



انتخاب معیار شکست نرم مناسب جهت پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد مقاطع دارای تاخوردگی

مازیار زهرابی¹، حسن مسلمی نائینی^{2*}، سیامک مزدک³، حسین طالبی قادیکلایی⁴

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* تهران، صندوق پستی 111-14115، moslemi@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد یکی از روش‌های پرکاربرد در تولید لوله و پروفیل‌های فلزی می‌باشد. باوجود مزایای فراوان این روش، پروفیل‌های فلزی دارای تاخوردگی با قابلیت شکل‌دهی پایین مانند پروفیل‌های آلومینیومی، در هنگام تولید دچار پدیده شکست می‌شوند. طراحی مناسب خط تولید و الگوی گل می‌تواند در پیشگیری از این عیب مؤثر باشد. در این تحقیق، به بررسی و مقایسه سه معیار شکست نرم بروزو، آیادا و رایس-تریسی برای پیش‌بینی پدیده شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع تاخوردگی پرداخته شده است. به این منظور شبیه‌سازی اجزای محدود توسط نرم‌افزار آباکوس با در نظر گرفتن معیار شکست انجام شد. برای اعتبارسنجی نتایج از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود له‌کردن لوله استفاده شد. نتایج آزمایش له کردن لوله نشان‌دهنده دقت بالاتر معیار بروزو نسبت به دو معیار دیگر می‌باشد. سپس با استفاده از سابروتین نوشته شده فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع فولادی دارای تاخوردگی شبیه‌سازی و نتایج آن با نمونه تجربی مقایسه شد. در شکل‌دهی مجدد مقطع فولادی تاخوردگی همانند آزمایش تجربی شکستی مشاهده نشده است. در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع آلومینیومی دارای تاخوردگی هر یک از معیارهای بروزو، رایس-تریسی و آیادا به ترتیب طول شکست 10/92، 16/05 و 20/58 میلی‌متر را پیش‌بینی می‌کنند. در نتیجه با توجه به صحت بالاتر معیار بروزو در پیش‌بینی شکست در آزمایش له‌کردن لوله، طول شکست حاصل از این معیار در فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع آلومینیومی دارای تاخوردگی به عنوان مقدار قابل اعتماد انتخاب شد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 مرداد 1400
داوری اولیه: 21 شهریور 1400
پذیرش: 28 مهر 1400

کلیدواژه‌ها:

شکل‌دهی غلتکی
شکل‌دهی مجدد
مقطع دارای تاخوردگی
شکست
معیار شکست نرم

Selection of Appropriate Ductile Fracture Criterion to Predict Failure of Folded Cross Section Profiles in Reshaping Process

Maziar Zohrabi¹, Hassan Moslemi Naeini^{1*}, Siamak Mazdak², Hossein Talebi-Ghadikolaei³

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

3- Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, moslemi@address.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 17 August 2021
First Decision: 12 September 2021
Accepted: 19 November 2021

Keywords:

Roll forming
Reshaping
Folded cross section
Fracture
Ductile fracture criteria

Abstract

The cold roll forming process is one of the most widely used methods in the production of metal profiles. In This method, despite its many advantages for producing folded cross section profiles, the fracture has happened for low-formability metals such as aluminum. Proper design of the line and flower pattern can be effective in preventing this defect. In this paper, three ductile fracture criteria of Brozzo, Ayada and Rice-Tracy are compared to predict the fracture initiation in the reshaping process of the folded cross section. For this purpose, finite element method was performed by Abaqus software considering the fracture criterion. Experimental tests and simulations of the tube flattening were used to verify the results. The results of the tube flattening test show that Brozzo's accuracy should be higher according to the other two criteria. Then, by using the written subroutine the process of forming the folded steel cross section has been simulated and compared with the experimental results. No fracture in the experimental process of forming the folded steel cross section was observed. According to the simulation results of the folded aluminum cross-section process, each of the Brozzo, Rice-Tracy and Ayada criteria predict the failure lengths of 10.9, 16.1 and 20.6 mm, respectively. Therefore, according to the higher accuracy of the Brozzo criterion in predicting failure in the tube flattening test, the fracture length of this criterion in the process of reshaping of the folded aluminum cross section was selected as a reliable value.

Please cite this article using:

M. Zohrabi, H. Moslemi Naeini, S. Mazdak, H. Talebi-Ghadikolaei, Selection of Appropriate Ductile Fracture Criterion to Predict Failure of Folded Cross Section Profiles in Reshaping Process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 8, pp. 24- 37, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

شکل‌دهی مجدد غلتکی روشی برای تولید پروفیل‌های فلزی از لوله گرد می‌باشد. در این روش لوله با عبور از مجموعه غلتک‌های دوار به شکل مورد نظر در می‌آید. مقاطع متفاوتی به این روش تولید می‌شود که یکی از مقاطع پر کاربرد مقطع دارای تاخوردگی می‌باشد. یکی از عیوب رایج در تولید مقاطع دارای تاخوردگی به خصوص برای لوله‌های آلومینیومی، پدیده ترک و شکست می‌باشد [1]. پدیده شکست با طراحی مناسب الگوی گل و مراحل شکل‌دهی رفع می‌شود. به این منظور استفاده از معیار شکست مناسب برای پیش‌بینی این عیب در طراحی الگوی گل و مراحل شکل‌دهی کمک شایانی می‌کند. در زمینه شکل‌دهی غلتکی سرد پژوهش‌های زیادی صورت گرفته که در ادامه شرح داده شده است.

کیوچی و همکاران [2] روشی تحلیلی برای پیش‌بینی الگوی گل مناسب، بر اساس کمینه کردن انرژی برای تبدیل لوله گرد به لوله بیضی شکل ارائه کردند. در بررسی آنها اثر هندسی فرایند نظیر شعاع خم سطح غلتک‌ها و میزان کاهش ارتفاع مقطع را بر روی پروفیل و ابعاد مقطع، شعاع گوشه، انقباض محیطی، افزایش طول (کشیدگی طولی) و افزایش ضخامت دیواره لوله‌ها بررسی کردند. اونادا و همکاران [3] به روش تجربی و اجزای محدود، شکل‌دهی مجدد لوله با سطح مقطع گرد را به مربعی بررسی کردند. در این بررسی پیشنهاد دادند که شکل‌دهی در ایستگاه‌های مختلف بر اساس یک برنامه کاهشی شدید باشد. آنها نشان دادند که توزیع محیطی ضخامت دیواره برای قسمت گوشه در راستای طولی از کاهش خمشی و محیطی تحمیل شده بوسیله غلتک‌ها تأثیر می‌پذیرد. مسلمی نائینی و همکاران [4] تأثیر هندسه غلتک و برنامه مسیر عبور لوله روی رفتار تغییر شکل لوله اولیه، شکل و کیفیت لوله مربعی و مستطیلی و نیروهای شکل‌دهی و رانش فرایند را به صورت تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها به این نتیجه دست یافتند که شعاع گوشه یک لوله با ضخامت دیواره بیشتر را سریع‌تر از لوله‌های با ضخامت دیواره کمتر می‌توان شکل‌دهی کرد. بایومی [5] روشی تحلیلی برای تولید لوله‌های چندضلعی منتظم فلزی از لوله گرد به روش کشش سرد را ارائه نموده است. این حل بر بدست آوردن یک میدان سرعت مجاز مبتنی است که شرایط دینامیکی برای ایجاد مولفه‌های نرخ کرنش را ارضا می‌کند. تنش‌ها از ترکیب قانون پایستگی ماده با رابطه سیلان لوی-میسرز و انتگرال‌گیری از معادلات تعادل به دست می‌آیند. در این بررسی اثر میزان اصطکاک در سطح تماس لوله

و غلتک، شعاع غلتک و ضخامت دیواره بر روی میزان بار وارد بر غلتک‌ها و نیروی کشش مورد نیاز برای انجام فرایند تحقیق شده است. ابری‌نیا و فرهمند [6] فرایند شکل‌دهی مجدد تبدیل لوله گرد به لوله با مقطع مربع و مستطیل را با استفاده از روش کران بالا¹ تحلیل و بررسی کردند. غلتک‌های مورد استفاده در این روش به صورت چهارتایی و به صورت تخت در نظر گرفته شدند. با استفاده از این تئوری تأثیر پارامترهای مهم در این فرایند از قبیل شعاع غلتک‌ها، قطر لوله گرد اولیه، مقدار کاهش در فاصله غلتک‌ها و سرعت غلتک‌ها روی محصول نهایی بررسی شد.

در شکل‌دهی مجدد برای مواد با قابلیت شکل‌دهی پایین در مقاطع دارای گوشه‌های با شعاع کم و زاویه‌های بسته، شکست در گوشه‌ها از معضلات احتمالی می‌باشد. معمولاً در فرایندهای شکل‌دهی فلزات که تغییر شکل به صورت تدریجی می‌باشد، شکست از نوع شکست نرم² می‌باشد. برای امکان بررسی پدیده شکست نرم و پیش‌بینی وقوع آن، پژوهشگران معیارهایی را در این زمینه ارائه کرده‌اند [7]. یک دسته از این معیارها، معیارهای شکست جفت نشده³ هستند که به دلیل سادگی و در عین حال دقت مطلوب آنها، از این دسته از معیارها در بررسی فرایندهای شکل‌دهی استفاده زیادی می‌شود [8]. از پیشروهای شکست نرم مک‌کلینتوک [9] بود که به بررسی ریزساختاری پدیده شکست پرداخت و در ادامه معیاری جفت‌نشده برای پیش‌بینی شکست ارائه داد. کرهون و همکاران [10] به بررسی حد شکل‌دهی و شکست در فرایند کشش عمیق فولاد ضد زنگ پرداختند. آنها با بررسی میکروسکوپی ساختار شکست به این نتیجه رسیدند که در فرایند کشش عمیق شکست نه تنها به صورت گلوبی شدن، بلکه در اثر شکل‌گیری یک نوار برشی به وقوع می‌پیوندد؛ آنها با ادغام معیار ابتدایی رایس-تریسی با معیار گلوبی ارائه‌شده توسط هیل به بررسی این اثر و مقایسه نتایج آن با نتایج به دست آمده از معیارهای کوکرافت-لاتهام و او اچ پرداختند. آنها با مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی به این نتیجه دست یافتند که معیار توسعه داده شده رایس-تریسی شروع شکست را به خوبی پیش‌بینی کرده و دو معیار دیگر شکست را در کرنش کمتری تخمین می‌زنند؛ که دلیل آن به عدم وابستگی معیار رایس-تریسی به مسیر کرنش می‌باشد. جیگان و همکاران [11] به بررسی شکست در آزمون کشش نمونه‌های استوانه‌ای با تمرکز بر ساختار سطح حاصل از شکست به روش اجزای محدود پرداختند. آنها در پژوهش خود به بررسی سطح حاصل از

¹ Upper bound² Ductile fracture³ Uncoupled fracture criteria

بررسی این موضوع استفاده کردند. آن‌ها سه نقطه از ناحیه خم‌شده لبه‌ها و در راستای طول را مورد بررسی قرار دادند و نتایج خود را با محصول تجربی مقایسه کردند؛ نشان دادند که قطعه در نقطه فرضی بعد از ایستگاه پایانی دچار شکست شده‌بود و در دو نقطه قبل از آن ترک یا شکست مشاهده نشده بود. آن‌ها با این نتایج سایر نقاط را نیز مورد تحلیل قرار دادند و مشاهده کردند که 93 درصد از سطح محصول بدون آسیب بوده است.

دادگر اصل و همکاران [14] شکستگی را در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مقطع کانالی شکل مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای بررسی شکست در این فرایند از معیارهای شکست نرم و نمودار حد شکل‌دهی¹² استفاده کردند که معیارهای شکست نرم انتخابی آن‌ها شامل کرنش معادل پلاستیک، رایس-تریسی، آرگون¹³، فرودنتال، ترسکا¹⁴ و حداکثر تنش برشی¹⁵ است. بر اساس نتایجی که آن‌ها به دست آوردند، آرگون دقیق‌ترین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی موقعیت شکست در مقایسه با دیگر معیارهای انتخابی است. علاوه بر این آن‌ها تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت ورق، شعاع خم و زاویه خم را روی پدیده شکست بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که احتمال وقوع شکست با افزایش ضخامت ورق و زاویه خم، افزایش می‌یابد در حالیکه این احتمال با افزایش شعاع خم، کاهش می‌یابد. دنوله و همکاران [15] در مقاله خود به بررسی تأثیر نحوه کالیبراسیون معیار لو-هو¹⁶ در پیش‌بینی شکست در شکل‌دهی ورق وی-شکل¹⁷ مارتنزیتی در فرایند شکل‌دهی غلتکی پرداختند. آن‌ها در این مقاله دریافتند که با استفاده از روش خمکاری وی-شکل برای کالیبراسیون معیار لو-هه در مقایسه با کالیبراسیون با استفاده از کشش تک محوره برای شکل‌دهی ورق وی-شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به نتایج عملی نزدیک‌تر می‌باشد.

طالبی قادیکلای و همکاران [16] با بررسی شکست به کمک معیارهای آيادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله برای شکل‌دهی یو-شکل¹⁸ ورق آلومینیومی 6061 در فرایند شکل‌دهی غلتکی؛ علاوه بر اینکه نشان دادند شرایط تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی بصورت کرنش صفحه‌ای می‌باشد، معیار کوکرافت-لاتهام نرماله نسبت به دو معیار دیگر شروع شکست را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند.

شکست پیش‌بینی شده توسط شش معیار مک‌کلینتوک¹، رایس-تریسی، کوکرافت-لاتهام، بروزو²، فرودنتال³ و اویان⁴ پرداختند و نتایج حاصل را با سطح مشاهده شده در حالت تجربی مقایسه کردند. آن‌ها در پایان با توجه به مشاهدات خود به این نتیجه رسیدند که معیارهای کوکرافت-لاتهام و مک‌کلینتوک، رایس-تریسی و اویان، فرودنتال و بروزو دو به دو سطح شکستی نزدیک به هم را در شبیه‌سازی پیش‌بینی می‌کنند. همچنین مشخص شد که سطح شکست پیش‌بینی شده توسط معیار فرودنتال به حالت تجربی نزدیک‌تر می‌باشد. سانگ و همکاران [12] در پژوهشی به تأثیر نحوه کالیبراسیون معیارها در پیش‌بینی شکست پرداختند. آن‌ها برای بررسی این اثر از سه معیار بروزو، کوکرافت-لاتهام و آيادا⁵ استفاده کردند و آن را بر روی نمونه آلیاژ آلومینیومی 5086 در حلگر آباکوس-ضمنی⁶ پیاده کردند. نمونه‌ای که آن‌ها معرفی کردند، دارای شکل «به اضافه» می‌باشد که در مرکز آن یک صفحه مربعی شبیه به آزمون بالچ⁷ طراحی شده است. آن‌ها این نمونه را تحت کشش آزمون‌های کشش تک‌محوره⁸، کرنش صفحه‌ای⁹ و کشش دو محوره مساوی¹⁰ قرار دادند و نتایج آن را با توجه به شکست در مقطع میانی در آزمون‌های تجربی که به روش برهم‌نگاری دیجیتالی اندازه گرفتند، مقایسه کردند. در هر سه آزمون شکست پیش‌بینی شده توسط معیار آيادا با حالت تجربی تطابق بسیار خوبی داشت. همچنین در حالتی که معیارها با آزمون کرنش صفحه‌ای کالیبره شده بودند، هر سه معیار نسبت به دو آزمون دیگر نتایج بهتری از تخمین شکست را ارائه دادند. وانگ و همکاران [13] به بررسی ریزساختاری شکست و وجود نوارهای برشی در قسمت سطح مقطع شکست محصول تولید شده از جنس فولاد استحکام بالا (DP980) توسط فرایند شکل‌دهی غلتکی پرداختند. محصول نهایی قطعه‌ای با مقطع باز و خم زیاد بود که در طی 13 ایستگاه شکل‌دهی غلتکی شکل می‌گرفت و به کمک معیار اویان سعی در پیش‌بینی شکست در ناحیه خم آن داشتند که برای کالیبره کردن معیار و به دست آوردن دو ثابت آن از دو نمونه آزمون کشش تک‌محوره و کرنش صفحه‌ای استفاده کردند. آن‌ها از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس-صریح¹¹ برای

¹ McClintock

² Brozzo

³ Freudenthal

⁴ Oyane

⁵ Ayada

⁶ Implicit

⁷ Bulge

⁸ Uniaxial tension

⁹ Plain strain

¹⁰ Equibiaxial tension

¹¹ Explicit

¹² Forming limit diagram (FLD)

¹³ Argon

¹⁴ Tresca

¹⁵ Maximum shear stress (MSS)

¹⁶ Lou-Huh

¹⁷ V-shaped

¹⁸ U-shaped

که $f(\sigma)$ تابعی از نوع تنش، D ثابت ماده بوده که شروع شکست را پیش‌بینی می‌کند و $\bar{\epsilon}_p$ و $\bar{\epsilon}_f$ به ترتیب معرف کرنش معادل پلاستیک و کرنش معادل در لحظه شکست است.

رایس و تریسی [18] از طریق مطالعه رشد حفره‌های کروی در ماده صلب-پلاستیک معیاری برای پیش‌بینی شکست نرم ارائه دادند که رابطه تعیین شده در این معیار در رابطه (2) نشان داده شده است:

$$D_1 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \exp\left(\frac{3\sigma_m}{2\bar{\sigma}}\right) d\bar{\epsilon}_p \quad (2)$$

اصول معیار آیادا [19] بر اساس پژوهش‌های مک‌کلینتوک [9] استوار است. آیادا در معیار ارائه داده خود مشابه با معیار رایس-تریسی اثر تنش هیدرواستاتیک در معادله معیار شکست نرم را در نظر گرفته است. بر این اساس این معیار با رابطه (3) نشان داده شده است:

$$D_2 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}_p \quad (3)$$

کوکرافت و لاتهام [20] با تحقیقات ریزساختاری در زمینه شکست و چقرمگی فلزات، بیشینه تنش اصلی را به عنوان پارامتر بحرانی در بروز شکست دانستند. بروزو [21] و همکاران معیار کوکرافت-لاتهام را با افزودن تأثیر مستقیم تنش هیدرواستاتیک اصلاح کرده و طبق رابطه (4) معیار خود را ارائه دادند:

$$D_3 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{max}}\right) d\bar{\epsilon}_p \quad (4)$$

که در روابط (2) تا (4)، σ_m ، $\bar{\sigma}$ و σ_{max} به ترتیب بیان‌گر تنش هیدرواستاتیک، تنش معادل ون میسز و تنش بیشینه اصلی می‌باشد. برای یافتن مقادیر D_1 ، D_2 و D_3 برای آلیاژ آلومینیوم 6101 که در واقع ثابت هریک از معیارها برای این جنس می‌باشد، از آزمون کشش تک‌محوره استفاده شد. حالات تنش را می‌توان با دو پارامتر بی‌بعد η (پارامتر سه محوره تنش) و $\bar{\theta}$ (زاویه لود نرماله) تعریف کرد. η در واقع برابر با نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش معادل است. $\bar{\theta}$ تابعی از نامتغیرهای دوم و سوم ماتریس تنش‌های انحرافی است و محدوده تعریف شده برای آن در بازه $[-1, 1]$ می‌باشد. هر کدام از مقادیر η و $\bar{\theta}$ بیانگر حالتی از شرایط تنشی است. برای بررسی بهتر شرایط تنش (با استفاده از قضیه مقدار میانگین) از میانگین پارامتر سه‌محوره تنش و زاویه لود نرماله استفاده شده است. برای به دست آوردن میانگین پارامتر سه‌محوره تنش و میانگین زاویه لود نرماله

با توجه به پیشینه پژوهش‌هایی که صورت گرفته است، دقت پیش‌بینی شکست در فرایندهای شکل‌دهی فلزات وابستگی شدیدی به حالت تنش در فرایند دارد. به همین دلیل نیاز است تا برای فرایندهای مختلف یک مدل شکست با انتخاب معیار و آزمون کالیبراسیون مناسب توسعه داده شود. بر همین اساس، با توجه به اینکه پدیده شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله با مقطع دارای تاخوردگی در پژوهش‌های پیشین بررسی نشده است و نظر به اینکه این فرایند مسیر بارگذاری مخصوص به خود را دارد، نیاز است تا در یک پژوهش مجزا به این موضوع پرداخته شود و یک مدل شکست متناسب با این فرایند ارائه شود. در این مقاله به بررسی شکست لوله آلومینیومی 6101 در فرایند شکل‌دهی مجدد از مقطع دایره‌ای به مقطع دارای تاخوردگی پرداخته می‌شود. سه معیار شکست نرم آیادا، رایس-تریسی و بروزو به همراه آزمون کالیبراسیون کشش تک محوری برای پیش‌بینی شکست مورد استفاده قرار گرفتند. برای ارزیابی دقت معیارها، از آن‌ها در بررسی شکست در فرایند له کردن لوله استفاده شد و به کمک آن‌ها شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله با مقطع دارای تاخوردگی پیش‌بینی شد.

هدف این تحقیق تعیین مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی برای لوله آلومینیومی است. برای این منظور طول شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی با کورس شکست در فرایند له کردن لوله مورد مقایسه و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

2- تئوری مسئله

معیارهای شکست عمدتاً بر اساس دو رویه پیشنهاد شده‌اند. رویه اول بر اساس تشکیل حفره‌ها در کنار ذرات، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها می‌باشد و رویه دوم بر اساس قوانین تجربی می‌باشد که بر اساس مشاهده‌های تجربی انجام گرفته به منظور تعیین کرنش شکست پیشنهاد شده‌اند. در رویه دوم وقوع شکست زمانی پیش‌بینی می‌شود که یک متغیر خارجی (جدا از متغیرهای داخلی مثل کرنش پلاستیک) به یک مقدار بحرانی برسد. ایده اصلی این دسته از معیارهای شکست نرم ارائه شده بر مبنای رسیدن تابع آسیب به مقدار بحرانی است. معیارهای شکست انتگرالی تاریخچه تغییر شکل را در نظر می‌گیرند و به صورت عمومی مطابق رابطه (1) در نظر گرفته می‌شوند [17]:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} f(\sigma) d\bar{\epsilon}_p = D \quad (1)$$

آلومینیومی و فولادی از لوله توسط وایرکات بریده شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. ضخامت نمونه‌های آلومینیومی 3/1mm و فولادی 2mm و طول گیج هر دو نمونه 60mm می‌باشد. در جدول 1 خواص استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است. برای اینکه بتوان تا لحظه شکست و بعد از آنرا در شبیه‌سازی بررسی کرد نیاز است تا با استفاده از معادله سوئیفت بر داده‌های تجربی معادله‌ای را برازش کرده؛ سپس توسط رابطه بدست آمده نمودار تنش - کرنش پلاستیک را تا بعد از مرحله شکست و کرنش پلاستیک 1/1 ادامه داده شد. از برازش رابطه سوئیفت بر داده‌های تجربی به ترتیب روابط (7) و (8) برای نمونه‌های آلومینیومی و فولادی بدست آمد:

$$\sigma = 352(0.0045 + \varepsilon_p)^{0.2} \quad (7)$$

$$\sigma = 671.1(0.0395 + \varepsilon_p)^{0.272} \quad (8)$$

جدول 1 خصوصیات مواد در شبیه‌سازی‌ها

Table 1 Material properties in simulation

جنس	چگالی (kg/m ³)	ضریب الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)
AA6101	2700	69	0/33	120
St12	7800	204	0/29	270

5- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این مقاله سه دسته شبیه‌سازی اجزای محدود توسط نرم‌افزار آباکوس ورژن 2019 به همراه سابروتین USDFLD همراه معیار شکست بروزو، رایس تریسی و آیدا انجام شد. شبیه‌سازی‌ها به صورت Dynamic explicit انجام شد.

5-1- آزمون کشش

همان‌طور که پیشتر بیان شد برای کالیبر کردن معیار شکست از شبیه‌سازی اجزای محدود آزمایش کشش تک محوره طبق استاندارد ASTM E8/E8M استفاده شد. ابعاد نمونه‌ها طبق استاندارد در نظر گرفته شد برای اجزای بندی از آنجایی که نازک‌شدگی در آزمایش کشش مهم است از اجزای آجری (C3D8R) که جزیی 8 گره خطی به روش انتگرال کاهش یافته استفاده شد. در جزءبندی تعداد اجزای به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که عدم وابستگی تحلیل به تعداد اجزای حاصل شود. در شکل 1 مدل جزءبندی شده نشان داده شده است.

در قسمت وسط نمونه برای دقیق‌تر شدن نتایج تعداد اجزای بیشتری در نظر گرفته شد. برای شرایط مرزی صفحات مربوط به قسمت دمبلی شکل در یک طرف ثابت شد و در طرف دیگر

به ترتیب از روابط (5) و (6) استفاده می‌گردد [22]:

$$\eta_{av} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_f} \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \eta d\bar{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\bar{\theta}_{av} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_f} \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\theta} d\bar{\varepsilon} \quad (6)$$

که در روابط (5) و (6)، η_{av} ، $\bar{\theta}_{av}$ ، $\bar{\varepsilon}_f$ و $d\bar{\varepsilon}$ به ترتیب بیانگر میانگین پارامتر سه‌محوره تنش، میانگین زاویه لود نرماله، کرنش معادل در لحظه شکست و نمو کرنش معادل است.

3- روش تحقیق

در این مقاله برای انتخاب معیار مناسب جهت پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد ابتدا از لوله‌های آلومینیومی و فولادی نمونه‌های آزمایش کشش استخراج شد. برای سه معیار بروزو، رایس تریسی و آیدا توسط سابروتین USDFLD برنامه‌ای نوشته شد. برای کالیبره کردن معیارها آزمایش کشش به صورت اجزای محدود توسط نرم‌افزار آباکوس و سابروتین نوشته شده شبیه‌سازی شد. به منظور ساده‌سازی و بررسی شرایط نزدیک‌تر به فرایند شکل‌دهی مجدد، از فرایند له کردن لوله برای اطمینان از صحت نتایج استفاده شد. به این منظور لوله‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیومی به صورت تجربی و شبیه‌سازی بین دو فک پرس تحت تغییر شکل مومسان قرار گرفت، که نتایج حاصل نشان داد که معیار بروزو ترک را از معیارهای آیدا و رایس تریسی دقیق‌تر نشان می‌دهد. پس از اطمینان از دقت معیارها، مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی انجام شد و به کمک نتایج تجربی مقطع فولادی، دقت مدل المان محدود در پیش‌بینی رفتار مومسان ورق در فرایند شکل‌دهی مجدد مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از اطمینان از صحت مدل در حوزه تغییر شکل مومسان و اطمینان از دقت معیارها در فرایند له کردن لوله، که حالت بارگذاری مشابه با فرایند شکل‌دهی مجدد داشته، شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی فولادی و آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با استفاده از نتایج تجربی حاصل از فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی فولادی، مقایسه‌ای بین پیش‌بینی شکست توسط مدل ارائه شده در این پژوهش و آزمون‌های تجربی نیز انجام شد.

4- خصوصیات مواد

برای تعیین خصوصیت مواد از آزمون کشش تک محوره بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M انجام شد. نمونه‌های

3-5- فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی

برای مدل‌سازی شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی لوله اولیه به صورت پوسته‌ای با در نظر گرفتن انقباض محیطی با قطر 49mm، طول 560mm و ضخامت 2mm در نظر گرفته شد. با توجه به تقارن فرایند نصف فرایند مدل شد. مدل مطابق شکل 4 در چهار ایستگاه شکل‌دهی و یک ایستگاه راهنما مدل‌سازی شد.

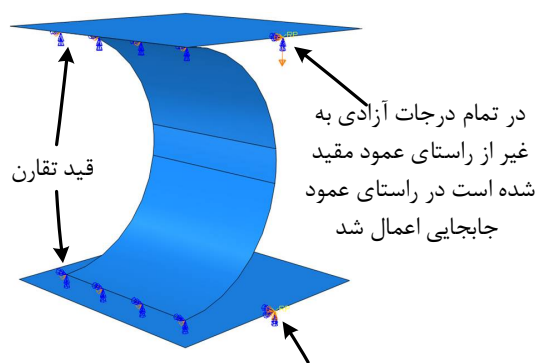


Fig. 2 Modeling and boundary conditions of tube flattening test
شکل 2 مدل‌سازی و شرایط مرزی له کردن لوله

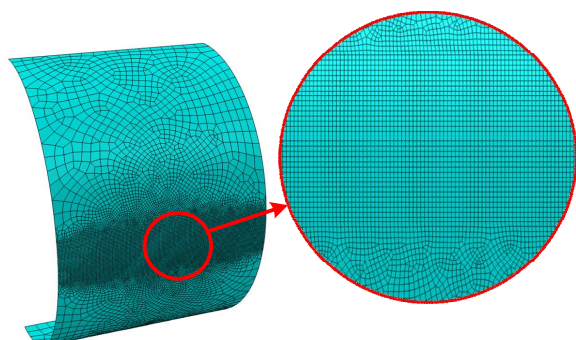


Fig. 3 Mesh of tube flattening test specimen in simulation
شکل 3 نمونه جزءبندی شده در شبیه‌سازی آزمون له کردن لوله

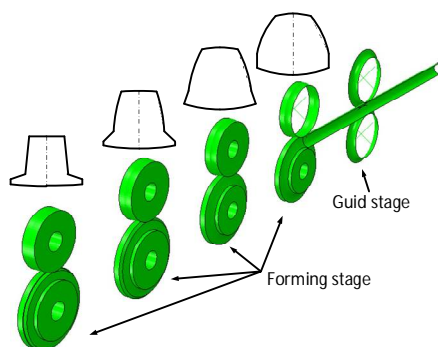


Fig. 4 Modeling stages of reshaping of folded cross section tube in simulation
شکل 4 مدل ایستگاه‌های شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی در شبیه‌سازی

گلتک‌ها به صورت صلب گسسته و لوله به صورت پوسته‌ای

مقدار جابجایی به گونه‌ای داده شد تا مقادیر کرنش در آزمایش تجربی بدست بیاید.

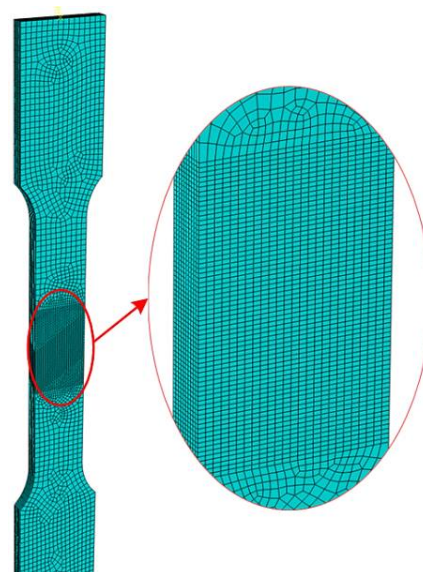


Fig. 1 Mesh of tensile test specimen in simulation
شکل 1 نمونه جزءبندی شده در شبیه‌سازی آزمون کشش

2-5- آزمایش له کردن لوله

منظور از له کردن لوله قرار دادن لوله در بین دو صفحه تخت و فشار دادن صفحات می‌باشد با توجه به طبیعت متقارن فرایند نصف لوله مدل شد. مطابق شکل 2 مدل و شرایط مرزی اعمال شد.

ابعاد نمونه بر اساس استاندارد ISO 8492 انتخاب شد. قطر خارجی لوله برابر با 75mm، ضخامت لوله برابر 3/1mm بوده و طول آن 50mm است. برای مش‌بندی با توجه به اینکه در فرایند شکل‌دهی مجدد برای کاهش زمان نیازمند استفاده از اجزای پوسته‌ای می‌باشد در له کردن لوله هم از اجزای پوسته‌ای استفاده شد. اجزای مورد استفاده (S4R) یک جزء پوسته‌ای چهار گره خطی با در نظر گرفتن روش انتگرال کاهش یافته می‌باشد. لازم به ذکر است طبق [22] استفاده از اجزای آجری در کالیبراسیون و استفاده از اجزای پوسته‌ای در تحلیل فرایند تأثیر محسوسی بر دقت فرایند ندارد.

تعداد اجزا به گونه‌ای انتخاب شد تا عدم وابستگی نتایج به مش‌بندی حاصل شود. در ناحیه‌ای که احتمال رشد ترک می‌رفت اندازه اجزا به گونه‌ای انتخاب شد که با اندازه اجزا در آزمایش کشش برابر باشد. صفحه‌های تخت به صورت صلب گسسته مدل شد. در شکل 3 لوله جزءبندی شده برای له کردن لوله نشان داده شده است.

میزان جابجایی فک پرس به عنوان طول کورس شکست در آزمون له کردن لوله در نظر گرفته شد. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، آزمایش سه بار انجام گرفت.

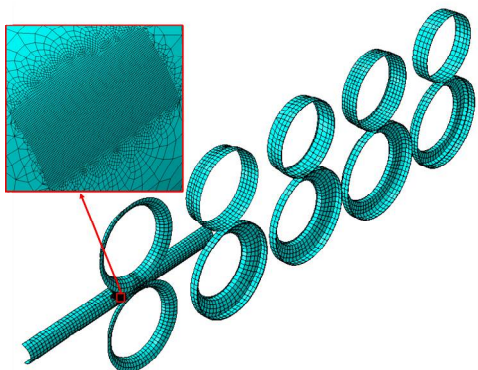


Fig. 5 Meshing model of reshaping of folded cross section tube in simulation

شکل 5 مدل جزءبندی شده در شبیه‌سازی شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی



Fig. 6 Cracks formed on surface of the specimen at 50 mm displacement of punch in tube flattening test

شکل 6 ترک‌های بوجود آمده بر روی سطح نمونه آزمایش له کردن لوله در جابجایی 50 میلیمتر فک پرس

6-2- شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی

برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی شکل‌دهی مجدد نمونه‌های از یک خط صنعتی برداشته شد به این منظور پس از توقف خط از ایستگاه پنجم نمونه‌هایی بریده شد. پروفیل نمونه بریده شده توسط CMM اندازه‌گیری شد. CMM مورد نظر دارای دقت $0/001\text{mm}$ می‌باشد. در شکل 7 دستگاه مورد استفاده برای آزمایش تجربی نشان داده شده است. در شکل 8 نمونه تهیه شده از ایستگاه پنجم و همچنین سطح مقطع نهایی قطعه نشان داده شده است.

مدل شد. لوله با اجزای پوسته‌ای (S4R) چهار گره، خطی با در نظر گرفتن روش انتگرال کاهش یافته مطابق شکل 5 جزءبندی شدند. برای جزءبندی مدل، اندازه اجزای ناحیه‌ای که احتمال رخ دادن ترک در آن وجود داشت، مطابق با اندازه اجزا در وسط نمونه شبیه‌سازی آزمون کشش انتخاب گردید. غلتک‌ها در تمام جهات به غیر از چرخش حول محور غلتک مقید شدند و به غلتک‌ها 70Rad/min حول محور غلتک چرخش داده شد. تماس بین غلتک‌ها و ورق از نوع تماس عمومی صریح تعریف شده است و ضریب اصطکاک برابر $0/05$ در نظر گرفته شد. شعاع کوچک غلتک راهنما برابر 85mm در نظر گرفته شد و برای ایجاد یک کشش نسبی لوله قطر کوچک هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبلی 2mm بزرگتر در نظر گرفته شده است.

6- آزمایش تجربی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد آزمایش تجربی در سه قسمت انجام شد. قسمت اول آزمون کشش که پیش‌تر توضیح داده شد. آزمایش له کردن لوله و شکل‌دهی مجدد که در ادامه شرح داده می‌شود.

6-1- آزمایش له کردن لوله

برای آزمایش له کردن لوله، نمونه‌هایی به طول 50mm از لوله‌ای با قطر خارجی 75mm و ضخامت $3/1\text{mm}$ بریده شد. نمونه‌های تهیه شده بین دو فک پرس قرار داده شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند. پس از آن تغییر شکل قطعه توسط فک پرس تا جایی ادامه پیدا کرد که اولین نشانه‌های شکست بر روی سطح نمونه مشاهده گردد. برای موادی مانند آلایژ آلومینیوم 6101 که جزو آلایژهای انعطاف‌پذیر به حساب می‌آیند، پدیده شروع شکست به صورت ترک‌های سطحی نمایان می‌شود. در این آزمایش، شکست نمونه پس از جابجایی فک پرس به میزان 52mm مشاهده شد. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر در زمینه تعیین لحظه شروع شکست در این فرایند، این آزمایش به ازای جابجایی فک پرس در بازه 48mm تا 52mm با گام $0/1\text{mm}$ انجام شد. پس از آن سطح خارجی نمونه‌های تغییر شکل یافته برای بررسی شکست با توجه به راهکار ارائه شده در [23] نمونه‌ها توسط میکروسکوپ دیجیتال با بزرگنمایی 50 برابر مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج به دست آمده اولین نشانه‌های شکست بر روی پوسته خارجی در نمونه‌ای مشاهده شد که تحت تغییر شکل با جابجایی 50mm توسط فک‌های پرس قرار گرفته بود، که در شکل 6 ترک‌های پدیدار شده در لحظه شروع شکست بر روی سطح این نمونه قابل مشاهده است. در نتیجه این

7- نتایج و بحث

شرایط تنش کشش تک‌محوره [24] را نشان می‌دهد که این موضوع صحت شبیه‌سازی آزمون کشش را می‌رساند.

7-1- محاسبه ثابت‌های معیارهای شکست و سطح شکست معیارها همان‌طور که پیشتر بیان شد برای بدست آوردن ثوابت معیارهای شکست از آزمون کشش تک‌محوره استفاده شد.

7-1-2- آلیاژ فولاد st12

نمونه فولادی آزمون کشش در این فرایند در لحظه جابجایی 19/2mm دچار شکست می‌گردد. در این جابجایی مقادیر بحرانی برای توابع معیارهای شکست نرم مشابه نمونه آلومینیومی، محاسبه گردیده است که این مقادیر برای هر کدام از معیارها در جدول 4 نشان داده شده است.

7-1-1- آلیاژ آلومینیوم 6101

نمونه آلومینیومی آزمون کشش در این فرایند در لحظه جابجایی 13/8mm دچار شکست می‌گردد. مقدار تابع شکست هر یک از این معیارها تا این لحظه در شبیه‌سازی آزمون کشش به کمک زیربرنامه VUSDFLD محاسبه گردیده و به عنوان مقدار بحرانی تابع یا ثابت معیار به دست می‌آید. ثوابت به دست آمده برای هر یک از معیارها در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2 ثابت معیارهای شکست مورد استفاده برای آلیاژ آلومینیوم 6101

نام معیار	مقدار بحرانی
آیادا	0/102378
رایس-تریسی	0/50278
پروزو	0/304184

جدول 3 مقادیر میانگین متغیرهای بی‌بعد تنش برای نمونه آلومینیومی در آزمون کشش

نام متغیر	مقدار میانگین
پارامتر سه‌محوره تنش	0/3383
زاویه لود نرماله	0/9861

جدول 4 ثابت معیارهای شکست مورد استفاده برای فولاد st12

نام معیار	مقدار بحرانی
آیادا	0/380022
رایس-تریسی	1/72181
پروزو	0/997233

در نهایت نمودارهای تنش برحسب کرنش به دست آمده از فولاد و آلومینیوم در حالت تجربی و شبیه‌سازی در شکل 9 آورده شده است که تطابق نتایج تجربی و شبیه‌سازی را به خوبی نشان می‌دهد.

7-2- پیش‌بینی شکست در فرایند له کردن لوله آلومینیومی

شبیه‌سازی این فرایند برای لوله آلومینیومی و با استفاده از معیارهای کالیبره شده انجام شده و مقدار تابع شکست برای هر کدام از معیارها توسط زیربرنامه VUSDFLD تدوین شده محاسبه گردید و با مقدار بحرانی به دست آمده توسط آزمون کشش مقایسه شد. ابتدا به بررسی محدوده تنش در فرایند له کردن لوله پرداخته می‌شود. همان‌طور که در مطالب پیشین ذکر



Fig. 7 The reshaping of folded cross section tube machine

شکل 7 دستگاه شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی



Fig. 8 Cut sample from fifth stage

شکل 8 نمونه بریده شده از خروجی ایستگاه پنجم

مقدار میانگین پارامتر سه‌محوره تنش و زاویه لود نرماله در جدول 3 آورده شده است. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود میانگین پارامتر سه‌محوره تنش در محدوده 0/3 بوده و میانگین زاویه لود نرماله نزدیک به 1 می‌باشد و این مقادیر

شده، برای بررسی نوع بارگذاری از پارامتر سه‌محوره تنش و همچنین زاویه لود نرماله استفاده می‌شود. توزیع هر دو این متغیرها در طول فرایند تا لحظه شکست تجربی بر حسب کرنش معادل پلاستیک در شکل 10 آورده شده است.

شکست پیش‌بینی شده توسط هر کدام از معیارهای آیادا، رایس-تریسی و بروزو در جدول 6 آورده شده است. کانتور توزیع آسیب معیارهای شکست آیادا، رایس-تریسی و بروزو در لحظه شروع شکست لوله آلومینیومی در آزمایش له کردن لوله در شکل 11 آورده شده است. همچنین تغییرات آسیب بحرانی بر حسب جابجایی فک پرس برای هر یک از معیارهای آیادا، رایس-تریسی و بروزو در شکل 12 آورده شده است.

جدول 5 مقادیر میانگین متغیرهای بی‌بعد تنش برای آزمایش له کردن لوله
Table 5 Mean values of dimensionless parameters for tube flattening test

نام متغیر	مقدار میانگین
پارامتر سه‌محوره تنش	0/5840
زاویه لود نرماله	-0/0397

جدول 6 جابجایی فک پرس در لحظه شروع شکست در حالت شبیه‌سازی در فرایند له کردن لوله

Table 6 Punch displacement at the moment of cracking in simulation for tube flattening test

نام معیار	مقدار جابجایی فک پرس در لحظه شروع شکست (mm)
آیادا	43
رایس-تریسی	47
بروزو	48/5

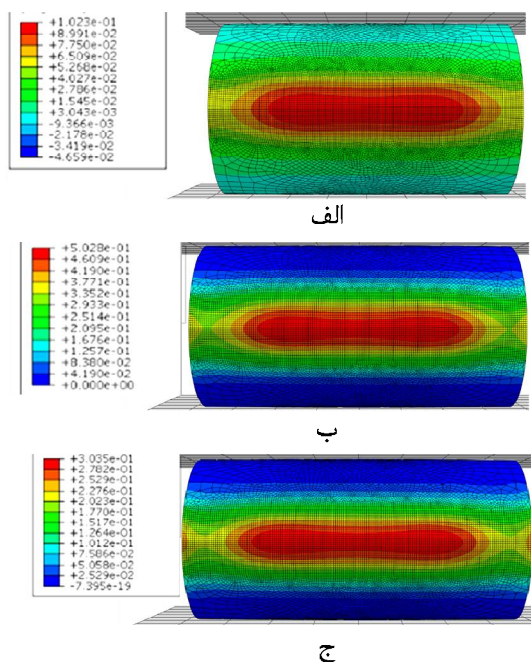


Fig. 11 Damage distribution contour of a)Ayada b)Rice-Tracy c)Brozzo criteria at the moment of cracking for AA6101

شکل 11 کانتور توزیع آسیب معیار (الف) آیادا (ب) رایس-تریسی (ج) بروزو در لحظه شروع شکست برای آلومینیوم 6101

شکل 9 نمودار تنش-کرنش حاصل از تجربی و شبیه‌سازی

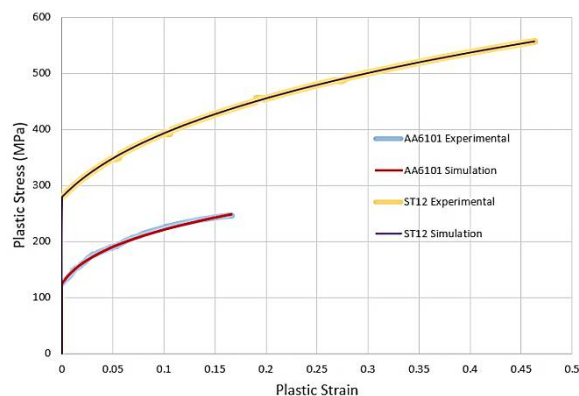


Fig. 9 Experimental and stimulation Stress-Strain diagram

شکل 9 نمودار تنش-کرنش حاصل از تجربی و شبیه‌سازی

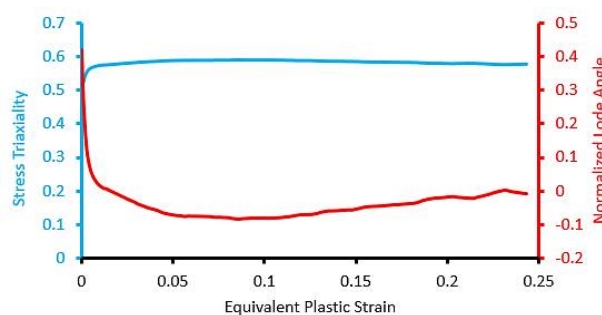


Fig. 10 Distribution of dimensionless parameters in tube flattening test

شکل 10 توزیع متغیرهای بی‌بعد تنش در طول فرایند له کردن لوله

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، در طول این فرایند پارامتر سه‌محوره تنش و به خصوص زاویه لود نرماله دارای تغییرات می‌باشند، که دلیل این تغییرات مربوط به تغییرات اندک حالت کرنش صفحه‌ای در طول فرایند می‌باشد.

برای امکان مقایسه بهتر این فرایند با آزمون کشش میانگین پارامتر سه‌محوره تنش و زاویه لود نرماله [19] در جدول 5 آورده شده است. همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌شود، با توجه به مقادیر میانگین به دست آمده، فرایند در حالت کرنش صفحه‌ای صورت گرفته است و این موضوع، فرض اولیه برای در نظر گرفتن حالت کرنش صفحه‌ای را تصدیق می‌کند.

پارامتری که در پیش‌بینی شکست در فرایند له کردن لوله انتخاب شده، میزان جابجایی فک پرس است تا به کمک آن نزدیک بودن نتایج شروع شکست پیش‌بینی شده در حالت

نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی بعد از خروج از ایستگاه آخر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی وجود دارد که نشان از صحت نتایج شبیه‌سازی دارد.

جدول 7 مقدار درصد خطای محاسبه شده برای هر معیار در فرایند له کردن لوله

Table 7 Error percentage of each criteria in tube flattening test

معیار شکست نرم	درصد خطا
آیادا	%14
رایس-تریسی	%6
بروزو	%3

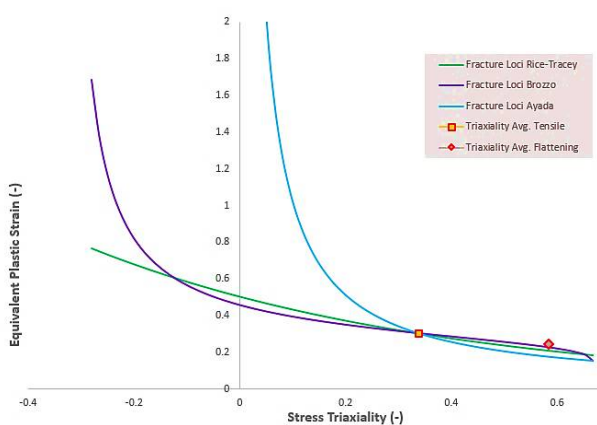


Fig. 13 Fracture envelope of Ayada, Rice-Tracey and Brozzo criteria in tube flattening test

شکل 13 سطح شکست معیارهای آیادا، رایس-تریسی و بروزو در شبیه‌سازی له کردن لوله

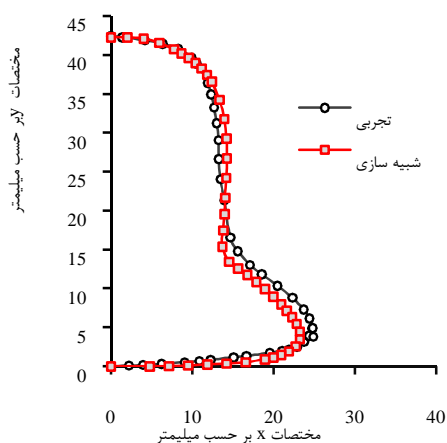


Fig. 14 The cross section profile of last stage in simulation and experiment

شکل 14 مقایسه شکل پروفیل خروجی از ایستگاه آخر شکل‌دهی برای شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

پس از اطمینان از صحت نتایج به بررسی شکست در نمونه‌ها

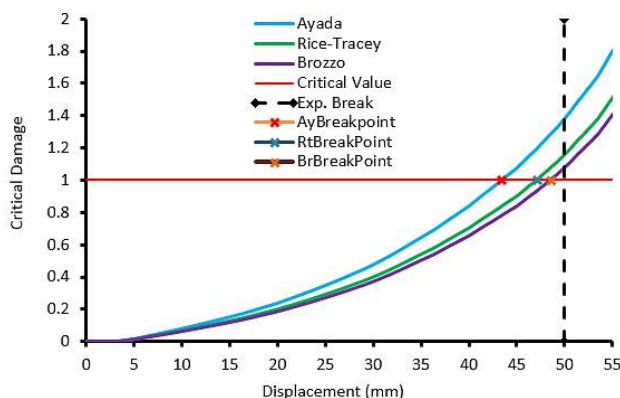


Fig. 12 Critical damage respect to punch displacement in tube flattening test

شکل 12 نمودار آسیب بحرانی بر حسب جابجایی فک پرس در فرایند له کردن لوله آلومینیومی

از آنجا که جابجایی شروع شکست در آزمایش تجربی برابر 50 میلی‌متر می‌باشد؛ در نتیجه همان‌طور که قابل مشاهده است معیار آیادا نسبت به سایر معیارها شروع شکست را با اختلاف بیشتری زودتر پیش‌بینی کرده است و معیار بروزو نزدیک‌ترین مقدار را نسبت به حالت تجربی تخمین زده است.

با توجه به نتایج به دست آمده خطای هر کدام از معیارها در جدول 7 نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول 7 مشخص است، معیار بروزو نزدیک‌ترین جابجایی برای شروع شکست را نسبت به حالت تجربی پیش‌بینی کرده است و پس از آن به ترتیب معیارهای رایس-تریسی و آیادا با درصد خطای بیشتری نسبت به معیار بروزو شروع شکست را پیش‌بینی کرده‌اند. برای بررسی دلیل خطای موجود و دقت هر کدام از معیارها، سطح شکست هر کدام از معیارهای آیادا، رایس-تریسی و بروزو و همچنین میانگین پارامتر سه‌محوره تنش برای آزمون کشش و آزمایش له کردن لوله در شکل 13 آورده شده است.

با توجه به شکل 13 در پارامتر سه‌محوره تنش بیشتر از 0/3 به ترتیب معیارهای بروزو، رایس-تریسی و آیادا حساسیت کمتری نسبت به تغییرات پارامتر سه‌محوره تنش دارند. از آنجایی که نقطه میانگین پارامتر سه‌محوره تنش در آزمایش له کردن لوله به سطح شکست معیار بروزو نزدیکتر است، در نتیجه این معیار تخمین نزدیکتری به آزمایش تجربی دارد و بعد از آن به ترتیب معیارهای رایس-تریسی و آیادا سطح شکست نزدیکتری به حالت تنش فرایند له کردن لوله دارند.

7-3- پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی

7-3-1- مقطع فولادی

در شکل 14 که سطح خارجی پروفیل را نشان می‌دهد، مقایسه

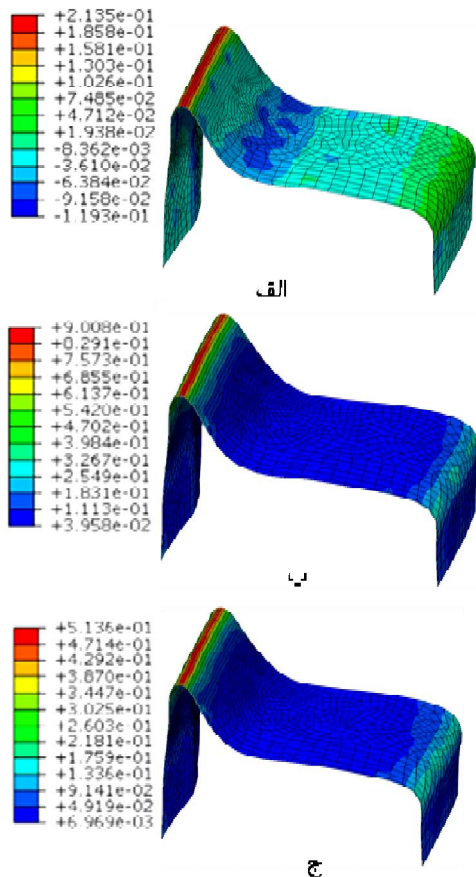


Fig. 16 Damage distributing contour of a) Ayada b) Rice-Tracey c) Brozzo criteria for folded steel cross section

شکل 16 کانتور توزیع آسیب معیار الف) آیادا ب) رایس-تریسی ج) بروزو برای مقطع دارای تاخوردگی فولادی

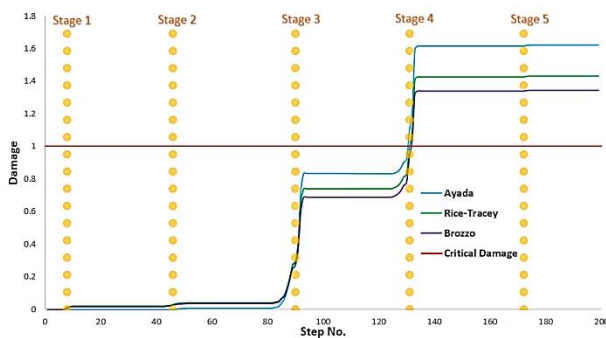


Fig. 17 Critical damage change during reshaping process for steel specimen

شکل 17 تغییرات آسیب بحرانی در طول فرایند شکل‌دهی مقطع دارای تاخوردگی آلومینیومی

برای مقایسه نتایج و تحلیل دقیق‌تر آن‌ها، پارامتری تحت عنوان طول شکست مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که در فرایند شکل‌دهی غلتکی تغییر شکل و همچنین تغییر تنش‌های سطح لوله محدود به نقطه یا ناحیه تحت تماس با غلتک نمی‌شود و نواحی اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ در لحظه

پرداخته، بدین منظور نمودار تغییرات آسیب بحرانی برای هر سه معیار در شکل 15 آورده شده است.

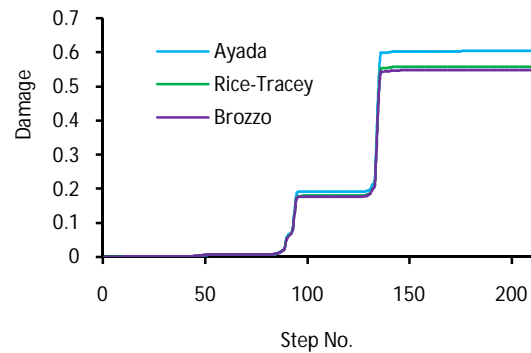


Fig. 15 Critical damage change during reshaping process for steel specimen

شکل 15 تغییرات آسیب بحرانی در طول فرایند شکل‌دهی مقطع دارای تاخوردگی فولادی

همان‌طور که در شکل 15 مشخص است، آسیب بحرانی با ورود به ایستگاه سوم و چهارم به دلیل تغییر شکل بیشتر لوله دچار یک تغییر آبی می‌شود؛ بعلاوه تا انتهای فرایند مقدار آسیب بحرانی از مرز 1 که نشان دهنده لحظه شروع شکست می‌باشد، تجاوز نکرده است که نشان می‌دهد قطعه تا آخرین مرحله شکل‌دهی دچار شکست نگردیده است و سالم از ایستگاه آخر خارج شده است. این نتیجه با نتایجی که از آزمایش تجربی حاصل گردیده است، همخوانی دارد و صحت پیش‌بینی معیارهای شکست را نشان می‌دهد.

شکل 16 کانتور توزیع آسیب معیارهای شکست آیادا، رایس-تریسی و بروزو را برای محصول فولادی خارج شده از ایستگاه آخر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هیچکدام از معیارها شکستی را در این فرایند پیش‌بینی نکرده‌اند.

2-3-7- مقع آلومینیومی

برای بررسی شکست در مقطع آلومینیومی دارای تاخوردگی در ابتدا به بررسی پیش‌بینی شکست توسط هر کدام از معیارها پرداخته می‌شود. برای بررسی این امر تغییرات آسیب بحرانی در طول فرایند شکل‌دهی جزء بحرانی در شکل 17 آورده شده است. در شکل 17 برای جزء بحرانی تغییرات آسیب معیارهای مورد بررسی در طول شکل‌دهی نشان داده شده است. هر سه معیار در هنگام ورود به ایستگاه شماره 4 وقوع ترک را پیش‌بینی می‌کنند.

از دو معیار دیگر بوده و این بدین معناست که شکست را در اجزای با فاصله بیشتری از جزیی که در تماس با غلتک است، پیش‌بینی می‌کند یا به عبارتی دیگر شکست را در جزیی با فاصله مشخص، زودتر از دو معیار دیگر تخمین می‌زند؛ که این نتیجه با پیش‌بینی زودتر شکست در فرایند له کردن لوله نسبت به دو معیار دیگر کاملاً همخوانی دارد.

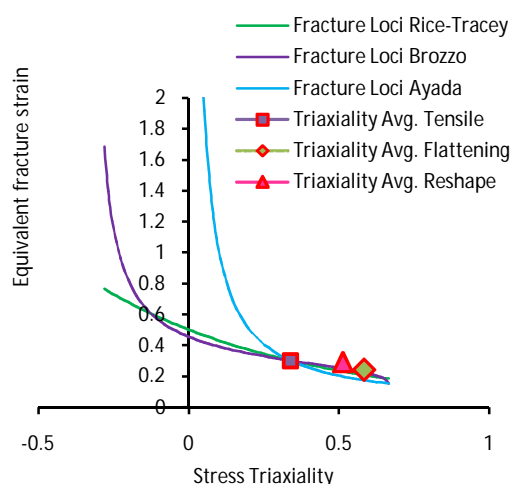


Fig. 18 Comparison of criteria's damage envelope with the mean of stress triaxiality

شکل 18 مقایسه سطح شکست معیارها با نقاط میانگین پارامتر سه‌محوره تنش

همچنین در شکل 19 می‌توان کانتور توزیع آسیب برای سه معیار آیادا، رایس-تریسی و بروزو در لحظه ورود نمونه به ایستگاه چهارم را مشاهده کرد. شکل 19 در واقع تصدیق بر پیش‌بینی زودتر شکست توسط معیار آیادا نسبت به دو معیار دیگر است.

با توجه به نتایج به دست آمده از وقوع پدیده شکست در آلیاژ آلومینیومی و فولادی در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله با مقطع تاخوردگی، شکست در شبیه‌سازی مقطع دارای تاخوردگی آلیاژ آلومینیومی در ایستگاه چهارم مشاهده شد؛ در حالیکه آلیاژ فولادی بدون وقوع شکست از ایستگاه نهایی خارج شده است که این نتیجه با مشاهدات تجربی حاصل از نمونه‌های فولادی تطابق دارد. دلیل این مسئله می‌تواند ناشی از حد بحرانی آسیب بالاتر آلیاژ فولادی باشد که در بخش کالیبراسیون معیارها نشان داده شده است. این حد آسیب بحرانی بالاتر باعث می‌شود تا مقادیر کرنش شکست برای آلیاژ فولادی در تمامی حالات بارگذاری ($0/66 < \eta < 0/33$) بالاتر از آلیاژ آلومینیومی قرار گیرد، که این موضوع باعث مشاهده چنین پدیده‌ای در این فرایند می‌شود. از آنجایی که معیار بروزو در آزمایش له کردن لوله مقدار

درگیر شدن ناحیه‌ای از سطح لوله با غلتک‌های شکل‌دهی، تنش‌های منتقل شده از آن ناحیه به نواحی که هنوز با سطح غلتک درگیر نشده‌اند موجب تغییر در وضعیت تنش و کرنش‌های آن نواحی می‌گردد. به همین جهت فاصله آخرین جزیی که در اثر تغییر شکل نواحی اطراف دچار شکست شده است با جزء بحرانی برای هر کدام از معیارها محاسبه شد و تحت عنوان طول شکست در جدول 8 آورده شده است. در واقع طول شکست فاصله جزء بحرانی از جزء زیر غلتک می‌باشد که قبل از رسیدن جزء بحرانی به زیر غلتک دچار شکست شده است.

جدول 8 مقادیر پیش‌بینی معیارها در فرایند شکل‌دهی مقطع دارای تاخوردگی آلومینیومی

Table 8 Predicted values of criteria in reshaping process of folded aluminum cross section

معیار شکست نرم	طول شکست (mm)
آیادا	20/58
رایس-تریسی	16/05
بروزو	10/92

با توجه به مقادیر طول شکست در جدول 8 بیشترین طول شکست پیش‌بینی شده توسط معیارها مربوط به معیار آیادا و کمترین آن متعلق به معیار بروزو است. این یعنی که در این فرایند همانند له کردن لوله، معیار آیادا نسبت به دو معیار دیگر شکست را زودتر پیش‌بینی می‌کند. برای تحلیل این موضوع به بررسی سطح شکست معیارهای شکست نرم انتخابی پرداخته و مقادیر میانگین پارامتر سه‌محوره تنش را بر روی سطوح شکست مورد بررسی قرار داده، که مقدار میانگین پارامتر سه‌محوره تنش طبق رابطه 6 برای این فرایند برابر $0/5139$ به دست می‌آید. شکل 18 سطح شکست سه معیار را با نقاط میانگین مربوط به پارامتر سه‌محوره تنش فرایندهای آزمون کشش، له کردن لوله و شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی آلومینیومی نشان می‌دهد. طبق شکل 18 میانگین پارامتر سه‌محوره تنش در لحظه شروع شکست برای فرایند شکل‌دهی مجدد مقطع آلومینیومی که توسط مثلث مشخص شده است، بین میانگین پارامتر سه‌محوره تنش در آزمون کشش و فرایند له کردن لوله قرار می‌گیرد. همان‌طور که مشهود است، مقدار میانگین پارامتر سه‌محوره تنش در این فرایند به سطح شکست معیار بروزو نزدیکتر می‌باشد و سطح شکست معیارهای رایس-تریسی و آیادا از نظر نزدیکی به مقدار میانگین پارامتر سه‌محوره تنش به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار می‌گیرند. همچنین با توجه به جدول 8 طول شکست پیش‌بینی شده توسط معیار آیادا بیشتر

لوله، پارامتر سه‌محوره تنش با تغییرات ناچیز به طور میانگین برابر $0/584$ می‌باشد که این مقدار مربوط به شرایط کرنش صفحه‌ای می‌باشد. شروع شکست در این فرایند برای حالت شبیه‌سازی توسط معیار شکست نرم بروزو نزدیک‌تر به آزمایش تجربی در مقایسه با دو معیار دیگر و با خطای 3 درصد پیش‌بینی شد، که دلیل آن تخمین دقیق‌تر معیار شکست بروزو از کرنش شکست در این محدوده بارگذاری می‌باشد (حساسیت کمتر کرنش شکست حاصل از معیار در محدوده پارامتر سه محوری بیشتر از $0/3$). همچنین معیارهای رایس-تریسی و آیادا به ترتیب با 6 و 14 درصد خطا نسبت به آزمایش تجربی شکست را زودتر پیش‌بینی کردند.

- با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز حالت تنش در ناحیه بحرانی شکل‌دهی غلتکی (پارامتر سه محوری برابر با $0/514$) و نزدیکی آن به مقدار پارامتر تئوری حالت تنش در حالت کرنش صفحه‌ای و آزمون له کردن لوله، مدل ارائه قابلیت تعیین شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی را خواهد داشت. در نتیجه به کمک دقت پیش‌بینی نتایج آزمایش له کردن لوله، می‌توان شروع شکست را در فرایند شکل‌دهی غلتکی مقطع دارای تاخوردگی نیز پیش‌بینی کرد. نتایج نشان می‌دهد کمترین طول شکست محاسبه شده مربوط به معیار بروزو با طول $10/92\text{mm}$ و بیشترین طول مربوط به معیار آیادا با مقدار $20/58\text{mm}$ می‌باشد.

9- تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (شماره پروژه: 96004204) کمال تشکر و قدردانی را داریم.

10- مراجع

- [1] Lou, Y., Lim, S.J. and Huh, H., Prediction of fracture forming limit for DP780 steel sheet. *Metals and materials international*, 19(4), pp.697-705, 2013.
- [2] Kiuchi, M., Shintani, K., & Naeni, H. M. Numerical analysis of round to oval reshaping process of pipes. *Seisan Kenkyu*, 50(8), 262-265, 1998.
- [3] Onoda, Y., Nagamachi, T., & Sugiyama, T. Finite element simulation of deformation features of round welded steel pipes reshaped into square shape by extroll-forming. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity(Japan)*, 36(409), 149-154, 1995.
- [4] Kiuchi, M., Naeni, H. M., & Shintani, K. Computer aided design of rolls for reshaping processes from round pipes to "channel-type" pipes. *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1-3), 193-197, 2001.

تقریباً دقیقی را از لحظه شروع شکست به دست داده است و از آنجایی که مکانیک تغییر شکل (حالت تنش) در هر دو فرایند له کردن لوله و شکل‌دهی مجدد مقطع دارای تاخوردگی نزدیک به هم بوده است، در نتیجه می‌توان به پیش‌بینی حاصل از معیار بروزو برای شروع شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله آلومینیومی استناد کرده و شروع شکست را لحظه ورود لوله به ایستگاه چهارم با طول شکست $10/92\text{mm}$ در نظر گرفت.

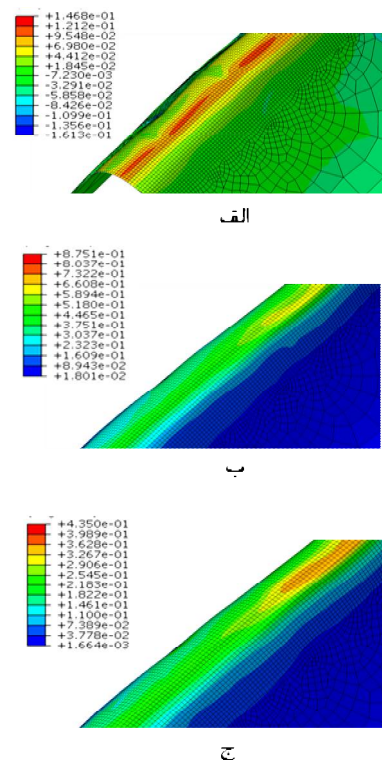


Fig. 19 Damage distributing contour of a)Ayada b)Rice-Tracy c)Brozzo criteria for aluminum specimen at third forming stage

شکل 19 کانتور توزیع آسیب معیار الف) آیادا ب) رایس-تریسی ج) بروزو برای لوله آلومینیومی در لحظه ورود به ایستگاه سوم

8- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از معیارهای شکست نرم آیادا، بروزو و رایس-تریسی و همچنین با کمک آزمایش له کردن لوله و محصول به دست آمده از شکل‌دهی مجدد لوله فولادی، شروع شکست در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله آلومینیومی بررسی شد. در ابتدا با استفاده از آزمون کشش تک-محوره معیارهای شکست نرم آیادا، رایس-تریسی و بروزو برای آلیاژ آلومینیوم 6101 کالیبره شوند و ثوابت هرکدام از معیارها محاسبه شد. آنالیز شکست در حین تغییر شکل مومسان به کمک مدل کالیبره شده، بررسی شد. اهم نتایج به شرح زیر است:

- در شرایط بارگذاری تقریباً یکنواخت در فرایند له کردن

- Advanced Manufacturing Technology, 91(5), pp.1481-1492. 2017.
- [15] Deole, A. D., Barnett, M. R., & Weiss, M. The numerical prediction of ductile fracture of martensitic steel in roll forming. *International Journal of Solids and Structures*, 144, 20-31, 2018.
- [16] Talebi-Ghadikolaee, H., Naeni, H. M., Mirnia, M. J., Mirzai, M. A., Gorji, H., & Alexandrov, S. Ductile Fracture Prediction of AA6061-T6 in Roll Forming Process. *Mechanics of Materials*, 103498, 2020.
- [17] Bao, Y., & Wierzbicki, T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(1), 81-98, 2004.
- [18] Rice, J. R., & Tracey, D. M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17(3), 201-217, 1969.
- [19] Ayada, M. Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials. In *Proceedings of 2nd International Conference on Technology for Plasticity*, Stuttgart, 1987 (Vol. 1, pp. 553-558), 1987.
- [20] Cockcroft, M. G., & Latham, D. J. Ductility and the workability of metals. *J Inst Metals*, 96(1), 33-39, 1968.
- [21] Brozzo, P., Deluca, B., & Rendina, R. A new method for the prediction of formability limits in metal sheets. In *Proc. 7th biennal Conf. IDDR*, 1972.
- [22] Magrinho, J. P., Silva, M. B., Centeno, G., Moedas, F., Vallellano, C., & Martins, P. A. F. On the determination of forming limits in thin-walled tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 155, 381-391, 2019.
- [23] Bai, Y., & Wierzbicki, T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International journal of plasticity*, 24(6), 1071-1096, 2008.
- [24] Mirnia, M. J., Vahdani, M., & Shamsari, M. (2018). Ductile damage and deformation mechanics in multistage single point incremental forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 136, 396-412, 2018.
- [5] Bayoumi, L. S. Cold drawing of regular polygonal tubular sections from round tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(11), 2541-2553, 2001.
- [6] Abrinia, K., & Farahmand, H. R. An upper bound analysis for the reshaping of thick tubes with experimental verification. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(2), 342-358, 2008.
- [7] Bai, Y. and Wierzbicki, T., A comparative study of three groups of ductile fracture loci in the 3D space. *Engineering Fracture Mechanics*, 135, pp.147-167, 2015.
- [8] Cao, T.S., Models for ductile damage and fracture prediction in cold bulk metal forming processes. *International Journal of Material Forming*, 10(2), pp.139-171. 2017.
- [9] McClintock, F. A. Erratum: "A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes" (*Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35, pp. 363-371), 1968.
- [10] Korhonen, A. S., & Manninen, T. Forming and fracture limits of austenitic stainless steel sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 488(1-2), 157-166, 2008.
- [11] Eom, J., Kim, M., Lee, S., Ryu, H., & Joun, M. Evaluation of Damage Models by Finite Element Prediction of Fracture in Cylindrical Tensile Test. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14(10), 8019-8023, 2014.
- [12] Song, X., Leotoing, L., Guines, D., & Ragneau, E. Investigation of the forming limit strains at fracture of AA5086 sheets using an in-plane biaxial tensile test. *Engineering Fracture Mechanics*, 163, 130-140, 2016.
- [13] Wang, H., Yan, Y., Jia, F., & Han, F. Investigations of fracture on DP980 steel sheet in roll forming process. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 177-184, 2016.
- [14] Asl, Y.D., Sheikhi, M., Anaraki, A.P. and Gollo, M.H., Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD. *The International Journal of*