مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 329-338

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی و عددی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مقطع کانال از ورق آلومینیم AL6061-T6

یعقوب دادگراصل[1]، محمدمراد شیخی[2*]، علی پورکمالی‌انارکی[3]، ولی‌اله پناهی‌زاده‌رحیملو[2]، محمد حسین‌پورگللو[2]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
2 - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
3 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
* تهران، صندوق‌پستی 16785-163، m.sheikhi@srttu.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 اسفند 1394
پذیرش: 15 اردیبهشت 1395
ارائه در سایت: 12 خرداد 1395

کلید واژگان:
شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر
عیب پارگی
معیارهای شکست نرم
روش اجزای محدود

چکیده

امروزه با پیشرفت فناوری، صنایعی مانند خودروسازی و ساختمان‌سازی به قطعات با سطح مقطع متغیر نیاز دارند. تعداد مراحل، محدودیت ابعادی و هزینه تولید بالای این قطعات سبب شد تا فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر برای تولید این قطعات به‌کار گرفته شود. پدیده پارگی از مهم‌ترین عیوبی در این فرآیند است. پارگی در ناحیه انتقال در لبه‌های خم که ضخامت ورق نسبت به شعاع خم زیاد است اتفاق می‌افتد. در این پژوهش به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی‌انعطاف‌پذیر مقطع کانالی شکل با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداخته شده است. بدین منظور شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. با به‌کارگیری شش معیار شکست نرم با نوشتن زیربرنامه به بررسی عیب پارگی در فرایند پرداخته شد. آزمایش‌های تجربی روی 27 نمونه ورق پیش‌بریده شده از جنس AL6061-T6 با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام گرفت. با مقایسه نتیجه‌های شبیه‌سازی عددی با نتیجه‌های تجربی، صحت‌سنجی نتیجه‌های عددی انجام شد. در ادامه با مقایسه نتیجه‌های پیش‌بینی معیارهای شکست نرم با نتیجه‌های تجربی، معیار شکست نرم آرگون، به‌عنوان مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پارگی انتخاب شد، همچنین تأثیر پارامترها، ضخامت ورق، شعاع و زاویه خم روی عیب پارگی با معیار برگزیده آرگون مورد بررسی قرار گرفت.

Experimental and Numerical Analysis of Fracture on Flexible Roll Forming Process of Channel Section in Aluminum 6061-T6 Sheet

Yaghoub Dadgar Asl, Mohammad Morad Sheikhi*, Ali Pourkamali Anaraki, Valiollah Panahizadeh Rahimloo, Mohammad Hosseinpour Gollo

- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16785-163 Tehran, Iran, m.sheikhi@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 March 2016
Accepted 04 May 2016
Available Online 01 June 2016

Keywords:
Flexible roll forming
Fracture defect
Ductile fracture criteria
Finite Element Method (FEM)

ABSTRACT

Today, with the development of technology, industries such as automotive and construction require products with variable cross section. Multiplicity of steps, dimensional limitation and high production costs of the components are the reason flexible roll forming process is used to produce these products. One of the main defects in this process is the fracture phenomenon. The fracture is observed on the bending edges at transition zone where sheet thickness is large compared to the bending radius. In this research the fracture phenomenon is investigated on flexible roll forming process of channel section using ductile fracture criteria. For this purpose finite element simulation of the process using Abaqus software is done. The fracture defect in this process is investigated using six ductile fracture criteria by developing a subroutine. Experimental tests are performed on 27 specimens precut sheets of AL6061-T6, using flexible roll forming machine built in Shahid Rajaee University. Numerical results were validated by comparing simulation results with experimental results, In addition, by comparing the results of ductile fracture criteria with experimental results, the Argon ductile fracture criteria, was chosen as the most appropriate criterion to predict fracture. Also the effects of parameters as sheet thickness, bending radius and bending angle on fracture with argon selected criterion are studied.

1- مقدمه

شکل‌دهی غلتکی سرد از روش‌های رایج و پر بازده در صنعت شکل‌دهی ورقی فلزات است. این فرآیند شامل چند مرحله شکل‌دهی فلز به‌صورت پیوسته و متوالی است که در هر مرحله با اعمال مقدار مشخصی شکل‌دهی، ورق به محصول نهایی نزدیک می‌شود [1]. در این فرآیند محصول یک پروفیل به سطح مقطع یکنواخت است. یک تفاوت اصلی این فرآیند با نورد، ثابت‌ماندن

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
Y. Dadgar Asl, M. M. Sheikhi, A. Pourkamali Anaraki, V. Panahizadeh Rahimloo, M. Hosseinpour Gollo, Experimental and Numerical Analysis of Fracture on Flexible Roll Forming Process of Channel Section in Aluminum 6061-T6 Sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 329-338, 2016 (in Persian)

ضخامت در آن است. فرایند شامل اعمال تغییر شکل به‌صورت مرحله‌ای و توسط غلتک‌های مسیر است. در هر مرحله شکل‌دهی حداقل دو غلتک وجود دارد که با هم تشکیل ایستگاه را می‌دهند. در شکل 1 طرحواره‌ای از فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد نشان داده شده است. از محدودیت‌های فرآیند شکل‌دهی غلتکی سنتی، ناتوانای تولید پروفیل‌هایی با سطح مقطع متغیر در طول محصول است. بسیاری از پروفیل‌های مورد نیاز در صنایع مانند صنعت خودروسازی، دارای سطح مقطع متغیر است که در چندین مرحله و با هزینه بالا توسط قالب‌های پرس ساخته می‌شوند.

جهت پاسخ به نیازهای مشتریان مانند هزینه پایین تولید و پروفیل‌های باز و بسته با سطح مقطع متغیر، روش تولید جدیدی به نام شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر یا شکل‌دهی غلتکی سه‌بعدی ایجاد شد. نمونه‌ای از محصول تولیدشده توسط فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در شکل 2 نشان داده شده است.

تفاوت اصلی این فرآیند با فرآیند شکل‌دهی غلتکی سنتی، در حرکت غلتک‌هاست. یعنی غلتک‌ها در این فرآیند در جای خود ثابت نیستند، هنگام تولید با توجه به هندسه پروفیل حرکت داده می‌شوند و سیستم‌های حرکتی در این فرایند به‌صورت کنترل عددی است. شکل 3 طرحواره یک ماشین شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد.

پناهی‌زاده رحیملو [5] به پیش‌بینی بروز پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی با استفاده از معیار شکست نرم آیادا پرداخت.

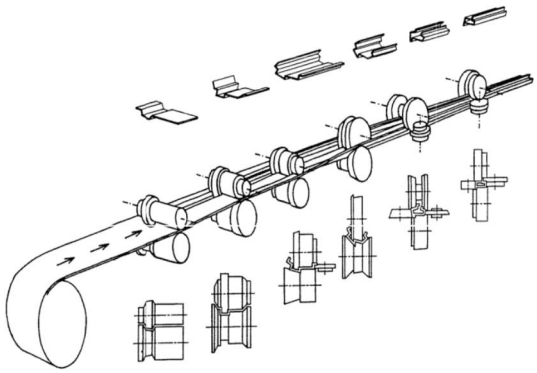


Fig. 1 Schematic of cold roll forming process

شکل 1 طرحواره فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد [2]

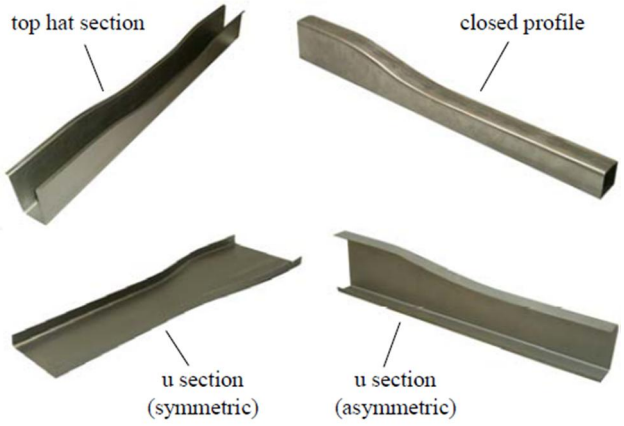


Fig. 2 Some profiles with variable cross section [3]

شکل 2 برخی از پروفیل‌های دارای سطح مقطع متغیر [3]

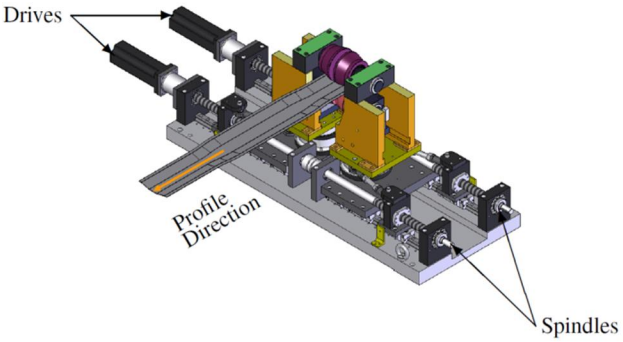


Fig. 3 Schematic of flexible roll forming process [4]

شکل 3 طرحواره ماشین شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر [4]

گان یانژی و همکاران [6] با روش آنالیز اجزای محدود به تحلیل پارگی در شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی شکل پرداختند. آن‌ها رابطه بین بروز پارگی با تنش، کرنش و دانسیته انرژی را مورد مطالعه قرار دادند

اونا و همکاران [7] به بررسی دلیل و قوع عیب تابیدگی کف پروفیل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با انجام آزمایش‌های تجربی و اندازه‌گیری کرنش‌های کف و لبه پروفیل در راستای طولی ورق پرداختند، ایشان دلیل وقوع این عیب در نزدیکی قسمت فشاری ناحیه انتقال را به انقباض ناشی از شکل‌دهی این ناحیه نسبت دادند.

ابی و همکارانش [8] با شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به بررسی نحوه توزیع کرنش در این فرآیند پرداختند و روشی را برای طراحی پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر براساس ایجاد نکردن عیب چروکیدگی در لبه بال ارائه دادند.

گولچکن و همکاران [9] به شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از نرم‌افزار مارک منتات کوپل شده با نرم‌افزار کپرا پرداختند. هدف آن‌ها بررسی عددی این فرآیند با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها موجدار شدن لبه جلو و عقب پروفیل کانالی شکل را نشان می‌دهد که در شکل‌دهی غلتکی مواد از پیش بریده شده معمول است.

گروچ و همکاران [10] یک مدل تحلیلی تک گام برای استفاده در طراحی پروفیل‌های کانالی شکل بدون چین‌خوردگی تولید شده به روش شکل‌دهی غلتکی سه‌بعدی ارائه کردند. این مدل نیمه تجربی است و براساس مکانیک کمانش صفحات و یک سری از تحلیل‌های اجزای محدود پایه‌ریزی شده است. این مدل بر ناحیه فشاری تمرکز می‌کند و به‌عنوان یک امکان‌سنج بدون نیاز به شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی به‌کار می‌رود.

کسایی و همکاران [11] به بررسی عیب اعوجاج لبه پروفیل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی پرداختند. با مقایسه نتایج تجربی و عددی به سازگاری خوبی رسیدند.

کسایی و همکاران [12] به بازنگری محدودیت عیب اعوجاج در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. ایشان در این تحقیق با استفاده از روش‌های عددی، تحلیلی، تجربی و به‌کار بردن روش جدید آزمون فشار نمونه‌های مستطیلی شکل، به بررسی این عیب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش ارائه‌شده جایگزینی مناسب برای روش‌های موجود براساس روش‌های تحلیلی و عددی ساده است.

محمدی و همکاران [13] به بررسی چگونگی ایجاد عیب تابیدگی کف با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس پرداختند. نتیجه‌های

شبیه‌سازی نشان داد که دلیل تابیدگی کف پروفیل، اعمال‌نشدن مقدار کافی کرنش طولی در لبه بال پروفیل در ناحیه انتقال است. در ادامه نیز اثر پارامترهای هندسی محصول مانند اندازه بال پروفیل، زاویه خم، شعاع ناحیه انتقال و ضخامت ورق بر میزان تابیدگی کف بررسی کردند.

در زمینه شکست نرم، هونگ نام هان و همکارش [14]، با ترکیب معیارهای شکست نرم کوکرافت- لاتهام و تنش برشی بیشینه، معیار شکست نرم تجربی برای پیش‌بینی پارگی در فرایندهای شکل‌دهی فلزات پیشنهاد دادند.

لیو هونگ شنگ و همکاران [15] به بررسی کاربرد معیارهای شکست‌نرم در پیش‌بینی حد شکل‌دهی فلزات پرداختند.

ژیگانگ وو و همکاران [16] به بررسی پدیده پارگی در فرایند هیدروپایرسینگ با شش معیار شکست نرم پرداختند. با انجام تحقیق دریافتند که پیش‌بینی معیار شکست نرم رایس و تریسی به نتیجه تجربی نزدیک‌تر است.

لیناردون و همکاران [17] قابلیت کشش لوله‌های از جنس آلیاژ کرم-کبالت با استفاده از معیارهای شکست نرم را بررسی کردند.

با توجه به این‌که در کارهای انجام‌شده به بررسی عیوب فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مانند تابیدگی کف، اعوجاج لبه و انحراف از موقعیت مطلوب لبه پرداخته شده و عیب پارگی که از مهم‌ترین عیوب فرایند است، بررسی نشده، دراین مقاله به بررسی بروز پدیده پارگی با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداخته شده است، بدین منظور شبیه‌سازی فرایند به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. با به‌کارگیری شش معیار شکست نرم با نوشتن زیربرنامه به بررسی عیب پارگی با استفاده از این معیارها پرداخته شد. آزمایش‌های تجربی روی 27 نمونه ورق پیش‌بریده شده از جنس AL6061-T6 با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام شد. در ادامه با مقایسه نتیجه‌های شبیه‌سازی عددی با نتیجه‌های تجربی، صحت‌سنجی نتیجه‌های عددی انجام شد. همچنین با مقایسه نتیجه‌های پیش‌بینی معیارهای شکست نرم مختلف با نتیجه‌های تجربی، مناسب‌ترین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی پارگی انتخاب شد. پارامترهای تأثیرگذار در رخ‌دادن پارگی در این فرایند شامل ضخامت ورق، شعاع خم، زاویه خم، جنس ورق، طول و شعاع ناحیه انتقال است. تأثیر پارامترهای ضخامت ورق، شعاع و زاویه خم روی عیب پارگی با معیار برگزیده آرگون مورد بررسی قرار گرفت.

2- معیارهای شکست نرم

چندین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی شکست وجود دارد که شکست را برحسب متغیرهای مکانیکی مانند تنش، کرنش یا کار مکانیکی توصیف می‌کنند. در تمام مدل‌های ارائه‌شده در این مقاله معیارهای شکست براساس توابعی است که به این متغیرها بستگی دارد که اگر این توابع به یک مقدار بحرانی برسند شکست اتفاق می‌افتد. دو مدل ساده برای پیش‌بینی شکست وجود دارد، براساس مدل نخست شکست زمانی روی می‌دهد که تابع تانسور تنش به یک مقدار بحرانی برسد و طبق مدل دوم شکست زمانی اتفاق می‌افتد که تابع تانسور کرنش به یک مقدار بحرانی برسد. و هر دو مدل براساس متغیر شکست لحظه‌ای D است که در حالت کلی به‌صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$D = f(\sigma) \text{ یا } D = f(\varepsilon^{\mathrm{p}}) \quad (1)$$

که σ و ε^{p} به‌ترتیب تانسور تنش و تانسور کرنش پلاستیک است.

به‌طور کلی معیارهای شکست زیادی براساس کار مکانیکی وجود دارد این معیارها پیشینه تنش و کرنش را برای پیش‌بینی شکست در نظر می‌گیرند. آن‌ها براساس متغیر شکست D است که با جزئیات به‌صورت رابطه (2) بیان می‌شود [17].

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} f(\sigma) d\bar{\varepsilon}_p \quad (2)$$

2-1- معیار کرنش پلاستیک معادل[1]

مطابق این معیار، هنگامی که مقدارکرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ای به مقدار D_1 رسید شکست رخ خواهد داد که از رابطه (3) محاسبه می‌شود [17].

$$D_1 = \bar{\varepsilon}_p \quad (3)$$

مقدار کرنش پلاستیک معادل برای یک ماده تراکم‌ناپذیر از رابطه (4) محاسبه می‌شود.

$$\bar{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3}\left(\left(\varepsilon_1^{\mathrm{p}} - \varepsilon_2^{\mathrm{p}}\right)^2 + \left(\varepsilon_2^{\mathrm{p}} - \varepsilon_3^{\mathrm{p}}\right)^2 + \left(\varepsilon_1^{\mathrm{p}} - \varepsilon_3^{\mathrm{p}}\right)^2\right)} \quad (4)$$

که $\bar{\varepsilon}_p$ کرنش پلاستیک معادل و $\varepsilon_1^{\mathrm{p}}$، $\varepsilon_2^{\mathrm{p}}$ و $\varepsilon_3^{\mathrm{p}}$ کرنش‌های پلاستیک اصلی و در حالت کشش تک محوری D_1 برابر با کرنش در لحظه شکست است.

2-2- معیار رایس و تریسی[2]

در مقیاس میکروسکوپی، شکست با ایجاد سطوح ناپیوستگی ناشی از شکستن پیوندهای اتمی و بزرگ‌شدن پلاستیکی حفره‌های میکروسکوپی آغاز می‌شود. رایس و تریسی [18] با مطالعه رشد حفره‌های کروی در ماده صلب-پلاستیک، معیاری برای پیش‌بینی شکست نرم به‌صورت رابطه (5) پیشنهاد کردند.

$$D_2 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \exp\left(\frac{3\sigma_m}{2\bar{\sigma}}\right) d\bar{\varepsilon}_p \quad (5)$$

$\bar{\varepsilon}_p$ کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\sigma}$ تنش معادل میزز و σ_m تنش هیدرواستاتیک است.

2-3- معیار آرگون[3]

آرگون و همکاران [17] با بررسی نحوه شکل‌گیری حفره در ناحیه شکست و عوامل مؤثر بر آن، معیار شکست نرمی با درنظر گرفتن اثر تنش مؤثر و تنش هیدرواستاتیک به‌صورت رابطه (6) ارائه کردند.

$$D_3 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} (\sigma_m + \bar{\sigma}) d\bar{\varepsilon}_p \quad (6)$$

$\bar{\varepsilon}_p$ کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\sigma}$ تنش معادل میزز و σ_m تنش هیدرواستاتیک است.

2-4- معیار فرودنتال[4]

فرودنتال [19] پیشنهاد کرد که آغاز و انتشار شکست در ماده به سطح انرژی کرنشی، که نمی‌تواند پیش از آزادشدن در اثر ایجاد جدایش در ماده،

[1] Plastic Equivalent Strain(PEStrn)
[2] Rice and Tracey(Rice)
[3] Argon(Argo)
[4] Freudenthal(Frue)

به‌صورت گرما تلف شود، بستگی دارد. شکست راه‌کار جایگزینی است که انرژی کرنشی برای آزادشدن برمی‌گزیند؛ بنابراین معیار شکست می‌تواند تنها یک معیار انرژی باشد که مقدار بحرانی‌ای برای انرژی واپیچشی ذخیره شده در جسم تا لحظه شکست تعریف کند. در نتیجه معیار شکست برای مواد همسان‌گرد می‌تواند برحسب پارامترهای نامتغیر تنش یا کرنش بیان شود. معیار انرژی یا کار پلاستیک کلی[1] به‌صورت رابطه (7) است.

$$D_4 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}_p \quad (7)$$

که $\bar{\sigma}$ تنش معادل میزز، $d\bar{\varepsilon}_p$ جزء کرنش معادل، $\bar{\varepsilon}_p$کرنش پلاستیک معادل و D مقدار بحرانی معیار شکست است. در حالت ساده آزمون کشش تک محوری، مقدار D برای معیار انرژی برابر با سطح زیر منحنی تنش حقیقی برحسب کرنش حقیقی خواهد بود. در این معیار شکل گلویی تأثیری بر کرنش شکست ندارد.

2-5- معیار انرژی ترسکا[2]

ترسکا معیار شکست نرمی را به‌صورت رابطه (8) ارائه کرد [17].

$$D_5 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} d\bar{\varepsilon}_p \quad (8)$$

2-6- معیار بیشینه تنش برشی[3]

معیار بیشینه تنش برشی به‌صورت رابطه (9) تعریف می‌شود [17].

$$D_6 = \tau_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (9)$$

به‌طور کلی آغاز شکست زمانی رخ می‌دهد که نسبت مقدار متغیر شکست به مقدار بحرانی شکست طبق رابطه (10) به مقدار عدد 1 برسد.

$$\frac{\mathrm{D}}{D_{\mathrm{crit}}} \geq 1 \quad (10)$$

مقدار بحرانی شکست D_{crit} برای هر معیار از طریق آزمون کشش به‌دست می‌آید.

بسیاری از پژوهش‌گران معیارهای مختلف شکست نرم برای پیش‌بینی شکست ارائه کرده‌اند. جهت انتخاب بهترین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از بین معیارهای شکست نرم موجود، شش معیار که در آن‌ها مقدار D_{crit} از طرق آزمون کشش ساده قابل محاسبه است. برای پیش‌بینی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر انتخاب شدند.

این معیارها براساس متغیرهای مختلفی مانند کرنش پلاستیک معادل، تنش مؤثر، تنش هیدرواستاتیک و بیشینه تنش اصلی پدیده پارگی را در فرایند پیش‌بینی می‌کنند.

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی‌های اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از حل‌گر دینامیک صریح نسخه 6.12 نرم‌افزار آباکوس[4] استفاده شد. شکل 4 مدل اجزای محدود فرایند به همراه کانتور کرنش پلاستیک معادل را نشان می‌دهد.

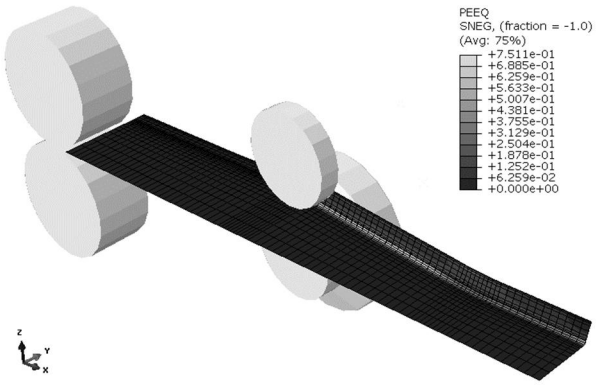


Fig. 4 Finite element modeling process with equivalent plastic strain contour

شکل 4 مدل اجزای محدود فرایند به همراه کانتور کرنش پلاستیک معادل

پارامترهای مهم تاثیرگذار بر پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر شامل ضخامت ورق، شعاع خم و زاویه شکل‌دهی است. جهت بررسی اثر پارامترهای مورد اشاره روی پدیده پارگی در این فرایند طراحی آزمایشی بر مبنای معیار عاملی کامل صورت گرفت. طرحی شامل 27 آزمایش برای 3 فاکتور 3 سطحی انتخاب شد که در جدول 1 نشان داده شده است.

جهت بررسی اثر ضخامت، زاویه شکل‌دهی و شعاع خم روی پدیده پارگی شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شد که در ادامه روند مدل‌سازی و انجام شبیه‌سازی‌ها به‌طور مفصل بیان شده است.

3-1- مدل‌سازی فرآیند

برای مدل‌سازی غلتک‌ها، از مدل نوع صلب تحلیلی و برای مدل‌سازی ورق از مدل پوسته شکل‌پذیر استفاده شد هندسه ورق پیش‌بریده شده مطابق شکل 5-a برای تولید محصول نهایی مطابق شکل 5-b درنظرگرفته شد. عرض کف در ناحیه باریک 117 mm، عرض کف در ناحیه عریض 179 mm، طول بال 21 mm، شعاع ناحیه انتقال 400 mm و پارامترهای هندسی مانند ضخامت ورق، شعاع خم و زاویه شکل‌دهی مطابق جدول 1 درنظر گرفته شدند، مدل اجزای محدود شامل دو ایستگاه است که ایستگاه اول با غلتک‌های استوآن‌های تخت برای جلوگیری از حرکت‌های اضافی ورق پیش از ورود به ایستگاه شکل‌دهی و ایستگاه دوم با غلتک‌های ذوزنقه‌ای جهت شکل‌دهی ورق در نظر گرفته شدند.

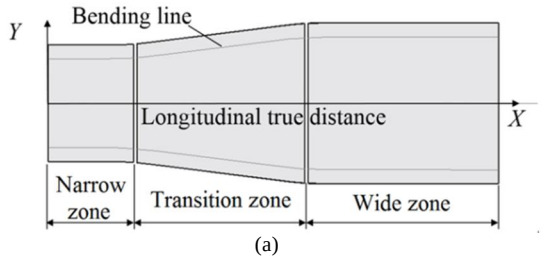
مقطع کانالی‌شکل عرض متغیر مورد بحث در این پژوهش دارای یک صفحه تقارن است که از خط مرکزی آن می‌گذرد؛ بنابراین با توجه به تقارن مورد اشاره نیمی از ورق و غلتک‌ها مدل شدند. برای برقراری شرط تقارن، حرکت در جهت عمود بر صفحه تقارن (جهت Y) و دورآن‌ها در صفحه تقارن (دوران حول محورهای X و Z) مهار شدند. برای جلوگیری از نوسان انتهای ورق پیش از ورود به ایستگاه شکل‌دهی، حرکت انتهای ورق در جهت عمود

جدول 1 مشخصات ضخامت‌های ورق، شعاع‌ها و زوایای خم در شبیه‌سازی‌های مختلف

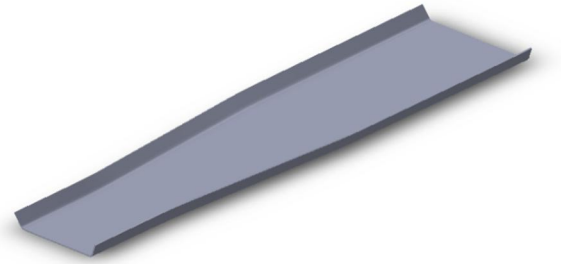
Table 1 Specifications of sheet thicknesses, Corners bending radius and bending angles in different simulations

پارامتر	سطوح
ضخامت ورق (mm)	1, 1.5, 2
شعاع خم (mm)	0.5, 2.5, 5
زاویه خم (deg)	25, 45, 60

[1] Energy or generalized plastic work criterion
[2] Tresca Energy(TREN)
[3] Maximum Shear Stress(MSS)
[4] ABAQUS



(a)



(b)

Fig. 5 a- Model of pre-cut sheet b- The final product geometry

شکل 5 a- مدل ورق پیش‌بریده، b- هندسه محصول نهایی

بر ورق مهار شد. غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی هنگام شکل‌دهی، به‌طور هم‌زمان دارای حرکت عرضی در جهت Y و حرکت دورانی حول محور Z است. حرکت غلتک‌ها براساس اصل عمود بودن تعریف می‌شوند. غلتک‌ها باید در هر لحظه بر منحنی خم عمود باشند. در شکل 6 عمود بودن غلتک ها در موقعیت‌های مختلف بر منحنی خم نشان داده شده است. در این مدل فاصله بین ایستگاه‌ها 300 mm درنظر گرفته شد.

3-2- مشخصات شبکه‌بندی

غلتک‌ها صلب و ورق شکل‌پذیر درنظر گرفته شدند. به دلیل شبیه‌سازی یک فرآیند شکل‌دهی ورقی، ورق از نوع المان پوسته تعریف شده است. با توجه به خصوصیات المان S4R در نرم‌افزار آباکوس، این نوع المان برای شبکه‌بندی انتخاب شد. اندازه المان‌ها متناسب با هندسه قطعه، بین 0.6 mm×mm 2 تا 2 mm × 2 mm 6 انتخاب شد. شکل 7 نمایی از ورق شبکه‌بندی‌شده را نشان می‌دهد.

3-3- مشخصات ماده

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، ورق از جنس AL6061-T6 که دارای مقدار نسبت پواسون 0.33، مدول یانگ 68.9 GPa و خواص همسان‌گرد در نظر گرفته شده است. منحنی تنش حقیقی- کرنش حقیقی مطابق شکل 8 به نرم‌افزار داده شد.

Fig. 6 The verticality of rollers in different positions on the bend curve

شکل 6 عمود بودن غلتک‌ها در موقعیت‌های مختلف بر منحنی خم

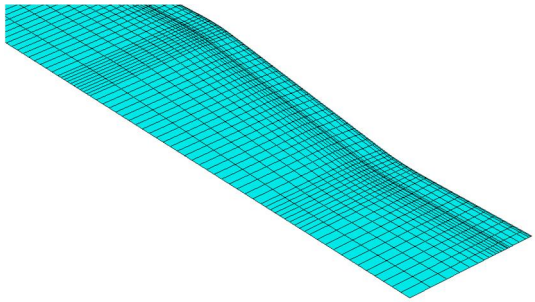


Fig. 7 View of meshed sheet

شکل 7 نمایی از ورق شبکه‌بندی‌شده

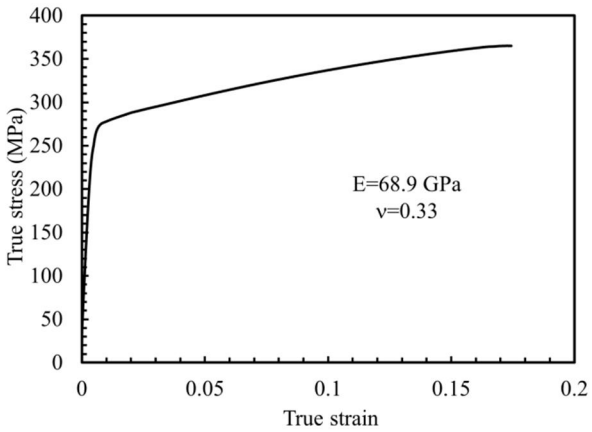


Fig. 8 The true stress-true strain curve of AL6061-T6

شکل 8 منحنی تنش حقیقی-کرنش حقیقی ورق ازجنس AL6061-T6

3-4- روند انجام شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، تحلیل‌ها از نوع ارتجاعی- خمیری درنظرگرفته و سرعت حرکت ورق در طول خط تولید روی 0.1 m/s تنظیم شد.

4- بخش تجربی

جهت مقایسه نتیجه‌های حاصل از پیش‌بینی پدیده پارگی توسط معیارهای شکست نرم بررسی شده در این پژوهش با نتیجه‌های تجربی و انتخاب مناسب‌ترین معیار، آزمایش‌های تجربی روی ورق از جنس AL6061-T6 با دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام شد. در شکل 9 نمایی از این دستگاه با محصول تولید شده نشان داده شده است.

برای این منظور تعداد 27 نمونه ورق پیش‌بریده شده برای انجام آزمایش‌ها مطابق جدول 2 تهیه شد.

نمونه‌ای از ورق پیش‌برش شده و محصول تولید شده با دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در شکل‌های 10 نشان داده شده است.

5- بحث و نتایج

5-1- صحت‌سنجی نتیجه‌های شبیه‌سازی

کرنش طولی یکی از کمیت‌های مهم در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد است. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی، با داده‌های تجربی گزارش شده در مرجع

[20] انجام شد. آزمایش‌های تجربی به‌صورت تک ایستگاهه برای مقطع کانالی با زاویه‌های خم °20، °30، °40 و °50 انجام شد. کرنش‌های طولی به وسیله کرنش‌سنج‌های الکتریکی در دو محل، یکی به فاصله 1.5 mm از لبه بال و دیگری در کف پروفیل روی محور تقارن اندازه‌گیری شدند. برای همسان‌سازی شبیه‌سازی با آزمایش تجربی مرجع، هندسه بخش باریک پروفیل، مشابه هندسه پروفیل تولیدشده در مرجع درنظر گرفته شد و سپس نتیجه‌های کرنش طولی در بخش باریک پروفیل با نتیجه‌های تجربی نامبرده مقایسه شد. همان‌طوری که در شکل‌های 11-a, 11-b نشان داده شده است سازگاری خوبی میان نتیجه‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی گزارش‌شده وجود دارد؛ بنابراین می‌توان به پاسخ‌های شبیه‌سازی اجزای محدود اعتماد درستی داشت.

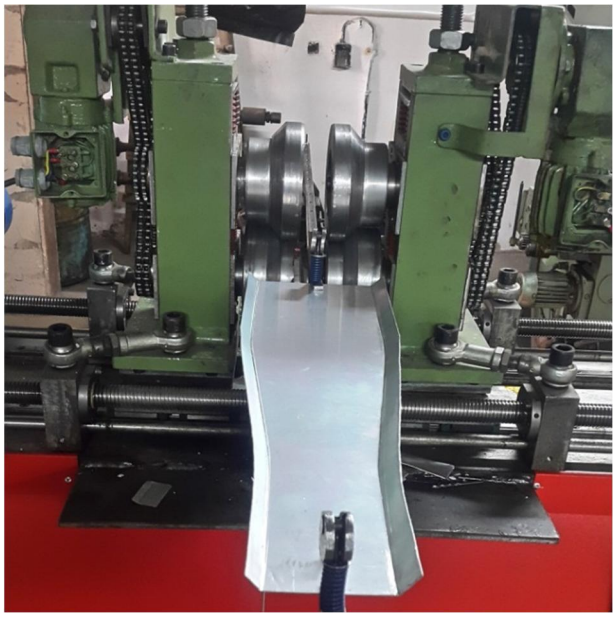
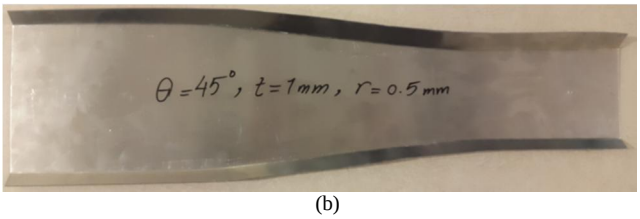


Fig. 9 Flexible roll forming machine made in Shahid Rajaee University

شکل 9 نمایی از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی

(a)



(b)

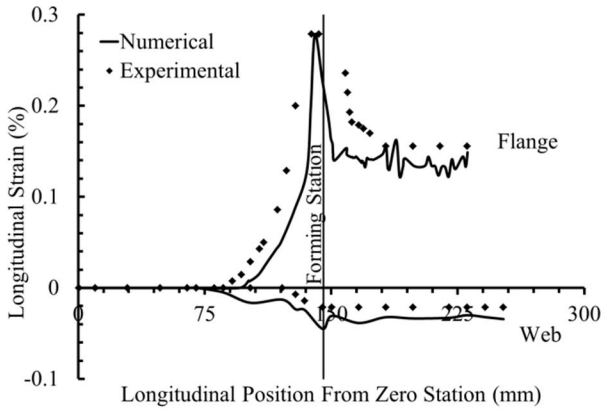
Fig. 10 (a) Pre-cut sheet (b) Final product

شکل 10 a- ورق پیش‌بریده شده، b- محصول نهایی

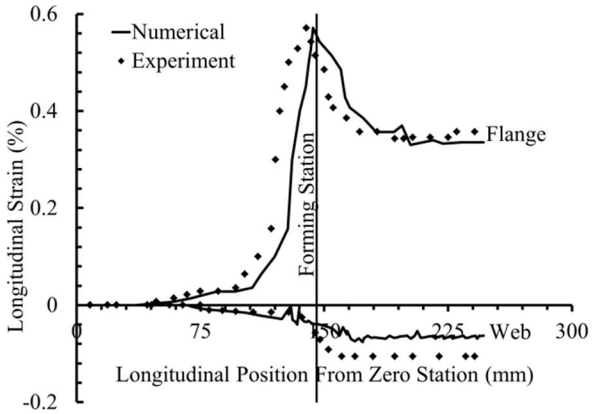
جدول 2 مشخصات ضخامت‌های ورق، شعاع‌ها و زوایای خم در آزمایش‌های تجربی

Table 2 Specifications of sheet thicknesses, Corners bending radius and bending angles in experimental tests

ردیف	ضخامت (mm)	شعاع خم (mm)	زاویه شکل‌دهی (deg)
1	1	5	60
2	2	5	25
3	2	2.5	45
4	1	5	45
5	2	2.5	25
6	2	2.5	60
7	1	2.5	60
8	1	0.5	45
9	1	2.5	45
10	1	2.5	25
11	1.5	0.5	25
12	2	0.5	25
13	1	5	25
14	2	5	60
15	1.5	5	60
16	2	0.5	45
17	2	5	45
18	1	0.5	25
19	1	0.5	60
20	2	0.5	60
21	1.5	5	45
22	1.5	2.5	25
23	1.5	2.5	60
24	1.5	0.5	45
25	1.5	5	25
26	1.5	0.5	60
27	1.5	2.5	45



(a)



(b)

Fig. 11 Compare of longitudinal strain on web and edge of narrow area in simulation with experimental reported data on [20] for the Bending angle of (a) 20°(b) 30°

شکل 11 مقایسه کرنش طولی کف و لبه ناحیه باریک شبیه‌سازی با داده‌های تجربی گزارش شده در [20] برای زاویه خم (a) °20 (b) °30

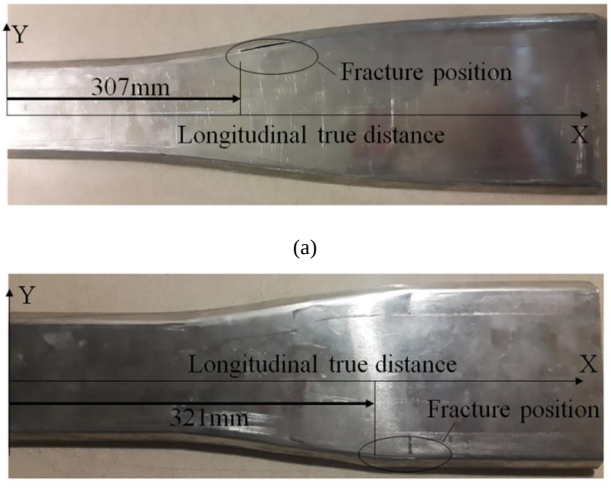
5-2- بررسی تجربی پدیده پارگی

براساس آزمایش‌های تجربی انجام گرفته شده در جدول 2، در زاویه‌های خم °25 و °45 تمامی محصولات سالم بوده و پدیده پارگی مشاهده نشد. پارگی فقط در زاویه خم °60 درجه برای دو حالت، ضخامت 1.5 mm با شعاع خم 0.5 mm به فاصله 307 mm از ابتدای محصول در راستای طولی و برای ضخامت 2 mm با شعاع خم 0.5 mm پارگی به فاصله 321 mm از ابتدای محصول در راستای طولی، در محل ناحیه انتقال مشاهده شد که این دو محصول در شکل 12-a, 12- b نشان داده شده است.

5-3- مقایسه پیش‌بینی پارگی توسط معیارهای شکست نرم با آزمایش‌های تجربی و انتخاب مناسب‌ترین معیار

برای پیش‌بینی پارگی در فرایندهای شکل‌دهی ورقی، معیارهای شکست نرم متعددی ارائه شده است. از بین معیارهای ارائه شده، شش معیار شکست نرم که مقدارهای بحرانی شکست D_{crit} آن‌ها با آزمون کشش ساده قابل محاسبه بودند، در این پژوهش برای پیش‌بینی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر انتخاب شده‌اند. نخست مقدارهای بحرانی معیارهای شکست نرم با استفاده از نتیجه‌های آزمایش کشش ساده محاسبه شدند که مقدارهای بحرانی شکست آن‌ها مطابق جدول 3 است.

سپس با شبیه‌سازی فرایند در نرم افزای اجزای محدود آباکوس و استفاده از نتایج آن، مقدارهای متغیر شکست D برای همه معیارهای مورد بررسی محاسبه شد. براساس رابطه (10) آغاز شکست زمانی رخ می‌دهد که نسبت مقدار متغیر شکست به مقدار بحرانی شکست به عدد 1 برسد. با محاسبه مقدارهای D/D_{crit} برای تمام معیارها، نتایج به‌صورت شکل 13-a, 13- b ارائه شد.



(a)

(b)

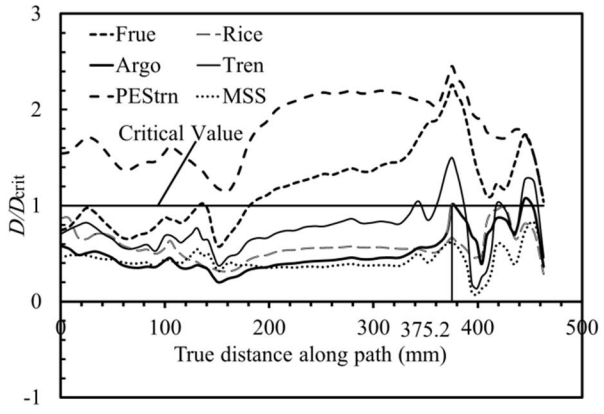
Fig. 12 View of product fracture position with thickness (a) 1.5 mm (b) 2 mm

شکل 12 نمایی از محل پارگی محصول با ضخامت، a- 1.5 mm، b- 2 mm

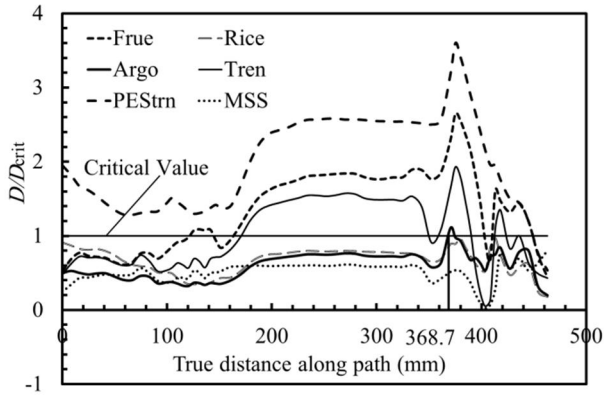
جدول 3 مقدارهای بحرانی شکست به‌دست‌آمده از آزمون کشش ساده

Table 2 Failure critical values obtained from the tensile

معیار شکست نرم	MSS	PEStrn	TREN	Argo	Rice	Frue
مقدارهای بحرانی شکست	182.56	0.19	34.67	92.49	0.31	69.37



(a)



(b)

Fig. 13 Selection of ductile fracture criteria for sheet thickness (a) 1.5 mm (b) 2mm

شکل 13 انتخاب معیار شکست نرم برای ضخامت ورق a- 1.5 mm b- 2mm

شاخص مورد استفاده برای انتخاب مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر محل وقوع پارگی در محصول تولید شده است. محل پارگی در آزمایش تجربی با محل پارگی پیش‌بینی‌شده توسط معیارهای شکست نرم مطابق شکل 13-a, 13- b مورد مقایسه قرار گرفت. معیارهای رایس و تریسی و بیشینه تنش برشی در هیچ کدام از حالت‌های بررسی شده، پارگی در محصول را پیش بینی نکردند. پیش‌بینی معیار کرنش پلاستیک معادل نشان‌دهنده پارگی در کل طول محصول که بیانگر ناتوانای پیش‌بینی درست این سه معیار شکست نرم است.

از میان سه معیار شکست نرم باقی‌مانده، پیش‌بینی محل رخ دادن پارگی توسط معیار آرگون به محل رخ‌دادن پارگی در آزمایش تجربی نزدیک‌تر است و میزان درصد خطای پیش‌بینی این معیار با آزمایش تجربی در مقایسه با سایر معیارها مطابق جدول 4 دارای کمترین مقدار است؛ بنابراین معیار شکست نرم آرگون به‌عنوان مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پدیده پارگی در این فرایند انتخاب شد.

جدول 4 درصد خطای پیش‌بینی معیارهای شکست نرم با آزمایش تجربی

Table 4 Percentage error of forecast ductile fracture criteria with experimental test

ردیف	ضخامت ورق (mm)	درصد خطا (%)		
		آرگون	فرودنتال	ترسکا
1	1.5	22.2	40.9	23.8
2	2	14.8	49.1	46.6

5-4- بررسی اثر ضخامت ورق روی پدیده پارگی

شکل 14-a, b, c تأثیر ضخامت ورق بر پارگی به ترتیب برای شعاع‌های خم 0.5 mm، 2.5 mm و 5 mm را براساس معیار برگزیده آرگون نشان می‌دهد. مطابق شکل 14-a در ضخامت‌های 1.5 mm و 2 mm برای شعاع خم 0.5 mm و زاویه خم 60° درجه با توجه به این‌که مقدار D/D_{crit} به عدد 1 می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.

5-5- بررسی اثر شعاع خم روی پدیده پارگی

شکل‌های 15-a ,b, c تأثیر شعاع خم بر پارگی به ترتیب برای ورق با ضخامت‌های 1 mm، 1.5 mm و 2 mm را طبق معیار برگزیده آرگون نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های 15-b ,c در شعاع خم 0.5 mm برای ضخامت‌های 1.5 mm و 2 mm و زاویه خم 60° با توجه به این‌که مقدار D/D_{crit} به عدد 1 می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.

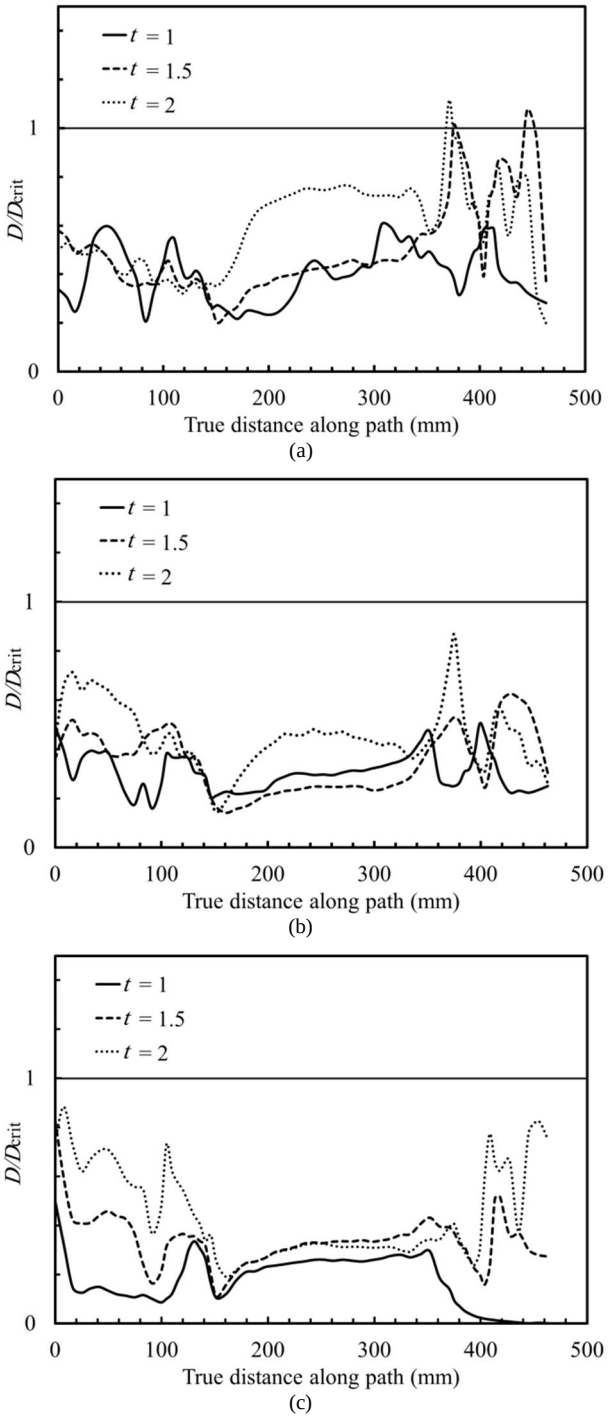


Fig. 14 Effect of sheet thickness on fracture for bending radiuses (a) 0.5 mm (b) 2.5mm (c) 5mm

شکل 14 اثر ضخامت ورق بر پارگی برای شعاع‌های خم (a) 0.5 mm (b) 2.5mm (c) 5mm

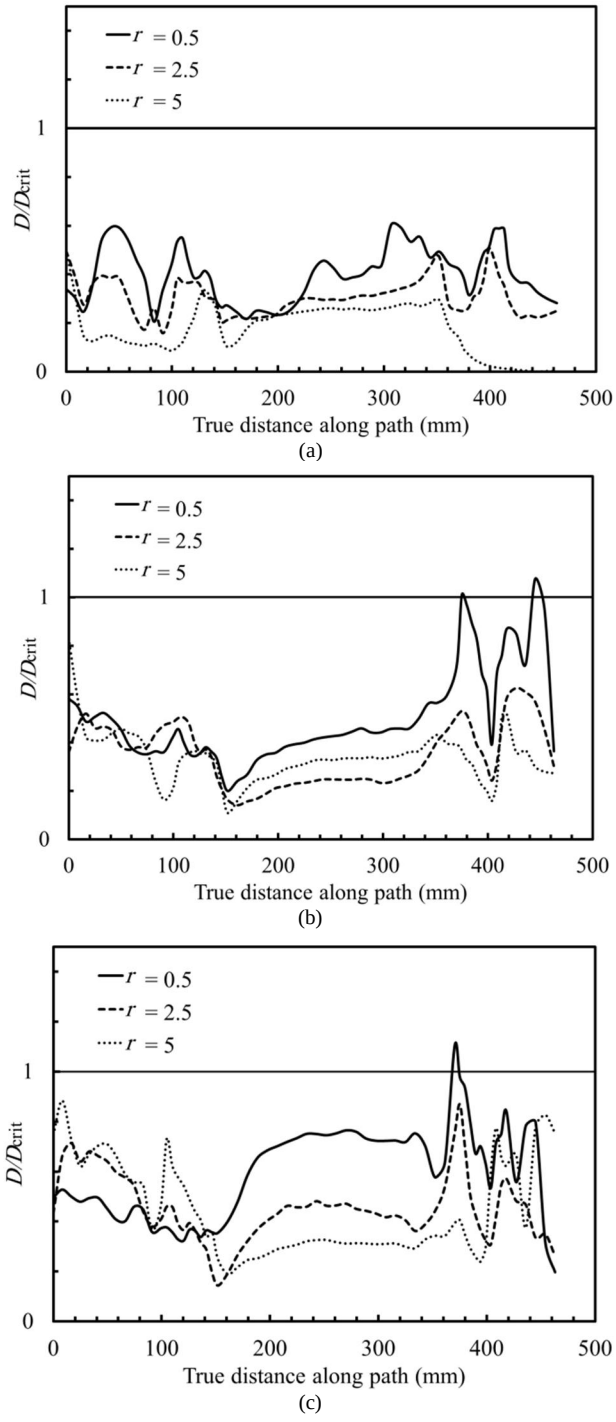


Fig. 15 Effect of bending radius on fracture for thicknesses (a) 1 mm (b) 1.5mm (b 2mm

(c) (b) 1.5mm (a) 1mm **شکل 15** تأثیر شعاع خم بر پارگی برای ضخامت‌های 2mm

5-6 - بررسی اثرزاویه خم روی پدیده پارگی

با توجه به این‌که در هیچ کدام از آزمایش‌های تجربی با زاویه‌های خم °25 و °45 پدیده پارگی مشاهده نگردید، اثر زاویه خم روی پدیده پارگی در سه حالت بحرانی زاویه‌های خم (ضخامت 2 mm و شعاع خم 0.5 mm) مطابق شکل 16 طبق معیار برگزیده آرگون بررسی شد. با توجه به این‌که مقدار D/D_{crit} در زاویه خم °60 به عدد 1 می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.

6- نتیجه‌گیری

پدیده‌ی پارگی یکی از مهم‌ترین عیوب فرایندهای شکل‌دهی ورقی است. در این پژوهش به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مقطع کانالی شکل با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداخته شده است. بدین منظور شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. با انتخاب شش معیار شکست نرم که مقدارهای بحرانی شکست آن‌ها از طریق آزمون کشش ساده قابل محاسبه بود، با نوشتن زیربرنامه به بررسی عیب پارگی در فرایند پرداخته شد، همچنین تأثیر پارامترهای، ضخامت ورق، شعاع و زاویه خم روی عیب پارگی مورد بررسی قرار گرفت، سپس آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام گرفت. با مقایسه نتیجه‌های شبیه‌سازی عددی با نتیجه‌های تجربی، صحت‌سنجی نتیجه‌های عددی انجام شد. نتیجه‌های حاصل از این پژوهش به شرح زیر است.

1- مطابق آزمایش‌های تجربی انجام گرفته شده براساس جدول 2، در زاویه‌های خم °25 و °45 تمامی محصولات سالم بوده و پدیده پارگی مشاهده نشد. پدیده پارگی فقط در زاویه خم °60 برای دو حالت، ضخامت 1.5 mm با شعاع خم 0.5 mm به فاصله 307 mm در راستای طولی محصول و برای ضخامت 2 mm با شعاع خم 0.5 mm پارگی به فاصله 321 mm در راستای طولی محصول، در محل ناحیه انتقال مشاهده شد.

2- محل بروز پارگی در فرایند به‌عنوان شاخص انتخاب مناسب‌ترین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی پدیده پارگی در فرایند انتخاب شد. با مقایسه محل رخدادن پارگی در آزمایش‌های تجربی و پیش‌بینی آن توسط معیارهای شکست نرم بررسی شده، کمترین درصد خطا مربوط به معیار آرگون بوده که مقدارهای آن به ترتیب 22.2 و 14.8 درصد برای دو محصول با ضخامت 1.5 mm و 2 mm است. معیار آرگون به‌عنوان مناسب‌ترین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی پدیده پارگی در این فرایند انتخاب شد.

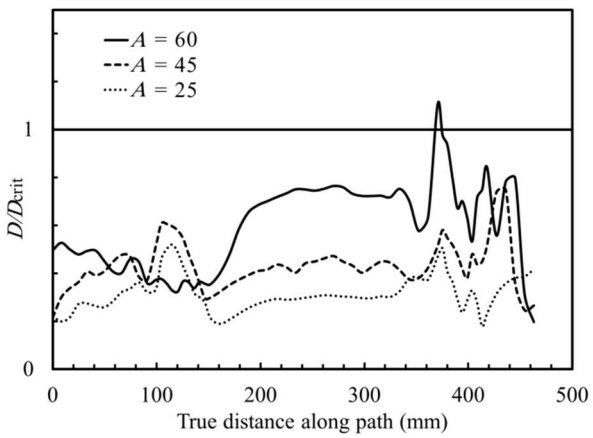


Fig. 16 Effect of bending angle on fracture for bending radius of 0.5 mm and sheet thickness of 2mm

شکل 16 تأثیر زاویه خم بر پارگی برای شعاع خم 0.5mm و ضخامت ورق 2mm

7- فهرست نمادها و نشانه‌ها

σ	تنش
$\bar{\sigma}$	تنش معادل میزز
$\sigma_i (i = 1-3)$	تنش‌های اصلی
ε^p	کرنش پلاستیک
$\bar{\varepsilon}_p$	کرنش پلاستیک معادل
$d\bar{\varepsilon}_p$	جزء کرنش معادل
$\varepsilon_i (i = 1-3)$	کرنش‌های پلاستیک اصلی
$\tau_{\max}$	بیشینه تنش برشی
$D_i (i = 1-6)$	مقدارهای متغیر شکست
D_{crit}	مقدار بحرانی شکست

8- مراجع

[1] Y. Dadgar Asl, M.Tajdari, H.Moslemi Naeini, B. Davoodi, R. Azizi Tafti, V. Panahizadeh, Prediction of Required Torque in Cold Roll Forming Process of a Channel Sections Using Artificial Neural Networks, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 209-214, 2015 (in Persian فارسی)

[2] A. S. Galakhar, W. J. T. Danieland, P. A. Meehan, Review of Contact and Dynamic Phenomena in Cold Roll Forming, *ARC Linkage Project Report (LP0560270)*, Research Report No. 2006/16, Division of Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Queensland, 2006.

[3] P. Groche, A. Zettler, S. Berner, G. Schneider, Development and verification of one-step-model for the design of flexible roll formed parts, *Material Forming*, Vol. 4, No. 4, pp. 371-377, 2011.

[4] J. Larrañaga, S. Berner, L. Galdos, P. Groche, Geometrical accuracy improvement in flexible roll forming lines, *International Conference on Materials and Processing Technologies*, Paris, France, Oct 24-27, 2010

[5] V. Panahizadeh, Theorical, numerical and experimental investigation of spring bach and Prediction of fracture on cold roll forming of channel section, Ph.D. Thesis, *Tarbiat Modares University*, Tehran, 2014 (in persian فارسی)

[6] Y. Z. Guan, Q. Li, Y. Yan, Fracture Finite Element Analysis for Roll forming of U- Section parts of TRIP 600 steel, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 249-250, No. 3, pp. 874-880, 2013

[7] H. Ona, I. Shou, K. Hoshi, On Strain Distributions in the Formation of Flexible Channel Section Development of Flexible Cold Roll Forming Machine, *Advanced Materials Research*, Vol. 576, No. 137, pp. 137-140, 2012.

[8] A. Abee, S. Berrner, A. Sedlmaier, Accuracy improvement of roll formed profile with variable cross section, *Proceeding of 9th International Conference of Plasticity (ICTP)*, Gyeongju, Korea. 2008.

[9] E. Gulceken, A. Abeé, A. Sedlmaier, H. Livatyali, Finite element simulation of flexible roll forming: A case study on variable width U channel, *4th International Conference and Exhibition on Desing and Production of Machines and Dies/Molds*, Cesme, Turkey, June 21-23, 2007.

[10] P. Groche, A. Zettler, S. Berner, Development of a one-step-model for the design of flexible roll-formed parts, *The 9th International Conference on Material Forming; Glasgow*, United Kingdom, April 26 - 28, 2006.

[11] M. M. Kasaei, H. Moslemi Naeini, B. Abbaszadeh, M. Mohammadi, M. Ghodsi, M. Kiuchi, R. Zolghadr, Gh. Liaghat, R. Azizi Tafti, M. Salmani Tehrani, Flange wrinkling in flexible roll forming process, *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014*, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, October 19-24, 2014.

[12] M. M. Kasaei, H. Moslemi Naeini, Gh. Liaghat, C. M. A. Silva, M. B. Silva , P. A. F, Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming, *Procedia Engineering Design*, Vol. 81, No. 7, pp. 245-250, 2015.

[13] M. Mohammadi, H. Moslemi Naeini, M. M. Kasaei, M. Salmani Tehrani, B. Abbas Zadeh, Investigation of web warping of profileswith changing cross section in flexible roll forming process,

Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 72-80, 2014 (in Persian فارسی)

[14] H. N. Hana,K. H. Kimb, A ductile fracture criterion in sheet metal forming process, *Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 1 , pp. 231–238, 2003.

[15] L. Hongshenga, Y. Yuyingb, Y. Zhongqib, S. Zhenzhongc,W. Yongzhib, The application of a ductile fracture criterion to the prediction of the forming limit of sheet metals, *Materials Processing Technology*,Vol. 209, No. 14, pp. 5443–5447, 2009.

[16] Z. Wua, S. Li, W. Zhang, W. Wanga, Ductile fracture simulation of hydropiercing process based on various criteria in 3D modeling, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 8, pp. 3661–3671, 2010.

[17] C. Linardona, D. Favierb, G. Chagnonb, B. Grueza, A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria, *Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 3, PP. 347– 357, 2013.

[18] J.R. Rice, D.M. Tracey, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, *the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, No. 3, pp. 201-217, 1969.

[19] H. Deilami Azodi, Theorical, Theoretical and Experimental Investigation on the Effects of Working Conditions in Hydromechanical Deep Drawing Process, Ph.D. thesis, *Tarbiat Modares University*, 2008 (in persian فارسی)

[20] M. Salmani Tehrani, P. Hartley, H. Moslemi Naeini, H. Khademizadeh, Localised edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section, *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, No. 2, pp. 184–196, 2006.