



## تحلیل تجربی و عددی پدیده پارگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر مقطع کانال از ورق آلومینیم AL6061-T6

یعقوب دادگر اصل<sup>1</sup>، محمدمراد شیخی<sup>2\*</sup>، علی پورکمالی انارکی<sup>3</sup>، ولی اله پناهی زاده رحیملو<sup>2</sup>، محمد حسین پورگللو<sup>2</sup>

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، صندوق پستی 16785-163، m.sheikhi@srutu.edu

### اطلاعات مقاله

### چکیده

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 20 اسفند 1394  
پذیرش: 15 اردیبهشت 1395  
ارائه در سایت: 12 خرداد 1395  
کلید واژگان:  
شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر  
عیب پارگی  
معیارهای شکست نرم  
روش اجزای محدود

امروزه با پیشرفت فناوری، صنایعی مانند خودروسازی و ساختمان سازی به قطعات با سطح مقطع متغیر نیاز دارند. تعداد مراحل، محدودیت ابعادی و هزینه تولید بالای این قطعات سبب شد تا فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر برای تولید این قطعات به کار گرفته شود. پدیده پارگی از مهم ترین عیوبی در این فرایند است. پارگی در ناحیه انتقال در لبه های خم که ضخامت ورق نسبت به شعاع خم زیاد است اتفاق می افتد. در این پژوهش به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر مقطع کانالی شکل با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداخته شده است. بدین منظور شبیه سازی فرایند در نرم افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. با به کارگیری شش معیار شکست نرم با نوشتن زیر برنامه به بررسی عیب پارگی در فرایند پرداخته شد. آزمایش های تجربی روی 27 نمونه ورق پیش بریده شده از جنس AL6061-T6 با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام گرفت. با مقایسه نتیجه های شبیه سازی عددی با نتیجه های تجربی، صحت سنجی نتیجه های عددی انجام شد. در ادامه با مقایسه نتیجه های پیش بینی معیارهای شکست نرم با نتیجه های تجربی، معیار شکست نرم آرگون، به عنوان مناسب ترین معیار برای پیش بینی 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

Yaghoob 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@srutu.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 pre-cut 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

متوالی است که در هر مرحله با اعمال مقدار مشخصی شکل دهی، ورق به محصول نهایی نزدیک می شود [1]. در این فرایند محصول یک پروفیل به سطح مقطع یکنواخت است. یک تفاوت اصلی این فرایند با نورد، ثابت ماندن

شکل دهی غلتکی سرد از روش های رایج و پر بازده در صنعت شکل دهی ورقی فلزات است. این فرایند شامل چند مرحله شکل دهی فلز به صورت پیوسته و

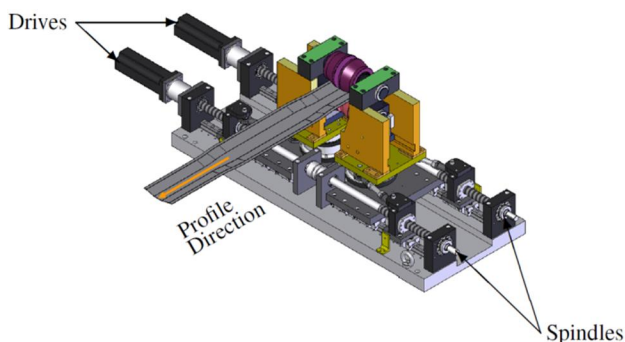


Fig. 3 Schematic of flexible roll forming process [4]

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 فرایند 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 فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از نرم‌افزار مارک منات کوپل شده با نرم‌افزار کپرا پرداختند. هدف آن‌ها بررسی عددی این فرایند 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 کماتش 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 به کار می‌رود.

کسای 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. کسای 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 به کار 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

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 فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد نشان داده شده است. از محدودیت‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی سنتی، ناتوانی 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 فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در شکل 2 نشان داده شده است.

تفاوت اصلی این فرایند با فرایند شکل‌دهی غلتکی سنتی، در حرکت غلتک‌هاست. یعنی غلتک‌ها در این فرایند 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 آایدا پرداخت.

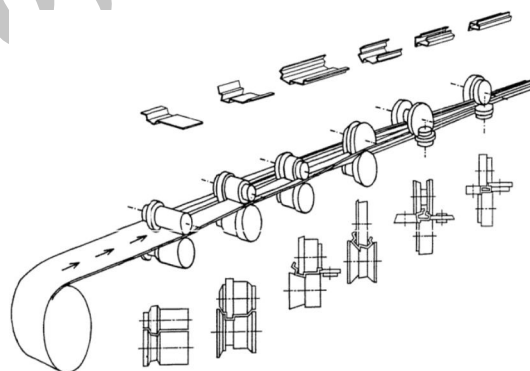


Fig. 1 Schematic of cold roll forming process

شکل 1 طرح‌واره فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد [2]

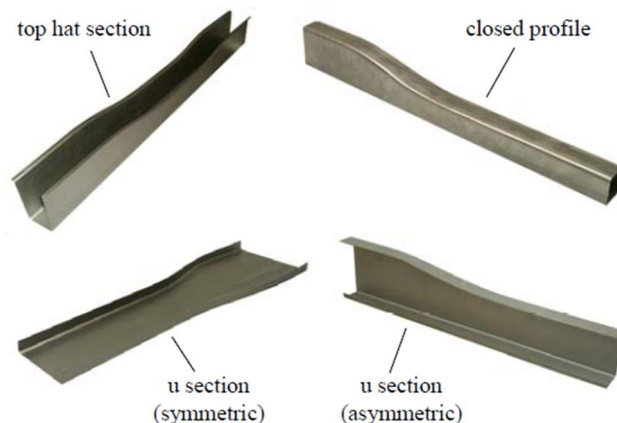


Fig. 2 Some profiles with variable cross section [3]

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

که  $\sigma$  و  $\epsilon^p$  به ترتیب 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].

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

### 2-1- معیار کرنش پلاستیک معادل<sup>1</sup>

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

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

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

$$\bar{\epsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3}((\epsilon_1^p - \epsilon_2^p)^2 + (\epsilon_2^p - \epsilon_3^p)^2 + (\epsilon_3^p - \epsilon_1^p)^2)} \quad (4)$$

که  $\bar{\epsilon}_p$  کرنش پلاستیک معادل و  $\epsilon_1^p, \epsilon_2^p, \epsilon_3^p$  کرنش‌های پلاستیک اصلی و در حالت کشش تک محوری  $D_1$  برابر با کرنش در لحظه شکست است.

### 2-2- معیار رایس و تریسی<sup>2</sup>

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.

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

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

### 2-3- معیار آرگون<sup>3</sup>

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

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

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

### 2-4- معیار فرودنتال<sup>4</sup>

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

شبه‌سازی 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 شکست نرم در پیش‌بینی حد شکل‌دهی فلزات پرداختند.

ژینگانگ 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، در این 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 م‌دهد 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.

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

<sup>1</sup> Plastic Equivalent Strain (PEStrn)

<sup>2</sup> Rice and Tracey (Rice)

<sup>3</sup> Argon (Argo)

<sup>4</sup> Freundenthal (Frue)

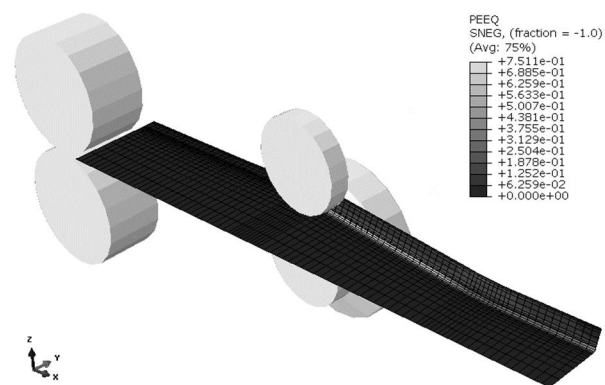


Fig. 4 Finite element modeling process with equivalent plastic strain contour

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

پارامترهای مهم تاثیرگذار بر پدیده پارگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر شامل ضخامت ورق، شعاع خم و زاویه شکل دهی 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 شکل دهی و شعاع خم روی پدیده پارگی شبیه سازی های متعددی انجام شد که در ادامه روند مدل سازی و انجام شبیه سازی ها به طور مفصل بیان شده است.

### 1-3- مدل سازی فرآیند

برای مدل سازی غلتک ها، از مدل نوع صلب تحلیلی و برای مدل سازی ورق از مدل پوسته شکل پذیر استفاده شد هندسه ورق پیش بریده شده مطابق شکل 5-a برای تولید محصول نهایی مطابق شکل 5-b در نظر گرفته 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 شکل دهی مطابق جدول 1 در نظر گرفته شدند، مدل اجزای محدود شامل دو ایستگاه است که ایستگاه اول با غلتک های استوانه ای تخت برای جلوگیری از حرکت های اضافی ورق پیش از ورود به ایستگاه شکل دهی و ایستگاه دوم با غلتک های دوزنقه ای جهت شکل دهی ورق در نظر گرفته شدند.

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

جدول 1 مشخصات ضخامت های ورق، شعاع ها و زوایای خم در شبیه سازی های مختلف

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

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

به صورت گرما تلف شود، بستگی دارد. شکست راه کار جایگزینی است که انرژی کرنشی برای آزاد شدن برمی گزیند؛ بنابراین معیار شکست می تواند تنها یک معیار انرژی باشد که مقدار بحرانی ای برای انرژی واپیچشی ذخیره شده در جسم تا لحظه شکست تعریف کند. در نتیجه معیار شکست برای مواد همسان گرد می تواند برحسب پارامترهای نامتغیر تنش یا کرنش بیان شود. معیار انرژی یا کار پلاستیک کلی<sup>1</sup> به صورت رابطه (7) است.

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

که  $\bar{\sigma}$  تنش معادل میزز،  $d\bar{\epsilon}_p$  جزء کرنش معادل،  $\bar{\epsilon}_p$  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 گویوی تأثیری بر کرنش شکست ندارد.

### 2-5- معیار انرژی ترسکا<sup>2</sup>

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

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

### 2-6- معیار بیشینه تنش برشی<sup>3</sup>

معیار بیشینه تنش برشی به صورت رابطه (9) تعریف می شود [17].

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

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

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

مقدار بحرانی شکست  $D_{\text{crit}}$  برای هر معیار از طریق آزمون کشش به دست می آید.

بسیاری از پژوهشگران معیارهای مختلف شکست نرم برای پیش بینی شکست ارائه کرده اند. جهت انتخاب بهترین معیار شکست نرم برای پیش بینی پارگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر از بین معیارهای شکست نرم موجود، شش معیار که در آن ها مقدار  $D_{\text{crit}}$  از طرق آزمون کشش ساده قابل محاسبه است. برای پیش بینی پدیده پارگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر انتخاب شدند.

این معیارها براساس متغیرهای مختلفی مانند کرنش پلاستیک معادل، تنش مؤثر، تنش هیدرواستاتیک و بیشینه تنش اصلی پدیده پارگی را در فرایند پیش بینی می کنند.

### 3- شبیه سازی اجزای محدود

برای شبیه سازی های اجزای محدود فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر از حل گر دینامیک صریح نسخه 6.12 نرم افزار آباکوس<sup>4</sup> استفاده شد. شکل 4 مدل اجزای محدود فرایند به همراه کانتور کرنش پلاستیک معادل را نشان می دهد.

<sup>1</sup> Energy or generalized plastic work criterion

<sup>2</sup> Tresca Energy(TREN)

<sup>3</sup> Maximum Shear Stress(MSS)

<sup>4</sup> ABAQUS

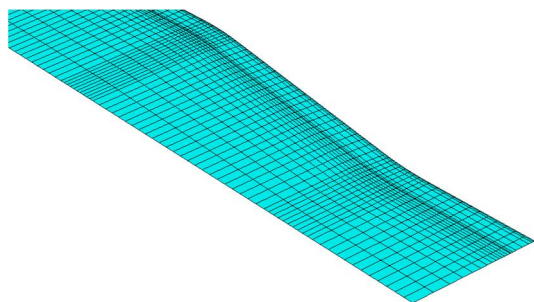


Fig. 7 View of meshed sheet

شکل 7 نمایی از ورق شبکه بندی شده

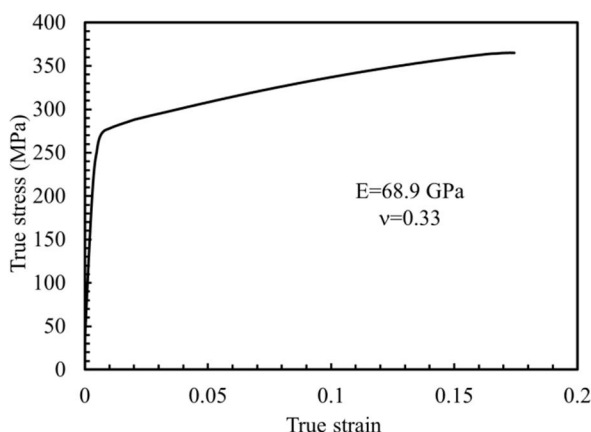


Fig. 8 The true stress-true strain curve of AL6061-T6

شکل 8 منحنی تنش حقیقی- کرنش حقیقی ورق از جنس AL6061-T6

### 3-4- روند انجام شبیه سازی

در شبیه سازی های انجام شده، تحلیل ها از نوع ارتجاعی - خمیری در نظر گرفته و سرعت حرکت ورق در طول خط تولید روی 0.1 m/s تنظیم شد.

### 4- بخش تجربی

جهت مقایسه نتیجه های حاصل از پیش بینی پدیده پارگی توسط معیارهای شکست نرم بررسی شده در این پژوهش با نتیجه های تجربی و انتخاب مناسب ترین معیار، آزمایش های تجربی روی ورق از جنس AL6061-T6 با دستگاه شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر 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 پیش بریده شده برای انجام آزمایش ها مطابق جدول 2 تهیه شد.

نمونه ای از ورق پیش برش شده و محصول تولید شده با دستگاه شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر در شکل های 10 نشان داده شده است.

### 5- بحث و نتایج

#### 5-1- صحت سنجی نتیجه های شبیه سازی

کرنش طولی یکی از کمیت های مهم در فرایند شکل دهی غلتکی سرد است. برای صحت سنجی نتایج به دست آمده از شبیه سازی های اجزای محدود، مقایسه ای بین نتایج شبیه سازی، با داده های تجربی گزارش شده در مرجع

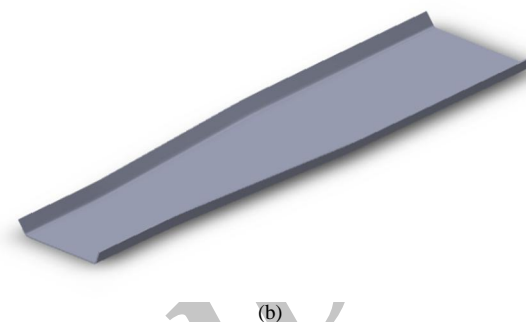
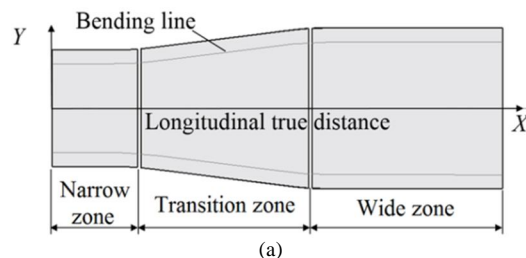


Fig. 5 a- Model of pre-cut sheet b- The final product geometry

شکل 5 a- مدل ورق پیش بریده، b- هندسه محصول نهایی

بر ورق مهار شد. غلتک های ایستگاه شکل دهی هنگام شکل دهی، به طور همزمان دارای حرکت عرضی در جهت Y و حرکت دورانی حول محور Z است. حرکت غلتک ها بر اساس اصل عمود بودن تعریف می شوند. غلتک ها باید در هر لحظه بر منحنی خم عمود باشند. در شکل 6 عمود بودن غلتک ها در موقعیت های مختلف بر منحنی خم نشان داده شده است. در این مدل فاصله بین ایستگاه ها 300 mm در نظر گرفته شد.

### 3-2- مشخصات شبکه بندی

غلتک ها صلب و ورق شکل پذیر در نظر گرفته شدند. به دلیل شبیه سازی یک فرایند شکل دهی ورق، ورق از نوع المان پوسته تعریف شده است. با توجه به خصوصیات المان S4R در نرم افزار آباکوس، این نوع المان برای شبکه بندی انتخاب شد. اندازه المان ها متناسب با هندسه قطعه، بین 0.6 mm تا 2 mm  $\times$  2 mm انتخاب شد. شکل 7 نمایی از ورق شبکه بندی شده را نشان می دهد.

### 3-3- مشخصات ماده

در شبیه سازی های انجام شده، ورق از جنس AL6061-T6 که دارای مقدار نسبت پواسون 0.33، مدول یانگ 68.9 GPa و خواص همسان گرد در نظر گرفته شده است. منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی مطابق شکل 8 به نرم افزار داده شد.



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

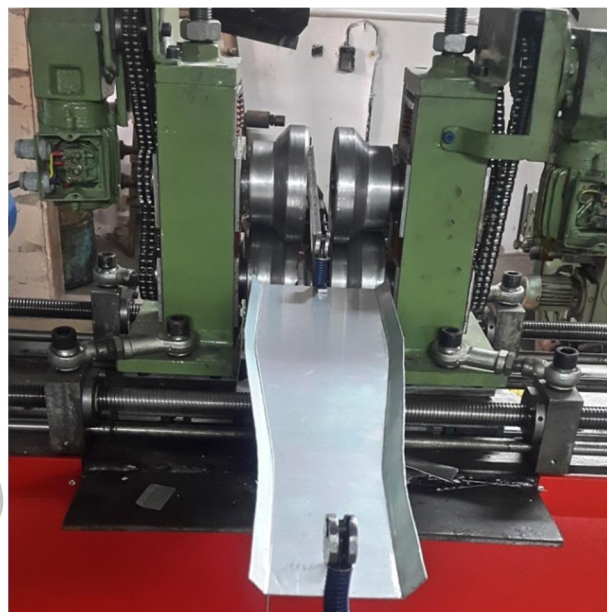
شکل 6 عمود بودن غلتک ها در موقعیت های مختلف بر منحنی خم

جدول 2 مشخصات ضخامت های ورق، شعاع ها و زاویای خم در آزمایش های تجربی

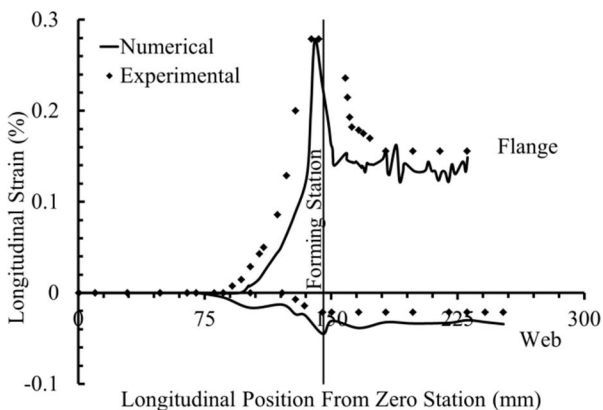
**Table 2** Specifications of sheet thicknesses, Corners bending radius and bending angles in experimental tests

ردیف	ضخامت (mm)	شعاع خم (mm)	زاویه شکل دهی (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

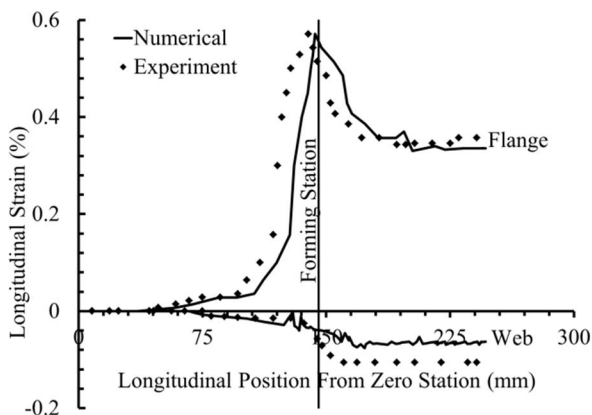
[20] انجام شد. آزمایش های تجربی به صورت تک ایستگاهه برای مقطع کانالی با زاویه های خم  $20^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $40^\circ$  و  $50^\circ$  انجام شد. کرنش های طولی به وسیله کرنش سنج های الکترونیکی در دو محل، یکی به فاصله 1.5 mm از لبه بال و دیگری در کف پروفیل روی محور تقارن اندازه گیری شدند. برای همسان سازی شبیه سازی با آزمایش تجربی مرجع، هندسه بخش باریک پروفیل، مشابه هندسه پروفیل تولید شده در مرجع در نظر گرفته شد و سپس نتیجه های کرنش طولی در بخش باریک پروفیل با نتیجه های تجربی نامبرده مقایسه شد. همان طوری که در شکل های 11-a، 11-b نشان داده شده است سازگاری خوبی میان نتیجه های شبیه سازی با داده های تجربی گزارش شده وجود دارد. بنابراین می توان به پاسخ های شبیه سازی اجزای محدود اعتماد درستی داشت.



**Fig. 9** Flexible roll forming machine made in Shahid Rajaee University  
شکل 9 نمایی از دستگاه شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی



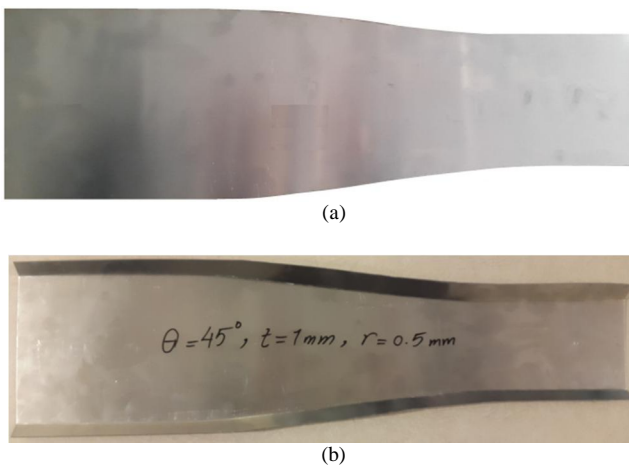
(a)



(b)

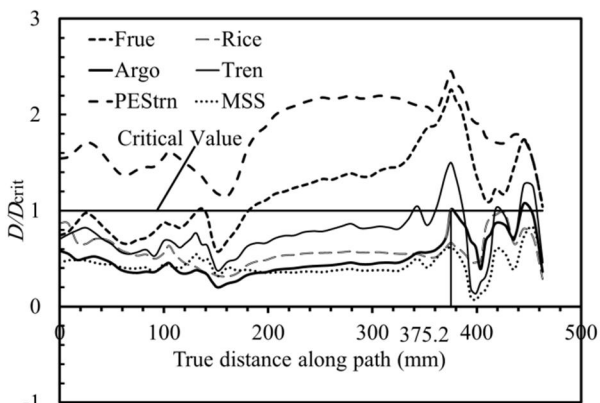
**Fig. 11** Compare of longitudinal strain on web and edge of narrow area in simulation with experimental reported data on [20] for the Bending angle of (a)  $20^\circ$  (b)  $30^\circ$

شکل 11 مقایسه کرنش طولی کف و لبه ناحیه باریک شبیه سازی با داده های تجربی گزارش شده در [20] برای زاویه خم (a)  $20^\circ$  (b)  $30^\circ$

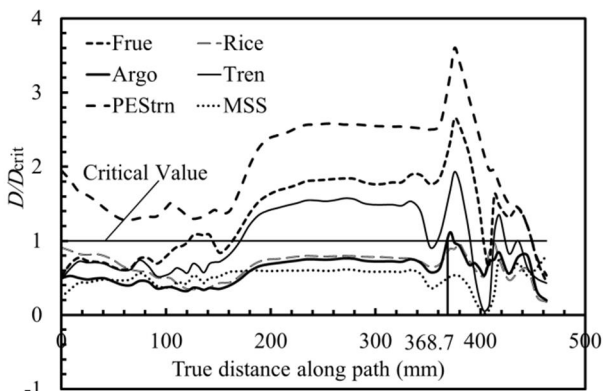


**Fig. 10** (a) Pre-cut sheet (b) Final product

شکل 10 -a ورق پیش بریده شده، -b محصول نهایی



(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 b- 2mm -a 1.5 mm

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 پیش‌بینی شده 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 پیش‌بینی 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 رخ دادن 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

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

### 2-5- بررسی تجربی پدیده پارگی

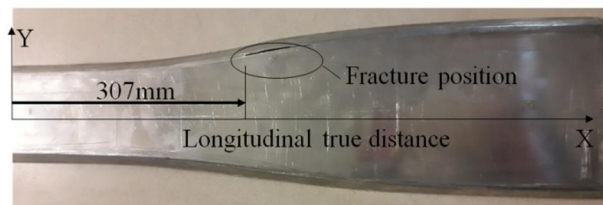
براساس آزمایش‌های تجربی انجام گرفته شده در جدول 2، در زاویه‌های خم 25° و 45° تمامی محصولات سالم بوده و پدیده پارگی مشاهده نشد. پارگی فقط در زاویه خم 60° درجه برای دو حالت، ضخامت 1.5 mm با شعاع خم 0.5 mm به فاصله 307 mm از ابتدای محصول در راستای طولی و برای ضخامت 2 mm با شعاع خم 0.5 mm پارگی به فاصله 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.

### 3-5- مقایسه پیش‌بینی پارگی توسط معیارهای شکست نرم با

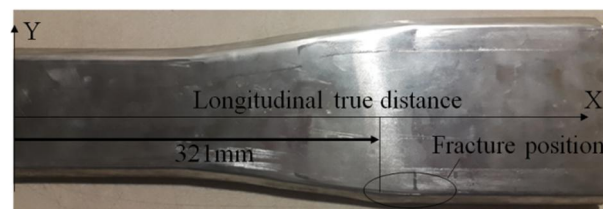
#### آزمایش‌های تجربی و انتخاب مناسب‌ترین معیار

برای پیش‌بینی پارگی در فرایندهای شکل‌دهی ورقی، معیارهای شکست نرم متعددی ارائه شده است. از بین معیارهای ارائه شده، شش معیار شکست نرم که مقادیر 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 مقادیر بحرانی معیارهای شکست نرم با استفاده از نتیجه‌های آزمایش کشش ساده محاسبه شدند که مقادیر بحرانی شکست آن‌ها مطابق جدول 3 است.

سپس با شبیه‌سازی فرایند در نرم افزای اجزای محدود آباکوس و استفاده از نتایج آن، مقادیر 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 مقادیر  $D/D_{crit}$  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 مقادیر بحرانی شکست به‌دست‌آمده از آزمون کشش ساده

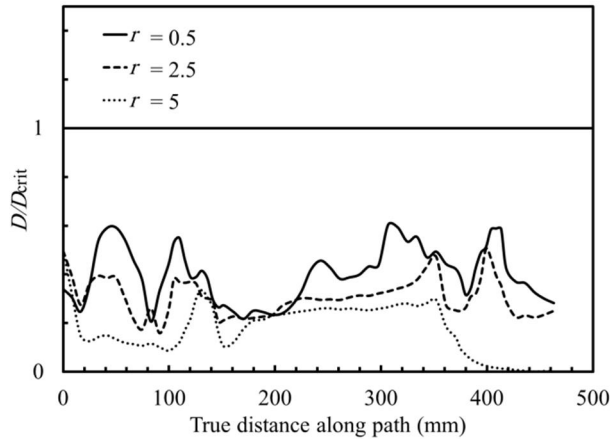
معیار شکست نرم	Frue	Rice	Argo	TREN	PEStn	MSS
مقادیر بحرانی شکست	69.37	0.31	92.49	34.67	0.19	182.56

4-5- بررسی اثر ضخامت ورق روی پدیده پارگی

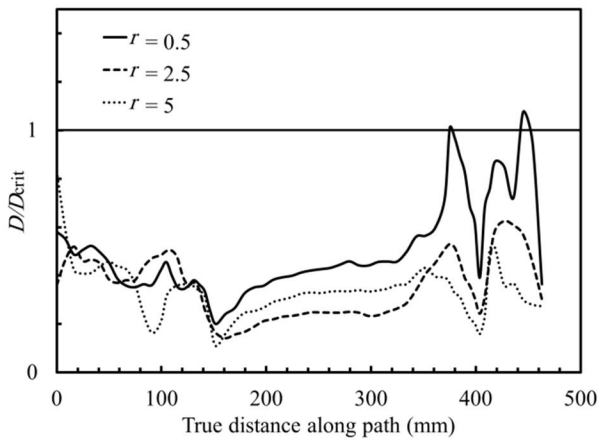
شکل 14-a, b, c تأثیر ضخامت ورق بر پارگی به ترتیب برای شعاع‌های خم 0.5 mm, 2.5 mm و 5 mm را براساس معیار برگزیده آرگون نشان می‌دهد. مطابق شکل 14-a در ضخامت‌های 1.5 mm و 2 mm برای شعاع خم 0.5 mm و زاویه خم 60° درجه با توجه به مقدار  $D/D_{crit}$  به عدد 1 می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.

5-5- بررسی اثر شعاع خم روی پدیده پارگی

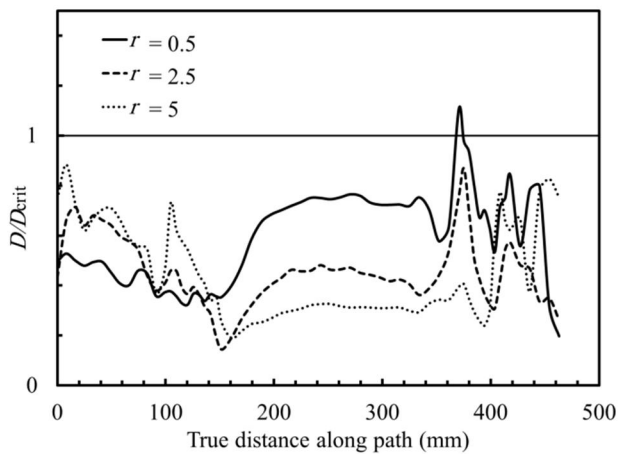
شکل‌های 15-a, b, c تأثیر شعاع خم بر پارگی به ترتیب برای ورق با ضخامت‌های 1 mm, 1.5 mm و 2 mm را طبق معیار برگزیده آرگون نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های 15-b, c در شعاع خم 0.5 mm برای ضخامت‌های 1.5 mm و 2 mm و زاویه خم 60° با توجه به این که مقدار  $D/D_{crit}$  به عدد 1 می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.



(a)



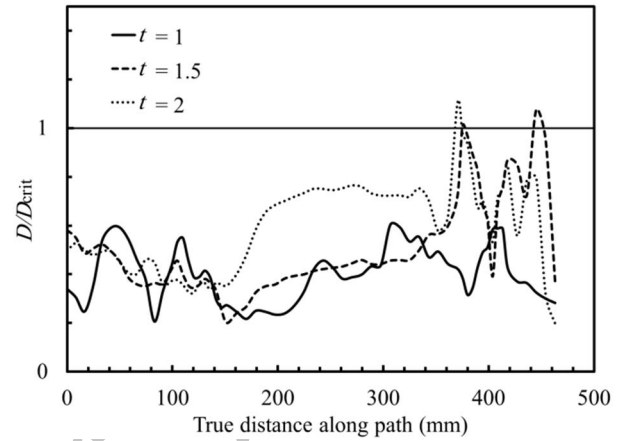
(b)



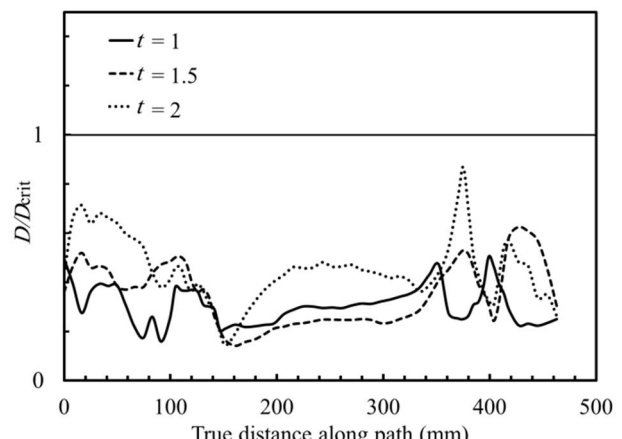
(c)

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

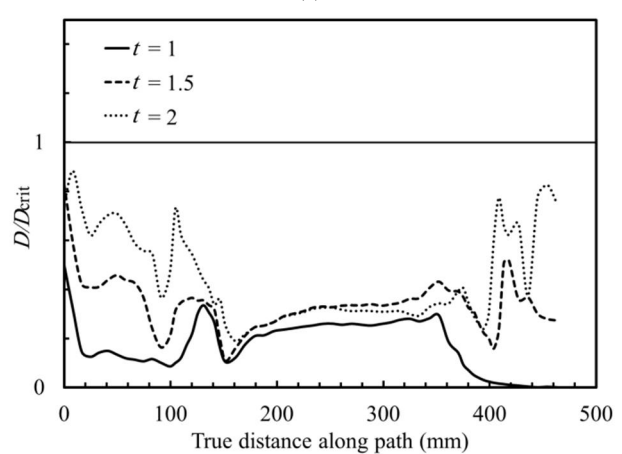
شکل 15 تأثیر شعاع خم بر پارگی برای ضخامت‌های (a) 1mm (b) 1.5mm (c) 2mm



(a)



(b)



(c)

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



6-5 - بررسی اثر زاویه خم روی پدیده پارگی

با توجه به این که در هیچ کدام از آزمایش های تجربی با زاویه های خم  $25^\circ$  و  $45^\circ$  پدیده پارگی مشاهده نگردید، اثر زاویه خم روی پدیده پارگی در سه حالت بحرانی زاویه های خم (ضخامت 2 mm و شعاع خم 0.5 mm) مطابق شکل 16 طبق معیار برگزیده آرگون بررسی شد. با توجه به این که مقدار  $D/D_{crit}$  در زاویه خم  $60^\circ$  به عدد 1 می رسد، شکست رخ می دهد.

6- نتیجه گیری

پدیده پارگی یکی از مهم ترین عیوب فرایندهای شکل دهی ورقی است. در این پژوهش به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر مقطع کانالی شکل با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداخته شده است. بدین منظور شبیه سازی فرایند در نرم افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. با انتخاب شش معیار شکست نرم که مقادیر بحرانی شکست آنها از طریق آزمون کشش ساده قابل محاسبه بود، با نوشتن زیر برنامه 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 آزمایش های تجربی با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام گرفت. با مقایسه نتیجه های شبیه سازی عددی با نتیجه های تجربی، صحت سنجی نتیجه های عددی انجام شد. نتیجه های حاصل از این پژوهش به شرح زیر است.

1- مطابق آزمایش های تجربی انجام گرفته شده بر اساس جدول 2، در زاویه های خم  $25^\circ$  و  $45^\circ$  تمامی محصولات سالم بوده و پدیده پارگی مشاهده نشد. پدیده پارگی فقط در زاویه خم  $60^\circ$  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 به عنوان شاخص انتخاب مناسب ترین معیار شکست نرم برای پیش بینی پدیده پارگی در فرایند انتخاب شد. با مقایسه محل رخ دادن پارگی در آزمایش های تجربی و پیش بینی آن توسط معیارهای شکست نرم بررسی شده، کمترین درصد خطا مربوط به معیار آرگون بوده که مقادیر آن به ترتیب 22.2 و 14.8 درصد برای دو محصول با ضخامت 1.5 mm و 2 mm است. معیار آرگون به عنوان مناسب ترین معیار شکست نرم برای پیش بینی پدیده پارگی در این فرایند انتخاب شد.

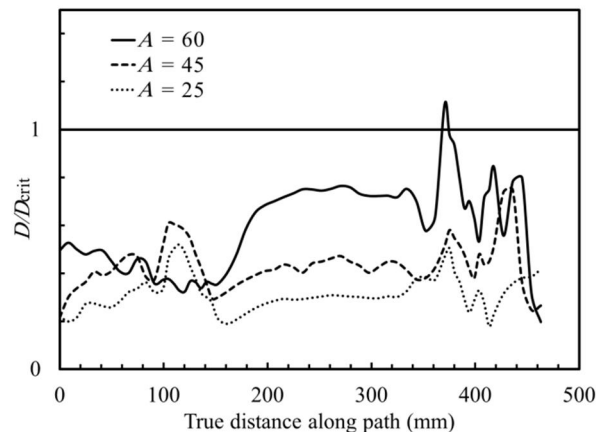


Fig. 16 Effect of bending angle on fracture for bending radius of 0.5 mm and sheet thickness of 2mm

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

7- فهرست نمادها و نشانه ها

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

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, Theoretical, 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. Berner, 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 profiles with changing cross section in flexible roll forming process,

- 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, Theoretical, 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.
- 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,

Archive of SID