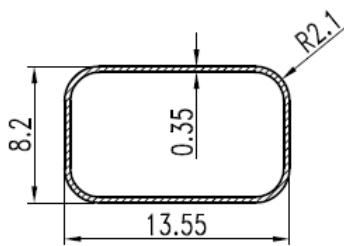
لئو [۸ و ۱۰] فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله‌های مربعی را با استفاده از چهار صفحه تخت انجام داد. در این

چهار گوش تحقیق کردند و به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف فرایند بر روی نیروی جداشونده در فرآیند شکل دهی مجدد به کمک روش اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS پرداختند.

هدف از انجام این تحقیق بررسی امکان تولید لوله مسی مستطیلی با استفاده از ماده پرکننده ای به نام بیسموت و سه مرحله غلتک کاری می باشد. روند طرح به این صورت است که داخل لوله مدور با استفاده از ماده بیسموت پر می شود و تغییر شکل آن بررسی می شود. در این پایان نامه از نرم افزار Abaqus برای شبیه سازی اجزای محدود استفاده گردیده و در نهایت توسط روش تجربی مقطع مورد نظر تولید می گردد و سپس به مقایسه نتایج بدست آمده پرداخته خواهد شد.

۲- شبیه سازی اجزای محدود

قطعه مورد بررسی عبارت است از یک پروفیل دو بعدی که در شکل (۱) نشان داده شده است. این لوله در ساخت ژنراتور استفاده می شود و وظیفه انتقال جریان برق را برعهده دارد و از طرفی جهت خنک شدن این لوله از داخل آن ها جریان هوای سرد عبور می کند. ابتدا فرآیند فوق در نرم افزار Abaqus شبیه سازی می شود که در شکل (۲) مونتاژ غلتک ها و لوله نمایش داده شده است و شکل (۳) غلتک های هر مرحله را نشان می دهد. در جدول (۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی مس و بیسموت آورده شده است. ضریب اصطکاک بین لوله و غلتک ها در سه حالت ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱) مقطع مورد بررسی

روش لوله گرد اولیه ابتدا گیره بندی شده و سپس چهار صفحه تخت به صورت تدریجی باعث تغییر شکل لوله گرد به حالت چهار گوش می شود. وی با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی پارامترهای موثر بر روی این فرآیند مانند ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی، نرخ هندسی (R/t) (بر روی عیوب تورفتگی دیواره ها در فرآیند چهار گوش کردن و تعیین نیروی شکل دهی پرداخت.

هوانگ و یانگ مینگ [۱۱] در تحقیقی دیگر به روش اجزاء محدود الاستو پلاستیک به بررسی تاثیر پارامترهایی همچون اصطکاک، نرخ هندسی، جنس لوله ها و میزان کاهش ارتفاع بر روی نیروی شکل دهی و حالت های خرابی پیش آمده در تبدیل لوله های چهار گوش از لوله گرد اولیه با استفاده از قالب های V شکل پرداخت.

بایومی و اتیا [۱۲] به بررسی و تعیین نیروهای شکل دهی و کشش در تبدیل لوله های گرد به لوله های چهار گوش به وسیله چهار صفحه پرداختند. این تحلیل به کمک یک روش تحلیلی و به کمک روش اجزای محدود در نرم افزارهای ABAQUS و LS-DYANA 3D انجام شده و به منظور تایید و مقایسه نتایج شبیه سازی و تحلیلی یک سری آزمایشات تجربی انجام است.

ابری نیا و فرهمند [۱۳] یک روش تحلیلی مبتنی بر تئوری حد بالا برای نورد لوله گرد و تبدیل آن به لوله مربعی ارائه نموده اند. تاثیر پارامترهای فرآیند مانند شعاع غلتک، قطر لوله اولیه، مقدار کاهش ارتفاع غلتکها بر روی محصول نورد شده مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه و تایید نتایج شبیه سازی یک سری آزمایشات تجربی انجام شده است. کمیت هایی همچون انرژی، ضخامت دیواره و شعاع گوشه های محصول نهایی اندازه گیری و ارائه شدند.

ابری نیا و تاجیار [۱۴] در مورد تاثیر پارامترهای مختلف بر روی نیروی جداشونده در شکل دهی مجدد لوله گرد به

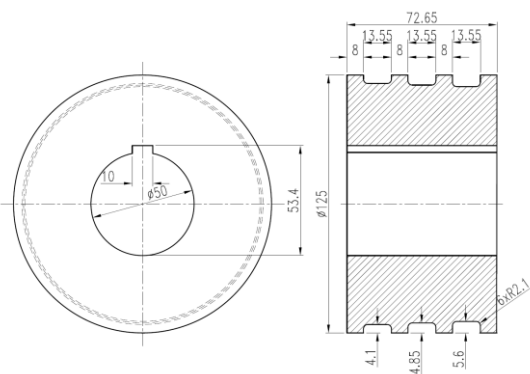
صورت می‌باشد که ابتدا بیسموت را که درجه ذوب آن حدود 70°C می‌باشد مذاب کرده و داخل لوله که یک سمت آن از قبل مسدود شده ریخته می‌شود و سه مرحله غلتک کاری صورت می‌گیرد. شکل (۴) ابعاد غلتک‌های ساخته شده نشان داده شده است که هر سه مرحله در یک غلتک ادغام گردیده است. شکل (۵) انجام آزمون تجربی را نشان می‌دهد.



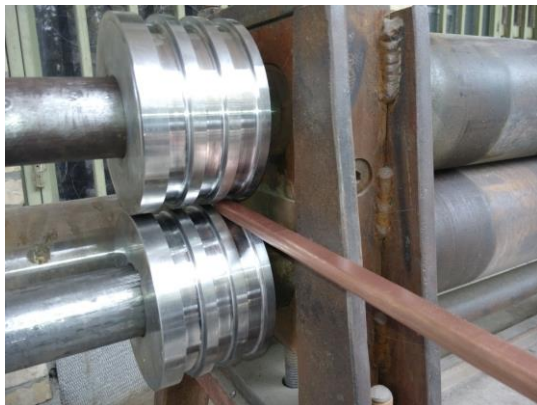
شکل (۲) مونتاژ غلتک‌ها و لوله در نرم افزار Abaqus

جدول (۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی مس و بیسموت

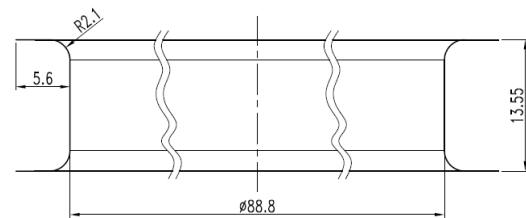
جنس	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیته (Gpa)	ضریب پواسان	تنش تسلیم (Mpa)
مس	۸۹۰۰	۱۱۷	۰/۳۴	۷۴
بیسموت	۹۵۹۰	۱۵	۰/۲۵	۲۵



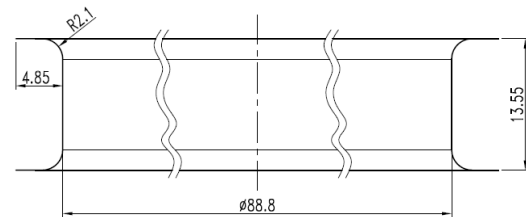
شکل (۴) ابعاد غلتک ساخته شده



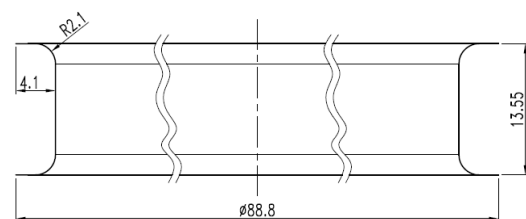
شکل (۵) انجام آزمون تجربی



مرحله اول



مرحله دوم



مرحله سوم

شکل (۲) غلتک‌های هر مرحله در نرم افزار Abaqus

۴- نتایج و بحث

مواردی که مورد بررسی قرار می‌گیرد عبارت است از بررسی مقطع قطعه در هر مرحله، مقایسه ابعادی قطعه ساخته شده با نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی، بررسی کاهش ضخامت دیواره در هر مرحله و بررسی اثر اصطکاک بر روی انجام فرآیند.

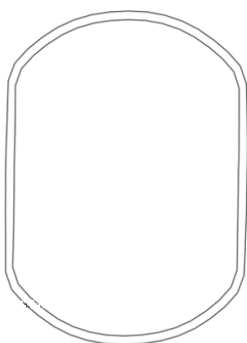
۳- آزمون تجربی

تجهیزاتی که برای آزمون تجربی مورد استفاده قرار گرفت عبارت اند از: ۱-دستگاه غلتک کاری ۲-غلتک ساخته شده ۳- بیسموت ۴- لوله ۵- تجهیزات گرمایشی برای ذوب کردن بیسموت. روند آزمون تجربی به این

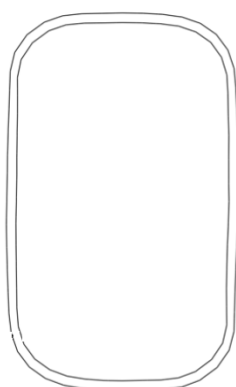
در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) مقطع بدست آمده در هر مرحله نشان داده شده است و در شکل (۹) قطعه ساخته شده توسط آزمون تجربی را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۰) مقطع مورد نظر به صورت پارامتری اندازه‌گذاری شده و در جدول (۲)، ابعاد قطعه حاصل از تست تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است و ملاحظه می‌شود که همخوانی قابل قبولی بین نتایج برقرار است و فقط مقداری کاهش ضخامت دیواره وجود داشته است که در محدوده ابعادی قابل قبول است. در شکل (۱۱) طول قطعه ساخته شده با لوله اولیه مقایسه شده است که میزان ۱۰ درصد افزایش طول را نشان می‌دهد.

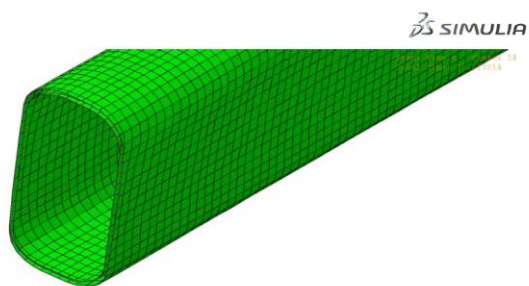
در شکل (۱۲) سه نقطه A، B و C نشان می‌دهد و در شکل (۱۳)، تغییر ضخامت مربوط به این سه نقطه را نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این فرآیند مقداری کاهش ضخامت دیواره بوجود می‌آید. کاهش ضخامت در نقطه A و B نزدیک به هم بوده و بیشتر از نقطه C می‌باشد ولی در کل می‌توان نتیجه گرفت که کاهش ضخامت به یک اندازه بوده و این اختلاف در بازه تیرانس ضخامت قطعه در نظر گرفت. علاوه بر یکی بودن محیط خارجی لوله اولیه و قطعه مورد بررسی، این کاهش ضخامت مشاهده شده به دلیل وجود ماده پرکننده درون لوله و اختلاف مساحت سطح مقطع داخل لوله دایروی با مساحت سطح مقطع داخلی قطعه مورد بررسی است.



شکل (۷) مقطع حاصل از مرحله دوم در نرم افزار Abaqus



الف



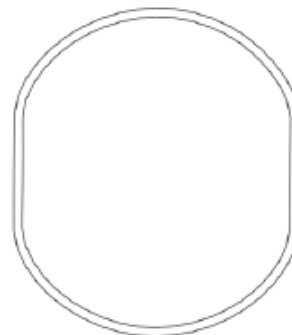
ب

شکل (۸) مقطع حاصل از مرحله آخر در نرم افزار Abaqus (الف) نمای

دو بعدی مقطع (ب) نمای سه بعدی از مقطع

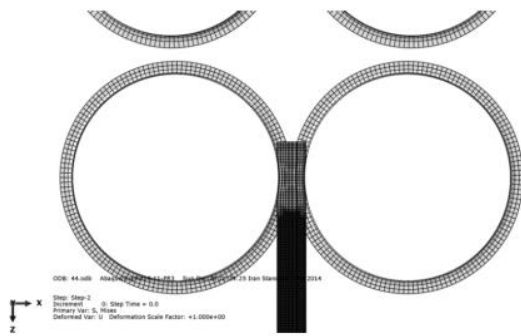


شکل (۹) قطعه شکل دهی شده بعد از غلتک سوم



شکل (۶) مقطع حاصل از مرحله اول در نرم افزار Abaqus

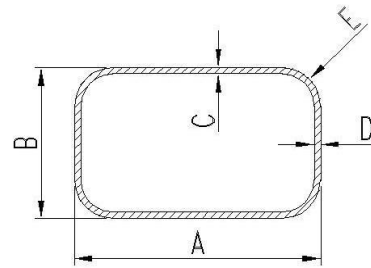
مقدار ضریب اصطکاک بین سطح خارجی لوله با غلتک ها سه مقدار ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ داده شد تا تاثیر مقدار اصطکاک بر روی فرآیند مورد بررسی قرار گیرد. در ضریب اصطکاک ۰/۱ غلتک ها نمی توانند قطعه را به سمت جلو هدایت کنند و لوله در غلتک دوم وارد نمی شود (شکل ۱۴). هنگامی که ضریب اصطکاک ۰/۳ در نظر گرفته می شود این مشکل بر طرف شده و شبیه سازی تا آخر ادامه پیدا می کند و همچنین برای مقدار ۰/۵ به همین صورت مشکلی ایجاد نمی شود. از این مورد نتیجه می گیریم که برای انجام فرآیند شکل دهی غلتکی لوله نیاز به وجود اصطکاک هستند یا به عبارتی عاملی که باعث کشیده شدن لوله بین شیارهای غلتک ها می شود اصطکاک بین لوله و غلتک می باشد و همانگونه که مشاهده شد افزایش بیشتر ضریب اصطکاک اشکالی در عملیات بوجود نمی آورد.



شکل (۱۴) عدم جلو کشیدن لوله توسط غلتک ها با ضریب اصطکاک ۰/۱

۵- نتیجه گیری

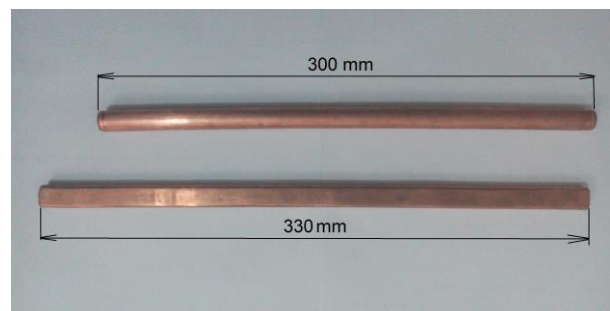
- ۱- نتایج بدست آمده از شبیه سازی با اندازه گیری تجربی مطابقت خوبی را نشان می دهد.
- ۲- روش شکل دهی غلتکی طی سه مرحله و با استفاده از ماده پر کننده، روشی مناسب و مقرون به صرفه ای برای تولید لوله های مستطیلی جدار نازک می باشد.
- ۳- در این فرآیند اندکی کاهش ضخامت دیواره ی لوله بوجود می آید.



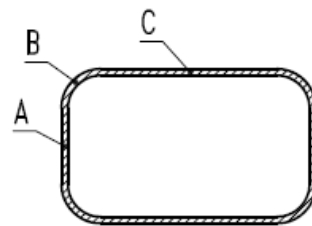
شکل (۱۰) شاخصه های اندازه گیری مقطع ساخته شده

جدول (۲) اندازه های بدست آمده از مقطع مورد نظر (mm)

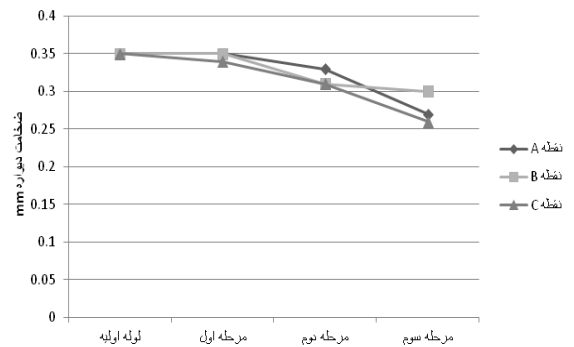
تست تجربی	شبیه سازی	قطعه اصلی
A	۱۳/۵۵	۱۳/۵۵
B	۸/۲	۸/۳
C	۰/۲۶	۰/۳۵
D	۰/۲۷	۰/۳۵
E	R2.3	R2.1



شکل (۱۱) مقایسه طول قطعه ساخته شده با لوله اولیه



شکل (۱۲) نمایش محل نقاط A، B و C برای بررسی کاهش ضخامت



شکل (۱۳) نمایش تغییر ضخامت برای نقاط A، B و C

- cross-sections, *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 2005, pp. 5–8.
- [8] Leu D.K., Wu J.Y., Finite element simulation of the squaring of circular tube, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, 2005, pp. 691–699.
- [9] Leu D.K., Finite-element simulation of the lateral compression of aluminum tube between rigid plates, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, 1999, pp. 621–638.
- [10] Leu D.K., The shaping of a circular tube into a symmetric square-tube by finite-element modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 178, 2006, pp.287–296.
- [11] Hwang Y.M., Elasto-plastic finite element analysis of squaring circular tube, *Journal of Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 18, 2008, pp.665-673.
- [12] Bayoumi L., Attia A.S., Determination of the forming tool load in plastic shaping of a round tube into a square tubular section, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 1835-1842.
- [13] Abrinia K., Farahmand H.R., An upper bound analysis for the reshaping of thick tubes with experimental verification, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, pp. 342-358.
- [14] ابری نیا ک.، تاجیار ع.، تاثیر پارامترهای مختلف بر روی نیروی جداشونده در شکل دهی مجدد لوله گرد، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ICME 2010، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
- ۴- در روش شکل دهی غلتکی لوله با ماده پرکننده مقداری افزایش طول قطعه کار مشاهده می گردد.
- ۵- از این روش می توان برای شکل دهی غلتکی لوله های جدار نازک استفاده کرد.
- ۶- اگر ضریب اصطکاک کم باشد غلتک ها نمی توانند لوله را به سمت جلو بکشند و امکان شکل دهی وجود ندارد و ضریب اصطکاک تا حدی مورد نیاز است و اصطکاک زیاد تاثیر مخربی بر فرآیند ندارد.
- مراجع:**
- [1] Kiuchi M, Shintani K, Tozawa M., Investigation into forming process of square pipe experimental study on roll forming process of noncircular pipe II, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 21/228, 1980, pp.73–80 [in Japanese].
- [2] Kiuchi M., Overall study on roll forming process of square and rectangular pipes, *In: Proceedings of the second international conference on rotary metalworking process*, Straford Upon_Avon, 1982, pp. 213–26.
- [3] Wen B., Using advanced tooling designs to reshape round tube into square and rectangular tubes, OH, USA: Roll-Kraft, Inc.
- [4] Onoda Y., Nagamachi T., Kimura S., Effects of forming conditions on cross-sectional shapes of corner zones of square and rectangular steel pipes formed by extroll-forming process, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 3, 1992, pp.573–578. (in Japanese).
- [5] Onoda Y, Nagamachi T, Kimura S, Kitawaki T., Pushing load acting on ram and forming load acting on the idle rolls in extroll-forming mill for reshaping round welded steel pipes into square and rectangular shapes, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 42, No.476, 1993, pp.478.
- [6] Bayoumi, Laila S., Cold drawing of regular polygonal tubular sections from round tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, 2001, pp. 2541–2553.
- [7] Moslemi Naeni H., Kiuchi M., Kitawaki T., Kuromatsu R., Design method of rolls for reshaping processes of pipes with pentagonal