

A New Method for Experimentally Determining the Forming Limit Curves of Thin-Walled Metal Tubes

Amin Ghiasi Tabari, Mohammad Bakhshi Jooybari ^{*}, Hamid Gorji, Mohammad Javad Mirnia

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: May 09, 2025

Revised: June 30, 2025

Accepted: July 02, 2025

ePublished: September 14, 2025

ABSTRACT

This study introduces a novel experimental approach for determining forming limit Curves (FLCs) in thin-walled metal tubes using a double-layer hydraulic bulge test. The outer tube, constructed from AA6063-T6 aluminum alloy, contains specially designed cuts to evaluate its formability, while a ductile inner tube transmits hydraulic pressure. By adjusting the cut geometry, different stress states from pure shear to equibiaxial tension can be generated until fracture, with each state corresponding to a unique strain path. The designed cuts configurations were optimized through iterative finite element modeling, ensuring accurate stress state simulations. Key benefits of this method include comprehensive strain path replication (similar to actual tube hydroforming conditions) and minimal experimental complexity. Additionally, fracture behavior was predicted using a modified Mohr-Coulomb ductile fracture criterion, calibrated through specialized tests resembling FLC determination procedures.

Keywords: Formability, Tube Hydroforming, Forming Limit Curve, Fracture

How to cite this article

Ghiasi Tabari A, Bakhshi Jooybari M, Gorji H, Mirnia M.J, A new method for experimentally determining the forming limit curves of thin-walled metal tubes. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(07):465-479.

*Corresponding author's email: bakhshi@nit.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-8164-5438



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-Noncommercial terms.

۱- مقدمه

شکل‌پذیری لوله‌های فلزی بیانگر قابلیت تغییر شکل پلاستیک آنها تا رسیدن به شکل مورد نظر، بدون بروز هر گونه عیبی می‌باشد. از جمله عیوبی که در فرآیندهای هیدروفرمینگ لوله-های فلزی رخ می‌دهد عبارتند از: ترکیدگی، چروکیدگی، خمیدگی، تاخوردگی و کاهش چشمگیر کیفیت سطح. هر کدام از این عیوب می‌تواند معیار محدود کننده‌ای برای شکل‌پذیری لوله‌های فلزی در نظر گرفته شود. امروزه، نمودار حد شکل‌دهی (Forming Limit Curve)، ابزار متعارفی است که برای توصیف کمی شکل‌پذیری لوله‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون روش‌های گوناگونی برای تعیین تجربی نمودارهای حد شکل‌دهی لوله‌های فلزی پیشنهاد گردیده‌است.

دیویس و همکاران [۱] با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ آزاد لوله که در آن نیروی محوری و فشار داخلی کنترل می‌شود، نمودار حد شکل‌دهی آلیاژهای آلومینیوم AA6061-T4 و AA6061-T6 را استخراج کردند. آنها نتایج به‌دست آمده را با نمودارهای حد شکل‌دهی این ورق‌ها که به صورت تئوری و بر اساس روش مارسینیاک-کوزینسکی (Marciniak-Kuczynski) محاسبه شد، مقایسه کردند. آنها بیان نمودند که با روش تئوری یاد شده می‌توان با دقت قابل قبولی نمودار حد شکل‌دهی لوله را به‌دست آورد. آنها هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که از لحاظ شکل ظاهری، نمودارهای به‌دست آمده بسیار شبیه نمودارهای حد شکل‌دهی متعارفی هستند که از ورق‌های فلزی استخراج شده‌اند. با مقایسه نمودارهای حد شکل‌دهی فرآیند هیدروفرمینگ آزاد لوله با یک فرآیند هیدروفرمینگ لوله تجاری پیچیده، مشاهده شد که نمودار به‌دست آمده قابلیت چندان برای پیش‌بینی حدود شکل‌دهی فرآیندهای پیچیده‌تر را ندارد، نتیجه‌ای که لزوم توسعه روش‌های جدیدتر را برجسته می‌کند. یوشیدا و همکاران [۲] حدود شکل‌دهی لوله آلومینیومی سری ۵۰۰۰ را با ترکیبی از بارگذاری محوری و فشار هیدرولیک داخلی با مسیرهای تنش‌ی خطی و غیر خطی مورد مطالعه قرار دادند. آنها در مطالعه خود از یک دستگاه آزمایش ترکیبی کشش-فشار داخلی استفاده کردند که قابلیت ایجاد و حفظ مسیر تنش دلخواهی را با استفاده از یک سیستم کنترل بسته دارد. آنان کرنش‌ها و تنش‌های حدی را با دقت بالایی اندازه‌گیری کردند و نمودارهای حد شکل‌دهی مبتنی بر کرنش و تنش را استخراج نمودند. با استخراج نمودارها مشخص شد که منحنی حد شکل‌دهی مبتنی بر کرنش، وابستگی بسیاری به مسیر بارگذاری دارد، در حالی که منحنی مبتنی بر تنش، مستقل از مسیر بارگذاری است. بر این اساس، محققان

نتیجه‌گیری کردند که اعتبار آن برای پیش‌بینی ناپایداری لوله-های فلزی در فرآیندهای تنش‌صفحه‌ای بیشتر است. هوانگ و همکاران [۳] به تعیین نمودار حد شکل‌دهی لوله آلومینیومی با استفاده از آزمون بالچ هیدرولیک پرداختند. آنها مسیرهای بارگذاری متناسب با مسیرهای کرنش مورد نظر خود را از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود طراحی نمودند. به‌علاوه، برای استخراج کرنش‌های اصلی بحرانی در شروع ناپایداری پلاستیک، از معیار گلوبی توزیعی سوئیفت (Swift's diffused necking criterion) و معیار گلوبی موضعی هیل (Hill's localized necking criterion) به همراه تابع تسلیم غیر مربع هیل استفاده نمودند. هم‌چنین، اثر نمای کرنش‌سختی، معیار تسلیم و ضریب ناهمسانگردی عمودی ماده را بر مکان هندسی تسلیم و نمودار حد شکل‌دهی، مورد بحث قرار دادند. آنها در نهایت به مقایسه نمودارهای حد شکل‌دهی تجربی و تحلیلی پرداختند. ماگرنو و همکاران [۴] با استفاده از روش بالچ هیدرولیک لوله، حدود شکل‌پذیری لوله‌های جدارنازک را در فضای کرنش مؤثر و سه‌محورگی تنش (Stress triaxiality) ترسیم کردند. آنها برای تشخیص شروع گلوبی از فناوری تصویربرداری دیجیتال (Digital Image Correlation-DIC)، بهره بردند و برای تشخیص شروع شکست و ارزیابی کرنش‌های آن ضخامت و کرنش را در ناحیه شکست اندازه‌گیری نمودند. آنها در پژوهش خود برای اولین بار خط شکل‌دهی شکست را برای لوله‌های جدارنازک بدست آوردند.

خصوصیات مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌ها یا لوله‌های فلزی، به‌ویژه در هیدروفرمینگ لوله، معمولاً از آزمون کشش تک‌محوره ورق اولیه استخراج می‌شود. با این حال، اعتبارسنجی نتایج و قابلیت اطمینان در شبیه‌سازی‌های عددی به دلیل ویژگی‌های متفاوت مواد لوله‌ای نسبت به ورق‌ها پیچیده‌تر است. برای شناسایی مناسب‌ترین خصوصیات مواد جهت ارزیابی حدود شکل‌دهی در فرآیندهای هیدروفرمینگ لوله، جین و همکاران [۵] آزمون‌های کشش تک‌محوره را هم بر روی ورق فلزی و هم بر روی لوله‌های رول‌فرم شده و نیز آزمون بالچ هیدرولیک آزاد لوله را بر روی لوله‌های رول‌فرم شده انجام دادند. آنها نمودارهای حد شکل‌دهی با استفاده از نظریه ناپایداری پلاستیک و مبتنی بر معیار گلوبی موضعی هیل را برای ورق‌ها و نیز بر اساس معیار گلوبی توزیعی سوئیفت برای ورق و لوله استخراج نمودند. آنها آزمون‌های بالچ آزاد را در شرایطی که بارگذاری به شدت تحت کنترل قرار داشته انجام دادند و در نهایت موفق شدند ناحیه مناسبی بین شروع گلوبی تا شروع

ترکیدگی را برای لوله‌های رول فرم شده در فرآیند هیدروفرمینگ لوله معین کنند که در مقایسه با روش‌های مربوط به ورق نتایج دقیق‌تری را در اختیار قرار می‌دهد.

نمودار حد شکل‌دهی باید گستره‌ی کاملی از مسیرهای کرنشی در فرآیندهای شکل‌دهی لوله‌های فلزی را پوشش دهد. هیدروفرمینگ آزاد لوله عموماً برای استخراج کرنش‌های حد شکل‌دهی ناحیه سمت چپ نمودارهای حد شکل‌دهی طراحی شده‌است و برای دستیابی به کرنش‌های حد شکل‌دهی نواحی سمت راست این نمودار، لازم است تا این فرآیند با شرایط متفاوتی نسبت به حالت آزاد صورت گیرد. چن و همکاران [۶] یک مدل تئوری برای پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله ارائه کرده‌اند. آنها برای استخراج کرنش‌های ناحیه سمت راست نمودار حد شکل‌دهی، یک مجموعه آزمون تجربی ابتکاری را طراحی کردند. این مجموعه از طریق ترکیب نیروی فشاری جانبی با فشار داخلی هیدرولیکی، جریان ماده را در حالت کرنش کششی-کششی کنترل می‌کند. آنها مسیرهای بارگذاری مناسب را برای نواحی سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی، با استفاده از روابط تئوری و مسیرهای بارگذاری مناسب نواحی سمت راست نمودار حد شکل‌دهی به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود محاسبه نمودند. لی و همکاران [۷] یک مدل تئوری جدید را برای بالچ بیضوی لوله در فرآیند هیدروفرمینگ لوله توسعه داده‌اند. این مدل برای پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی لوله‌های فلزی از تئوری مارسینیاک-کوزینسکی و معیار تسلیم هاسفورد بهره می‌برد. آنها برای استخراج کرنش‌ها در ناحیه کشش دومحوره نمودار حد شکل‌دهی، یک مجموعه آزمون تجربی ابتکاری را طراحی کردند. این مجموعه از طریق پنج اینسرت قالب بیضوی با نسبت‌های بیضوی متفاوت، جریان ماده را در حالت کرنش کششی-کششی کنترل می‌کند.

یو و همکاران [۸] برای ارزیابی شکل‌پذیری لوله‌های درزدار از آزمون‌های بالچ هیدرولیک آزاد و بالچ هیدرولیک بیضوی برای استخراج نمودار حد شکل‌دهی استفاده کردند. آنها شکل‌پذیری دو نوع لوله درزدار را که یکی با جوش لیزر و دیگری با جوشکاری مقاومتی ساخته شده بود، مورد ارزیابی قرار دادند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که لوله با جوش لیزر شکل‌پذیری بهتری را از خود نشان می‌دهد. نگوین و همکاران [۹] بیان نمودند که روش‌های مرسوم استخراج نمودارهای حد شکل‌دهی، در مورد محصولات هیدروفرم شده لوله‌ای به این دلیل که تنش‌های پیچیده و تغییرات مسیر کرنشی را تجربه می‌کنند، ممکن است کارآمدی لازم را نداشته باشد. از این رو، برای ارزیابی گلوبی و

ترکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله، نمودار کرنش پلاستیک مؤثر قطبی را به عنوان یک ابزار اندازه‌گیری غیرحساس به مسیر کرنش مورد استفاده قرار دادند. نمودار کرنش پلاستیک مؤثر قطبی از داده‌های کرنش پلاستیک مؤثر و جهت تعیین شده توسط آرکتانژانت نسبت نرخ کرنش جاری استفاده می‌کند. این مقادیر از آزمون انبساط آزاد لوله‌های آلومینیوم آلیاژ AA6063 با ترکیب‌های مختلف تغذیه محوری و فشار داخلی با استفاده از یک سیستم اندازه‌گیری کرنش سطحی مبتنی بر دید استریویی اندازه‌گیری و محاسبه شدند. در پایان نمودار کرنش پلاستیک مؤثر قطبی استخراج شد و برای پیش‌بینی عددی حد شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیوم آلیاژ AA6063 مورد استفاده قرار گرفت. محمدی و همکاران [۱۰] روشی برای آزمون بالچ هیدرولیک لوله به منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی لوله دولایه پیشنهاد داده‌اند. آنها بالچ هیدرولیک لوله دو لایه آلومینیومی-مسی را با نرم افزار المان محدود ABAQUS شبیه‌سازی نمودند و پس از اعتبارسنجی مدل اجزای محدود، اثرات پارامترهای فرآیند (پهنای برآمدگی، شعاع قالب و مسیر بارگذاری) را بر روی مسیر کرنش ایجاد شده بررسی کردند. سپس با انتخاب سطوح مناسب پارامترهای فرآیند، تعدادی آزمون به منظور دستیابی به توزیع یکنواخت کرنش‌های حدی در صفحه کرنش اصلی طراحی و انجام دادند. در نهایت، نمودار حد شکل‌دهی لوله دو لایه با استفاده از کرنش‌های حدی به دست آمده را ترسیم نمودند.

هاشمی و همکاران [۱۱]، برای استخراج منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ در دماهای بالا از هفت معیار شکست نرم در شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده کردند. آنها در ادامه برای انتخاب بهترین معیار، منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده به وسیله معیارهای شکست را با نتایج تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که معیار شکست می‌تواند زمان و محل پارگی را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم لوله‌های آلومینیومی با دقت خوبی معین کند.

مسلمی نائینی و همکاران [۱۲] به بررسی کاربرد معیارهای ناپایداری پلاستیک (شامل معیار هیل و معیار سوئیفت برای لوله‌ها و ورق‌ها) در پیش‌بینی پدیده گلوبی شدن و منحنی حد شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله پرداختند. در این مطالعه، کرنش‌های حدی با بهره‌گیری از این معیارها محاسبه شد. پژوهشگران یاد شده اثر ناهمسانگردی لوله‌ها را مدنظر قرار داده و از معیار تسلیم درجه دوم بارلات استفاده کردند. به منظور اعتبارسنجی نتایج نظری، آزمایش‌های بالچ تحت مسیرهای مختلف بارگذاری انجام شد و منحنی حد شکل‌دهی به صورت

شکل‌دهی حاصل از شبیه‌سازی مطابقت خوبی را با نمودار تجربی حاصل از آزمون بالچ هیدرولیک لوله نشان داد. ژو و همکاران [۱۷] یک مدل تحلیلی برای بالچ هیدرولیک لوله‌های جدار نازک با انتهای باز و انتهای بسته ارائه نمودند و با به‌کارگیری هم‌زمان شبیه‌سازی اجزای محدود، مسیرهای تنش و کرنش را در حین فرآیند بالچ لوله مورد ارزیابی قرار دادند. آنها برای ارایه بهتر کرنش‌های حدی در مسیرهای بارگذاری غیر خطی، یک نمودار حد شکل‌دهی ابتکاری را که با پارامتری هندسی لوله ترکیب شده بود، پیشنهاد نمودند. این پارامتر نسبت طول ناحیه تحت بالچ به قطر لوله است که با تغییرات آن، شرایط بارگذاری نیز تغییر می‌کند و گستره کاملی از حالت‌های تنش قبل از گلوپی و شکست را در اختیار قرار می‌دهد.

غیر یکنواختی ضخامت لوله‌های فلزی تأثیر قابل توجهی بر شکل‌پذیری آنها در فرآیندهای هیدروفرمینگ لوله دارد، یانگ و ژائو [۱۸] در پژوهش خود به این موضوع پرداختند. آنان در ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله، نمودار حد شکل‌دهی لوله‌ی استیل زنگ نزن با ضخامت اولیه غیر یکنواخت را در حالت‌های کرنش کششی و فشاری به‌دست آوردند. سپس به ایجاد یک مدل هندسی غیر یکنواخت برای لوله مبادرت ورزیدند. در ادامه، اثر غیر یکنواختی ضخامت را بر نمودار حد شکل‌دهی ارزیابی نمودند. آنها برای شفاف سازی هر چه بیشتر تفاوت‌های مشاهده شده در نمودارها، از سه معیار ناپایداری پلاستیک متفاوت استفاده نمودند و در پایان برای اعتبارسنجی مدل هندسی ارائه شده از آزمون‌های تجربی بالچ هیدرولیک استفاده نمودند.

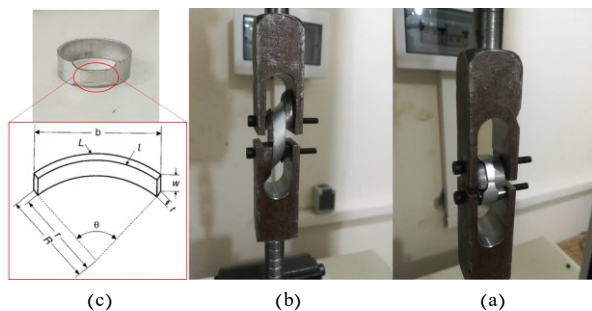
هاشمی و همکاران [۱۹] نمودار حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی AA6063 را با استفاده از آزمون بالچ هیدرولیک در دماهای بالا به دست آوردند. آنها ابتدا تعدادی از معیارهای شکست نرم را با استفاده از آزمون کشش تک محوره در دماهای بالا کالیبره کردند و فرآیند بالچ هیدرولیک لوله را در شرایط مختلف شبیه‌سازی نمودند. آنگاه با مقایسه نمودارهای حد شکل‌دهی تجربی و شبیه‌سازی به اعتبارسنجی صحت پیش-بینی معیارهای شکست نرم انتخاب شده پرداختند.

در مطالعاتی که معیارهای شکست توسط آزمون‌های محدود به یک حالت تنش خاص و غیر مبتنی بر هندسه لوله کالیبره می‌شوند (گو و همکاران [۲۰]، لی و همکاران [۲۱] و سونگ و همکاران [۲۲]) این کاستی وجود دارد که صحت شبیه‌سازی‌ها در پیش‌بینی گلوپی یا شکست محدود به همان شرایط

تجربی تعیین گردید. یافته‌های این تحقیق نشان داد که معیار ناپایداری سوئیفت برای لوله‌ها دقیق‌ترین پیش‌بینی را از منحنی حد شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله ارائه می‌دهد. هاشمی و همکاران [۱۳] در پژوهش خود، هفت معیار شکست نرم را برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی AA6063 در دمای بالا به‌کار بردند. آنها ابتدا با انجام آزمایش‌های کشش در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف، این معیارها را کالیبره کردند. سپس، فرآیند هیدروفرمینگ یک قطعه مربعی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و منحنی‌های بارگذاری با مقادیر مختلف تغذیه محوری اعمال گردید تا شعاع گوشه‌های شکل‌گرفته توسط معیارهای مختلف پیش‌بینی شود. علاوه بر این، آزمایش‌های تجربی نیز انجام شد. نتایج نشان داد که معیارهای شکست نرم اصلاح‌شده، مکان ترک‌زدگی را با دقت خوبی تعیین می‌کنند و در میان آنها، معیار آیدای اصلاح‌شده با کمترین خطا، شعاع گوشه قطعه مربعی را در دماهای بالا پیش‌بینی می‌کند.

سنتنو و همکاران [۱۴] تغییر شکل پلاستیک لوله‌های آلومینیومی AA6063-T6 را به منظور تعیین حدود شکل‌دهی و شکست با استفاده از سه فرآیند انبساط لوله، مخروطی کردن لوله و برگرداندن لوله (Tube inversion) مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در ارزیابی خود از شبیه‌سازی اجزای محدود به همراه روش تحلیل شبکه دایره‌ای به منظور استخراج مسیرهای بارگذاری در فضای کرنش‌های اصلی استفاده نمودند. کریستینو و همکاران [۱۵] یک روش جدید برای مشخصه‌سازی شکل‌پذیری لوله‌ها به کار بردند. آنها در مطالعه خود برای استخراج نمودار حد شکل‌دهی تجربی لوله، یک انتهای آن را با پانچ‌های دایره‌ای، بیضوی و مربعی منبسط نمودند.

غیر یکنواختی ضخامت سطح مقطع لوله‌های جدار نازک اکستروود شده منجر به تغییر الگوی شکل‌پذیری آنها خواهد شد. هی و همکاران [۱۶] در ابتدا این موضوع را با روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند و انبساط شعاعی، توزیع تنش محیطی و تغییر سطح مقطع لوله در هنگام بالچ هیدرولیک آزاد را تحلیل نمودند. آنها غیر یکنواختی ضخامت را در قالب پارامتر کمی ضریب ناهمگنی اولیه و ترکیب آن با مدل تحلیل ناپایداری پلاستیک مارسینیاک-کوزینسکی مورد ارزیابی قرار دادند و به این صورت مدل مارسینیاک-کوزینسکی اصلاح شده را پیشنهاد نمودند. آنان برای اعتبارسنجی آن مدل از آزمون بالچ هیدرولیک لوله آلومینیومی AA6061-F به صورت کنترل شده استفاده نمودند. در نهایت ناحیه سمت راست نمودار حد



شکل ۱ الف) آزمون کشش محیطی حلقه. ب) آزمون کشش حلقه مورب. پ) ابعاد هندسی ناحیه گنج

Fig.1 Ring hoop tension tests

جدول ۱ خواص مکانیکی لوله‌های AA6063-T6 و SS304 که از آزمون-های کشش لوله، کشش محیطی حلقه (RHTT) و کشش محیطی حلقه مورب (DRHTT) به دست آمده‌اند.

Table 1 Mechanical properties of AA6063-T6 and SS304 tubes obtained from the full-size tube tension test, RHTT and DRHTT

	E (GPa)	YS (MPa)	UTS (MPa)	Poisson's Ratio	Elongation (%)		Lankford coefficients			
					Uniform	Fracture	r_0	r_{45}	r_{90}	$\bar{r}$
AA6063-T6	68.9	214	241	0.33	9.57	13.11	0.29	0.31	0.65	0.39
AISI304	193	289	1060	0.29						

آزمون کشش لوله با استفاده از دستگاه آزمایش کشش ۶۰۰ کیلو نیوتنی DMG با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. آزمون‌های کشش حلقه با دستگاه آزمایش ۵۰ کیلو نیوتنی تنی SANTAM SAM-250 با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده‌اند. جدول ۱ خواص مکانیکی لوله آلومینیومی را در امتداد محوری نشان می‌دهد. ضرایب لنگفورد (Lankford Coefficient) با استفاده از آزمون‌های حلقه و در موقعیت ۲۰٪ کرنش گلوبی محاسبه گردیده‌اند که در جدول ۱ به نمایش گذاشته شده‌اند.

تنش‌های تسلیم در کرنش پلاستیک ۰/۲٪ در امتدادهای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب عبارتند از ۲۱۴ مگاپاسکال، ۲۱۲/۷ مگاپاسکال و ۲۰۳/۴ مگاپاسکال. برای محاسبه ضریب ناهمسانگردی در امتداد ۹۰ درجه (r_{90})، ابتدا پهنای اولیه نمونه‌ی حلقه‌ای (w_0) در ناحیه گنج و پهنای نهایی (w_f) در موقعیت ۲۰٪ کرنش گلوبی، اندازه‌گیری شد. آنگاه r_{90} با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید:

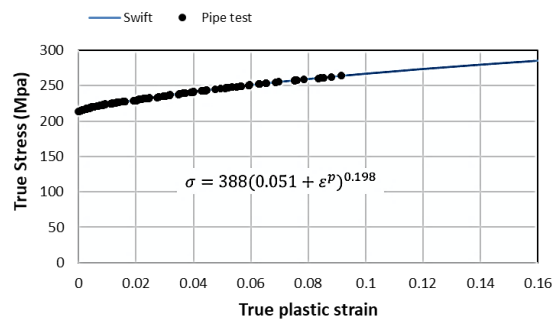
$$r = -\frac{\epsilon_w}{\epsilon_w + \epsilon_l} = -\frac{\ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right) + \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right)} \quad (1)$$

کالیبراسیون می‌شود و نمی‌توان تحلیل جامعی را که همه حالت‌های تنش در آن دیده شود، انجام داد. در مقاله حاضر یک روش جدید برای تعیین تجربی نمودارهای حد شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک فلزی ارائه شده‌است. روش مورد استفاده مبتنی بر آزمون بالچ هیدرولیک لوله دولایه می‌باشد. بر روی لوله خارجی که قرار است شکل پذیری آن بررسی شود و جنس آن نیز از آلیاژ آلومینیوم AA6063-T6 می‌باشد، یک شیار با هندسه خاص، ایجاد می‌شود. لوله داخلی که از یک فلز شکل-پذیر انتخاب شده‌است، به عنوان واسطه‌ای برای انتقال فشار هیدرولیکی به لوله خارجی عمل می‌کند. با اصلاح موقعیت و ابعاد شیارها می‌توان در لوله خارجی، حالت‌های مختلف تنش، از برش محض صفحه‌ای تا کشش دومحوره‌ی متوازن را تا رسیدن به شکست ایجاد نمود. هر یک از این حالت‌های تنش متناظر با یک مسیر کرنش است که هدف از این مطالعه دستیابی به آنها می‌باشد. طراحی شیارهای هندسی بر روی لوله خارجی برای ایجاد هر حالت تنش خاص، با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود رفت و برگشتی انجام شده‌است. برای شبیه‌سازی عددی روش پیشنهاد شده جهت استخراج نمودار حد شکل‌دهی، از مجموعه آزمون‌های کالیبراسیون جامعی که گستره کاملی از حالت‌های تنش، از برش محض صفحه‌ای تا کشش دومحوره متوازن را پوشش می‌دهد، استفاده شده‌است [۲۳]. این آزمون‌ها مبتنی بر هندسه لوله‌اند و بازتاب دقیق‌تری از فرآیندهای هیدروفورمینگ لوله را در اختیار قرار می‌دهند. در ادامه معیار شکست نرم پدیدارشناختی موهر-کلمب اصلاح شده (MMC3)، کالیبره می‌شود و در تحلیل‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پایان نمودارهای حد شکل‌دهی که از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود به دست آمده‌اند، با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۲- مواد

۲-۱- لوله آلومینیوم AA6063-T6

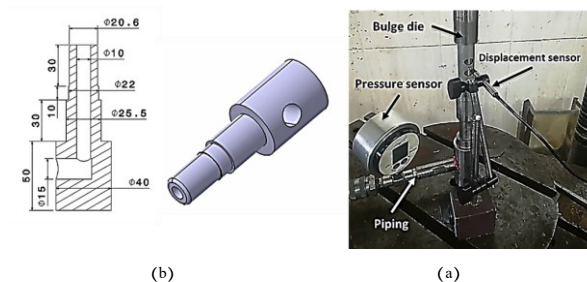
استخراج نمودار حد شکل‌دهی با انجام آزمون بالچ هیدرولیک لوله بر روی یک لوله آلومینیوم AA6063-T6 با قطر خارجی ۲۵/۵ میلی‌متر و ضخامت ۱/۱ میلی‌متر صورت پذیرفت. خواص مکانیکی این لوله با استفاده از آزمون کشش لوله مبتنی بر استاندارد ASTM E8 در امتداد محور لوله (جهت اکستروژن، امتداد ۰°)، آزمون کشش محیطی حلقه (امتداد ۹۰°) و آزمون کشش حلقه مورب (امتداد ۴۵°) به دست آمده‌اند. شکل ۱ نمایی از آزمون‌های کشش حلقه را نشان می‌دهد.



شکل ۲ نمودار تنش - کرنش حقیقی لوله AA6063-T6 استخراج شده از

آزمون کشش لوله به همراه معادله کارسختی سویفت

Fig. 2 True stress-plastic strain curve of AA6063-T6 tube obtained from the pipe test together with the Swift work hardening equation



شکل ۳ الف) تجهیزات آزمون بالج هیدرولیک لوله دولایه، ب) ابعاد

سنبه آزمون بالج (به میلیمتر)

Fig. 3 Experimental equipment of the THB test and Dimensions of the bulge punch (dimensions are in mm)

خاص بر روی لوله خارجی و سپس انجام فرآیند بالج هیدرولیک لوله دولایه می‌توان حالت‌های تنش گوناگون، از برش محض تا کشش دومحوره‌ی متوازن را که منجر به مسیرهای کرنش مختلفی می‌شوند، ایجاد کرد. برای کاهش اصطکاک، از سه لایه پلی‌اتیلن روغنکاری شده استفاده شده است. همه‌ی آزمون‌ها با نرخ جریان پایای ۳۰ میلیمتر بر دقیقه انجام شده‌اند.

در پژوهش حاضر، لوله داخلی تنها برای انتقال فشار سیال به داخل لوله شیاردار AA6063-T6 استفاده شده است. برای این منظور، قابلیت شکل‌پذیری لوله داخلی باید بالاتر از لوله شیاردار باشد تا از شکست زودرس لوله داخلی جلوگیری شود، چرا که شکست زودرس می‌تواند منجر به کاهش ناگهانی فشار شکل‌دهی شود. از طرف دیگر، استحکام لوله داخلی باید بیشتر از لوله خارجی باشد تا بتواند شکل کروی خود را در طول آزمایش حفظ کند و فشار تماس یکنواختی را به لوله خارجی منتقل کند. در غیر این صورت، لوله داخلی با استحکام کم تحت فشار شکل‌دهی به صورت موضعی به داخل شیارهای لوله خارجی کشیده می‌شود که این امر یکنواختی فرآیند تغییر شکل لوله مورد نظر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، بلافاصله پس از شروع شکست در لوله اصلی، لوله داخلی با

در معادله فوق ε_w و ε_t به ترتیب کرنش‌های عرضی و طولی هستند و L_0 و L_f بر اساس شکل ۱-ج به ترتیب طول کمان‌های اولیه و نهایی ناحیه گیج می‌باشند که بر اساس روابط پیشنهادی وانگ و همکاران [۲۴] محاسبه شده‌اند. برای محاسبه ضریب ناهمسانگردی در امتداد ۴۵ درجه (r_{45})، آزمون کشش حلقه مورب با استفاده از معادله ۲ که توسط موسوی و همکاران [۲۵] پیشنهاد شده، محاسبه شده است:

$$r_{\phi} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2)$$

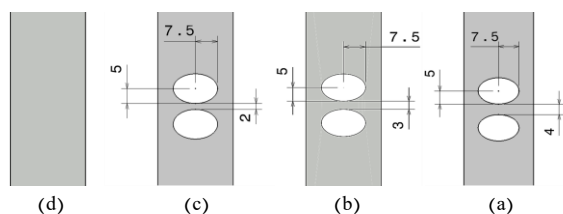
در معادله ۲، r_{ϕ} ضریب ناهمسانگردی وابسته به جهت است و ε_w و ε_t به ترتیب کرنش‌های عرضی و ضخامتی هستند که با استفاده از روابط ارائه شده توسط مرجع [۲۵] محاسبه شده‌اند. نمودار تنش-کرنش لوله آلومینیوم AA6063-T6 با استفاده از آزمون کشش لوله استخراج و سپس با استفاده از قانون کارسختی همسانگرد سوئیفت برون‌یابی گردید. این نمودار در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۲-۲- لوله فولادی AISI304

برای جلوگیری از شکست زود هنگام لوله آلومینیومی در بالج هیدرولیک، لوله فولادی داخلی که وظیفه انتقال فشار سیال به لوله خارجی را دارد، از یک آلیاژ با شکل‌پذیری و استحکام بالاتر از لوله خارجی در نظر گرفته شده است. پس از بررسی‌های اولیه لوله فولادی AISI304 با قطر خارجی ۲۲ میلیمتر و ضخامت ۰/۷ میلیمتر انتخاب شد. رفتار کارسختی این لوله با استفاده از آزمون کشش لوله و برون‌یابی بر اساس قانون کارسختی همسانگرد سوئیفت به صورت $\sigma = 1982(0.03 + \varepsilon^p)^{0.56}$ به دست آمد. خواص مکانیکی این لوله نیز در جدول ۱ نمایش داده شده است.

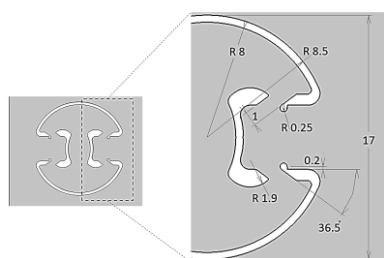
۳- آزمون بالج هیدرولیک لوله

در آزمون بالج هیدرولیک لوله با دو انتهای مقید، افزایش فشار سیال داخل لوله سبب می‌شود تا لوله به تدریج منبسط شود. مقادیر ارتفاع بالج و ضخامت ناحیه بالج شده در این فرآیند اهمیت زیادی دارد. تجهیزات مورد استفاده در این نوع خاص از فرآیند بالج هیدرولیک لوله در شکل ۳ نشان داده شده است. این تجهیزات شامل مجموعه قالب، پمپ هیدرولیک، حسگر فشار با دقت ۰/۱ بار و حسگر ارتفاع با دقت ۰/۰۵ میلیمتر برای اندازه‌گیری ارتفاع بالج می‌باشد. طول اولیه لوله‌های به کار رفته در این آزمون ۱۲۰ میلیمتر بوده است. وقتی دو انتهای لوله کاملاً مقید باشند، حالت کرنش صفحه‌ای حاکم خواهد بود (محور عمودی در نمودار حد شکل‌دهی). با طراحی شیارهایی



شکل ۴ الف) نمونه کشش دوماحوره متوازن (EBT)، ب) نمونه کشش دوماحوره (BT)، پ) نمونه کشش تک محوره (UAT) و ت) نمونه کرنش صفحه‌ای (PST)

Fig. 4 FLD test specimens



شکل ۵ هندسه طراحی شده برای آزمون بالچ هیدرولیک دولایه حالت برش محض صفحه‌ای (IPS)

Fig. 5 The designed geometry for the in-plane shear in the THB test (dimensions in mm)

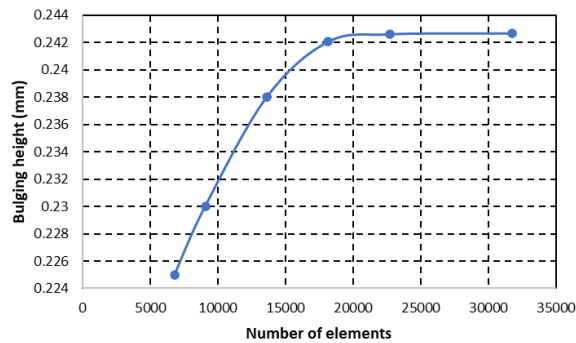
فاصله بین بیضی‌ها بر روی ۴ میلی‌متر تنظیم شود، مسیر کرنش متناظر با حالت کشش دوماحوره متوازن تولید می‌گردد (نمونه Equibiaxial Tension (EBT)). با تغییر فاصله بین دو بیضی، گستره جامعی از مسیرهای کرنش متناظر با حالت‌های تنش در محدوده کشش تک‌محوره تا کشش دوماحوره متوازن تولید می‌گردند. به طور مثال، با تنظیم فاصله بیضی‌ها بر روی ۳ میلی‌متر مسیر کرنش متناظر با حالتی از کشش دوماحوره در محدوده حالت‌های کرنش صفحه‌ای و کشش دوماحوره متوازن به وجود می‌آید که با نمونه Biaxial tension (BAT) معرفی شده‌است.

طراحی آزمونی که بتواند وقوع گلوبی یا شکست را تحت شرایط برش صفحه‌ای (ربع دوم نمودار حد شکل‌دهی) محقق کند از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش یک نمونه آزمون ابتکاری از طریق ایجاد یک هندسه خاص که می‌تواند مسیر کرنش متناظر با حالت برش صفحه‌ای را در آزمون بالچ هیدرولیک لوله دولایه مدل‌سازی کند، مطابق شکل ۵، طراحی شده‌است (نمونه In Plain Shear (IPS)). به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از هندسه لوله و طبیعت فرآیند هیدروفرمینگ لوله، طراحی نمونه IPS از جهت اهمیت دستیابی به کرنش پلاستیک معادل حداکثر در موقعیتی دور از لبه‌های آزاد ناحیه گیج تا حدودی چالش‌برانگیز بوده است. این چالش با کمک شبیه‌سازی‌های اجزای محدود رفت و برگشتی متعدد برطرف گردیده‌است. شکل ۶ نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمون تجربی را نشان می‌دهد.

استحکام کمتر به طور ناگهانی برآمده می‌شود و در نتیجه سطح شکست لوله اصلی دچار تغییر شکل پلاستیک شدیدی می‌گردد. پس از انجام آزمایش‌های مقدماتی بر روی انواع مختلف لوله‌های داخلی مانند پلی‌اورتان، DC04، AA1050، AA3003 و AA6061-O در آزمون بالچ هیدرولیک نمونه UAT، لوله فولاد ضدزنگ AISI 304 با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر انتخاب شد. این ماده دارای هر دو ویژگی قابلیت شکل‌پذیری و استحکام مناسب در مقایسه با لوله AA6063-T6 مورد نظر است.

۴- طراحی آزمون تعیین حد شکل‌دهی

شکل‌گیری ایده اولیه ایجاد حالت‌های تنشی مختلف با استفاده از طراحی شیارهای هندسی بر روی نمونه‌ها، مبتنی بر آزمون‌هایی همچون مارسینیاک و ناکازیمما بر روی ورق بوده است. همچنین بر اساس پژوهش‌های میرنیا و همکارانش [۲۶] و بانابیک و همکارانش [۲۷] که آنها هم بر روی ورق فلزی صورت گرفته‌است، ایده کاربرد آزمون بالچ هیدرولیک لوله دولایه به همراه طراحی شیارهای هندسی بر روی لوله خارجی برای پژوهشگران مطالعه حاضر شکل گرفته‌است. در ادامه به منظور بدست آوردن حالت‌های تنش مختلف از برش صفحه‌ای تا کشش دوماحوره متوازن، شبیه‌سازی‌های اجزای محدود اولیه از آزمون بالچ هیدرولیک لوله برای لوله‌های شیاردار با هندسه‌های مختلف انجام شد. بر اساس تحلیل دقیق حالت‌های تنش و کرنش، هندسه‌های نشان داده شده در شکل‌های ۴ و ۵ طراحی شده‌اند. کاربرد هندسه بیضی و اندازه‌ها و فواصل به کار رفته بر اساس تحلیل‌های تجربی اولیه مبتنی بر پیشینه پژوهش و تحلیل‌های عددی رفت و برگشتی تکمیلی صورت گرفته‌است. برای تولید مسیرهای کرنش مختلف، شبیه‌سازی‌های اجزای محدود متعددی بر روی آزمون بالچ هیدرولیک لوله دولایه انجام شده‌است. شبیه‌سازی آزمون بالچ هیدرولیک لوله دولایه با دو انتهای مقید و بدون هرگونه شیار هندسی بر روی لوله خارجی، برای تولید مسیر کرنش متناظر با حالت کرنش صفحه‌ای (نمونه Plane Strain Tension (PST)) انجام شده‌است. این شبیه‌سازی برای لوله با دو انتهای مقید، همراه با شیارهای هندسی خاص بر روی لوله خارجی نیز انجام شده‌اند. حالت‌های تنشی استخراج شده از این شبیه‌سازی‌ها برای ایجاد هندسه‌های نشان داده شده در شکل ۴ با دقت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دو شیار بیضی با فاصله ۲ میلی‌متر برای تولید مسیر کرنش متناظر با حالت کشش تک‌محوره (نمونه Uniaxial Tension (UAT)) طراحی گردیده‌اند. وقتی



شکل ۹ تغییرات ارتفاع بالج با افزایش تعداد المان‌ها (کاهش سایز مش از ۰/۳ میلی‌متر تا ۰/۰۸ میلی‌متر)

Fig. 9 Variations of bulging height with increasing the number of elements (decreasing of mesh size from 0.3mm to 0.08mm)

جدول ۲ تعداد المان‌ها و گره‌های به کاررفته در شبیه‌سازی نمونه کشش تک محوری، نوع المان C3D8R

Table 2 The number of elements and nodes utilized in the simulation of UAT specimen

Element type	Number of nodes	Number of elements	Minimum mesh size (mm)
C3D8R	36225	31780	0.08
	26565	22700	0.1
	21735	18160	0.15
	16905	13620	0.2
	12075	9080	0.25
	9660	6810	0.3

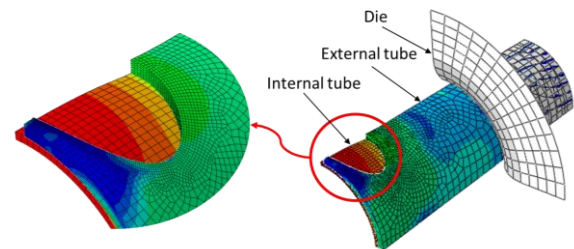
تعیین حد شکل‌دهی را با جزییات بیشتر نشان می‌دهد. لوله-های خارجی آلومینیومی با استفاده از المان‌های reduced integration eight-node brick element (C3D8R) شده‌اند. اندازه المان‌ها در نزدیکی قسمت‌هایی که احتمال گلوپی و شکست در آنها بیشتر است برابر ۰/۱۵ میلی‌متر بوده و در دورترین قسمت‌ها نسبت به نواحی مذکور برابر ۳ mm می-باشد.

تحلیل حساسیت شبکه با استفاده از دامنه‌ای از اندازه‌های مش در نواحی که احتمال وقوع شکست وجود داشت، از حدود ۰/۳ میلی‌متر تا ۰/۰۸ میلی‌متر (تعداد المان‌ها از ۶۸۱۰ تا ۳۱۷۸۰) انجام شد. نتایج نشان داد که ارتفاع برآمدگی ثابت باقی ماند و تغییرات قابل توجهی بین اندازه‌های مش ۰/۱۵ میلی‌متر و ۰/۰۸ میلی‌متر مشاهده نشد. نتایج نشان داده‌شده در شکل ۹ نحوه تغییر ارتفاع برآمدگی را با اندازه مش (یا تعداد المان‌ها) نشان می‌دهد.

در جدول ۲ تعداد المان‌ها و گره‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی برای المان C3D8R و اطلاعاتی در باره چگالی مش و نیازهای محاسباتی مرتبط با نمونه خاص UAT نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که اندازه مش در دورترین فاصله از محل احتمالی شکست، حداکثر ۳ میلی‌متر در نظر

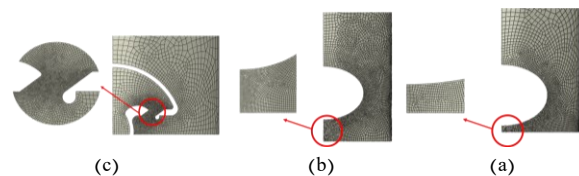


شکل ۶ نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمون تجربی
Fig. 6 Experimental manufactured specimens



شکل ۷ مدل اجزای محدود آزمون بالج هیدرولیک لوله دولایه نمونه کشش تک محوری

Fig. 7 The FE model of the THB test on the IPS specimen with the carrier tub



شکل ۸ مش‌بندی اجزای محدود نمونه‌های آلومینیومی در آزمون بالج هیدرولیک لوله دولایه: الف) نمونه کشش تک محوری، ب) نمونه کشش دومحوره متوازن و پ) نمونه برش محض صفحه‌ای

Fig. 8 The FE mesh of the aluminum specimens in the THB test: a) the UAT specimen, b) the EBT specimen, c) the IPS specimen

۵- شبیه‌سازی آزمون بالج هیدرولیک دولایه

برای شبیه‌سازی عددی فرآیند بالج هیدرولیک نمونه‌های طراحی شده، از نرم افزار Abaqus/Explicit 6.14 استفاده شده- است. در ابتدا با استفاده از آزمون‌های ابتکاری مورد استفاده در پژوهش دیگری از نگارندگان این مقاله [۲۳]، معیار شکست نرم موهر-کلمب اصلاح شده (MMC3) کالیبره شده و در قالب زیربرنامه VUSDFLD به فرآیند شبیه‌سازی ملحق گردید. این زیربرنامه امکان پیش‌بینی حدود شکل‌دهی را در آزمون‌های بالج هیدرولیک لوله دولایه فراهم می‌کند. شکل ۷ مدل سه-بعدی نمونه کشش تک‌محوری شبیه‌سازی شده را نشان می-دهد که به دلیل تقارن هندسی و شرایط بارگذاری به صورت یک-هشتم هندسه اصلی مدل‌سازی شده‌است.

قالب نشان داده شده در شکل ۷ با استفاده از المان‌های پوسته‌ای صلب گسسته مدل‌سازی شده‌است. شکل ۸ مدل اجزای محدود سه مورد از نمونه‌های طراحی شده برای آزمون

۶- نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ویژگی‌های هندسی نمونه‌ها شامل ابعاد شیارهای بیضوی و فاصله‌ی بین آنها می‌شود. این پارامترهای هندسی نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار مکانیکی لوله‌های جدار نازک در فرآیند شکل‌دهی ایفا می‌کنند. در این مطالعه، با تغییر ساختارمند فاصله بین بیضی‌ها، امکان کنترل دقیق استحکام ناحیه‌ی بین شیارها فراهم شده‌است. کنترل پارامتری، این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان رفتار تغییر شکل ناحیه‌ی برآمدگی را در مسیرهای کرنش مختلف به صورت هدفمند هدایت کرد.

مطالعات تجربی نشان می‌دهد که وقتی ناحیه بین شیارها به اندازه کافی باریک طراحی شود، مسیر کرنش ناحیه مورد مطالعه به سمت حوزه کششی-فشاری (شاخه سمت چپ منحنی حد شکل‌دهی) گرایش پیدا می‌کند که این موضوع در نمونه ۲ شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. این پدیده ناشی از تمرکز تنش در ناحیه باریک و غلبه حالت تنش محوری است. در مقابل، مطابق نمونه‌های ۴ و ۵ شکل ۱۰ با افزایش تدریجی فاصله بین بیضی‌ها، توزیع تنش به گونه‌ای تغییر می‌کند که تغییر شکل در حوزه کششی-کششی (شاخه سمت راست منحنی حد شکل‌دهی) اتفاق می‌افتد. این انتقال بین حالات مختلف تنش، امکان بررسی رفتار ماده در محدوده وسیعی از شرایط بارگذاری را فراهم می‌آورد. نکته حائز اهمیت این است که وجود شیارهای طراحی شده، همواره منجر به وقوع شکست در ناحیه قطبی می‌شود. این ویژگی مزیت قابل توجهی در مطالعات تجربی دارد، چرا که امکان پیش‌بینی دقیق محل شکست و تمرکز اندازه‌گیری‌ها را در یک ناحیه مشخص فراهم می‌کند. به عنوان نقاط مرجع، نمونه بدون شیار، مسیر کرنش متناظر با حالت کرنش صفحه‌ای (محور عمودی منحنی حد شکل‌دهی) را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، نمونه برش محض نمایانگر مسیر کرنش در انتهای سمت چپ منحنی حد شکل‌دهی است که معادل حالت تغییر شکل برشی خالص می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از دقت قابل قبولی در پیش‌بینی رفتار تغییر شکل برخوردار است. این تطابق به ویژه در ناحیه کششی-کششی منحنی حد شکل‌دهی که معمولاً با چالش‌های بیشتری در پیش‌بینی همراه است، چشمگیر می‌باشد. از دیدگاه مهندسی، این روش جدید امکان بهینه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک را با هزینه و زمان کمتر نسبت به روش‌های مرسوم فراهم می‌کند.

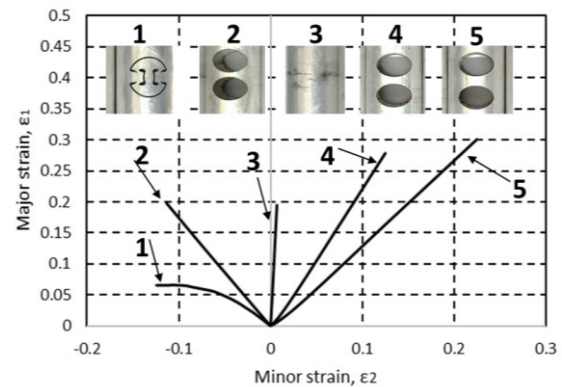
گرفته شده‌است و به تدریج به مقدار $0/15$ میلی‌متر در نقطه وقوع شکست کاهش می‌یابد. در مورد لوله فولادی انداز‌ی المان‌ها در یک سیر صعودی از مقدار حدود $0/15$ میلی‌متر در نزدیکی ناحیه گلوپی و شکست آلومینیوم تا مقدار 3 میلی‌متر در دورترین نواحی در نظر گرفته شده‌است.

لوله آلومینیوم خارجی و لوله فولادی داخلی در راستای ضخامت، هر کدام به ترتیب با 7 و 3 المان مدل‌سازی شده‌اند. رفتار پلاستیک لوله آلومینیومی خارجی با استفاده از معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل 48 توصیف شده‌است و رفتار پلاستیک لوله داخلی نیز به دلیل آنکه فقط نقش واسطه انتقال فشار سیال به لوله خارجی را ایفا می‌کند با معیار تسلیم همسانگرد ون‌میزز بیان شده‌است.

با توجه به اینکه آزمون‌های بالچ دولایه با دو انتهای مقید انجام شده‌اند، در مدل‌سازی اجزای محدود آنها نیز شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف شده‌است که انتهای لوله‌ها هیچ حرکتی نداشته باشند. فشار یکنواخت با الگوی افزایشی خطی، به دیواره داخلی لوله واسطه داخلی اعمال گردیده‌است. همه وضعیت‌های حرکتی لبه‌های دو لوله، با شرایط مرزی مناسب مشخص گردیده‌اند. برای کاهش زمان شبیه‌سازی از یک مقیاس زمانی استفاده شده‌است، به گونه‌ای که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در طول فرآیند کمتر از 1 درصد باقی بماند. برای اطمینان از شبه استاتیکی بودن شبیه‌سازی، این مقیاس زمانی با استفاده از همگرایی نمودار فشار-ارتفاع بالچ و نیز کرنش پلاستیک معادل در نقطه بحرانی به دست آمده‌است. اصطکاک بین لوله‌ها، به دلیل شرایط روانکاری تجربی صفر در نظر گرفته شده‌است. به این منظور مقایسه‌ای بین حالت تنش نمونه کرنش صفحه‌ای (PST) با و بدون لوله داخلی شده‌است و نتیجه نشان داد که در هر دو حالت وضعیت تنش صفحه‌ای با حالت کرنش صفحه‌ای برقرار است و وجود لوله داخلی تأثیر قابل توجهی بر حالت تنش ندارد و این موضوع قابلیت تعمیم به سایر نمونه‌ها را نیز دارد. اصطکاک بین لوله خارجی و قالب نیز بر اساس قانون اصطکاک کلمب با ضریب $0/2$ در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌است. معیار شکست MMC3 با استفاده از زیربرنامه VUSDFLD برای نقاط انتگرال‌گیری در المان‌ها تعریف شده‌است و برای شبیه‌سازی رشد ترک، از روش حذف المان استفاده شده‌است. مطابق این روش، هرگاه مقدار آسیب همه نقاط انتگرال‌گیری یک المان به مقدار واحد برسد، المان مورد نظر حذف گردیده و این لحظه به عنوان شروع شکست در نظر گرفته می‌شود.

آنها شده است. لازم به ذکر است که هر نقطه اندازه‌گیری شده در این منحنی نمایانگر میانگین نتایج سه نمونه آزمایشی است که این امر موجب افزایش قابلیت اطمینان داده‌ها و کاهش اثر خطاهای آزمایشگاهی شده است.

تصاویر نمونه‌های بالچ شده در موقعیت شروع شکست و سطح مقطع شکست در آنها در شکل ۱۲ ارائه شده است. تحلیل این تصاویر اطلاعات ارزشمندی درباره مکانیزم‌های شکست ارائه می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۲-الف مشاهده می‌شود، در نمونه برش محض به دلیل حالت تنش برش صفحه‌ای، تغییر ضخامت محسوسی در هنگام شکست رخ نداده است. این پدیده کاملاً با تئوری‌های کلاسیک پلاستیسیته همخوانی دارد که پیش‌بینی می‌کند در شرایط برش محض، تغییر حجم ناچیز خواهد بود. در مقابل، اشکال ۱۲-ب تا ۱۲-ث نشان می‌دهند که سطح مقطع شکست در نمونه‌های دیگر حالت مورب دارد که نشانگر تأثیر ترکیبی تنش‌های عمودی و برشی در فرآیند شکست است. هم‌چنین، وضعیت گلویی موضعی در این نمونه‌ها به وضوح قابل مشاهده است که مؤید تمرکز تغییر شکل در ناحیه‌ای خاص قبل از وقوع شکست می‌باشد. ضخامت شکست در نمونه‌های برش محض، کشش تک-محوره، کرنش صفحه‌ای، دومحوره و دومحوره‌ی متوازن به ترتیب برابر ۰/۹۰، ۰/۷۹، ۰/۸۶، ۰/۷۱ میلی‌متر، ۰/۶۰ میلی‌متر می‌باشند. این تغییرات ساختارمند در ضخامت نهایی کاملاً با انتظارات نظری مطابقت دارد و نشان می‌دهد که روش اندازه‌گیری به کار گرفته شده از دقت کافی برخوردار است. در روش شناسی این پژوهش، برای اندازه‌گیری ضخامت شکست، نمونه‌ها دقیقاً از ناحیه شکست برش داده شده‌اند (مطابق شکل ۱۲) و سپس با استفاده از دو ابزار دقیق کولیس دیجیتالی و میکرومتر، ضخامت دیواره در چند نقطه مجاور ترک اندازه‌گیری شده است. این رویکرد چندگانه در اندازه‌گیری باعث افزایش دقت نتایج و امکان ارزیابی خطای اندازه‌گیری شده است. تحلیل عمیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که بین میزان کاهش ضخامت و مسیر تنش اعمال شده رابطه معناداری وجود دارد. به عنوان مثال، در حالت کشش دومحوره متوازن که بیشترین میزان کاهش ضخامت مشاهده شده است، ماده تحت شدیدترین حالت تغییر شکل قرار گرفته که این امر با تئوری‌های شکل‌پذیری همخوانی دارد. از سوی دیگر، در شرایط کرنش صفحه‌ای که تغییر ضخامت متوسطی مشاهده شده، ماده رفتار بینابینی از خود نشان داده است. این یافته‌ها می‌تواند در بهینه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک مورد استفاده قرار گیرد.



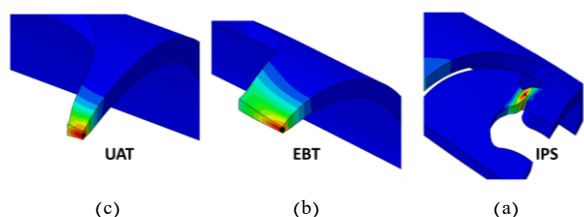
شکل ۱۰ مسیرهای کرنش استخراج شده از شبیه‌سازی عددی فرآیندهای بالچ هیدرولیک لوله دولایه

Fig. 10 strain paths obtained from finite element simulation of two-layer tube hydraulic bulge

پارامترهای هندسی نمونه‌ها که امکان شناسایی پنج نقطه‌ی مشخص روی منحنی حد شکل‌دهی را فراهم می‌کنند، از طریق شبیه‌سازی عددی تعیین شدند. در هر آزمایش، هم مقادیر حدی کرنش‌ها و هم پیشرفت آن‌ها تا وقوع شکست مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۱۰ نتایج عددی به‌دست‌آمده برای آلیاژ آلومینیوم AA6063-T6 را ارائه می‌دهد. این یافته‌ها قابلیت روش پیشنهادی در ارائه‌ی مقادیر دقیق کرنش مورد نیاز برای تعیین تجربی منحنی‌های حد شکل‌دهی را تأیید می‌کنند.

در این پژوهش، پنج مجموعه آزمون بالچ هیدرولیک لوله دولایه با استفاده از روش پیشنهادی انجام شده است که نتایج حاصل از آنها اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار تغییر شکل این سازه‌های جدار نازک ارائه می‌دهد. در تمامی نمونه‌های آزمایش شده، شکست به صورت ساختارمند در ناحیه برآمدگی مورد انتظار رخ داده است. این امر نشان‌دهنده دو نکته کلیدی است: نخست آنکه روش پیشنهادی قابلیت کنترل مطلوب پدیده اصطکاک بین لوله‌های داخلی و خارجی را داراست. دوم آنکه طراحی به خوبی توانسته شرایط بارگذاری یکنواختی را ایجاد نماید. این کنترل دقیق اصطکاک بین لایه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که در لوله‌های دولایه، رفتار اصطکاکی بین لایه‌ها می‌تواند تأثیر بسزایی در توزیع تنش و در نتیجه محل وقوع شکست داشته باشد.

شکل ۱۱ منحنی حد شکل‌دهی استخراج شده با استفاده از روش پیشنهادی را به نمایش می‌گذارد. در تعیین این منحنی، کرنش‌های حدی با استفاده از دو مرحله مکمل اندازه‌گیری مستقیم ضخامت شکست از طریق آزمایش‌های تجربی و نیز به کارگیری روابط تحلیلی پلاستیسیته محاسبه شده‌اند. این رویکرد ترکیبی باعث افزایش دقت نتایج و امکان اعتبارسنجی



شکل ۱۳ موقعیت المان بحرانی در نمونه‌های (الف) برش محض صفحه‌ای، (ب) دوماحوری متوازن، و (پ) کشش تک محوره

Fig. 13 Critical element location in the specimens

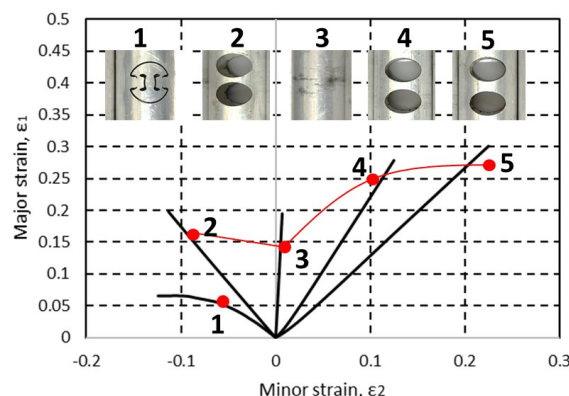
جدول ۳ مقایسه خطای مطلق و نسبی نتایج شبیه‌سازی نسبت به نتایج تجربی مقادیر کرنش حدی در نمودار حد شکل‌دهی.

Table 3 Major and minor absolute and relative errors comparison.

Stress state	ϵ_1 absolute error	ϵ_1 relative error (%)	ϵ_2 absolute error	ϵ_2 relative error (%)
In Plane Shear (IPS)	0.01	16	0.06	80
Uniaxial Tension (UAT)	0.03	17	0.03	30
Plane Strain Tension (PST)	0.05	35	0	0
Biaxial Tension (BT)	0.03	12	0.02	20
Equibiaxial Tension (EBT)	0.03	11	0	0
Mean absolute error	0.03	18	0.02	26

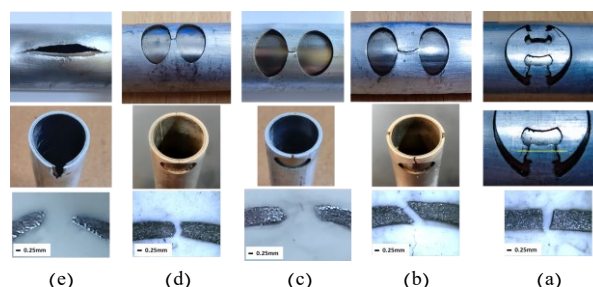
شود. در مقابل، در نمونه‌های کشش تک‌محوره و کشش دوماحوری متوازن، المان بحرانی در میانه ضخامت ماده قرار دارد. این تفاوت موقعیت، ناشی از ماهیت تنش‌های اعمالی است. در کشش تک‌محوره، تنش عمودی غالب بوده و کرنش‌های پلاستیک در راستای محور بارگذاری متمرکز می‌شوند، در حالی که در کشش دوماحوری، تنش‌های مساوی در دو جهت عمود بر هم، شرایط کرنش صفحه‌ای ایجاد می‌کنند که منجر به تمرکز آسیب در هسته مرکزی ماده می‌شود. پدیده گلوبی که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، به وضوح در نمونه‌های کشش تک‌محوره و دوماحوری رخ می‌دهد. این پدیده ناشی از ناپایداری پلاستیک است که طی آن، تغییر شکل موضعی در یک ناحیه محدود تشدید شده و به کاهش سریع سطح مقطع منجر می‌شود. در مقابل، در نمونه برش محض، به دلیل عدم وجود مؤلفه تنش عمودی محوری، تغییر شکل به صورت یکنواخت توزیع شده و هیچ نشانه‌ای از گلوبی مشاهده نمی‌شود.

به دلیل رفتار نه چندان نرم ماده و عدم وقوع گلوبی قابل توجه قبل از شکست در آن، شاخص اندازه‌گیری کرنش‌های حدی، مشاهده شروع شکست در ماده بوده است و همچنین به همین دلیل در شبیه‌سازی رفتار ماده نیز از یک مدل شکست استفاده شده است که از طریق حذف المان بحرانی شروع شکست را نشان می‌دهد. میزان خطای مطلق و نسبی نتایج



شکل ۱۱ نمودار حد شکل‌دهی لوله آلومینیوم AA6063-T6

Fig. 11 AA6063-T6 tube FLD.



شکل ۱۲ نمونه‌های بالج شده به همراه تصاویر بزرگنمایی شده از سطح مقطع شکست برای اندازه‌گیری ضخامت شکست: (الف) نمونه برش محض، (ب) نمونه کشش دوماحوری متوازن، (پ) نمونه کشش دوماحوری، (ت) نمونه کشش تک محوری و (ث) نمونه کرنش صفحه‌ای

Fig. 12 Bulged specimens

در شکست نرم فلزات، نقطه‌ای که بیشترین کرنش پلاستیک معادل را تجربه می‌کند، به عنوان نقطه بحرانی شناخته می‌شود [۲۶]. بر اساس پژوهش‌های لو و همکاران [۲۸] این نقطه نه تنها نشانگر آغاز تشکیل ترک‌های میکروسکوپی است، بلکه به عنوان پیش‌نیاز وقوع ترک‌های ماکروسکوپی نیز عمل می‌کند. در نمونه‌های مورد بررسی، موقعیت المان بحرانی به شدت تحت تأثیر نوع بارگذاری و هندسه نمونه قرار می‌گیرد. به عنوان مثال و همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، در نمونه‌های تحت بارگذاری برش محض، المان بحرانی در سطح خارجی نمونه واقع شده است. این پدیده را می‌توان با توزیع غیریکنواخت تنش برشی در سطح مقطع نمونه توضیح داد. تنش برشی در نزدیکی سطح خارجی به حداکثر مقدار خود می‌رسد، در حالی که در مناطق مرکزی، به دلیل محدودیت‌های هندسی، تنش‌ها توزیع متعادل‌تری دارند. هم‌چنین، در مرحله طراحی نمونه برش محض، ضروری است که المان بحرانی از لبه‌های آزاد نمونه فاصله داشته باشد تا از ایجاد حالت تنش تک‌محوره جلوگیری شود، چرا که چنین شرایطی می‌تواند منجر به تخمین غیرواقعی از مقاومت ماده

پیش‌بینی شده توسط مدل‌های تئوری رخ دهد. از سوی دیگر، مطالعات شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود تأیید کرده‌اند که مدل‌سازی آسیب پلاستیک با معیارهایی نظیر کرنش پلاستیک معادل یا مدل‌های پیشرفته‌تری مانند Modified Mohr-coulomb (MMC3) می‌تواند دقت پیش‌بینی نقطه بحرانی را به طور چشمگیری افزایش دهد.

از منظر کاربردی، درک دقیق مکانیزم تشکیل نقطه بحرانی و ارتباط آن با پارامترهای آزمایشی، برای طراحی بهینه نمونه‌های آزمون و بهبود فرآیندهای شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک ضروری است. به عنوان مثال، در فرآیندهایی مانند هیدروفرمینگ، شناسایی نقاط بحرانی می‌تواند از پارگی ناخواسته ماده جلوگیری کند. هم‌چنین، استفاده از تکنیک‌های تجربی پیشرفته مانند همبستگی تصاویر دیجیتال (Digital Image Correlation - DIC) برای اندازه‌گیری میدان کرنش و شناسایی نقاط بحرانی، به همراه روش‌های شبیه‌سازی، می‌تواند به توسعه نمودارهای حد شکل‌دهی با دقت بالا منجر شود. در نهایت، ترکیب داده‌های تجربی، شبیه‌سازی‌های عددی، و تحلیل‌های میکروسکوپی می‌تواند چارچوب جامعی برای پیش‌بینی رفتار مواد در شرایط بارگذاری پیچیده فراهم کند.

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله با معرفی یک روش نوآورانه برای تعیین تجربی نمودار حد شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک فلزی، گامی مؤثر در بهبود دقت و کارایی فرآیندهای ارزیابی رفتار مواد تحت تغییر شکل‌های پیچیده برداشته است. روش پیشنهادی مبتنی بر استفاده از سیستم بالچ هیدرولیک لوله‌ای دولایه طراحی شده است که در آن لوله خارجی مجهز به شیارهای هندسی با توزیع متقارن حول محور مرکزی است و لوله داخلی به عنوان انتقال‌دهنده فشار هیدرولیک به لوله خارجی عمل می‌کند. هندسه منحصر به فرد شیارها، همراه با قابلیت تنظیم موقعیت نسبی آن‌ها، امکان شبیه‌سازی گستره وسیعی از حالت‌های تنش را فراهم می‌آورد. یکی از جنبه‌های کلیدی این روش، طراحی نمونه ابتکاری برای مدل‌سازی رفتار ماده در حالت برش محض است که پیش از این به دلیل محدودیت‌های تجربی، اندازه‌گیری دقیق پارامترهای شکست در این حالت را با چالش مواجه می‌ساخت. مزیت اصلی این رویکرد، امکان استخراج منحنی حد شکل‌دهی در دامنه کامل تنش‌ها با وضوح بالا و کاهش خطاهای ناشی از اثرات جانبی آزمایش است.

شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های تجربی در جدول ۳ ارایه گردیده است.

در تحلیل عوامل ایجاد خطا می‌توان به خطای بالاتر در کرنش مینیمم (ϵ_2) نسبت به کرنش ماکزیمم (ϵ_1) اشاره نمود که علل محتمل آن عبارتند از:

۱ - پارامترهای ناهمسانگردی به‌درستی کالیبره نشده‌اند، به‌ویژه در تنش‌های صفحه‌ای (حالاتی که ϵ_2 نزدیک به صفر است).

۲ - در شبیه‌سازی، ضریب اصطکاک بین ورق و قالب ممکن است با شرایط واقعی مطابقت نداشته باشد و بر توزیع کرنش در جهت ϵ_2 تأثیر بگذارد.

هم‌چنین خطای نسبی قابل توجه در کرنش ماکزیمم (ϵ_1) نیز قابل مشاهده است و علل آن می‌تواند شامل موارد ذیل باشد:

۱ - خطای موجود در مشخصه‌سازی قانون سخت‌شوندگی (Swift) که ممکن است رفتار پلاستیک ماده را در ناحیه‌های با تغییر شکل بزرگ به‌درستی پیش‌بینی نکرده باشد.

۲ - مدل آسیب (Damage Model) در شبیه‌سازی ممکن است نقطه شروع تشکیل گلوبی یا ترک را با تأخیر یا پیش‌بینی زود هنگام محاسبه کرده باشد.

۳ - روش‌های اندازه‌گیری کرنش (اندازه‌گیری مستقیم کرنش ضخامتی) در نواحی با تغییر شکل موضعی بالا ممکن است دقت کمتری داشته باشد و بر روی نتایج تأثیر گذاشته باشد و استفاده از تکنیک‌های اندازه‌گیری دقیق‌تر و به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر پردازش تصویر با وضوح بالا مانند همبستگی تصاویر دیجیتال (Digital Image Correlation - DIC) برای کاهش خطای اندازه‌گیری کرنش در داده‌های تجربی مناسب می‌باشد.

میانگین خطای مطلق در محدوده قابل قبول (۰/۰۲ تا ۰/۰۳) قرار دارد، ولی خطای نسبی کرنش مینیمم (۲۶٪) نشان‌دهنده نیاز به بهبود مدل‌سازی در پیش‌بینی رفتار عرضی ماده است. اختلاف‌های مشاهده‌شده عمدتاً ناشی از مدل‌سازی ناهمسانگردی، اصطکاک و قانون سخت‌شوندگی هستند که با کالیبراسیون دقیق‌تر قابل کاهش هستند.

نتایج این پژوهش هم‌چنین نشان می‌دهد که رفتار ماده در نقطه بحرانی تنها به نوع بارگذاری محدود نمی‌شود، بلکه عواملی مانند نرخ کرنش، ریزساختار ماده (مانند اندازه دانه و توزیع فازهای ثانویه)، و حتی شرایط محیطی (مانند دما) نیز می‌توانند بر موقعیت و شدت تمرکز کرنش تأثیر بگذارند. برای مثال، در فلزات با ریزساختار ناهمگن، تشکیل ترک‌های میکروسکوپی ممکن است زودتر و در نقاطی دور از منطقه

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] R. Davies, G. Grant, D. Herling, M. Smith, et al., "Formability investigation of aluminum extrusions under hydroforming conditions," *SAE Technical Paper*, no. 2000-01-2675, 2000, doi: <https://doi.org/10.4271/2000-01-2675>.
- [2] K. Yoshida, T. Kuwabara, K. Narihara, and S. Takahashi, "Experimental verification of the path-independence of forming limit stresses," *Int. J. Form. Process.*, vol. 8, no. SI, pp. 283-298, 2005.
- [3] Y. M. Hwang, Y. K. Lin, and T. Altan, "Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 2, pp. 343-351, Feb. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.009>.
- [4] J. P. Magrinho, M. B. Silva, G. Centeno, F. Moedas, C. Vallellano, and P. A. Martins, "On the determination of forming limits in thin-walled tubes," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 155, pp. 381-391, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.03.020>.
- [5] W. J. Song, S. C. Heo, T. W. Ku, J. Kim, and B. S. Kang, "Evaluation of effect of flow stress characteristics of tubular material on forming limit in tube hydroforming process," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 50, no. 9, pp. 753-764, Sep. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.05.010>.
- [6] X. Chen, Z. Yu, B. Hou, S. Li, and Z. Lin, "A theoretical and experimental study on forming limit diagram for a seamed tube hydroforming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 12, pp. 2012-2021, Dec. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.06.023>.
- [7] S. Li, X. Chen, Q. Kong, Z. Yu, and Z. Lin, "Study on formability of tube hydroforming through elliptical die inserts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 9, pp. 1916-1924, Sep. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.04.016>.
- [8] Z. Yu, Q. Kong, C. Ma, et al., "Theoretical and experimental study on formability of laser seamed tube hydroforming," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 75, pp. 305-315, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6130-y>.
- [9] N. T. Nguyen, E. Lee, M. G. Lee, H. J. Kim, and H. Y. Kim, "Hydroformability assessment of AA6063 tubes using the polar effective plastic strain diagram," *Proc. Inst. Mech. Eng., B, J. Eng. Manuf.*, vol. 229, no. 4, pp. 647-653, Apr. 2015, doi: <https://doi.org/10.1177/0954405414522603>.
- [10] M. Mohammadi, J. S. Karami, and S. J. Hashemi, "Forming limit diagram of aluminum/copper bi-layered tubes by bulge test," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, pp. 1539-1549, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0225-1>.
- [11] S. J. Hashemi, F. Rahmani, and S. M. H. Seyed Kashi, "Numerical and experimental investigation of forming limit diagram in warm incremental forming process of aluminum tubes," *Modarres Mech. Eng.*, vol. 20, no. 6, pp.

از جمله نقاط قوت بارز این روش می‌توان به توانایی بررسی رفتار ماده در تمامی محدوده کرنش‌های محتمل در فرآیندهای شکل‌دهی لوله‌ها اشاره کرد که پیش‌نیازی ضروری برای طراحی دقیق فرآیندهای صنعتی مانند هیدروفرمینگ یا انبساط لوله‌ها محسوب می‌شود. سادگی نسبی تجهیزات مورد نیاز در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم که نیاز به تجهیزات کنترلی پیچیده و سیستم‌های بارگذاری چندمحوره دارد، هزینه‌های اجرایی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. پدیده گلوپی و شکست که به صورت کنترل شده در ناحیه برآمدگی نمونه رخ می‌دهد، نه تنها اعتبار نتایج را افزایش می‌دهد، بلکه تحلیل داده‌های تجربی را نیز تسهیل می‌کند. با این حال، روش پیشنهادی با محدودیت‌هایی نیز همراه است: نخست آنکه ضخامت نمونه‌ها به دلیل وابستگی به حداکثر فشار هیدرولیک قابل اعمال توسط تجهیزات، محدود به رنج مشخصی می‌شود. این موضوع به ویژه در مورد فلزات با استحکام بالا یا کامپوزیت‌های چندلایه می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. دومین محدودیت، حساسیت روش به دقت موقعیت‌دهی نمونه در حین نصب است که هرگونه انحراف از تراز دقیق می‌تواند منجر به توزیع ناهمگن فشار و در نتیجه خطا در تعیین نقطه شکست گردد.

برای بهبود این روش در آینده، می‌توان امکان ادغام آن با تکنیک‌های اندازه‌گیری پیشرفته نظیر همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) یا حسگرهای کرنش فیبر نوری را بررسی کرد تا دقت ردیابی تغییر شکل‌های موضعی افزایش یابد. هم‌چنین، توسعه نمونه‌های چندلایه با قابلیت تحمل فشارهای بالاتر می‌تواند دامنه کاربرد روش را به مواد با ضخامت بیشتر یا استحکام بالاتر گسترش دهد. از منظر تئوری، ترکیب داده‌های تجربی حاصل از این روش با مدل‌سازی عددی مبتنی بر المان محدود (FE) و معیارهای شکست پیشرفته می‌تواند به ایجاد چارچوبی جامع برای پیش‌بینی رفتار مواد تحت شرایط بارگذاری دینامیکی یا غیرهمگن منجر شود. در نهایت، با توجه به اهمیت نمودارهای حد شکل‌دهی در صنایعی همچون خودروسازی، هوافضا و تولید تجهیزات پزشکی، بومی‌سازی و بهینه‌سازی این روش می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش هزینه‌های تولید و افزایش قابلیت اطمینان محصولات نهایی داشته باشد.

- (MMC3) ductile fracture criterion using tube hydroforming process," *Int. J. Eng.*, vol. 38, no. 10, pp. 2369–2383, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.10a.13>.
- [24] H. Wang, R. Bouchard, R. Eagleson, P. Martin, and W. R. Tyson, "Ring hoop tension test (RHTT): A test for transverse tensile properties of tubular materials," *J. Test. Eval.*, vol. 30, no. 5, pp. 382–391, Sep. 2002, doi: <https://doi.org/10.1520/JTE12328>.
- [25] F. Mousavi, R. Hashemi, and R. Madoliat, "Measurement of directional anisotropy coefficients for AA7020-T6 tubes and prediction of forming limit curve," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 96, pp. 1015–1023, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1645-2>.
- [26] M. J. Mirnia and M. Vahdani, "Calibration of ductile fracture criterion from shear to equibiaxial tension using hydraulic bulge test," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 280, p. 116589, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116589>.
- [27] D. Banabic, L. Lazarescu, L. Paraianu, I. Ciobanu, I. Nicodim, and D. S. Comsa, "Development of a new procedure for the experimental determination of the forming limit curves," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 62, no. 1, pp. 255–258, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.051>.
- [28] M. Luo, M. Dunand, and D. Mohr, "Experiments and modeling of anisotropic aluminum extrusions under multi-axial loading - Part II: Ductile fracture," *Int. J. Plast.*, vol. 32, pp. 36–58, May 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iijplas.2011.11.001>.
- 1635–1645, 2020, doi: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-38356-en.html>.
- [12] H. Moslemi Naeini, S. Hashemi, G. H. Liaghat, M. Mohammadi, and H. Deilami Azodi, "Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes," *Modares Mech. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 133–140, 2014. (In Persian), doi: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-10755-en.html>.
- [13] S. J. Hashemi, H. Moslemi Naeini, G. Liaghat, J. S. Karami, and A. H. Roohi, "Prediction of bursting in warm tube hydroforming using modified ductile fracture criteria," *Modares Mech. Eng.*, vol. 14, no. 16, pp. 201–211, 2015. (In Persian), doi: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-1404-en.html>.
- [14] G. Centeno, M. B. Silva, L. M. Alves, C. Vallengano, and P. A. Martins, "On the utilization of circle grid analysis in thin-walled forming of tubes: Experimental and numerical evaluation," *Procedia Eng.*, vol. 207, pp. 1773–1778, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.937>.
- [15] V. A. Cristino, J. P. Magrinho, G. Centeno, M. B. Silva, and P. A. Martins, "A digital image correlation-based methodology to characterize formability in tube forming," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 54, no. 2, pp. 139–148, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/0309324718823629>.
- [16] Z. He, Z. Wang, Y. Lin, H. Zhu, and S. Yuan, "A modified Marciniak-Kuczynski model for determining the forming limit of thin-walled tube extruded with initial eccentricity," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 151, pp. 715–723, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.029>.
- [17] H. Zhu, Z. He, Y. Lin, K. Zheng, X. Fan, and S. Yuan, "The development of a novel forming limit diagram under nonlinear loading paths in tube hydroforming," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 172, p. 105392, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105392>.
- [18] L. Yang and Q. Zhao, "Forming limit diagrams for tubes with non-uniform thickness in hydro-bulging," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 103, pp. 901–911, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03596-3>.
- [19] S. J. Hashemi, H. M. Naeini, G. Liaghat, et al., "Forming limit diagram of aluminum AA6063 tubes at high temperatures by bulge tests," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 4745–4752, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1041-2>.
- [20] X. Guo, F. Ma, Q. Guo, X. Luo, N. Kim, and K. Jin, "A calculating method of tube constants of ductile fracture criteria in tube free bulging process based on MK theory," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 128, pp. 140–146, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.04.012>.
- [21] H. Y. C., Y. J. C., Y. C. L., and C. C. W., "Evaluation of fracture criteria considering complex loading paths in cobalt alloy tube hydroforming," *Mater. Trans.*, vol. 53, no. 5, pp. 807–811, May 2012, doi: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201119>.
- [22] W. J. Song, S. W. Kim, J. Kim, and B. S. Kang, "Analytical and numerical analysis of bursting failure prediction in tube hydroforming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 164–165, pp. 1618–1623, May 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.01.008>.
- [23] A. Ghiasi Tabari, M. Bakhshi Jooybari, H. Gorji, and M. J. Mirnia, "Calibration of modified Mohr-Coulomb