

پیش بینی نمودار حد شکل دهی لوله منیزی با استفاده از مدلسازی فرآیند هیدروفرمینگ

دانشجو کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، ایران، tabei.ghozzati@yahoo.com

نیما تابعی

دانشجو دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، ایران، a.mirzakhani@mech.sharif.ir

امین میرزاخانی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، ایران، assem@sharif.edu

احمد عاصم پور*

چکیده

هدف از انجام این مطالعه، مدل سازی تست هیدروفرمینگ لوله منیزی و استخراج نمودار حد شکل دهی (FLD) به کمک روش المان محدود می باشد. در گام اول، مدل سازی سه بعدی المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله آلومینیوم 7020-T6 به منظور رسم نمودار FLD انجام شد. به منظور شناسایی معیار مناسب شروع گلویی شدن، چهار معیار حداکثر مقدار مشتق دوم کرنش کوچک، کرنش بزرگ، کرنش ضخامتی و کرنش پلاستیک معادل لحاظ گردید. مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی نشان می دهد که سه معیار حداکثر مقدار مشتق دوم کرنش بزرگ، کرنش کوچک و کرنش پلاستیک معادل معیار مناسب برای شبیه سازی هستند. پس از صحت سنجی مدلسازی فرآیند هیدروفرمینگ با نتایج تجربی برای لوله آلومینیوم 7020-T6، نمودار FLD لوله منیزی استخراج گردید. نتایج نشان می دهد که در بارگذاری ها با تغذیه محوری های متفاوت، زمان گلویی شدن و مقدار تنش و کرنش در لوله تغییر می کند و سبب می گردد در هر بارگذاری، کرنش های حدی مختلفی بدست آید. همچنین مطابق با نمودار FLD، هر چه نسبت تغذیه محوری به فشار داخلی بیشتر شود، نقطه بدست آمده روی نمودار FLD به سمت کرنش کوچک منفی تر کشیده می شود.

واژه های کلیدی: هیدروفرمینگ، نمودار حد شکل دهی، اجزا محدود، گلویی، کرنش پلاستیک، منیزیم.

Prediction of forming limit diagram for pure magnesium tube using hydroforming process modeling

N. Tabei
A. Mirzakhani
A. Assempour

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

The main objective in this study is to model the hydroforming process for Mg tube and obtain the forming limit diagram (FLD) using finite element method. In the first step, three-dimensional finite element modeling of hydroforming process of AL-7020-T6 tube was performed to plot FLD. In order to identify the appropriate criterion for the onset of necking, the hydroforming process modeling was performed by considering the four criteria including of the second derivative of minimum principal strain, maximum principal strain, thickness strain and equivalent plastic strain. Comparison between simulation and experimental results indicated that the second derivative of minimum principal strain, max principal strain and equivalent plastic strain were appropriate criteria for simulation. After validation of the hydroforming process modeling with experimental result, the FLD of the Mg tube was extracted. The results show that in the loading with different axial feeding, the necking time and the amount of stress and strain change. Therefore, various limit strains are obtained by changing the loading conditions. Also, according to the FLD, the higher ratio of axial feed to internal pressure causes the limit strain shifts to the left in FLD plane.

Keywords: Tube hydroforming, Forming limit diagram, Finite element simulation, Necking.

۱- مقدمه

آلیاژهای منیزی در ساخت استنت های زیست تجزیه پذیر می باشد بطوریکه در سال ۲۰۱۶ سازمان غذا و دارو اولین استنت زیست تجزیه پذیر را مورد تایید قرار داد [۳]. در واقع استفاده از استنت های زیست تجزیه پذیر به جای استنت های دائمی سبب آسیب کمتری به بدن گردیده و مانع از وجود عوارض ناشی از کاشت استنت های دائمی در بدن می گردد [۴].

در کنار تمام این ویژگی های مناسب، فلز منیزیم دارای خواص مکانیکی ضعیف تری همچون شکل پذیری و مقاومت مکانیکی پایین تر نسبت به سایر فلزات رقیب در صنایع اشاره شده بوده که این امر سبب شده تا استفاده گسترده از این فلز محدود شود. به همین دلیل در سال های اخیر، محققین در تلاش هستند با ارائه راهکارهایی بتوانند سبب بهبود خواص مکانیکی این فلزات بشوند تا استفاده از این فلز در مقیاس زیاد عملاً کاربردی شود. خصوصیات مکانیکی مربوط به منیزیم

منیزیم و آلیاژهای آن در سال های اخیر به عنوان یک ماده مناسب در ساخت قطعات در صنایع اتومبیل سازی و تجهیزات پزشکی مورد توجه قرار گرفته اند. علت این توجهات را می توان خصوصیات جذاب منیزیم از جمله داشتن چگالی کم، استحکام بالا که منجر به داشتن نسبت استحکام به وزن بالایی می شود، معرفی کرد [۱]. آلیاژهای منیزیم به دلیل دارا بودن استحکام ویژه بالا جایگزین مناسبی برای فولاد و آلومینیوم برای استفاده در قطعات سبک در صنایع اتومبیل سازی هستند. از دیگر ویژگی های این فلزات می توان به خاصیت زیست تجزیه پذیری اشاره کرد که سبب شده در بسیاری از مواقع که استفاده از فلزات دائمی سبب آسیب به بافت های بدن گردد، استفاده از این فلز و آلیاژهای آن به عنوان ایمپلنت توصیه شود [۲]. یکی از کاربردهایی که در دهه اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است، استفاده از

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: assem@sharif.edu

به علت ساختار شش‌وجهی فشرده (HCP)^۱ آنها می‌باشد که دارای تعداد محدودی از سیستم‌های لغزش فعال می‌باشند. سیستم‌های لغزش فعال در منیزیم شامل لغزش پایه‌ای^۲، لغزش منشوری^۳، لغزش هرمی^۴ $\langle a \rangle$ و لغزش هرمی^۵ $\langle a+c \rangle$ می‌باشد. در کنار این سیستم‌های لغزش، سیستم‌های تغییر شکل دوقلوبی را در منیزیم و آلیاژهای آن می‌توان شناسایی کرد که به عنوان دوقلوبی‌های کششی (TT)^۶ و فشاری (CT)^۷ شناخته می‌شوند و می‌توانند در تغییر شکل منیزیم موثر واقع بشوند [۵] و [۶]. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که عواملی همچون اندازه دانه [۷-۹]، تکسچر [۱۰-۱۲]، وجود عناصر کمیاب خاکی [۱۳] و عملیات حرارتی [۱۴] می‌توانند در رفتار مکانیکی آلیاژهای منیزیمی موثر واقع بشوند.

فرآیند شکل‌دهی لوله‌های فلزی عبارت است از انجام یک تغییر شکل پلاستیک که روی لوله انجام می‌پذیرد تا یک قطعه مهندسی با شکل دلخواه تولید گردد. هیدروفرمینگ یکی از روش‌های شکل‌دهی مواد می‌باشد که با استفاده از فشار سیال به جای استفاده از ابزارهای سخت، لوله را به شکل دلخواه تبدیل می‌نماید. با این روش قطعات پیچیده‌تری با افزایش چشم‌گیر نسبت استحکام به وزن ساخته خواهند شد. علت اصلی که این روش را در مقایسه با روش‌های مشابه مقرون به صرفه‌تر می‌سازد کاهش مراحل تولید یک قطعه است بصورتی که در اکثر موارد در یک مرحله تولید قطعه به اتمام می‌رسد. هیدروفرمینگ به عنوان ابزاری که ملاحظاتی از قبیل نسبت بالای استحکام به وزن، تراسن‌های دقیق، صلبیت بالا، کاهش چشم‌گیر عملیات ثانویه، دقت بالای شکل‌دهی، نبود تمرکز تنش و اصطکاک روی لوله، مونتاژ آسان، هزینه ابزار پایین و مهم‌تر از همه مقرون به صرفه بودن را می‌توان از آن انتظار داشت و همین باعث شده تا علاقه‌مندی به استفاده از هیدروفرمینگ به خصوص در صنایع خودرو و هوا و فضا بیشتر شود [۱۵]. در سال ۱۹۴۰ گری یک اتصال T شکل از لوله مسی تولید کرد که جرقه‌ای برای آغاز فرآیند هیدروفرمینگ لوله بود [۱۶]. کیم و همکاران شروع پارگی در لوله‌های هیدروفرم شده STKM-11A را با ترکیب فشار داخلی و تغذیه محوری مستقل با استفاده از روش حل تحلیلی بدست آوردند [۱۷]. کیم و همکاران حد شکل‌پذیری در لوله‌های هیدروفرم شده STKM-11A را با روش‌های عددی و تحلیلی پیش‌بینی کردند [۱۸]. سیدکاشی و همکاران دو نوع از لوله‌های دولایه، یکی از جنس مس-آلومینیوم و دیگری از جنس فولاد کربنی-فولاد ضدزنگ که به روش هیدروفرمینگ بدست می‌آیند را به روش نظری و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند [۱۹].

رفتار یک لوله فلزی در یک فرآیند شکل‌دهی وابسته به چند عامل می‌باشد که اهمیت هرکدام از این عوامل بستگی به فرآیند بکار گرفته شده دارد. نمودار حد شکل‌دهی^۸ (FLD) می‌تواند یک معیار مناسب برای پیش‌بینی شکل‌پذیری لوله‌ها بعد از انجام یک فرآیند شکل‌دهی

محسوب گردد. شکل‌پذیری یک لوله فلزی بیانگر محدودیت عملکرد آن بدون ایجاد عیب در یک عملیات شکل‌دهی می‌باشد که در آن لوله فلزی با اعمال فشار داخلی و تغذیه محوری مناسب تحت تغییرشکل سه بعدی پلاستیک قرار می‌گیرد [۲۰].

هوانگ و همکاران نمودار حد شکل‌دهی لوله آلومینیومی AA6011 را از دو روش تحلیلی که ترکیبی از دو معیار سوئیفت و هیل بود و روش تجربی استخراج کردند [۲۱]. نقیبی و همکاران به مطالعه تجربی و عددی منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی ضد زنگ ۳۰۴ در فرآیند هیدروفرمینگ پرداختند [۲۲]. هاشمی و همکاران پیش‌بینی ترکیب لوله در فرآیند هیدروفرمینگ گرم به کمک معیارهای شکست نرم اصلاح‌شده را ارائه دادند [۲۳]. نائینی و همکاران به پیش‌بینی تحلیلی کرنش‌ها و تنش‌های حدی در هیدروفرمینگ لوله آلومینیومی ناهمسانگرد AA6063 پرداختند [۲۴].

در این مقاله ابتدا معیار مناسب شروع گلوبی شدن، با مدل‌سازی عددی فرآیند هیدروفرمینگ لوله آلومینیومی 7020-T6 و مقایسه نتایج عددی و تجربی FLD مشخص می‌شود. انطباق خوب نتایج نظری و تجربی بیانگر تایید فرآیند مدل‌سازی عددی استخراج نمودار FLD می‌باشد. در ادامه نمودار FLD لوله منیزیمی که مطالعات کمی در مورد آن صورت گرفته است را با استفاده از مدل‌سازی عددی تایید شده در مرحله قبل استخراج می‌گردد. این مقاله در پنج بخش نگارش شده است که شامل مقدمه، تئوری مسئله، مدل‌سازی، نتایج و مراجع می‌باشد.

در مقدمه در مورد اهمیت آلیاژهای منیزیم به عنوان یک ماده‌ی مناسب در صنایع مختلف بحث شده و هم‌چنین در مورد اهمیت نمودار حد شکل‌دهی به عنوان یک معیار مناسب برای پیش‌بینی شکل‌پذیری لوله‌ها بعد از انجام فرآیند شکل‌دهی اشاره شده است. در بخش بعدی، تئوری مسئله بیان می‌شود. در قسمت مدل‌سازی، فرآیند مدل‌سازی تست هیدروفرمینگ لوله آلومینیومی انجام و معیار شروع گلوبی شدن تعیین می‌شود. در قسمت نتایج پس از تایید فرآیند مدل‌سازی هیدروفرمینگ، نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدروفرمینگ لوله منیزیمی استخراج گردیده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- تئوری مسئله

استخراج نمودار FLD در این مقاله بر اساس مدل M-K می‌باشد. در واقع برای رسم نمودار FLD باید نقطه بحرانی که در آن شروع گلوبی شدن اتفاق می‌افتد شناسایی شود. مدل M-K معمول، به منظور لحاظ کردن اثرات تنش عمودی در محاسبه FLD مطابق با شکل ۱ اصلاح شده است. در مدل اصلاح شده فرض شده است که یک شیار باریک بر روی سطح وجود دارد. ناحیه با ضخامت اسمی را "a" و ناحیه‌ی شیاردار را "b" می‌نامند. با اعمال کرنش پلاستیک، ناحیه‌ی ناپیوستگی اولیه شروع به رشد کردن می‌کند و این امر منجر به یک گلوبی موضعی می‌شود. برای به دست آوردن کرنش‌های حدی، محاسبات ابتدا بر روی ناحیه‌ی اسمی انجام شده است، سپس با استفاده از اطلاعات به دست آمده از ناحیه‌ی اسمی، محاسبات ناحیه‌ی شیاردار انجام شده است. مدل‌سازی در این مقاله بر اساس کار عاصم‌پور و همکاران می‌باشد [۲۵].

¹ Hexagonal Closed Pack (HCP)

² Basal Slip

³ Prismatic Slip

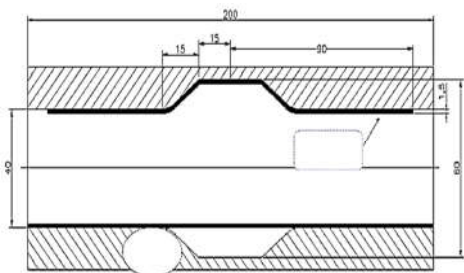
⁴ Pyramidal $\langle a \rangle$ Slip

⁵ Pyramidal $\langle c+a \rangle$ Slip

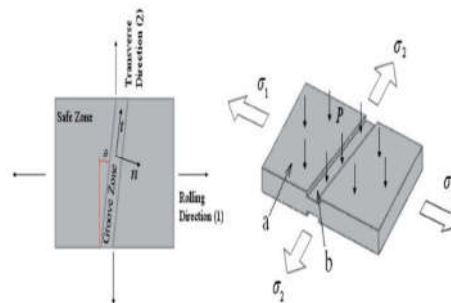
⁶ Tension Twinning (TT)

⁷ Compression Twinning (CT)

⁸ Forming Limit Diagram (FLD)



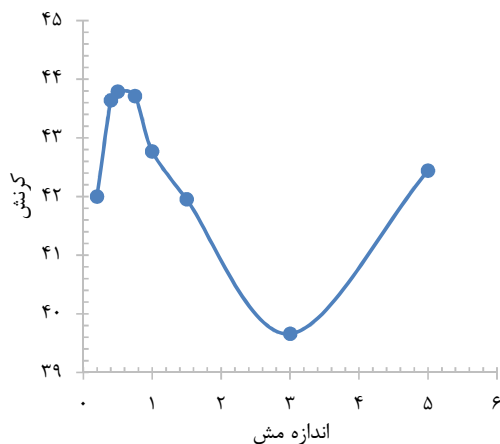
شکل ۲- طرحواره و ابعاد قالب و لوله اولیه و محصول نهایی [۲۶]



شکل ۱- مدل M-K عمومی برای تعیین FLD ها با توجه به اثر تنش نرمال.

در این مدل‌سازی، قالب به صورت صلب و لوله بصورت شکل‌پذیر لحاظ می‌گردد. از المان S4R با انتگرال کاهش یافته برای مش رنی استفاده می‌شود. به منظور استخراج اندازه مش مناسب، نمودار تغییرات کرنش پلاستیک بر اساس اندازه مش مطابق با شکل ۳ رسم می‌شود. همان‌گونه که از شکل ۳ مشخص است، ناحیه همگرایی کرنش پلاستیک در بازه اندازه مش ۰/۳ تا ۰/۸ می‌باشد بنابراین اندازه مش ۰/۵ می‌تواند یک انتخاب مناسب برای تحلیل باشد. در مدل‌سازی از اعمال ضریب ناهمسانگردی صرف‌نظر شده و ضریب اصطکاک بین قالب و لوله ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

برای بدست آوردن نقاط منحنی حد شکل‌دهی باید حالت‌های مختلف بارگذاری ترکیبی از فشار داخلی و تغذیه محوری روی لوله اعمال شود. در شکل ۴ نمودار بارگذاری اعمالی به لوله در فرآیند شبیه‌سازی که متشکل از فشار داخلی و بارگذاری محوری می‌باشد، نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمودار بررسی ضریب حساسیت به مش برای لوله

با توجه به نمودار بارگذاری فشار از ۰ تا ۴۰ مگاپاسکال و تغذیه محوری از ۰ تا ۱۰ میلیمتر تغییر می‌کند. این تغییرات در قالب مسیر مختلف بارگذاری در نرم افزار ABAQUS اعمال می‌شود.

۳- مدل‌سازی مسئله

روش تحقیق در این پژوهش شامل مدل‌سازی عددی به کمک روش اجزا محدود می‌باشد. ابتدا، فرآیند مدل‌سازی عددی فرآیند هیدروفورمینگ لوله آلومینیوم 7020-T6 با نتایج تجربی موجود برای آلومینیوم 7020-T6 مقایسه می‌شود. پس از تایید فرآیند مدل‌سازی عددی FLD، نمودار حد شکل‌دهی لوله منبسط شده از طریق مدل‌سازی به وسیله نرم افزار اجزا محدود ABAQUS انجام می‌پذیرد. برای مدل‌سازی در این قسمت از لوله با جنس آلومینیوم 7020-T6 با اندازه هندسی مطابق با جدول ۱ و مشخصات مکانیکی مطابق با جدول ۲ استفاده شده است.

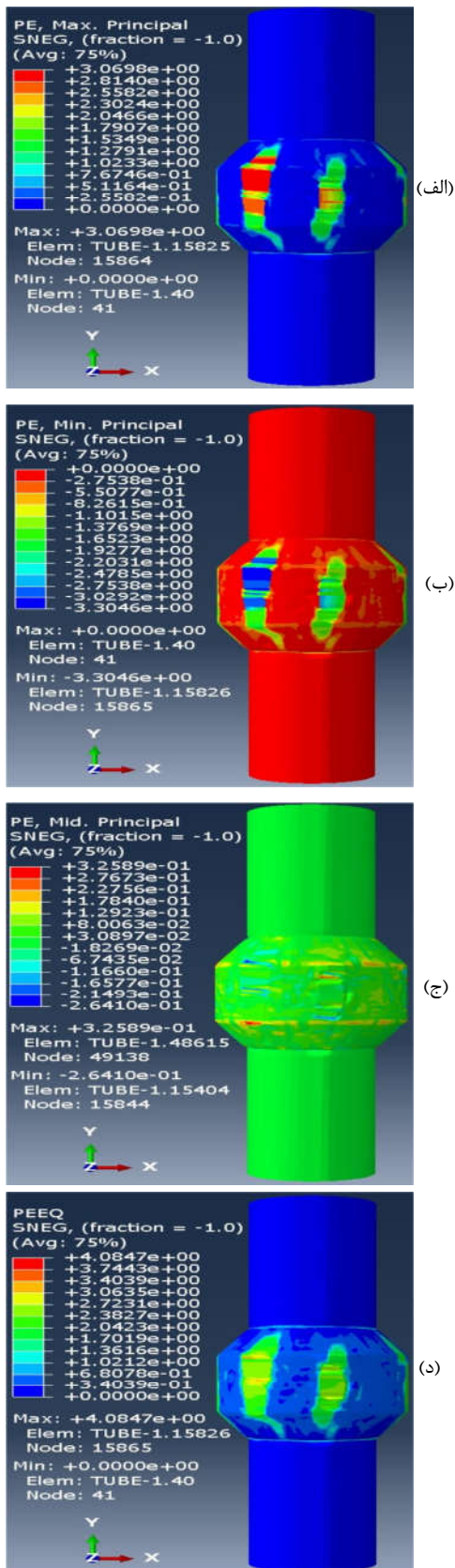
جدول ۱- مشخصات هندسی لوله جهت استخراج FLD [۲۶]

طول (mm)	ضخامت لوله (mm)	قطر خارجی (mm)
۲۰۰	۱،۵	۴۰

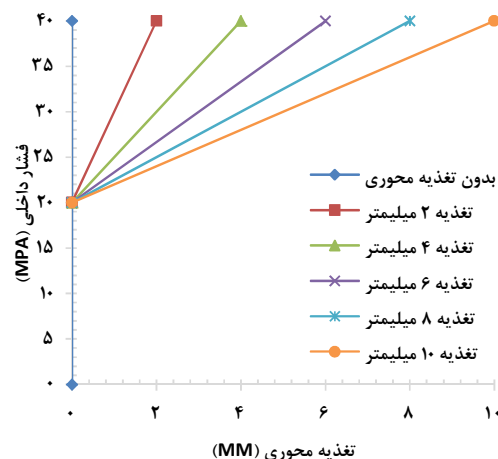
جدول ۲- خواص مکانیکی لوله آلومینیوم 7020-T6 [۲۶]

تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیک E(GPa)	ضریب استحکام K(MPa)	توان کار سختی n	چگالی (Kg/m ³)	جنس لوله
۳۰۵	۷۱	۳۷۰	۰،۱۷	۲۷۸۰	آلومینیوم 7020-T6

برای مدل‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ از نرم‌افزار ABAQUS و حل‌گر Dynamic/Explicit استفاده می‌گردد. مدل شبیه‌سازی شده اجزاء محدود سه‌بعدی لوله به همراه قالب در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵- توزیع‌ها کرنش‌های (الف) بزرگ (ب) کوچک (ج) ضخامتی (د) پلاستیک معادل برای تغذیه محوری ۴ میلی‌متر



شکل ۴- منحنی بارگذاری برای آلومینیوم

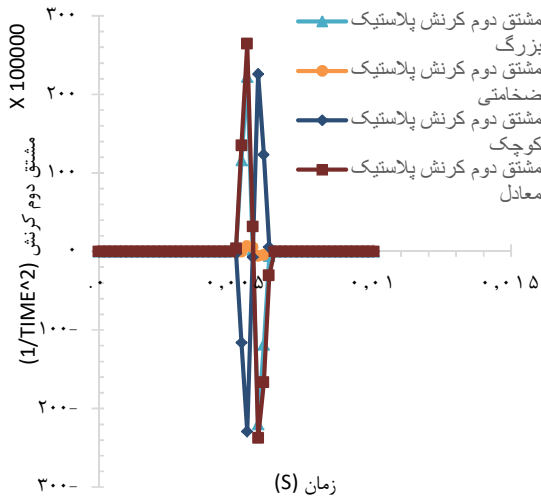
پس از اجرا و اتمام فرآیند مدل‌سازی، پردازش نتایج همچون تاریخچه انواع کرنش‌ها صورت می‌پذیرد. در این مرحله هدف آن است به نحوی یک رابطه منطقی بین کرنش‌ها و زمان شروع گلوپی شدن یافت. تعیین معیاری جهت پیش‌بینی لحظه شروع گلوپی شدن جهت استخراج نمودار حد شکل‌دهی یک لوله فلزی به کمک مدل‌سازی اجزا محدود در درجه اول اهمیت قرار دارد که دقت و صحت نمودار حد شکل‌دهی تعیین‌شده را برای ما تضمین می‌کند. در این مقاله ابتدا المان بحرانی را که شامل بیشترین میزان کرنش در فرآیند بوده را به عنوان المان بحرانی انتخاب می‌کنیم. پس از انتخاب المان بحرانی، زمانی که مشتق دوم یکی از کرنش‌های بزرگ، کوچک، پلاستیک معادل و ضخامتی المان بحرانی به حالت حداکثری خود برسد را زمان شروع گلوپی شدن معرفی می‌گردد. از بین چهار معیار زیر، بهترین معیار شروع گلوپی شدن با مقایسه نتایج عددی و تجربی FLD انتخاب شده و نقاط نمودار حد شکل‌دهی توسط معیار انتخابی مشخص می‌گردند.

- حداکثر مقدار شتاب کرنش اصلی بزرگ.
- حداکثر مقدار شتاب کرنش اصلی کوچک.
- حداکثر مقدار شتاب کرنش پلاستیک معادل.
- حداکثر مقدار شتاب کرنش ضخامتی (کرنش اصلی متوسط)

در شکل ۵ توزیع کرنش‌های بالا برای حالت تغذیه محوری ۴ میلی‌متر نمایش داده شده است. طبق این شکل مشاهده می‌شود توزیع کرنش‌های بزرگ، کوچک و پلاستیک معادل تقریباً یکسان می‌باشد بنابراین انتظار می‌رود این سه معیار نتایج تقریباً یکسانی در پیش‌بینی شروع گلوپی شدن داشته باشند.

پس از تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ، المان بحرانی را که محل شروع گلوپی شدن می‌باشد انتخاب می‌گردد. در شکل ۶ توزیع کرنش پلاستیک معادل در لوله آلومینیوم 7020-T6 در فرآیند هیدروفرمینگ قابل مشاهده است. المان بحرانی، المانی است که بیشینه کرنش پلاستیک معادل در آن وجود داشته باشد. در شکل ۶، المان بحرانی با بیشترین مقدار کرنش پلاستیک معادل مشخص شده است.

طبق جدول ۳ مشاهده می‌شود هر چهار معیار برای حالت تغذیه محوری ۴ میلی‌متر، زمان شروع گلوبی شدن یکسانی را نشان می‌دهند.



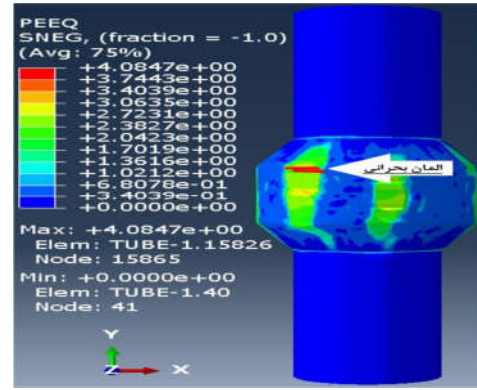
شکل ۸- مشتق دوم کرنش‌ها

پس از تعیین زمان شروع گلوبی شدن (زمان بحرانی) برای هر معیار، مقادیر کرنش کوچک و بزرگ در المان بحرانی در زمان بحرانی هر معیار را به عنوان کرنش‌های حدی مربوط به همان معیار انتخاب می‌کنیم و در نمودار حد شکل‌دهی نقطه متناظر با کرنش‌های حدی آن معیار را مشخص می‌کنیم. با توجه به اینکه در حالت بارگذاری خاص با تغذیه محوری ۴ میلی‌متر، پیش‌بینی زمان شروع گلوبی شدن برای هر چهار معیار یکسان می‌باشد بنابراین انتظار می‌رود در این حالت بارگذاری کرنش‌های حدی مربوط به هر چهار معیار در المان بحرانی یکسان بوده و نقاط حدی متناظر با این نوع بارگذاری در نمودار حد شکل‌دهی برای هر چهار معیار بر روی یکدیگر قرار بگیرند.

شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ برای حالت‌های بارگذاری دیگر در شکل ۴ انجام می‌پذیرد. مطابق با روش بیان شده برای هر کدام از حالت‌های بارگذاری زمان شروع گلوبی شدن برای هر یک از چهار معیار در هر یک از حالت‌های بارگذاری تعیین می‌شود. با تعیین زمان بحرانی هر معیار، کرنش‌های حدی برای چهار معیار در حالت‌های مختلف بارگذاری تعیین می‌شوند. با مشخص کردن کرنش‌های حدی تمام حالت‌های بارگذاری، نمودار حد شکل‌دهی برای چهار معیار بصورت عددی استخراج می‌گردد.

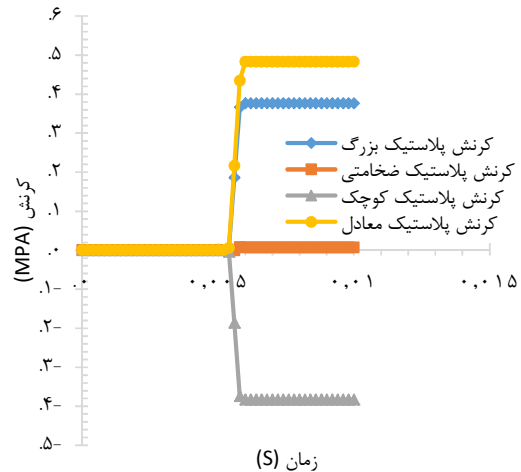
۴- نتایج

نمودار حد شکل‌دهی مربوط به چهار معیار برای آلیاژ آلومینیوم 7020-T6 در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای حد شکل‌دهی بدست آمده در شکل ۹، مشاهده می‌شود معیارهای مشتق دوم کرنش بزرگ، کرنش کوچک و کرنش پلاستیک معادل طبق پیش‌بینی‌های قبلی، نتایج یکسانی را نمایش می‌دهند در حالیکه معیار مشتق دوم کرنش ضخامت در بعضی از بارگذاری‌ها نتایج متفاوتی را نسبت به سه معیار دیگر ارائه می‌دهد. به عبارتی در تمام حالت‌های بارگذاری مشتق دوم کرنش بزرگ، کرنش کوچک و کرنش پلاستیک



شکل ۶- تعیین المان بحرانی آلیاژ آلومینیوم برای تغذیه محوری ۴ میلی‌متر

بعد از تعیین المان بحرانی، نمودارهای کرنش‌های بزرگ، کوچک، پلاستیک معادل و ضخامت در المان بحرانی مطابق با شکل ۷ رسم می‌شود.



شکل ۷- نمودار چهار کرنش اصلی برای آلومینیوم در بارگذاری ۴ میلی‌متر

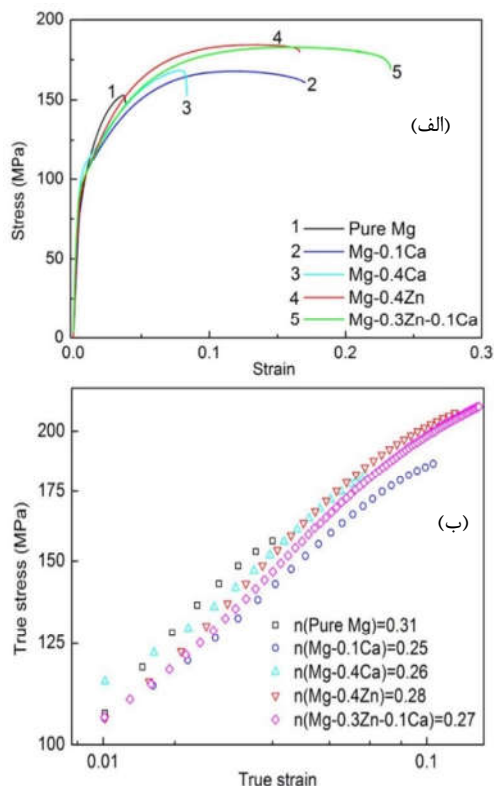
طبق شکل ۷ مشاهده می‌شود که بازه تغییرات کرنش‌های بزرگ، کوچک و معادل پلاستیک تقریباً یکسان بوده، ولی برای کرنش ضخامت این بازه متفاوت می‌باشد.

حال برای بدست آوردن زمان شروع گلوبی، مشتق دوم چهار کرنش را باید محاسبه کنیم. در شکل ۸، مشتق دوم کرنش‌های نشان داده شده است. با توجه به زمان ایجاد تغییر بزرگ در مقدار شتاب کرنش‌ها، زمان گلوبی شدن در هر یک از حالت‌ها مطابق با جدول ۳ استخراج می‌گردد.

جدول ۳- زمان گلوبی شدن در هر یک از حالت‌ها

معیار	زمان شروع گلوبی
کرنش پلاستیک معادل	۰/۰۰۵۴
کرنش بزرگ	۰/۰۰۵۴
کرنش کوچک	۰/۰۰۵۴
کرنش ضخامت	۰/۰۰۵۴

پس از صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی این پژوهش برای فلز آلومینیوم با نتایج تجربی و شبیه‌سازی مرجع [۲۶] و انطباق خیلی خوب نتایج، در این قسمت نمودار حد شکل‌دهی برای منیزیم خالص با استفاده از مدل‌سازی توضیح داده شده انجام می‌پذیرد. در شکل ۱۱ نمودار مربوط به تنش-کرنش مهندسی و واقعی برای آلیاژهای مختلف منیزیم نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- نمودارهای تنش-کرنش (الف) مهندسی و (ب) واقعی [۲۷].

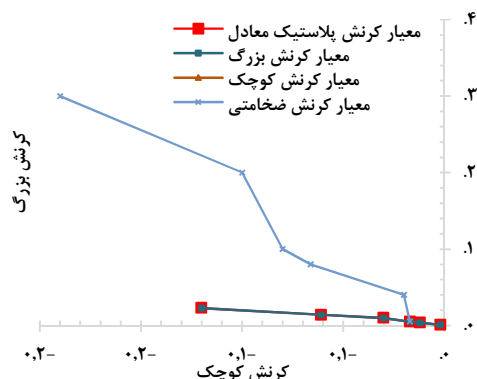
در جدول ۴ خواص مکانیکی مربوط به منیزیم خالص نشان داده شده است. مشخصات هندسی لوله منیزیمی و قالب مطابق با شکل ۲ و جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۴- خواص مکانیکی لوله منیزیم خالص [۲۸]

جنس لوله	چگالی (Kg/m ³)	توان کار سختی n	ضریب استحکام K (MPa)	مدول الاستیک E (GPa)	تنش تسلیم (MPa)
منیزیم	۱۷۴۰	۰,۳۱	۱۵۱	۴۴	۱۰۰

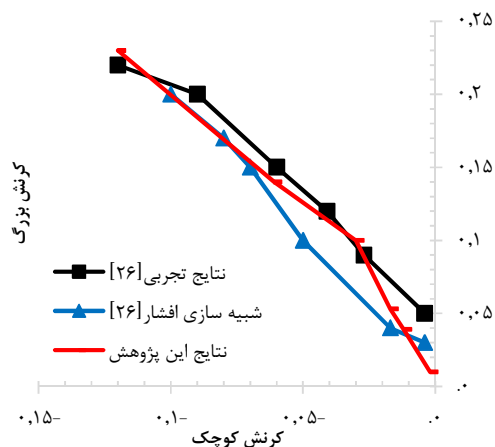
برای به دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی منیزیم، از حالت‌های مختلف بارگذاری ترکیبی فشار داخلی و تغذیه محوری مطابق با شکل ۱۲ استفاده می‌شود. با توجه به این نمودار علاوه بر بارگذاری های در شکل ۴، تعدادی بارگذاری با تغذیه محوری‌های ۰,۱، ۰,۳ و ۰,۵ میلیمتر اضافه شده است.

معادل در یک زمان به حداکثر مقدار خود خواهند رسید ولی زمان حداکثر شدن مقدار مشتق دوم کرنش ضخامتی در بعضی از بارگذاری‌ها نسبت به سه معیار دیگر متفاوت است. بنابراین بکارگیری هر یک از سه معیار حداکثر مقدار مشتق دوم کرنش بزرگ، کرنش کوچک و کرنش پلاستیک معادل نتیجه یکسانی را در تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی خواهد داشت در حالیکه این نمودار برای معیار حداکثر مشتق دوم کرنش ضخامتی در بعضی از بارگذاری‌ها متفاوت است.

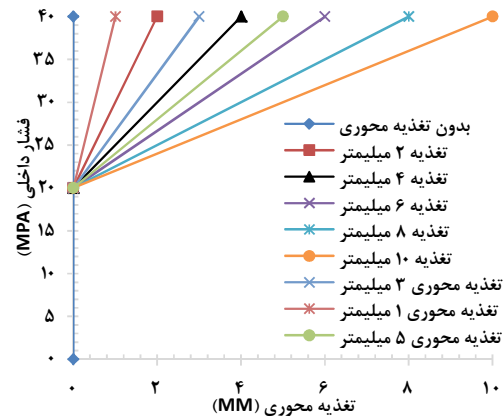
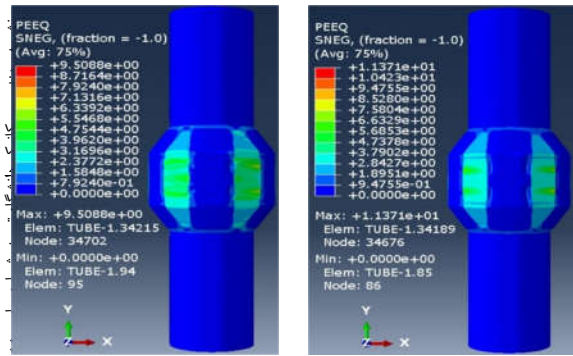


شکل ۹- منحنی حد شکل‌دهی حاصل از معیارهای مختلف این پژوهش

در شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی نمودار حد شکل‌دهی لوله آلومینیوم 7020-T6 با استفاده از سه معیار حداکثر مقدار شتاب کرنش بزرگ، کرنش کوچک و کرنش پلاستیک با نتایج تجربی و شبیه‌سازی قبلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی این مقاله از دقت بالایی در پیش بینی FLD برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان فرآیند شبیه‌سازی این مطالعه را با استفاده از یکی از سه معیار حداکثر مقدار شتاب کرنش بزرگ، کرنش کوچک و کرنش پلاستیک را برای استخراج نمودار حد شکل‌دهی بصورت عددی تایید کرد.

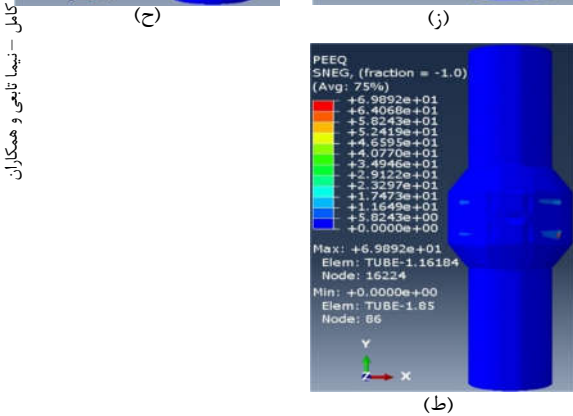
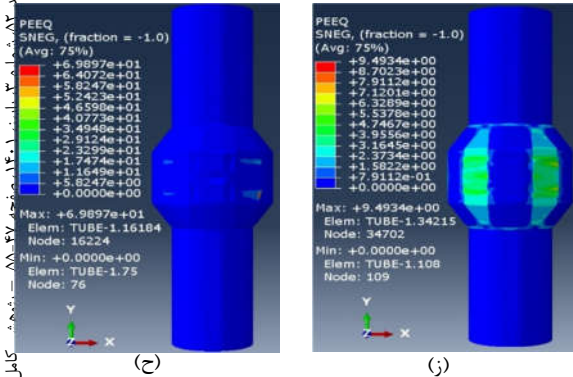


شکل ۱۰- منحنی حد شکل‌دهی حاصل از معیار کرنش پلاستیک معادل و نتایج تجربی و شبیه‌سازی مرجع [۲۶]



شکل ۱۲- منحنی بارگذاری برای منیزیم

نتایج توزیع کرنش معادل پلاستیک حاصل از شبیه‌سازی آزمایش هیدروفورمینگ لوله منیزیم خالص برای تمام حالت‌های بارگذاری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل می‌توان تغییر میزان برآمده شدن را برای بارگذاری‌های مختلف برای لوله منیزیمی مشاهده کرد.

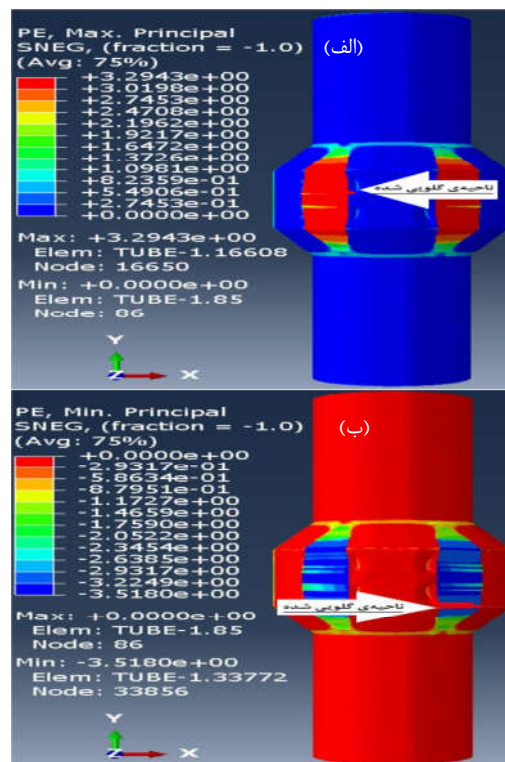


شکل ۱۳- توزیع کرنش پلاستیک معادل در لوله منیزیمی برای تغذیه محوری‌های مختلف (الف) بدون تغذیه محوری، (ب) ۱ میلی‌متر، (ج) ۲ میلی‌متر، (د) ۳ میلی‌متر، (ه) ۴ میلی‌متر، (و) ۵ میلی‌متر، (ز) ۶ میلی‌متر، (ح) ۸ میلی‌متر (ط) ۱۰ میلی‌متر

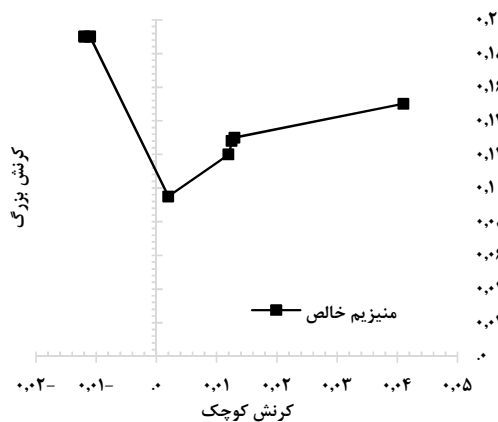
در شکل ۱۴ توزیع کرنش اصلی بزرگ و کرنش کوچک برای نمونه‌ای با تغذیه محوری ۴ میلی‌متر نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع کرنش در لوله منیزیمی خالص همانند لوله آلومینیومی به نحوی می‌باشد که توزیع کرنش در ناحیه ایجاد عیب متمرکز می‌شود. در شکل ۱۴، توزیع کرنش‌های کوچک و بزرگ تقریباً مشابه یکدیگر بوده بنابراین همانند لوله آلومینیومی این کرنش‌ها می‌توانند پیش‌بینی یکسانی از زمان شروع گلوبی شدن داشته باشند.

متفاوت به منظور رسم نمودار هیدروفورمینگ انجام پذیرفت. پس از رسم نمودار FLD مربوط به لوله آلومینیومی و منیزیومی نتایج زیر حاصل شد:

- ✓ با بررسی چهار معیار کرنش بزرگ، کرنش کوچک، کرنش پلاستیک معادل و کرنش ضخامتی مشاهده شد در بارگذاری‌های مختلف، مشتق دوم کرنش بزرگ، کرنش کوچک و کرنش پلاستیک معادل در یک زمان به حداکثر مقدار خود خواهد رسید، لذا بکارگیری هر کدام از آن‌ها نتیجه یکسانی را در تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی خواهد داشت.
- ✓ با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی، نمودار حد شکل‌دهی آلومینیوم در فرآیند هیدروفورمینگ در سمت چپ خط $\epsilon_p = 0$ (حالت کرنش صفحه‌ای) می‌افتد.
- ✓ در لوله منیزیومی هر چه نسبت تغذیه محوری به فشار داخلی بیشتر شود، نقطه بدست آمده روی نمودار به سمت کرنش کوچک منفی‌تر کشیده می‌شود.
- ✓ استفاده از روش المان محدود راهکاری مناسب برای تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی لوله‌ها بدون انجام آزمایش‌های پرهزینه و پیچیده می‌باشد. همچنین زمان دستیابی به منحنی‌های حد شکل‌دهی با استفاده از روش المان محدود به مراتب کمتر از روش تجربی بوده و توصیه می‌شود برای یافتن این منحنی‌ها از روش المان محدود استفاده گردد.



شکل ۱۴- توزیع کرنش برای نمونه‌ای با تغذیه محوری ۴ میلی‌متر (الف) توزیع کرنش بزرگ، (ب) توزیع کرنش کوچک



شکل ۱۵- منحنی حد شکل‌دهی برای فلز منیزیم خالص

با شبیه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ و استفاده از بارگذاری شکل ۱۲، نتایج نمودار حد شکل‌دهی برای منیزیم خالص به صورت شکل ۱۵ پیش‌بینی می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

از آن‌جا که در تعیین خواص مکانیکی و میزان شکل‌پذیری لوله‌های منیزیومی تحقیقات بسیار اندکی انجام گرفته شده است، بنابراین هدف این پژوهش بررسی حد شکل‌پذیری لوله‌های منیزیومی به کمک رسم نمودار حد شکل‌دهی می‌باشد. یک مدل‌سازی سه بعدی فرآیند هیدروفورمینگ با اعمال بارگذاری فشاری و تغذیه محوری‌های

۶- مراجع

- [1] Sadeghi A., et al., *Selected Topics On Advanced Magnesium Technologies*, Tehran: Arvan, 1395.
- [2] Bowen P. K., Shearier E. R., Zhao S., Guillory II R. J., Zhao F., Goldman J., Drelich J. W., *Biodegradable metals for cardiovascular stents: from clinical concerns to recent Zn-alloys*, *Adv. Healthc. Mater.* Vol. 5, pp. 1121-1140, 2016.
- [3] Wykrzykowska J. J., Kraak R. P., Hofma S. H., van der Schaaf R. J., Arkenbout E. K., IJsselmuiden A. J., Elias J., van Dongen I. M., Tijssen R. Y., Koch K. T., Baan J. Jr., Vis M. M., de Winter R. J., Piek J. J., Tijssen J. G., Henriques J. P., AIDA Investigators, *Bioresorbable scaffolds versus metallic stents in routine PCI*, *N. Engl. J. Med.* Vol. 376, pp. 2319-2328, 2017.
- [4] Colombo, A., Karvouni, E., *Biodegradable stents: fulfilling the mission and stepping away*. *Circulation*, Vol. 102, pp. 371-373, 2000.
- [5] Roberts C, S, *Magnesium and its Alloys*, Wiley, New York, NY, 1960.
- [6] Burke E. C. and Hibbard J. W. R., *Plastic deformation of magnesium single crystals*, *Trans. AIME.*, Vol. 79, pp. 295-303, 1952.
- [7] Wang L., Mostaed E., Cao X., Huang G., Fabrizio A., Bonollo F., Chi C., Vedani M., *Effects of texture and grain size on mechanical properties of AZ80 magnesium alloys at lower temperatures*, *Mater. Des.*, Vol. 89, pp. 1-8, 2016.
- [8] Li F., Zeng X., Chen Q., Cao G. J., *Effect of local strains on the texture and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy produced by continuous variable cross-section direct extrusion (CVCDE)*, *Mater. Des.*, Vol. 85, pp. 389-395, 2015.
- [9] Mostaed E., Fabrizio A., Dellasega D., Bonollo F., Vedani M., *Microstructure, mechanical behavior and low*

- [26] Afshar A., Hashemi R., Madoliat R., Rahmatahadi D. and Hadiyan B., Numerical and experimental study of bursting prediction in tube hydroforming of Al 7020-T6, *Mechanics & Industry*, Vol. 18, pp. 2-5, 2017.
- [27] Zeng Z. R., Bian M. Z., Xu S. W., Davies C. J. H., Birbilis N., Nie J. F., Effects of dilute additions of Zn and Ca on ductility of magnesium alloy sheet, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 674, pp. 459-471, 2016.
- [28] Sankaranarayanan Seetharaman, *Synthesis and Characterization of New titanium containing Magnesium Materials*, Ph.D Theses, National University of Singapore, 2014.
- temperature superplasticity of ECAP processed ZM21 Mg alloy, *J. Alloys Compd.*, Vol. 638, pp. 267-276, 2015.
- [10] Yin S. M., Wang C. H., Diao Y. D., Wu S. D., Li S. X., Influence of grain size and texture on the yield asymmetry of Mg-3Al-1Zn alloy, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 27, pp. 29-34, 2011.
- [11] Tong L. B., Zheng M. Y., Kamado S., Zhang D. P., Meng J., Cheng L. R., Zhang H. J., Reducing the tension-compression yield asymmetry of extruded Mg-Zn-Ca alloy via equal channel angular pressing, *J. Magnes. Alloy.*, Vol. 3, pp. 302-308, 2015.
- [12] Zhang L., Zhang W., Cao B., Chen W., Duan J., Cui G., Effects of texture and grain size on the yield strength of ZK61 alloy rods processed by cyclic extrusion and compression, *Mater.*, Vol. 10, pp. 87-101, 2017.
- [13] Kamrani S., Fleck C., Effects of calcium and rare-earth elements on the microstructure and tension-compression yield asymmetry of ZEK100 alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 618, pp. 238-243, 2014.
- [14] Jain J., Poole W. J., Sinclair C. W., Gharghoury M. A., Reducing the tension-compression yield asymmetry in a Mg-8Al-0.5Zn alloy via precipitation, *Scr. Mater.*, Vol. 62, pp. 301-304, 2010.
- [۱۵] رضایی آشتیانی ح. ر.، بیاتی ص.، بهینه‌سازی مسیر بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از منطق فازی، *مجله مهندسی مکانیک تبریز*، د. ۴۹، ش. ۲، ص. ۹۳-۱۰۱ و ۱۳۹۸.
- [۱۶] عباس نژاد ش.، "هیدروفرمینگ ورق های آلومینیومی"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک دانشگاه علم و صنعت ۱۳۸۵.
- [17] Kim J., Kim S. W., Song W. J., Kang B. S., Analytical approach to bursting in tube hydroforming using diffuse plastic instability, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 1535-1547, 2004.
- [18] Kim J., Kim S. W., Song W. J., Kang B. S., Analytical and numerical approach to prediction of forming limit in tube hydroforming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, pp. 1023-1037, 2005.
- [19] Seyedkashi S. M. H., Valiollah Panahizadeh R., Haibin Xu, SangYun Kim and Young Hoon Moon, process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, pp. 169-175, 2015.
- [20] Chen X., Yu Z., B., Li S., Lina Z., A theoretical and experimental study on forming limit diagram for a seamed tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. ۲۰۱۲-2021, ۲۰۱۱.
- [21] Hwang Y. M., Lin Y. K., Chuang H. C., Forming limit diagrams of tubular materials by bulge tests, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5024-5034, 2009.
- [۲۲] فلاحتی نقیبه م.، گردویی م.، بخشی جویباری م.، گرجی ولوکلا ع. ح.، "مطالعه تجربی و عددی منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ نزن ۴۰۳ در فرآیند هیدروفرمینگ"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۹۹، ص. ۱-۸، ۱۳۹۹.
- [۲۳] سید هاشمی ج.، مسلمی نائینی ح.، لیاقت غ. ح.، شهبازی کرمی ج.، اروچی ا. ح.، "پیش بینی ترکیدگی لوله در فرآیند هیدروفرمینگ گرم به کمک معیارهای شکست نرم اصلاح شده"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۴، ص. ۲۰۱-۲۱۱، ۱۳۹۳.
- [۲۴] مسلمی نائینی ح.، سید هاشمی ج.، غلامحسین لیاقت غ. ح.، محمدی م.، دیلمی عضدی ح.، "پیش بینی تحلیلی کرنش ها و تنش های حدی در هیدروفرمینگ لوله آلومینیومی ناهمسانگرد"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۴، ص. ۱۳۳-۱۴۰ و ۱۳۹۳.
- [25] Assempour A., Nejadkhaki HK. and Hashemi R. Forming limit diagrams with the existence of through-thickness normal stress. *Computational Materials Science*, Vol. 48, pp. 504-508, 2010.