



## Numerical and Experimental Investigation of Forming Limit Diagram in Warm Incremental Forming Process of Aluminum Tubes

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Hashemi S.J.<sup>1</sup> PhD,

Rahmani F.<sup>2</sup> PhD,

Seyedkashi S.M.H.\*<sup>3</sup> PhD

#### How to cite this article

Hashemi S.J, Rahmani F, Seyedkashi S.M.H. Numerical and Experimental Investigation of Forming Limit Diagram in Warm Incremental Forming Process of Aluminum Tubes. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(6):1635-1645.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Enghelab-e Eslami Faculty, Technical & Vocational University (TVU), Tehran, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Faculty, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

<sup>3</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Shokatabad Campus, University of Birjand, Birjand, South Khorasan. Postal Code: 9717434765  
Phone: +98 (56) 32202133  
Fax: +98 (56) 32202133  
seyedkashi@birjand.ac.ir

#### Article History

Received: November 19, 2019

Accepted: March 9, 2020

ePublished: June 20, 2020

### ABSTRACT

Incremental tube forming process is capable of manufacturing tubes with different cross sections and dimensions using simple and inexpensive forming tools. In the current study, seven different ductile failure criteria are used in finite element simulations in order to obtain the forming limit diagram (FLD) of Al6063 aluminium tubes at high temperatures. The predicted FLD using these criteria are compared with experimental data to select the optimum criterion. Standard universal tensile tests in different temperatures and strain rates along with Zener-holloman parameter are performed to calibrate the failure criteria. The effects of process parameters including temperature, forming depth and forming feed are considered. The results showed that failure criteria can predict the time and location of rupture in incremental tube forming process with a good accuracy. In high temperatures, Cockroft-Latham and normalized Cockroft-Latham criteria which consider the effect of the largest tensile stress had the best prediction. Investigation of temperature and strain rate showed that by increasing temperature, the forming limit goes higher but increasing strain rate causes to decrease it.

**Keywords** Warm Incremental Tube Forming; Forming Limit Diagram; Ductile Fracture Criteria

### CITATION LINKS

[1] Flexible and incremental sheet metal bulging using a path-controlled spherical roller: 2nd report, vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers [2] Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization [3] Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals [4] Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming [5] Numerical investigation on forming behavior of friction stir tailor welded blanks (FSTWBs) during single-point incremental forming (SPIF) process [6] Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31 [7] Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature [8] Incremental forming of free surface with magnesium alloy AZ31 sheet at warm temperatures [9] Electric hot incremental forming: A novel technique [10] Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet [11] Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming [12] Investigation of forming limit of aluminum sheet in warm incremental forming process [13] Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point incremental forming at high rotational speeds [14] Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti-6Al-4V sheet using electrical current [15] Incremental forming of Mg alloy sheet at elevated temperatures [16] A rotary flange forming process on the lathe using a ball-shaped tool [17] Dieless incremental hole-flanging of thin-walled tube for producing branched tubing [18] Effect of material properties on deformation behavior in incremental tube-burring process using a bar tool [19] Characterization of deformation behavior of thin-walled tubes during incremental forming: a study with selected examples [20] Experimental investigation of effective parameters on a new incremental tube bulging method using rotary tool [21] Converting circular tubes into square cross-sectional parts using incremental forming process [22] Constitutive modelling for high temperature behavior of 1Cr12Ni3Mo2VNbN martensitic steel [23] Deformation mechanism maps: The plasticity and creep of metals and ceramics

## بررسی عددی و تجربی منحنی حد شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم لوله‌های آلومینیومی

سیدجلال هاشمی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

فرزاد رحمنی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

سیدمحمدحسین سیدکاشی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### چکیده

فرآیند شکل‌دهی تدریجی توانایی ساخت لوله‌ها با سطح مقطع و اندازه‌های مختلف با استفاده از ابزارهای شکل‌دهی ساده و ارزان را دارا است. در این مقاله برای دستیابی به منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۱ در دماهای بالا از هفت معیار شکست نرم در شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی‌شده به وسیله معیارهای شکست با نتایج تجربی مقایسه شده تا بهترین معیار انتخاب شود. به منظور کالیبراسیون معیارهای شکست از آزمایش کشش تک‌محوری در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف به همراه پارامتر زن- هولومن استفاده شده است. اثر پارامترهای فرآیندی شامل دما، گام و عمق شکل‌دهی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که معیار شکست می‌تواند زمان و محل پارگی را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم لوله‌های آلومینیومی با دقت خوبی معین کند. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده در دماهای بالا، معیارهای کوکرافت- لاتهام و کوکرافت- لاتهام نرمال که اثر بزرگ‌ترین تنش کششی را در معیار شکست در نظر می‌گیرند، پیش‌بینی بهتری داشته‌اند. بررسی تأثیر دما و سرعت شکل‌دهی فرآیند بر روی حد شکل‌دهی لوله‌ها نشان داد که با افزایش دما، منحنی حد شکل‌دهی بالاتر می‌رود اما افزایش سرعت باعث پایین‌تر آمدن منحنی حد شکل‌دهی خواهد شد. **کلیدواژه‌ها:** شکل‌دهی تدریجی گرم لوله، منحنی حد شکل‌دهی، معیار شکست نرم

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

\*نویسنده مسئول: seyedkashi@birjand.ac.ir

### مقدمه

ایده اصلی فرآیند شکل‌دهی تدریجی توسط /یسکی و همکاران [1] با نام شکل‌دهی بدون قالب مطرح شد. بعد از گذشت ۲۴ سال، این ایده شروع به مطرح شدن در بعضی از گزارش‌های علمی شد. علت اصلی این تأخیر، محدودیت‌های فناوری کنترل عددی رایانه‌ای در ماشین‌های تراشکاری و فرزندکاری بود. تا این که در اواخر دهه ۸۰ فناوری کنترل عددی رایانه‌ای وارد بازار شد. این روش ابتدا بر روی ورق‌های فلزی به کار گرفته شد. اصول این روش شکل‌دهی ورق به این ترتیب است که ابتدا مسیر شکلی که قرار است بر روی ورق ایجاد شود، توسط نرم‌افزار ساخت به کمک رایانه، به صورت G-کد ایجاد شده و بعد از فراخوانی G-کدها در دستگاه فرز کنترل عددی رایانه‌ای، مسیر مورد نظر توسط ابزار سرکروی نصب‌شده بر روی

دستگاه، طی شده و با اعمال نیرو از طرف ابزار بر روی ورق مقید شده، شکل مورد نظر بر روی ورق ایجاد می‌شود. فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق به دو نوع کلی تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود. در روش شکل‌دهی تک‌نقطه‌ای از یک ابزار سرکروی برای اعمال نیروی شکل‌دهی و یک قید برای گرفتن ورق استفاده شده و در آن از ماتریس‌های خاص استفاده نمی‌شود. در این روش به دلیل عدم استفاده از ماتریس‌های خاص، قابلیت انعطاف‌پذیری بالاتر است [2]. این روش علاوه بر استفاده از ابزار و فیکسچر، بر پایه حضور یک قالب در زیر ورق انجام می‌شود تا ورق مورد نظر در دو نقطه تماسی، یک نقطه بین ابزار و سطح ورق در بالای ورق و یک نقطه بین سطح ورق و قالب در پایین ورق شکل‌دهی شود. این نوع روش شکل‌دهی نسبت به روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای با کاهش قابلیت شکل‌دهی ورق همراه بوده ولی دقت هندسی اشکال به‌دست‌آمده از این روش بالاتر است [2]. در زمینه شکل‌دهی تدریجی ورق در دمای محیط مقالات زیادی منتشر شده‌اند. زاهدی و همکاران [3]، اثر شعاع ابزار و گام عمودی را در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های دولایه آلومینیوم و فولاد را مورد بررسی تجربی و عددی قرار دادند. نیک‌دوز و همکاران [4]، برای افزایش شکل‌پذیری، از شکل‌دهی تدریجی دو مرحله‌ای استفاده کردند. ماراته و راول [5] شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق‌های ترکیبی جوشکاری‌شده به روش اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی تجربی و عددی قرار دادند.

در سال‌های اخیر، آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به دلیل افزایش نسبت استحکام به وزن قطعات و همچنین مقاومت به خوردگی بالا در صنعت خودرو مورد توجه قرار گرفته‌اند. این آلیاژها می‌توانند وزن خودرو را تا ۳۰٪ کاهش داده و مصرف سوخت را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. به دلیل وجود عناصر آلیاژی و همچنین ساختار هگزاگونال منیزیم، شکل‌پذیری آنها در دمای اتاق پایین است. این در حالی است که با بالا بردن دمای فرآیند می‌توان شکل‌پذیری این آلیاژها را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. در سال‌های اخیر استفاده از آلیاژهای آلومینیوم در صنایع خودروسازی مورد توجه قرار گرفته است. دلیل اصلی کاربرد این آلیاژها، نسبت استحکام به وزن بالا در درجه اول و مقاومت به خوردگی در درجه دوم است. این آلیاژها شکل‌پذیری پایینی در دمای محیط دارند و معمولاً برای افزایش قابلیت شکل‌دهی، از شکل‌دهی در دمای بالا استفاده می‌شود. شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای مواد مختلف در دماهای بالا توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. آمبروگیو و همکاران [6]، نشان دادند که بیشترین شکل‌پذیری آلیاژ AZ31 در شکل‌دهی تدریجی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد قابل دستیابی است. جی و پارک [7، 8] شکل‌دهی تدریجی ورق‌های منیزیمی را در دماهای مختلف تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به صورت عددی و تجربی بررسی کرده و نشان دادند که با بیشترین شکل‌پذیری در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد

این مقاله، ایجاد انبساط متقارن محوری روی لوله‌های آلومینیومی با استفاده از اصول شکل‌دهی تدریجی و حرکت مارپیچ ابزار در داخل لوله انجام شده است. با استفاده از این روش انعطاف‌پذیر، شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی تا نسبت انبساط بالا بدون نیاز به قالب خارجی در تماس با سطح شکل‌دهی صورت گرفته است. به‌منظور دستیابی به بالاترین نسبت انبساط ممکن برای لوله‌ها، گرمایش لوله‌ها تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی در نرم‌افزار اجزای محدود صورت گرفته و در جهت رسیدن به یک ابزار دقیق در پیش‌بینی پارگی در فرآیند شکل‌دهی معرفی شده از هفت معیار شکست نرم در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده و کرنش‌های حدی تعیین شده‌اند. به‌منظور تعیین بهترین پیش‌بینی از بین هفت معیار استفاده شده، نتایج عددی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. کالیبراسیون معیارهای شکست نرم با استفاده از آزمایش کشش تک‌محوری و پارامتر زنر-هولومن انجام گرفته است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، شکل‌دهی تدریجی لوله‌های آلومینیومی از جنس AA6063 با قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر انجام شده است. ترکیبات آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از آزمون کوانتومتری تعیین و با استاندارد مطابقت داده شده است. لوله‌ها با فرآیند اکستروژن تولید شده و کاملاً بدون درز است. منحنی تنش-کرنش مهندسی لوله آلومینیومی در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف حاصل از آزمون کشش استاندارد در نمودار ۱ نشان داده شده است.

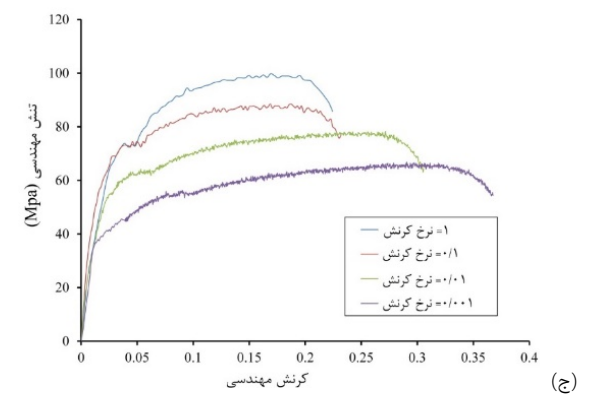
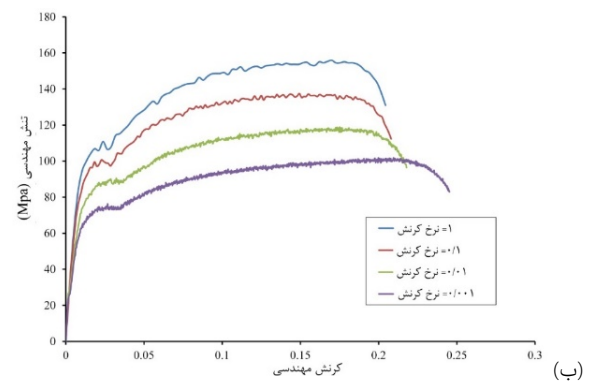
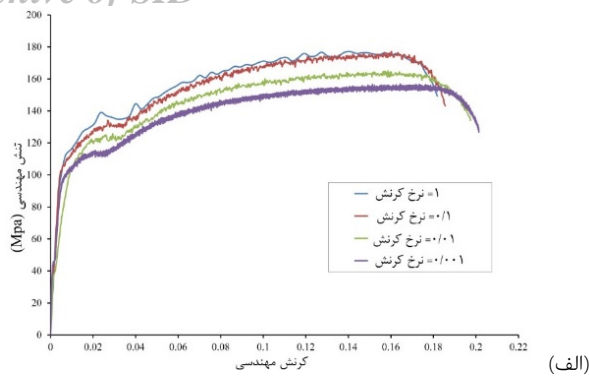
مقدار کرنش شکست نمونه‌های آزمایش کشش تک‌محوری و همچنین کار شکست که برابر با سطح زیر منحنی تنش-کرنش حقیقی ماده است، محاسبه شد. مقادیر کرنش شکست در جدول ۱ و مقادیر کار شکست در جدول ۲ مشاهده می‌شود. دماها جهت استفاده در روابط بر حسب واحد کلویین ارائه شده است.

پارامتر زنر-هولومن (Z) به‌منظور زوج‌کردن (Couple) اثر نرخ کرنش و دما بر روی تنش سیلان ماده در دماهای بالا معرفی شده است. از این پارامتر می‌توان برای کاربرد معیارهای شکست نرم در دمای بالا بهره برد. به این منظور توابع کار شکست و کرنش شکست بر حسب این پارامتر تعریف می‌شود. پارامتر زنر-هولومن بر طبق معادله ۱ تعریف می‌شود [22]. در معادله ۱، رابطه Q و T و R به‌ترتیب انرژی فعال‌سازی، دما بر حسب کلویین و ثابت گازها هستند. E نیز نشان‌دهنده نرخ کرنش است. مقدار انرژی فعال‌سازی برای هر ماده و در محدوده‌های دمایی متفاوت است، اما مقدار ثابت گازها در دماهای مختلف تغییری ندارد. مقدار Q در این تحقیق برابر با ۸۲ کیلوژول بر مول در نظر گرفته شده است [23]. با توجه به تعریف پارامتر زنر-هولومن می‌توان برای مقادیر کرنش شکست و کار شکست معادله‌ای بر حسب این پارامتر

قابل دستیابی است. فن و همکاران [9, 10]، از عبور جریان الکتریسیته از درون ورق برای گرمایش آن در شکل‌دهی تدریجی استفاده کردند و با کنترل شدت جریان الکتریسته توانستند دمای ورق را برای افزایش شکل‌پذیری آن تا حد مطلوب افزایش دهند. ژانگ و همکاران [11]، نشان دادند که با افزایش دمای شکل‌دهی اثر ناهمسان‌گردی بر کیفیت سطح ورق‌های منیزیمی AZ31 شکل‌داده شده با شکل‌دهی تدریجی کاهش می‌یابد. روحی و همکاران [12]، ارتفاع قطعات شکل‌داده شده منیزیمی را با گرمایش موضعی ورق افزایش دادند. طاهرخانی و همکاران [13]، از معیار گلوبی موضعی برای پیش‌بینی پارگی در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های آلومینیومی در دمای بالا استفاده کردند. هنرپیشه و همکاران [14]، برای افزایش دمای ورق به‌صورت موضعی و در نتیجه کاهش برگشت فزنی از سرعت‌های دروانی بالای ابزار شکل‌دهی استفاده کردند. کیم و همکاران [15]، از جریان الکتریسیته برای گرمایش ورق در شکل‌دهی تدریجی استفاده کرده و اثر پارامترهای فرآیندی را بر نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت بررسی کردند.

امروزه قطعات لوله‌ای کاربرد زیادی در صنایع مختلف مانند خودروسازی و هوافضا دارند. قطعات لوله‌ای با سطح مقطع متغیر معمولاً با فرآیند هیدروفورمینگ شکل داده می‌شوند. به‌منظور بالابردن انعطاف‌پذیری و حذف هزینه قالب در شکل‌دهی قطعات لوله‌ای، تحقیقاتی بر روی شکل‌دهی تدریجی لوله‌ها صورت گرفته است. محمد و همکاران [16]، ایجاد فلنج در انتهای لوله را با استفاده از شکل‌دهی تدریجی انجام داده‌اند؛ به این صورت که ابزار سرکروی بوده و بر روی ابزارگیر دستگاه تراش نصب شده بود، در حالی که لوله به‌وسیله سه نظام دستگاه در حال دوران بوده است. یانگ و همکاران [17]، فرآیند لبه‌سازی برای افزایش قطر را برای تولید قطعات سه‌راهی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که شاخه فرعی قابل شکل‌دهی، به نسبت قطر لوله اولیه و قطر و شکل سوراخ ایجاد شده بستگی دارد. تراما و همکاران [18]، فرآیند شکل‌دهی تدریجی قطعات سه‌راهی را با استفاده از لوله‌های سوراخ‌شده و تأثیر ضریب ناهمسان‌گردی را بر روی توزیع ضخامت قطعه بررسی کردند. ون و همکاران [19]، چهار حالت شکل‌دهی تدریجی لوله‌ها شامل افزایش قطر داخلی لوله، کاهش قطر لوله، شیارزنی روی لوله و لبه‌سازی سوراخ را مورد بررسی قرار دادند. سیدکاشی و همکاران [20]، روش جدیدی را برای شکل‌دهی تدریجی لوله‌های مسی با استفاده از ابزار چرخان را پیشنهاد دادند و اثر پارامترهای موثر در فرآیند بر کیفیت محصول را بررسی نمودند. رحمانی و همکاران [21]، نیز این روش را برای تولید لوله مسی با مقطع مربعی مورد بررسی قرار دادند.

براساس مطالعه ادبیات تحقیق، گزارشی در مورد فرآیند انبساط متقارن محوری لوله‌ها در دمای بالا با استفاده از شکل‌دهی تدریجی گرم و بررسی معیارهای شکست مختلف موثر در آن یافت نشد. در



نمودار ۱) منحنی تنش-گرش مهندسی لوله آلومینیومی در دماهای: الف) ۱۰۰ درجه سانتی گراد، ب) ۲۰۰ درجه سانتی گراد، ج) ۳۰۰ درجه سانتی گراد

جدول ۱) گرش شکست در دماها و نرخ گرشهای مختلف

نرخ گرش (s <sup>-1</sup> )	دما (K)		
	۳۷۳	۴۷۳	۵۷۳
۰/۰۰۱	۰/۱۶	۰/۱۷۸	۰/۲
۰/۰۱	۰/۱۶۲	۰/۱۷۸	۰/۲۱
۰/۱	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۵
۱	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۹

جدول ۲) کار شکست (مگاژول بر متر مکعب) در دماها و نرخ گرشهای مختلف

نرخ گرش (S <sup>-1</sup> )	دما (K)		
	۳۷۳	۴۷۳	۵۷۳
۰/۰۰۱	۳۰/۷۷۷	۲۷/۹۴۹	۲۳/۴۳۶
۰/۰۱	۳۱/۶۸۷	۲۵/۳۵۶	۲۲/۳۴۷
۰/۱	۳۰/۳۳۶	۲۲/۷۶۲	۲۱/۰۶۰
۱	۲۸/۴۹۴	۲۲/۵۹	۲۲/۰۱۶

تعیین کرد. با استفاده از مقادیر جداول ۱ و ۲، دو تابع گرش شکست مطابق معادله ۲ و تابع کار شکست مطابق معادله ۳ به دست آمده اند.

$$Z = \epsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (۱)$$

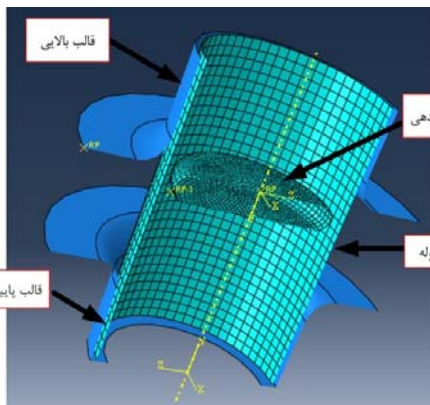
$$\bar{\epsilon}_f(Z) = \bar{\epsilon}_f(\bar{\epsilon}, T) = 3 \times 10^{-6} \times [Ln(Z)]^4 - 0.0003 \times [Ln(Z)]^3 - 0.009 \times [Ln(Z)]^2 - 0.1446 \times [Ln(Z)] + 1.0731 \quad (۲)$$

$$W_f(Z) = W_f(\bar{\epsilon}, T) = 5 \times 10^{-5} \times [Ln(Z)]^5 - 0.0057 \times [Ln(Z)]^4 + 0.2227 \times [Ln(Z)]^3 - 3.9578 \times [Ln(Z)]^2 + 32.699 \times [Ln(Z)] - 80.006 \quad (۳)$$

برای به دست آوردن منحنی حد شکل دهی در دماهای بالا برای لوله های آلومینیومی و مقایسه آن با نتایج پیش بینی معیارهای شکست نرم، یک مجموعه آزمایشگاهی شکل دهی گرم لوله طراحی و ساخته شد. برای انجام فرآیند شکل دهی، دو انتهای لوله درون قالب بالایی و پایینی قرار گرفته و مهار می شوند. بین دو قالب بالا و پایین فضای آزادی وجود دارد که شکل دهی در این ناحیه بدون تماس با قالب خارجی انجام می شود. در ابتدای فرآیند ابزار شکل دهی از بالا وارد لوله می شود و نوک ابزار در موقعیتی قرار می گیرد که سطح خارجی لوله آزاد بوده و با قالب در تماس نباشد. پس از تماس شدن ابزار به سطح خارجی لوله، پاس اول شکل دهی آغاز می شود. در ابتدای پاس اول شکل دهی، ابزار به مقدار از پیش تعیین شده در راستای شعاعی حرکت کرده و باعث تغییر شکل لوله می شود. این مقدار نفوذ شعاعی، عمق شکل دهی نامیده می شود. محور طولی ابزار در زمان شکل دهی همیشه موازی محور لوله باقی می ماند. به منظور شکل دهی متقارن در تمام طول آزاد لوله، ابزار شکل دهی بعد از نفوذ شعاعی شروع به حرکت مارپیچ در جهت محوری لوله می کند و در نتیجه تمام بخش آزاد لوله که در بین دو قالب بالا و پایین قرار گرفته دچار انبساط خواهد شد. سرعت حرکت خطی ابزار در طول مسیر مارپیچ ثابت است که در همه آزمایش ها ۸۰ میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش زمان فرآیند شکل دهی این سرعت انتخاب شده است البته در سرعت های بالاتر از سرعت مذکور پارگی نمونه ها به سرعت رخ داده و میزان شکل دهی به شدت کاهش یافته است. فاصله طی شده در راستای محور لوله توسط ابزار در هر چرخش حول محیط لوله به عنوان گام شکل دهی در نظر گرفته می شود. پس از اتمام پاس اول شکل دهی، ابزار بدون تماس با سطح داخلی لوله به نقطه اولیه شروع شکل دهی باز می شود. در صورت نیاز به انبساط بیشتر لوله، پاس بعدی شکل دهی مجدداً با اعمال تغذیه در راستای شعاعی و سپس حرکت مارپیچ انجام می شود. این مراحل تا رسیدن به عمق شکل دهی مطلوب تکرار خواهد شد. مجموعه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده، در شکل ۱ مشاهده می شود. دمای لوله تا مقدار مورد نیاز توسط المنت کمتری سرامیکی بالا رفته و تا پایان فرآیند ثابت نگه داشته می شود.

دماهای مورد بررسی طوری در نظر گرفته شده‌اند تا پایین‌تر از دمای تبلور مجدد ماده باشند و از تغییرات ریزساختار و دانه‌بندی در زمان گرمایش و حین فرآیند شکل‌دهی اجتناب شود. برای پیش‌بینی پارگی در شبیه‌سازی از هفت معیار شکست نرم استفاده شد که برای استفاده در دمای بالا تغییر داده شده‌اند. در معیارهای تغییر داده شده، از دو تابع کرنش شکست و کار شکست استفاده می‌شود. این معیارها در جدول ۴ ارائه شده است. طبق معیارهای هفت‌گانه، چنان چه مقدار تابع انتگرالی  $F$  مربوط به یک معیار در یک نقطه از ماده به ۱ برسد، پارگی رخ داده است. در این توابع  $\bar{\sigma}$  و  $\bar{\epsilon}$  به ترتیب نشان‌دهنده تنش معادل و کرنش معادل هستند.  $\sigma_m$  و نیز به ترتیب برابر با بزرگ‌ترین تنش کششی اصلی و تنش میانگین در نظر گرفته می‌شوند. در معادله معیارهای شکست اولیه نیز  $C_1$  تا  $C_7$  ثابت ماده هستند. توابع معیارهای شکست نرم تغییر داده شده به صورت یک زیربرنامه به مدل شبیه‌سازی معرفی شده و پارگی لوله را در زمان تغییر شکل پیش‌بینی می‌کنند. پس از پیش‌بینی پارگی توسط یک معیار، کرنش‌های مربوط به نزدیک‌ترین المان به محل پارگی به عنوان کرنشی حدی در نظر گرفته شده و برای رسم منحنی حد شکل‌دهی به کار می‌روند.

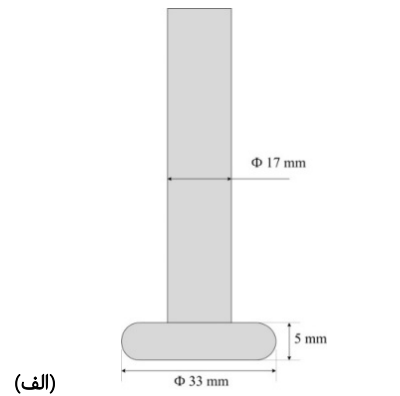
قبل از اینکه از معیارهای شکست برای تشخیص پارگی در نرم‌افزار استفاده شود باید نسبت به صحت نتایج شبیه‌سازی، به مقایسه با نتایج تجربی پرداخته شود. به این منظور در حالت بالج آزاد توزیع ضخامت و ارتفاع قطعه با حالت تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه توزیع ضخامت شبیه‌سازی و تجربی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط گام شکل‌دهی امیلی‌متر، عمق شکل‌دهی امیلی‌متر با سرعت ۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در نمودار ۲ نمایش داده شده است. حداکثر اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی حدود ۵٪ است.



شکل ۲) مدل شبیه‌سازی برش‌خورده

جدول ۳) سطوح پارامترهای استفاده شده در آزمایش‌های شکل‌دهی

عوامل	سطح یک	سطح دو	سطح سه
گام شکل‌دهی (mm)	۰/۵	۱	۱/۵
عمق شکل‌دهی (mm)	۰/۵	۰/۷۵	۱
دما (°C)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰

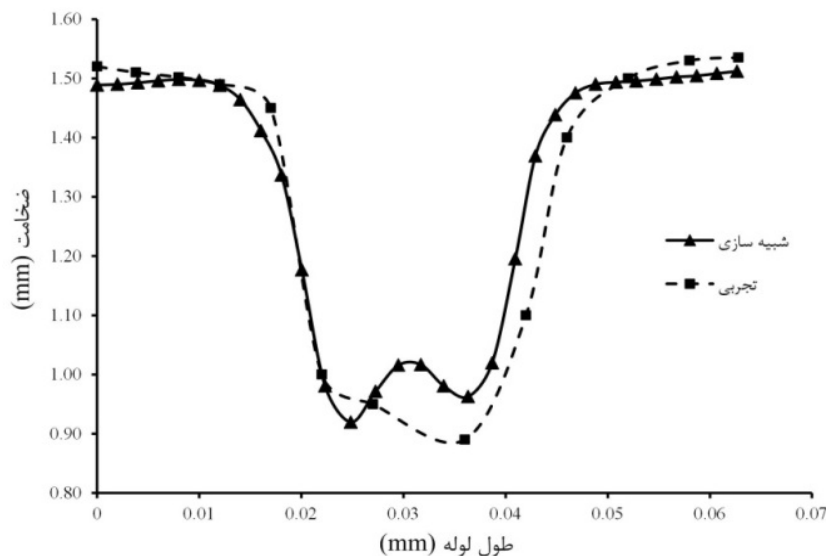


شکل ۱) (الف) ابعاد ابزار شکل‌دهی، (ب) مجموعه دستگاه شکل‌دهی بدون قالب لوله

### شبیه‌سازی اجزای محدود و معیارهای شکست نرم

شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم لوله در نرم‌افزار محیط *Abaqus/Implicit* و به صورت زوج ترمومکانیکی انجام شد. لوله به عنوان جسم شکل‌پذیر و به صورت پوسته مدل شده است. قالب‌ها به صورت جسم صلب در نظر گرفته شدند. مش‌بندی لوله با المان نوع *S4RT* و با اندازه ۲ میلی‌متر انجام شد. اندازه مش با استفاده از تحلیل حساسیت به ابعاد مش انتخاب شده است. برای مش‌بندی ابزار شکل‌دهی نیز از المان نوع *R3D4* با اندازه امیلی‌متر استفاده شده است. قالب‌های بالا و پایین به صورت صلب تحلیلی مدل شده و بدون المان هستند. مانند فرآیند تجربی لوله در دو انتها با قالب‌ها تماس داشته و هیچ قیدی بر آن اعمال نشده است. توزیع دمای یکنواخت نیز در زمان شکل‌دهی روی لوله اعمال شد. سطح تماس بین لوله و قالب‌ها با ضریب اصطکاک ۰/۱ با مدل اصطکاک کلمب تعریف شد. در شبیه‌سازی از ناهمسان‌گردی خواص مکانیکی صرف نظر شده است. همچنین برای مدل‌سازی رفتار پلاستیکی ماده، از منحنی‌های تنش-کرنش تحت نرخ‌های کرنش مختلف به دست آمده از آزمایش کشش تک‌محوری در نرم‌افزار اجزای محدود استفاده شد. مدل برش‌خورده شبیه‌سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. مسیر حرکت ابزار شکل‌دهی به صورت ماریچ و مطابق با پارامترهای هندسی انجام شد. به منظور تغییر حالت شکل‌دهی و ایجاد مسیرهای کرنشی مختلف در راستای دست‌یابی به منحنی حد شکل‌دهی از مقادیر آزمایشی مطابق با جدول ۳ و به صورت عملی کامل استفاده شد.

شماره	نام معیار شکست نرم	معادله معیار اولیه	معادله تغییر داده شده
۱	کرنش پلاستیک معادل	$\bar{\epsilon}_p = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} d\bar{\epsilon} = C_1$	$F_1 = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f(Z)} = 1$
۲	فرودنتال	$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = C_2$	$F_2 = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\bar{\sigma}}{W_f(Z)} d\bar{\epsilon} = 1$
۳	کوکرافت- لاتهام	$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C_3$	$F_3 = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\sigma^*}{W_f(Z)} d\bar{\epsilon} = 1$
۴	کوکرافت- لاتهام نرمال شده	$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_4$	$F_4 = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\sigma^*}{\bar{\epsilon}_f(Z)} d\bar{\epsilon} = 1$
۵	آیادا	$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_5$	$F_5 = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\sigma_m}{\bar{\epsilon}_f(Z)} d\bar{\epsilon} = 1$
۶	بروزو	$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{2\sigma^*}{3(\sigma^* - \sigma_m)} d\bar{\epsilon} = C_6$	$F_6 = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{2\sigma^*}{3(\sigma^* - \sigma_m) \times \bar{\epsilon}_f(Z)} d\bar{\epsilon} = 1$
۷	رایس	$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \exp\left(\frac{1.5\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\epsilon} = C_7$	$F_7 = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\exp\left(\frac{1.5\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right)}{1.6487\bar{\epsilon}_f(Z)} d\bar{\epsilon} = 1$



نمودار ۲) مقایسه توزیع ضخامت در شبیه‌سازی با نتیجه تجربی

### تحلیل نتایج

نمونه‌های تجربی با توجه به پارامترهای متفاوت فرآیندی شکل داده شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما قطر شکل داده شده تا ایجاد اولین پارگی روی لوله بیشتر شده است. سه نمونه شکل داده با گام و عمق شکل دهی ۵/۰ میلی‌متر در دماهای مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. فرآیند شکل دهی تا ایجاد پارگی در دیواره لوله ادامه پیدا کرده است. براساس نتایج به دست آمده، در همه نمونه‌ها شروع پارگی در ناحیه نزدیک شعاع گوشه بالایی انبساط شکل داده شده روی لوله ایجاد می‌شود. در واقع در همین ناحیه نفوذ شعاعی ابزار در ابتدای هر پاس شکل دهی رخ می‌دهد. با نفوذ شعاعی ابزار در پاس اولیه، تنش کششی محیطی به علت انبساط رخ می‌دهد و از طرف دیگر به دلیل این که لوله در انتها با قالب درگیر بوده، حرکت لوله به ناحیه شکل دهی در اثر اصطکاک محدود می‌شود. در نتیجه در اثر تنش کششی دو محوری ایجاد شده پارگی در همین ناحیه ایجاد می‌شود. مطابق با نتایج تجربی، معیارهای شکست نرم به کار گرفته شده در شبیه‌سازی نیز به درستی محل شروع پارگی را پیش‌بینی کرده‌اند. اما قطر انبساط شکل داده شده تا شروع پارگی برای معیارهای هفت‌گانه متفاوت است. محل پارگی پیش‌بینی شده برای دو معیار

کرنش پلاستیک معادل و کوکرافت- لاتهام با نتیجه تجربی در شکل ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است.

با استفاده از شبیه‌سازی، کرنش‌های اصلی و فرعی المان نزدیک محل پارگی که در دو راستای محیطی و طولی قرار دارند به دست می‌آید. محل پارگی به وسیله هفت معیار شکست نرم تغییر داده شده در شبیه‌سازی تعیین می‌شود. منحنی‌های حد شکل دهی برای هفت معیار شکست به همراه منحنی تجربی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمودار ۳ نشان داده شده است. نقاط مختلف منحنی‌ها، در اثر تغییر عوامل گام شکل دهی و عمق شکل دهی و در نتیجه مسیر کرنش به دست آمده است. به دلیل حالت تنش دو محوری کششی در محل پارگی لوله، منحنی حد شکل دهی در ربع اول قرار می‌گیرد. در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای هر کدام از معیارها ۹ نقطه وجود دارد، در حالی که برای منحنی تجربی به دلیل اینکه اطمینان از شروع پارگی و محل گلوبی دقیق وجود ندارد، تعداد نقاط بیشتری نزدیک به پارگی خوانده شده است که در شکل نشان داده شده است. در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، بالاترین منحنی حد شکل دهی را معیار کوکرافت- لاتهام نرمال پیش‌بینی کرده است و کمترین پیش‌بینی نیز متعلق به معیار کرنش پلاستیک است.

دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر رفته‌اند. همچنین به دلیل دوماحوری بودن کرنش، کرنش‌های فرعی نیز بالاتر رفته و منحنی‌ها به سمت راست نیز منتقل شده‌اند.

منحنی حد شکل‌دهی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمودار ۵ نشان داده می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای شکل‌دهی، قطر شکل‌دهی بیشتر و در نتیجه منحنی شکل‌دهی بالاتر رفته است. در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، فاصله پیش‌بینی معیارهای کوکرافت-لاتهام و کوکرافت-لاتهام نرمال به نتایج تجربی کمتر بوده و انتخاب این دو معیار با توجه به نزدیکی نتایج به تجربی مورد قبول است. برای دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد از بین معیارهایی که نزدیک به تجربی هستند معیار کوکرافت-لاتهام نرمال می‌تواند به‌عنوان بهترین معیار برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی در دمای بالا انتخاب شود.

با مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی پیش‌بینی‌شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مشخص می‌شود حداکثر کرنش محیطی از مقدار ۱۸٪ به ۳۶٪ افزایش پیدا کرده است. بیشترین کرنش اصلی در حالت تجربی به گام شکل‌دهی ۵/۵ میلی‌متر و عمق شکل‌دهی ۵/۵ میلی‌متر است که بیشترین قطر شکل‌دهی نیز برابر ۵۴/۶۹ میلی‌متر است که متعلق به این حالت است. ترتیب پیش‌بینی معیارها در همه دما تقریباً یکسان است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، هر چقدر گام و عمق شکل‌دهی کمتر می‌شود قطر انبساط بیشتری شکل داده شده و کرنش‌های حدی بالاتری به‌دست می‌آید.

در ادامه اثر سرعت خطی ابزار شکل‌دهی نیز بر منحنی حد شکل‌دهی به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر سرعت فرآیند بر منحنی حد شکل‌دهی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمودار ۶-الف نشان داده شده است. این منحنی‌ها با استفاده از معیار کوکرافت-لاتهام که این دما به نتایج تجربی نزدیک‌تر بوده به‌دست آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دلیل این که ماده حساسیت به نرخ کرنش کمتری دارد با تغییر سرعت تفاوت خاصی در منحنی حد شکل‌دهی ایجاد نشده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که سرعت فرآیند در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر چندانی بر منحنی حد شکل‌دهی ندارد. برای بررسی اثر سرعت در دماهای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد از معیار کوکرافت-لاتهام نرمال استفاده شده است. حساسیت نرخ کرنش ماده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. در واقع در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش نرخ کرنش، کرنش شکست ماده و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. همان طور که در نمودار ۶-ب نشان داده شده، در واقع در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش سرعت شکل‌دهی، منحنی حد شکل‌دهی پایین‌تر آمده است یعنی با افزایش سرعت پارگی زودتر رخ می‌دهد.

در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، ماده حساسیت به نرخ کرنش

پلاستیک جمع‌شونده است و با توجه به این که مقدار نهایی آن به مسیر کرنش وابسته نیست، حتی با تغییر پارامترهای فرآیندی شامل گام و عمق شکل‌دهی، مقدار نهایی انبساط پیش‌بینی‌شده با این معیار تغییر چندانی ندارد. همان طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی‌شده با معیار کرنش پلاستیک دارای تغییرات زیاد کرنش اصلی نیست. بیشترین بازه کرنش فرعی پیش‌بینی‌شده مربوط به معیار بروزو است. از طرف دیگر معیارهای آیادا و کوکرافت-لاتهام نرمال، منحنی حد شکل‌دهی را خیلی بالاتر از نتایج تجربی محاسبه کرده‌اند. با توجه به اینکه برای کالیبراسیون معیارهای شکست از نتایج آزمایش کشش استفاده شده، این موضوع به تفاوت رفتار تغییر شکل لوله در کشش تک‌محوری و کرنش دوماحوری در شکل‌دهی تدریجی باز می‌شود. در تابع انتگرالی معیار آیادا از تنش میانگین استفاده شده که در آزمایش کشش مقدار آن برابر یک‌سوم تنش معادل فرض می‌شود، ولی در شکل‌دهی تدریجی لوله این مقدار کمتر بوده و در نتیجه انتگرال معیار تغییر داده آیادا دیرتر به مقدار ۱ رسیده و پارگی دیرتر پیش‌بینی می‌شود؛ در نتیجه، منحنی حد شکل‌دهی مربوط به این معیار بالاتر خواهد رفت. در مورد معیار کوکرافت-لاتهام نرمال نیز همین موضوع رخ می‌دهد، زیرا در حالت تک‌محوری، بزرگ‌ترین تنش کششی برابر یک‌سوم تنش معادل فرض شده، ولی در حالت کرنش دو محوری ناشی از شکل‌دهی با ابزار شکل‌دهی تدریجی، اختلاف بزرگ‌ترین تنش کششی و تنش معادل بیشتر می‌شود. با مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مشخص می‌شود که معیارهای کوکرافت-لاتهام و بروزو نزدیک‌ترین پیش‌بینی را به نتایج تجربی را دارند. با بررسی مقدار تنش به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مشخص می‌شود، تنش در راستای محیطی در محل پارگی بیشتر از تنش سطحی بوده است. این موضوع مشخص می‌کند پارگی باید در راستای طولی لوله آغاز شود که در شکل ۵ در سه دمای ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با توجه به اینکه در دمای پایین شکل‌پذیری کمتر بوده ترک اولیه سریع رشد کرده و به‌صورت ترکیب‌گی طولی نمایان می‌شود. در دماهای بالاتر که رشد ترک اولیه به سرعت رخ نمی‌دهد، با توجه حرکت پیوسته ابزار شکل‌دهی در راستای محیط لوله، ترک اولیه ایجادشده نیز در همین راستا گسترش می‌یابد.

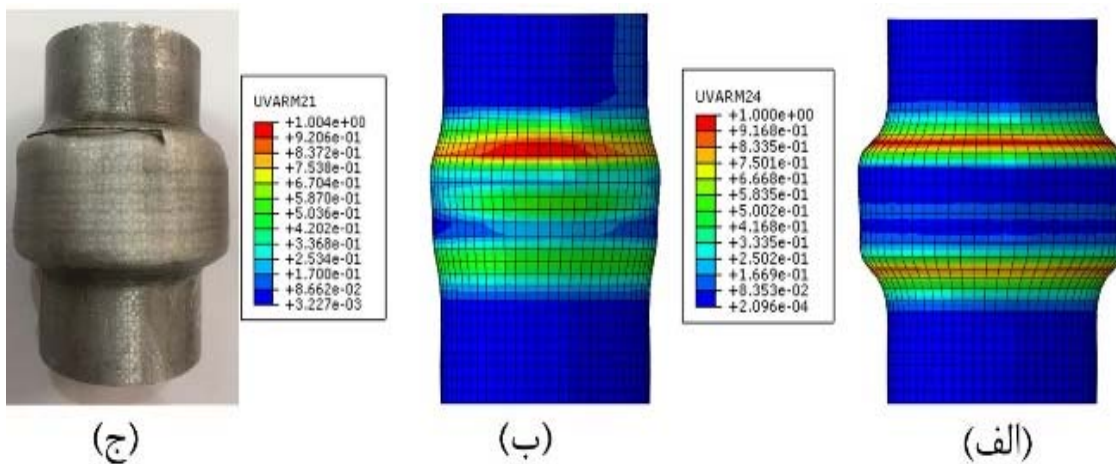
منحنی حد شکل‌دهی در دماهای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمودار ۴ نشان داده شده است. همانند دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز بالاترین پیش‌بینی را معیار کوکرافت-لاتهام نرمال و کمترین پیش‌بینی را نیز کرنش پلاستیک دارا است. وسیع‌ترین محدوده کرنش فرعی نیز متعلق به معیار بروزو است. با توجه به نمودار ۴، در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد معیار کوکرافت-لاتهام نرمال و آیادا به پیش‌بینی تجربی نزدیک‌تر هستند. از آنجا که با افزایش دما شکل‌پذیری بیشتر می‌شود، کرنش‌های حدی بالاتر رفته، و در نتیجه منحنی‌های حد شکل‌دهی

شکل‌دهی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به سرعت پایین‌تر آمده و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

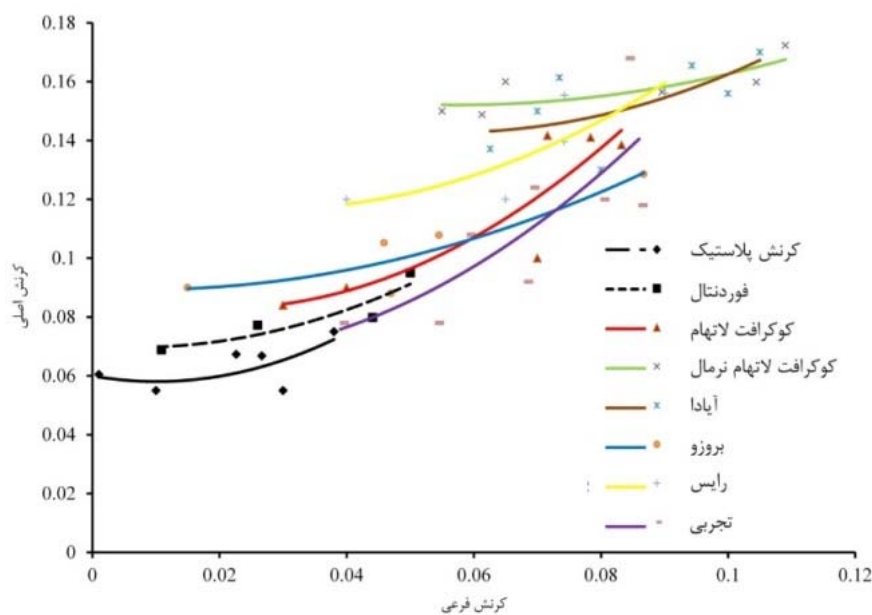
بیشتری را نسبت به دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. با توجه به نمودار ۶- ج، با افزایش سرعت ابزار، منحنی



شکل ۳) نمونه‌های شکل‌داده‌شده در دماهای مختلف با گام و عمق شکل‌دهی ۵/۰ میلی‌متر



شکل ۴) الف) پیش‌بینی معیار کوکرافت- لاتهام، ب) پیش‌بینی معیار کرنش پلاستیک، ج) نتیجه تجربی



نمودار ۳) مقایسه پیش‌بینی منحنی‌های شکل‌دهی معیارهای شکست مختلف و تجربی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد



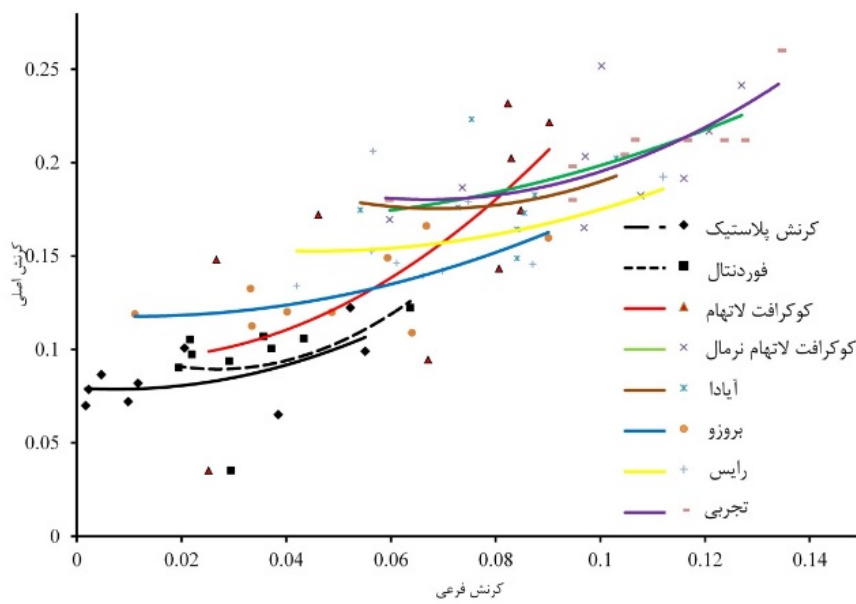


۳۰۰درجه سانتی‌گراد

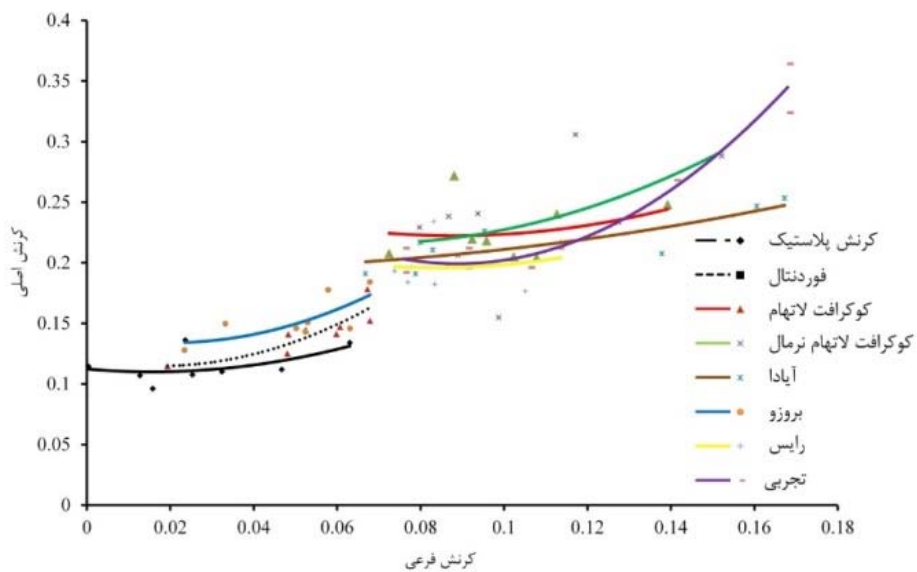
۲۰۰درجه سانتی‌گراد

۱۰۰درجه سانتی‌گراد

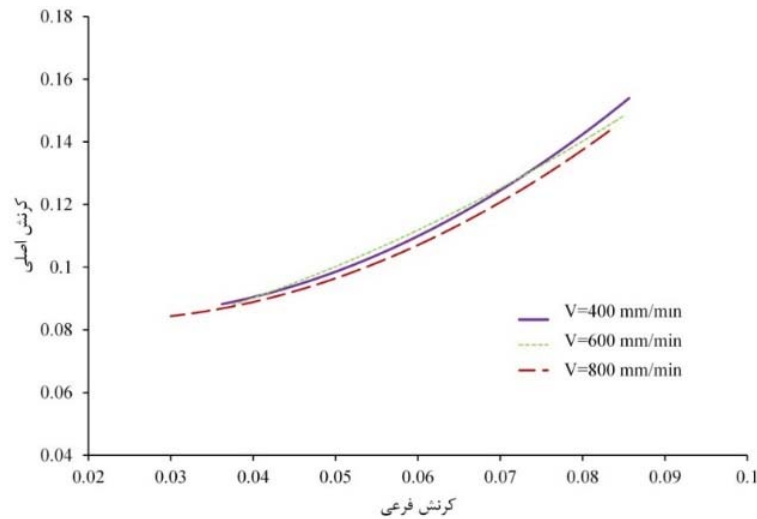
شکل ۵) شروع پارگی در راستای طولی لوله در سه دمای مختلف



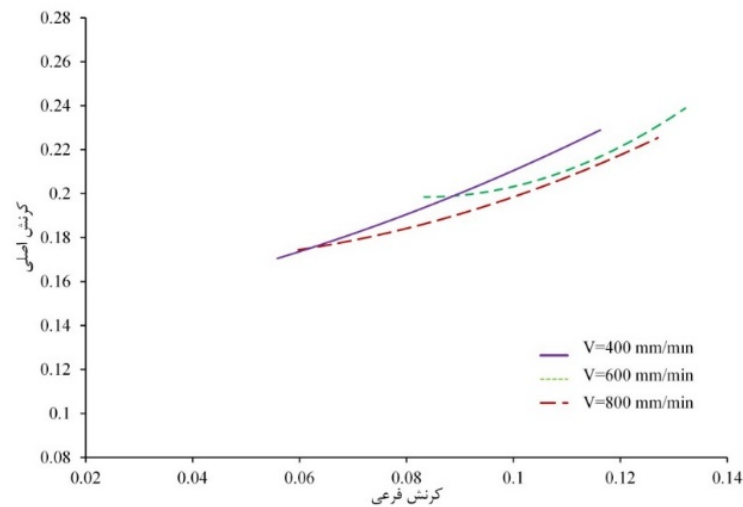
نمودار ۴) مقایسه پیش‌بینی منحنی‌های شکل‌دهی معیارهای شکست مختلف و تجربی در دمای ۲۰۰درجه سانتی‌گراد



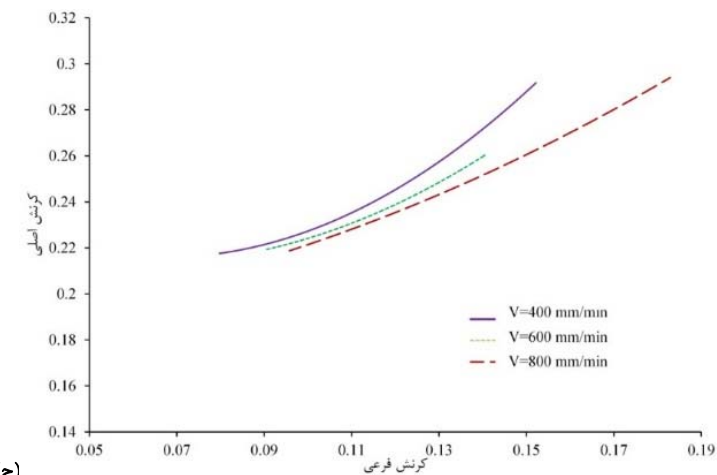
نمودار ۵) مقایسه پیش‌بینی منحنی‌های شکل‌دهی معیارهای شکست مختلف و تجربی در دما ۳۰۰درجه سانتی‌گراد



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۶) بررسی اثر سرعت ابزار شکل‌دهی بر منحنی حد شکل‌دهی در دمای: الف) ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ب) ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، ج) ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

### نتیجه‌گیری

کرنش استفاده شد. نتایج نشان داد پارگی لوله‌ها همیشه در ناحیه شعاع بالایی انبساط در منطقه شکل‌دهی رخ می‌دهد که در اثر تنش کششی دومحوری است. مقایسه منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی‌شده به وسیله معیارهای مختلف با نتایج تجربی نشان داد که در دماهای بالا، معیارهای کوکرافت-لاتهام و کوکرافت-لاتهام نرمال شده دقت بالاتری دارند. با افزایش دما منحنی حد

در این مقاله، شکل‌دهی تدریجی لوله‌های آلومینیومی در دماهای بالا مورد بررسی قرار گرفت. انبساط متقارن محوری لوله‌ها بدون تماس با قالب خارجی و به وسیله یک ابزار چرخان در داخل لوله انجام شد. برای دستیابی به منحنی حد شکل‌دهی لوله‌ها، از هفت معیار شکست نرم تغییر داده‌شده با در نظر گرفتن اثر نرخ

forming: A novel technique. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008;48(15):1688-1692.

10- Fan G, Sun F, Meng X, Gao L, Tong G. Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;49(9-12): 941-947.

11- Zhang Q, Guo H, Xiao F, Gao L, Bondarev A, Han W. Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. 2009;209(15-16):5514-5520.

12- Roohi H, Deilami Azodi H, Safari M. Investigation of forming limit of aluminum sheet in warm incremental forming process. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):259-268. [Persian]

13- Taherkhani A, Basti A, Narimanzadeh N, Jamali A. Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point incremental forming at high rotational speeds. Modares Mechanical Engineering. 2017;16(12):665-674. [Persian]

14- Honarpisheh M, Abdolhoseini MJ, Amini S. Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti-6Al-4V sheet using electrical current. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;83(9-12):2027-2037.

15- Kim SW, Lee YS, Kang SH, Lee JH. Incremental forming of Mg alloy sheet at elevated temperatures. Journal of Mechanical Science and Technology. 2007;21(10):1518.

16- Mohamed FA, El-Abden SZ, Abdel-Rahman M. A rotary flange forming process on the lathe using a ball-shaped tool. Journal of Materials Processing Technology. 2005;170(30):501-508.

17- Yang C, Wen T, Liu LT, Zhang S, Wang H. Dieless incremental hole-flanging of thin-walled tube for producing branched tubing. Journal of Materials Processing Technology. 2014;214(11):2461-2467.

18- Teramae T, Manabe K, Ueno K, Nakamura K, Takeda H. Effect of material properties on deformation behavior in incremental tube-burring process using a bar tool. Journal of Materials Processing Technology. 2007;191(1-3):24-29.

19- Wen T, Yang C, Zhang S, Liu L. Characterization of deformation behavior of thin-walled tubes during incremental forming: a study with selected examples. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;78(9-12):1769-1780.

20- Seyedkashi SMH, Hashemi SJ, Rahmani F. Experimental investigation of effective parameters on a new incremental tube bulging method using rotary tool. International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology. 2017;10(2):83-91.

21- Rahmani F, Seyedkashi SMH, Hashemi SJ. Converting circular tubes into square cross-sectional parts using incremental forming process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2019;29(11):2351-2361.

22- Xiao YH, Guo C. Constitutive modelling for high temperature behavior of 1Cr12Ni3Mo2VNbN martensitic steel. Materials Science and Engineering: A. 2011;528(15):5081-5087.

23- Frost HJ, Ashby MF. Deformation mechanism maps: The plasticity and creep of metals and ceramics. 1<sup>st</sup> Edition. Oxford: Pergamon Press; 1982.

شکل‌دهی لوله‌ها بالاتر رفته است. افزایش سرعت خطی ابزار باعث کاهش شکل‌پذیری ماده می‌شود. با افزایش گام و عمق شکل‌دهی کرنش‌های حادی کمتری به دست خواهند آمد.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** تاکنون در هیچ نشریه دیگری به طور کامل یا بخشی از آن به چاپ نرسیده و برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. همچنین محتویات علمی، حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده ایشان است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** سید جلال هاشمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ فرزاد رحمنی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ سیدمحمدحسین سیدکاشی (نویسنده سوم)، روش‌شناس (۳۰٪).

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

## منابع

- 1- Iseki H, Naganawa T, Kato K. Flexible and incremental sheet metal bulging using a path-controlled spherical roller : 2nd report, vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers. Transactions of Japanese Society of Mechanical Engineering. 1996;62(596):1600-1605.
- 2- Attanasio A, Ceretti E, Giardini C, Mazzone L. Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. Journal of Materials Processing Technology. 2008;197(1-3):59-67.
- 3- Zahedi A, Mollaei-Dariani B, Morovvati MR. Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(14):1-8. [Persian]
- 4- Nikdooz AH, Mirnia MJ, Baseri H. Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(5):210-220. [Persian]
- 5- Prakashbhai Marathe Sh, Kishorchandra Raval H. Numerical investigation on forming behavior of friction stir tailor welded blanks (FSTWBs) during single-point incremental forming (SPIF) process. Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019;41(10):424.
- 6- Ambrogio G, Filice L, Manco G. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. CIRP Annals. 2008;57(1):257-260.
- 7- Ji Y, Park J. Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature. Journal of Materials Processing Technology. 2008;201(1-3):354-358.
- 8- Ji Y, Park J. Incremental forming of free surface with magnesium alloy AZ31 sheet at warm temperatures. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008;18(1):165-169.
- 9- Fan G, Gao L, Hussain G, Wu Z. Electric hot incremental