

بررسی پدیده‌ی پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از معیارهای شکست نرم و معیار FLD

یعقوب دادگر اصل (دانشجوی دکتری)

محمد مراد شیخی* (استادیار)

علی پورکمالی افشاری (دانشیار)

ولی‌اله پناهی‌زاده رحیم‌لو (استادیار)

محمد حسین پورگللو (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۶)
دوری ۲ - ۳، شماره ۲، ص. ۹۲-۸۳

تعداد مراحل، محدودیت ابعادی، و هزینه‌ی تولید بالای قطعات با سطح مقطع متغیر باعث شده است فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به‌کار رود. در این پژوهش به بررسی پدیده‌ی پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از شش معیار شکست نرم و معیار FLD پرداخته شده است. شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. سپس آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام گرفته است. با مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی معیارهای شکست نرم و معیار FLD با نتایج تجربی، معیار شکست نرم آرگون، به عنوان مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پارگی انتخاب شده است. همچنین تأثیر پارامترهای ضخامت ورق، شعاع، و زاویه‌ی خم روی عیب پارگی با معیار منتخب آرگون بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ورق و زاویه‌ی خم احتمال بروز عیب پارگی در محصول افزایش می‌یابد و با افزایش شعاع خم احتمال بروز عیب پارگی در محصول کاهش می‌یابد.

y.dadgar@srttu.edu
m.sheikhi@srttu.edu
ali-pourkamali@srttu.edu
v.panahizadeh@srttu.edu
m.hoseinpour@srttu.edu

واژگان کلیدی: شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، معیارهای شکست نرم، روش اجزای محدود، منحنی حد شکل‌دهی.

۱. مقدمه

به منظور پاسخ به نیازهای مشتریان مانند هزینه‌ی پایین تولید و پروفیل‌های باز و بسته با سطح مقطع متغیر، روش تولید جدیدی به نام شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر یا شکل‌دهی غلتکی سه‌بعدی ایجاد شده است. نمونه‌ی از محصول تولیدشده توسط فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در شکل ۲ نشان داده شده است.^[۱] تفاوت اصلی این فرایند با فرایند شکل‌دهی غلتکی سنتی، در حرکت غلتک‌هاست. یعنی غلتک‌ها در این فرایند در جای خود ثابت نیستند، بلکه در حین تولید با توجه به هندسه‌ی پروفیل حرکت داده می‌شوند. سیستم‌های حرکتی در این فرایند به صورت کنترل عددی است.

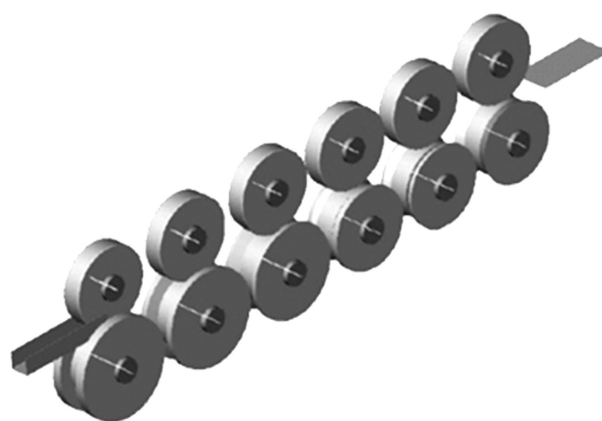
لارانتزا و همکاران به بررسی تأثیر استفاده از ورق‌گیر و حرارت دادن القایی ورق بر روی عیب تابیدگی کف در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که این عملیات تأثیر به‌سزایی در تولید محصولات با دقت و کیفیت بالا با این فرایند دارند.^[۲]

پناهی‌زاده رحیم‌لو به پیش‌بینی بروز پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی با استفاده از معیار شکست نرم آبادا^۱ پرداخت.^[۵]

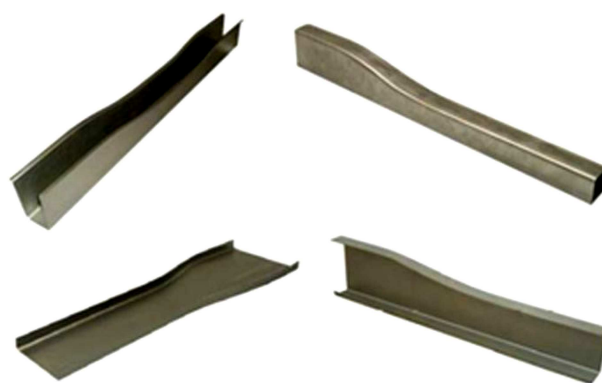
شکل‌دهی غلتکی سرد یکی از روش‌های رایج و پر بازده در صنعت شکل‌دهی ورقی فلزات است. این فرایند شامل چند مرحله شکل‌دهی فلز به صورت پیوسته و متوالی است که در هر مرحله با اعمال مقدار مشخصی شکل‌دهی، ورق به محصول نهایی نزدیک می‌شود.^[۱] در این فرایند محصول یک پروفیل با سطح مقطع یک‌نواخت است. تفاوت اصلی این فرایند با نورد، ثابت ماندن ضخامت در آن است. فرایند شامل اعمال تغییر شکل به صورت مرحله‌ی به واسطه غلتک‌های مسیر است. در هر مرحله شکل‌دهی دست کم دو غلتک وجود دارد که با هم ایستگاه تشکیل می‌دهند. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد نشان داده شده است.^[۲] از محدودیت‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی سنتی، عدم توانایی تولید پروفیل‌هایی با سطح مقطع متغیر در طول محصول است. در حالی‌که بسیاری از پروفیل‌های لازم در صنایع، از قبیل صنعت خودروسازی، دارای سطح مقطع متغیر هستند که در چندین مرحله و با هزینه‌ی بالا توسط قالب‌های پرس ساخته می‌شوند.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۲۹، پذیرش ۱۳۹۵/۴/۲۹.



شکل ۱. طرح‌واره‌ی از فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد.^[۲]



شکل ۲. برخی از پروفیل‌های دارای سطح مقطع متغیر.^[۳]

پژوهشگران با روش تحلیل اجزای محدود به تحلیل پارگی در شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی شکل پرداختند. آن‌ها رابطه‌ی بین بروز پارگی با تنش، کرنش، و چگالی انرژی را مطالعه کردند.^[۶]

پژوهشگران دیگری به بررسی علت وقوع عیب تابیدگی کف پروفیل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با انجام آزمایش‌های تجربی و اندازه‌گیری کرنش‌های کف و لبه‌ی پروفیل در راستای طولی ورق پرداختند، آن‌ها علت وقوع این عیب در نزدیکی قسمت فشاری ناحیه‌ی انتقال را به انقباض ناشی از شکل‌دهی این ناحیه نسبت دادند.^[۷]

ابی و همکارانش با شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به بررسی نحوه‌ی توزیع کرنش در این فرایند پرداختند و روشی را برای طراحی پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر بر اساس عدم ایجاد عیب چروکیدگی در لبه‌ی بال ارائه دادند.^[۸]

گولچکن و همکاران به شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از نرم‌افزار مارک‌منتات^۲ ترکیب‌شده با نرم‌افزار کپرا^۳ پرداختند. هدف آن‌ها بررسی عددی این فرایند با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها موج‌دار شدن لبه‌های جلو و عقب پروفیل کانالی شکل را نشان می‌دهد که در شکل‌دهی غلتکی مواد از پیش بریده‌شده معمول است.^[۹]

محققان یک مدل تحلیلی تک‌گام برای استفاده در طراحی پروفیل‌های کانالی شکل بدون چین‌خوردگی تولیدشده به روش شکل‌دهی غلتکی سه‌بعدی ارائه کردند. این مدل نیمه تجربی است و بر اساس مکانیک کمانش صفحات و یک سری از تحلیل‌های اجزای محدود پایه‌ریزی شده است. این مدل بر روی ناحیه‌ی فشاری تمرکز می‌کند و به عنوان یک امکان‌سنج بدون نیاز به شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی به کار می‌رود.^[۱۰]

کسایی و همکاران به بررسی عیب اعوجاج لبه‌ی پروفیل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی پرداختند و با مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی به تطابق خوبی رسیدند.^[۱۱]

کسایی و همکاران 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 تست فشار نمونه‌های مستطیلی شکل، به بررسی این عیب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش ارائه‌شده جایگزین مناسبی برای روش‌های موجود بر اساس روش‌های تحلیلی و عددی ساده است.^[۱۲]

محمدی و همکاران به بررسی چگونگی ایجاد عیب تابیدگی کف با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که علت تابیدگی کف پروفیل، اعمال نشدن مقدار کافی کرنش طولی در لبه‌ی بال پروفیل در ناحیه‌ی انتقال است. آن‌ها همچنین، اثر پارامترهای هندسی محصول نظیر اندازه‌ی بال پروفیل، زاویه‌ی خم، شعاع ناحیه‌ی انتقال، و ضخامت ورق بر میزان تابیدگی کف را بررسی کردند.^[۱۳]

در زمینه‌ی شکست نرم، هانا و همکارانش، با ترکیب معیارهای شکست نرم کوکرافت - لانهام^۴ و تنش برشی بیشینه، یک معیار شکست نرم تجربی برای پیش‌بینی پارگی در فرایندهای شکل‌دهی فلزات پیشنهاد دادند.^[۱۴]

شنگ و همکاران به بررسی کاربرد معیارهای شکست نرم در پیش‌بینی حد شکل‌دهی فلزات پرداختند.^[۱۵]

وو و همکاران به بررسی پدیده‌ی پارگی در فرایند هیدروپایرسینگ با شش معیار شکست نرم پرداختند. آن‌ها با انجام این تحقیق به این نتیجه رسیدند که پیش‌بینی معیار شکست نرم رایس و تریسی به نتیجه‌ی تجربی نزدیک‌تر است.^[۱۶]

لیتاردون و همکاران به بررسی قابلیت کشش لوله‌های از جنس آلایژ کرم - کبالت با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداختند.^[۱۷]

با توجه به این‌که در پژوهش‌های انجام‌شده، به بررسی عیوب فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مانند تابیدگی کف، اعوجاج لبه، و انحراف از موقعیت مطلوب لبه پرداخته‌شده اما عیب پارگی که یکی از مهم‌ترین عیوب فرایند است بررسی نشده است، در این مقاله به بررسی بروز پدیده‌ی پارگی با استفاده از معیارهای شکست نرم و معیار FLD پرداخته شده است؛ بدین‌منظور شبیه‌سازی فرایند به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. با به کارگیری شش معیار شکست نرم و معیار FLD به بررسی عیب پارگی در این فرایند پرداخته شده است. آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته‌شده در دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی انجام شده است. در ادامه با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، صحت‌سنجی نتایج عددی انجام شده است. با مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی معیارهای شکست نرم و معیار FLD با نتایج تجربی، مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پارگی انتخاب شده است. پارامترهای تأثیرگذار در رخ دادن پارگی در این فرایند شامل ضخامت ورق، شعاع خم، زاویه‌ی خم، جنس ورق، طول و شعاع ناحیه‌ی انتقال است. تأثیر پارامترهای ضخامت ورق، شعاع، و زاویه‌ی خم روی عیب پارگی با مناسب‌ترین معیار منتخب بررسی شده است.

۲. معیارهای شکست نرم

چندین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی شکست وجود دارد که شکست را بر حسب متغیرهای مکانیکی مانند تنش، کرنش یا کار مکانیکی توصیف می‌کنند.

۴.۲. معیار فرودنتال^{۱۹}

فرودنتال^[۱۹] پیشنهاد کرد که آغاز و انتشار شکست در ماده به سطح انرژی کرنشی، که نمی‌تواند پیش از آزاد شدن در اثر ایجاد جدایش در ماده به صورت گرما تلف شود، بستگی دارد. در واقع شکست راهکار جایگزینی است که انرژی کرنشی برای آزاد شدن برمی‌گزیند. بنابراین، معیار شکست می‌تواند تنها یک معیار انرژی باشد که مقدار بحرانی برای انرژی واپیچشی ذخیره شده در جسم تا لحظه‌ی شکست تعریف کند. در نتیجه، معیار شکست برای مواد همسان‌گرد می‌تواند بر حسب پارامترهای نامتغیر تنش یا کرنش بیان شود. معیار انرژی یا کار خمیری کلی به صورت رابطه‌ی ۷ است.

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

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

۵.۲. معیار انرژی ترسکا^۸

ترسکا معیار شکست نرمی را به صورت رابطه‌ی ۸ ارائه کرد.^[۱۷]

$$D_0 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} d\bar{\varepsilon}_p \quad (8)$$

که σ_1 و σ_2 تنش‌های اصلی، $d\bar{\varepsilon}_p$ جزء کرنش معادل، $\bar{\varepsilon}_p$ کرنش خمیری معادل، و D مقدار بحرانی معیار شکست است.

۶.۲. معیار بیشینه‌ی تنش برشی^۹

معیار بیشینه‌ی تنش برشی به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود.^[۱۷]

$$D_F = \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (9)$$

که σ_1 و σ_2 تنش‌های اصلی، $\tau_{\max}$ تنش برشی بیشینه، و D مقدار بحرانی معیار شکست است.

به‌طور کلی شروع شکست زمانی رخ می‌دهد که نسبت مقدار متغیر شکست به مقدار بحرانی شکست طبق رابطه‌ی ۱۰ به مقدار عدد ۱ برسد.

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

مقدار بحرانی شکست D_{crit} برای هر معیار از طریق آزمون کشش به دست می‌آید. بسیاری از پژوهشگران معیارهای مختلف شکست نرم برای پیش‌بینی شکست ارائه کرده‌اند. به منظور انتخاب بهترین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از بین معیارهای شکست نرم موجود، شش معیار شکست نرم، که در آن‌ها مقدار D_{crit} از طرق آزمون کشش ساده محاسبه‌پذیر است، برای پیش‌بینی پدیده‌ی پارگی در این فرایند انتخاب شدند.

این معیارها بر اساس متغیرهای مختلفی مثل کرنش خمیری معادل، تنش مؤثر، تنش هیدرواستاتیک، و بیشینه‌ی تنش اصلی پدیده‌ی پارگی را در فرایند پیش‌بینی می‌کنند.

در همه‌ی مدل‌های ارائه شده در این مقاله معیارهای شکست بر اساس 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 اول شکست زمانی اتفاق می‌افتد 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؛ هر دو مدل بر اساس متغیر شکست لحظه‌ی D هستند که در حالت کلی به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

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

که σ و ε^p به ترتیب تنش و تانسور کرنش خمیری هستند.

به‌طور کلی معیارهای شکست زیادی بر اساس کار مکانیکی وجود دارد این معیارها تاریخچه‌ی تنش و کرنش را برای پیش‌بینی شکست در نظر می‌گیرند. آن‌ها براساس متغیر شکست D هستند که با جزئیات به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود.^[۱۷]

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

۱.۲. معیار کرنش خمیری معادل^۵

مطابق این معیار، وقتی مقدار کرنش خمیری معادل در نقطه‌ی به مقدار D_1 رسید شکست رخ خواهد داد که از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.^[۱۷]

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

مقدار کرنش خمیری معادل برای یک ماده‌ی تراکم‌ناپذیر از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود.

$$\bar{\varepsilon}_p = \left(\frac{2}{3} ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که $\bar{\varepsilon}_p$ کرنش خمیری معادل و ε_1 ، ε_2 و ε_3 کرنش‌های خمیری اصلی هستند. در حالت کشش تک محوری D_1 برابر با کرنش در لحظه‌ی شکست است.

۲.۲. معیار رایس و تریسی

رایس و تریسی^[۱۸] با مطالعه‌ی رشد حفره‌های کروی در ماده‌ی صلب - خمیری، معیاری برای پیش‌بینی شکست نرم به صورت رابطه‌ی ۵ پیشنهاد کردند.

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

که $\bar{\varepsilon}_p$ کرنش خمیری معادل، $\bar{\sigma}$ تنش معادل می‌ز، و σ_m تنش هیدرواستاتیک است.

۳.۲. معیار آرگون^۶

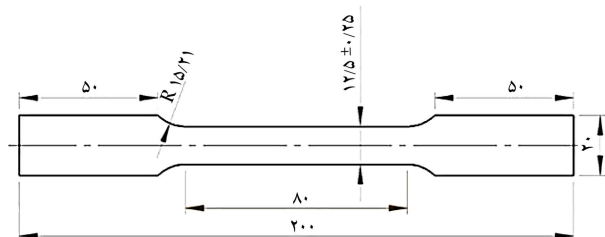
آرگون و همکاران^[۱۷] معیاری با در نظر گرفتن اثر تنش مؤثر و تنش هیدرواستاتیک به صورت رابطه‌ی ۶ ارائه کردند.

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

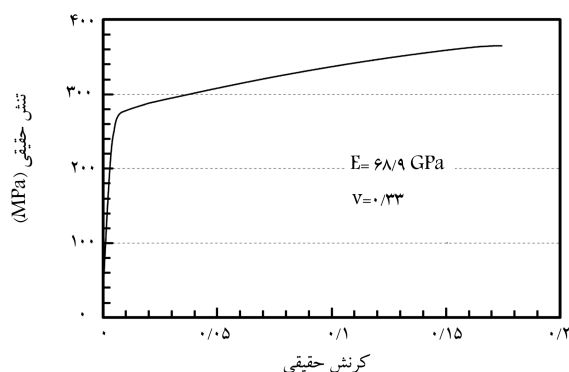
که $\bar{\varepsilon}_p$ کرنش خمیری معادل، $\bar{\sigma}$ تنش معادل می‌ز، و σ_m تنش هیدرواستاتیک است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ AL۶۰۶۱-T۶ بر حسب درصد وزنی.

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
۹۵٫۸ – ۹۸٫۶	۰٫۴ – ۰٫۳۵	۰٫۱۵ – ۰٫۴	۰٫۷ Max	۰٫۸ – ۱٫۲	۰٫۱۵ Max	۰٫۴ – ۰٫۸	۰٫۱۵ Max	۰٫۲۵ Max



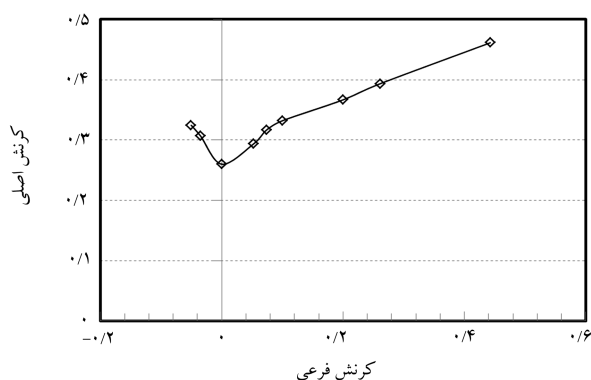
شکل ۳. ابعاد نمونه‌ها برای آزمون کشش.



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش حقیقی آلیاژ AL۶۰۶۱-T۶.



شکل ۵. نمونه‌های آزمون FLD.



شکل ۶. منحنی حد شکل‌دهی ورق AL۶۰۶۱-T۶ با ضخامت ۱ mm.

۳. تعیین تجربی مشخصات ماده برای انجام شبیه‌سازی‌ها

۳.۱. آزمون کشش

ابعاد نمونه‌ها برای آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM A۳۷۰ مطابق شکل ۳ و نمودار تنش - کرنش حقیقی مطابق شکل ۴ استخراج شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ AL۶۰۶۱-T۶ بر حسب درصد وزنی در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳.۲. آزمون FLD

برای انجام آزمون FLD از دستگاه آزمون کشش ۱۰ تن ساخت شرکت ژوئیک و قالب ناکازاما استفاده شده و روی سطح همه‌ی نمونه‌ها با شبکه‌بندی دایروی به قطر ۲٫۵ میلی‌متر با روش الکتروشیمیایی اچ شده است.

تغییر شکل نمونه‌ها تا زمانی‌که در نمونه‌پارگی ایجاد شود ادامه یافت. در طی فرایند شکل‌دهی دایره‌ها به بیضی‌هایی با اندازه‌های متفاوت تبدیل شدند. قطره‌های بزرگ و کوچک بیضی‌ها با استفاده از دستگاه پروژکتور نوری با دقت ± 1 میکرومتر اندازه‌گیری و کرنش‌های اصلی و فرعی محاسبه شد. شکل ۵ نمونه‌های تست FLD را نشان می‌دهد.

شکل ۶ منحنی حد شکل‌دهی ورق AL۶۰۶۱-T۶ با ضخامت ۱ میلی‌متر را بر اساس آزمایش انجام‌شده نشان می‌دهد.

۴. شبیه‌سازی اجزای محدود

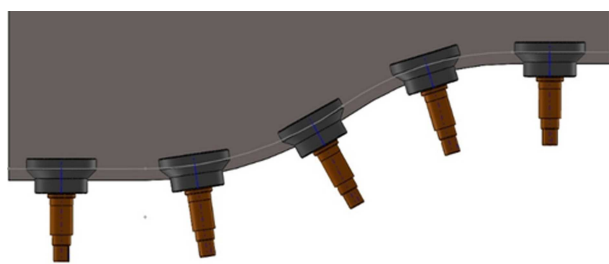
برای شبیه‌سازی‌های اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از حل‌گر دینامیک صریح نسخه‌ی ۶/۱۲ نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. شکل ۷ مدل اجزای محدود فرایند به همراه کانتور کرنش خمیری معادل را نشان می‌دهد.

پارامترهای مهم تأثیرگذار بر پدیده‌ی پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر شامل ضخامت ورق، شعاع خم، و زاویه‌ی خم است. به منظور بررسی اثر این پارامترها روی پدیده‌ی پارگی در این فرایند طراحی آزمایشی بر مبنای معیار عاملی کامل صورت گرفت. طرحی شامل ۲۷ آزمایش برای ۳ فاکتور ۳ سطحی انتخاب شد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

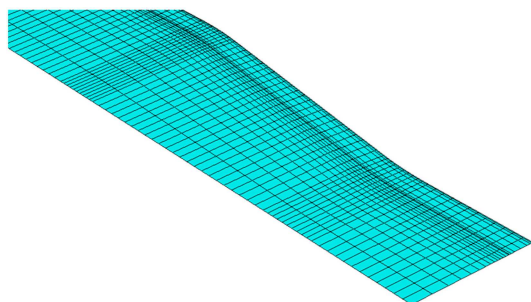
به منظور بررسی اثر ضخامت، زاویه‌ی شکل‌دهی، و شعاع خم روی پدیده‌ی پارگی شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شد که در ادامه روند مدل‌سازی و انجام شبیه‌سازی‌های به‌طور مفصل بیان شده است.

جدول ۲. مشخصات ضخامت‌های ورق، شعاع‌ها و زوایای خم در شبیه‌سازی‌های مختلف.

پارامتر	ضخامت ورق (mm)	شعاع خم (mm)	زاویه‌ی خم (deg)
سطوح	۱٫۵، ۲ و ۳	۵، ۲٫۵ و ۰٫۵	۴۵، ۲۵ و ۶۰



شکل ۹. عمود بودن غلتک‌ها در موقعیت‌های مختلف بر منحنی خم.



شکل ۱۰. نمایی از ورق شبکه‌بندی شده.

شکل‌دهی، حرکت انتهای ورق در جهت عمود بر ورق مهار شد. غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی در حین شکل‌دهی، به‌طور هم‌زمان دارای حرکت عرضی در جهت Y و حرکت دورانی حول محور Z هستند. همچنین، حرکت غلتک‌ها بر اساس اصل عمود بودن تعریف می‌شوند. یعنی اینکه غلتک‌ها باید در هر لحظه بر منحنی خم عمود باشند. در شکل ۹ عمود بودن غلتک‌ها در موقعیت‌های مختلف بر منحنی خم نشان داده شده است. در این مدل فاصله‌ی بین ایستگاه‌ها 30° میلی‌متر در نظر گرفته شد.

۲.۴. مشخصات شبکه‌بندی

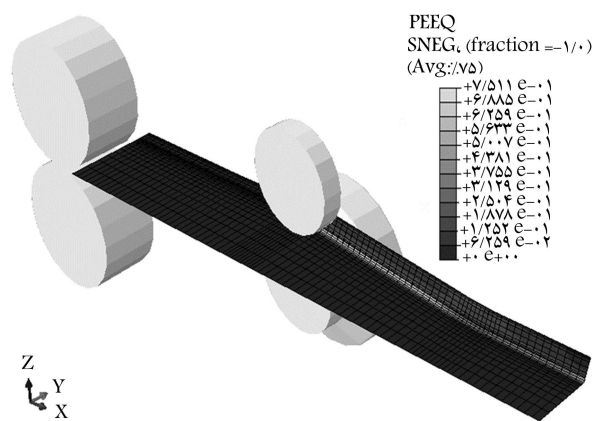
غلتک‌ها صلب و ورق شکل‌پذیر در نظر گرفته شدند. به‌دلیل شبیه‌سازی یک فرایند شکل‌دهی ورق، ورق از نوع المان پوسته تعریف شده است. با توجه به خصوصیات المان S4R در نرم‌افزار آباکوس، این نوع المان برای شبکه‌بندی انتخاب شد. اندازه‌ی المان‌ها متناسب با هندسه‌ی قطعه، بین $2 \text{ (mm)} \times 0.6 \text{ (mm)}$ تا $6 \text{ (mm)} \times 2 \text{ (mm)}$ انتخاب شد. شکل ۱۰ نمایی از ورق شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد.

۳.۴. مشخصات ماده

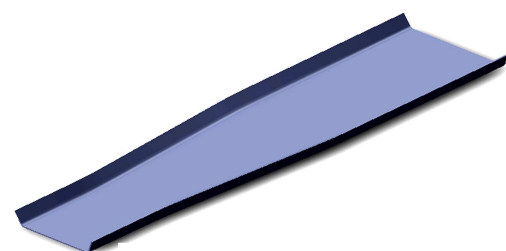
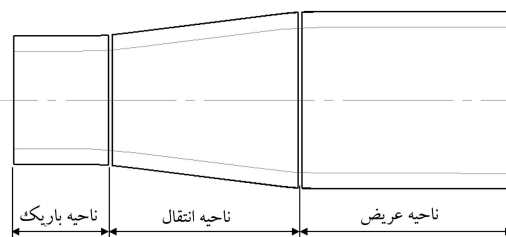
در شبیه‌سازی‌های انجام شده، ورق از جنس AL6061-T6 که دارای مقدارنسبت پواسون 0.33 ، مدول یانگ 68.9 گیگاپاسکال، و خواص همسانگرد است در نظر گرفته شده است. منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی مطابق شکل ۴ و منحنی حد شکل‌دهی مطابق شکل ۶ به نرم‌افزار داده شد.

۴.۴. روند انجام شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، تحلیل‌ها از نوع ارتجاعی - خمیری در نظر گرفته شد. سرعت حرکت ورق در طول خط تولید روی 0.1 متر بر ثانیه تنظیم شد.



شکل ۷. مدل اجزای محدود فرایند به همراه کانطور کرنش خمیری معادل.



ب) هندسه‌ی محصول نهایی.

شکل ۸. مدل سه بعدی محصول نهایی.

۱.۴. مدل‌سازی فرایند

برای مدل‌سازی غلتک‌ها، از مدل نوع صلب تحلیلی و برای مدل‌سازی ورق از مدل پوسته‌ی شکل‌پذیر استفاده شد. هندسه‌ی ورق از پیش بریده شده مطابق شکل ۸ الف برای تولید محصول نهایی مطابق شکل ۸ ب در نظر گرفته شد. عرض کف در ناحیه‌ی باریک 117 میلی‌متر، عرض کف در ناحیه‌ی عریض 179 میلی‌متر، طول بال 21 میلی‌متر، شعاع ناحیه‌ی انتقال 400 میلی‌متر، و پارامترهای هندسی نظیر ضخامت ورق، شعاع خم، و زاویه‌ی خم مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شدند. مدل اجزای محدود شامل دو ایستگاه است؛ ایستگاه اول با غلتک‌های استوانه‌ای تخت، به‌منظور جلوگیری از حرکت‌های اضافی ورق قبل از ورود به ایستگاه شکل‌دهی، در نظر گرفته شده و ایستگاه دوم با غلتک‌های دوزنقه‌بی، به‌منظور شکل‌دهی ورق، در نظر گرفته شده است.

مقطع کانالی شکل عرض متغیر مورد بحث در این پژوهش دارای یک صفحه‌ی تقارن است که از خط مرکزی آن می‌گذرد. بنابراین، با توجه به این تقارن نیمی از ورق و غلتک‌ها مدل شدند. برای برقراری شرط تقارن، حرکت در جهت عمود بر صفحه‌ی تقارن (جهت Y) و دوران‌ها در صفحه‌ی تقارن (دوران حول محورهای X و Z) مهار شدند. همچنین، برای جلوگیری از نوسان انتهای ورق قبل از ورود به ایستگاه

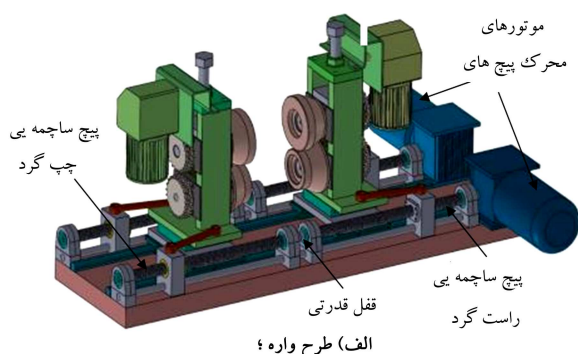
۵. بخش تجربی

به منظور مقایسه ی نتایج حاصل از پیش بینی پدیده ی پارگی توسط معیارهای شکست نرم و معیار FLD با نتایج تجربی و انتخاب مناسب ترین معیار، آزمایش های تجربی روی ورق از جنس AL6۰۶۱-T۶ با دستگاه شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر ساخته شده در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام شد. برای این منظور تعداد ۲۷ نمونه ورق از پیش بریده شده برای انجام آزمایش های تجربی مطابق جدول ۳ تهیه شد.

در شکل ۱۱ الف و ۱۱ ب به ترتیب طرح واره و نمایی از این ماشین شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر با محصول تولید شده نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات ضخامت های ورق، شعاع ها و زوایای خم در آزمایش های تجربی.

ردیف	ضخامت (mm)	شعاع خم (mm)	زاویه خم (deg)
۱	۱	۵	۶۰
۲	۲	۵	۲۵
۳	۲	۲٫۵	۴۵
۴	۱	۵	۴۵
۵	۲	۲٫۵	۲۵
۶	۲	۲٫۵	۶۰
۷	۱	۲٫۵	۶۰
۸	۱	۰٫۵	۴۵
۹	۱	۲٫۵	۴۵
۱۰	۱	۲٫۵	۲۵
۱۱	۱٫۵	۰٫۵	۲۵
۱۲	۲	۰٫۵	۲۵
۱۳	۱	۵	۲۵
۱۴	۲	۵	۶۰
۱۵	۱٫۵	۵	۶۰
۱۶	۲	۰٫۵	۴۵
۱۷	۲	۵	۴۵
۱۸	۱	۰٫۵	۲۵
۱۹	۱	۰٫۵	۶۰
۲۰	۲	۰٫۵	۶۰
۲۱	۱٫۵	۵	۴۵
۲۲	۱٫۵	۲٫۵	۲۵
۲۳	۱٫۵	۲٫۵	۶۰
۲۴	۱٫۵	۰٫۵	۴۵
۲۵	۱٫۵	۵	۲۵
۲۶	۱٫۵	۰٫۵	۶۰
۲۷	۱٫۵	۲٫۵	۴۵



ب) نمایی از دستگاه شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر ساخته شده در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

شکل ۱۱. دستگاه شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر به همراه نمونه محصول تولید شده.

۶. بحث و نتایج

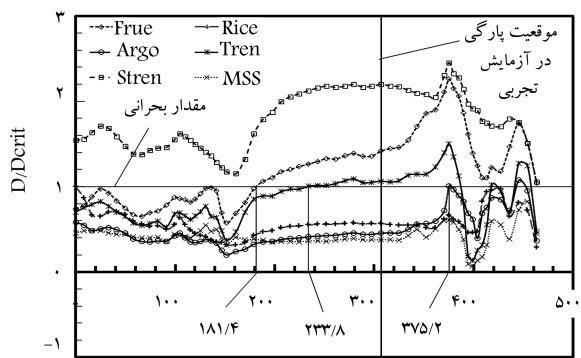
۱.۶. بررسی تجربی پدیده ی پارگی

بر اساس آزمایش های تجربی انجام گرفته شده مطابق جدول ۲، در زوایای خم ۲۵ و ۴۵ درجه تمام محصولات سالم بود و پدیده ی پارگی مشاهده نشد. پارگی فقط در زاویه ی خم ۶۰ درجه برای دو حالت، ضخامت ۱٫۵ میلی متر با شعاع خم ۰٫۵ میلی متر به فاصله ی ۳۰۷ میلی متر از ابتدای محصول در راستای طولی، و برای ضخامت ۲ میلی متر با شعاع خم ۰٫۵ میلی متر پارگی به فاصله ی ۳۲۱ میلی متر از ابتدای محصول در راستای طولی در محل ناحیه ی انتقال مشاهده شد. این دو محصول در شکل ۱۲ نشان داده شده اند.

۲.۶. پیش بینی پارگی توسط معیارهای شکست نرم

برای پیش بینی پارگی در فرایندهای شکل دهی ورق، 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 محاسبه پذیر بودند، برای پیش بینی پدیده ی پارگی در این فرایند انتخاب شدند. ابتدا معیارهای شکست نرم به وسیله ی آزمون کشش ساده کالیبره شدند که مقادیر بحرانی شکست D_{crit} آنها مطابق جدول ۴ به دست آمد.

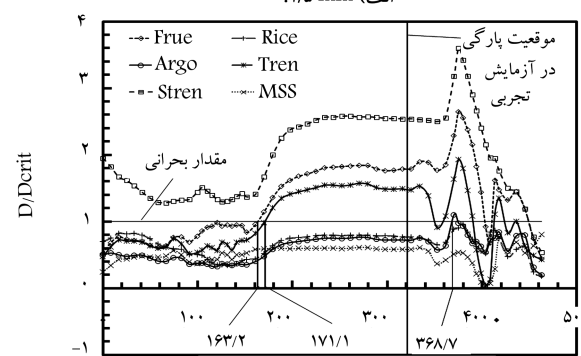
سپس با شبیه سازی فرایند در نرم افزار اجزای محدود آباکوس و استفاده از نتایج آن، مقادیر متغیر شکست D برای همه ی معیارهای مورد بررسی محاسبه شد. طبق



الف) ۱/۵ mm



ب) ۲ mm



شکل ۱۳. پیش‌بینی معیارهای شکست نرم برای شعاع خم ۰/۵ mm، زاویه‌ی خم ۶۰ درجه و ضخامت ورق ۱/۵ و ۲ میلی‌متر.

شکل ۱۲. نمایی از محل پارگی محصول با ضخامت ورق ۱/۵ و ۲ میلی‌متر.

جدول ۴. مقادیر بحرانی شکست به‌دست آمده از آزمون کشش ساده.

معیار شکست نرم	Frue	Rice	Argo	Tren	Stren	MSS
مقادیر بحرانی شکست	۶۹/۳۷	۰/۳۱	۹۲/۴۹	۳۴/۶۷	۰/۱۹	۱۸۲/۵۶

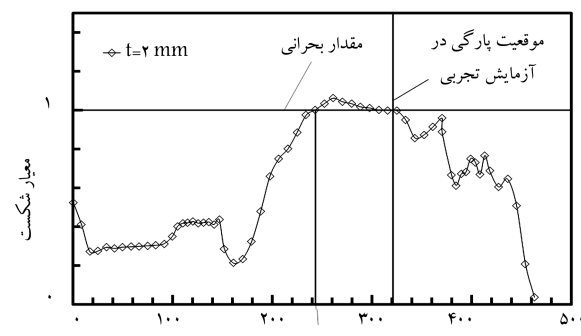
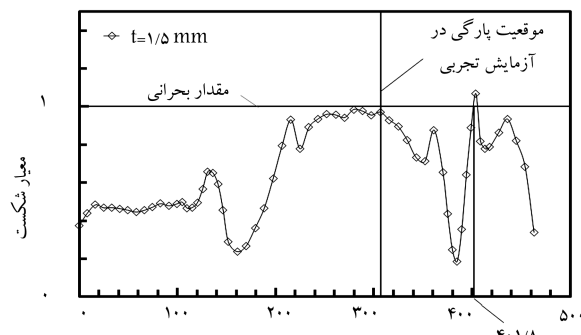
رابطه‌ی ۱۰ شروع شکست زمانی رخ می‌دهد که نسبت مقدار متغیر شکست به مقدار بحرانی شکست به عدد ۱ برسد. با توجه به نتایج معیارهای شکست نرم همانند نتایج تجربی، در زوایای خم ۲۵ و ۴۵ درجه در هیچ‌یک از حالت‌ها پدیده‌ی پارگی رخ نداده است و فقط در زاویه‌ی خم ۶۰ درجه برای ضخامت‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌متر با شعاع خم ۰/۵ میلی‌متر پارگی رخ داده است. با محاسبه‌ی مقادیر D/D_{crit} برای همه‌ی معیارها در دو حالت پارگی، نتایج به‌صورت شکل ۱۳ خواهد بود.

۳.۶. پیش‌بینی پارگی توسط معیار FLD

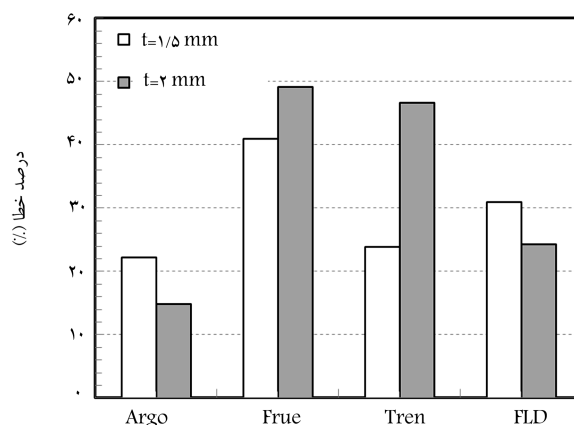
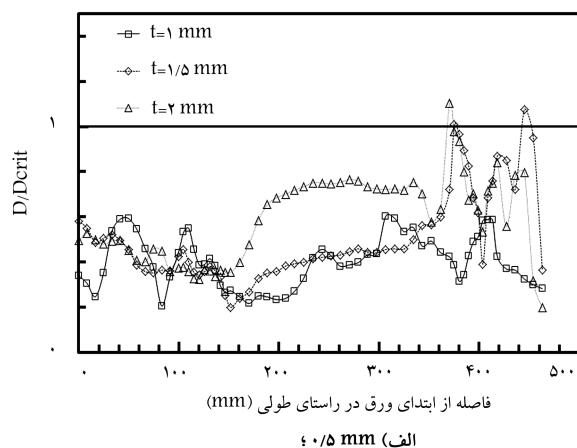
با استفاده از مقادیر حد شکل‌دهی تجربی فرایند شبیه‌سازی شد و با استفاده از نتایج شبیه‌سازی به پیش‌بینی پدیده‌ی پارگی با استفاده از معیار FLD پرداخته شد. در نرم‌افزار آباکوس اگر مقدار FLDCRT به عدد ۱ برسد شکست رخ می‌دهد. با توجه به نتایج معیار FLD، همانند نتایج معیارهای شکست نرم و تجربی، پدیده‌ی پارگی فقط در زاویه‌ی خم ۶۰ درجه برای ضخامت‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌متر با شعاع خم ۰/۵ میلی‌متر رخ داده است شکل ۱۴ نتایج پیش‌بینی معیار FLD را در دو حالت پارگی نشان می‌دهد.

۴.۶. انتخاب مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پارگی

شاخص مورد استفاده برای انتخاب مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، محل وقوع پارگی در محصول تولیدشده است. محل پارگی در آزمایش تجربی با محل پارگی پیش‌بینی‌شده توسط معیارهای شکست نرم و معیار FLD به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقایسه شد. معیارهای رایس و تریسی و بیشینه‌ی تنش‌برشی در هیچ‌کدام از حالت‌های بررسی‌شده، پارگی در محصول را پیش‌بینی نکردند. همچنین پیش‌بینی معیار کرنش خمیری معادل نشان‌دهنده‌ی پارگی در تمام طول محصول است که بیان‌کننده‌ی عدم توانایی پیش‌بینی درست این سه معیار شکست نرم است.



شکل ۱۴. نتایج پیش‌بینی معیار FLD برای ضخامت ورق ۱/۵ و ۲ میلی‌متر.



شکل ۱۵. درصد خطای پیش‌بینی معیارهای شکست نرم و معیار FLD با آزمایش تجربی.

با توجه به اینکه پیش‌بینی پارگی توسط معیار آرگون به پارگی در آزمایش تجربی نزدیک‌تر است و میزان درصد خطای پیش‌بینی این معیار با آزمایش تجربی در مقایسه با سایر معیارها مطابق شکل ۱۵ دارای کمترین مقدار است، از بین سه معیار شکست نرم باقی‌مانده و معیار FLD معیار شکست نرم آرگون مناسب‌ترین معیار برای پیش‌بینی پدیده پارگی در این فرایند انتخاب شد.

۵.۶. بررسی اثر ضخامت ورق روی پدیده پارگی

شکل ۱۶ تأثیر ضخامت ورق بر پارگی به ترتیب برای شعاع‌های خم ۲/۵، ۵/۵ و ۵ میلی‌متر را طبق معیار منتخب آرگون نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۶ الف در ضخامت‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌متر برای شعاع خم ۵/۵ میلی‌متر و زاویه خم ۶۰ درجه، با توجه به اینکه مقدار D/D_{crit} به عدد ۱ می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.

۶.۶. بررسی اثر شعاع خم روی پدیده پارگی

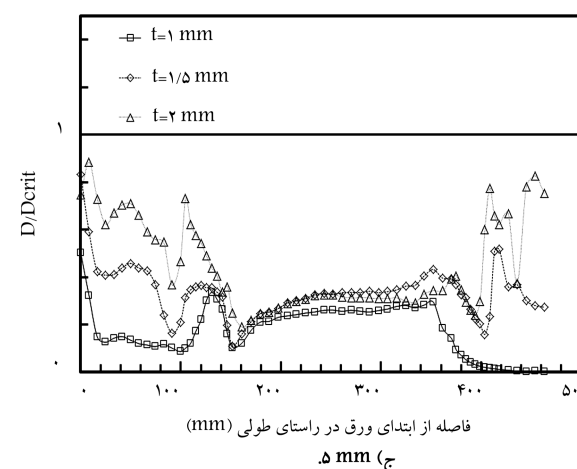
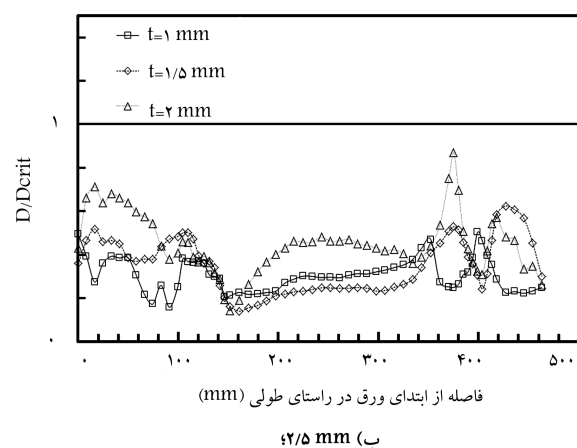
شکل ۱۷ تأثیر شعاع خم بر پارگی را به ترتیب برای ورق‌های با ضخامت‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر طبق معیار منتخب آرگون نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۷ ب و ج در شعاع خم ۵/۵ میلی‌متر برای ضخامت‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌متر و زاویه خم ۶۰ درجه، با توجه به اینکه مقدار D/D_{crit} به عدد ۱ می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.

۷.۶. بررسی اثر زاویه خم روی پدیده پارگی

با توجه به اینکه در هیچ‌کدام از آزمایش‌های تجربی با زوایای خم ۲۵ و ۴۵ درجه پدیده پارگی مشاهده نشد، اثر زاویه خم روی پدیده پارگی در سه حالت بحرانی زوایای خم (ضخامت ۲ میلی‌متر و شعاع خم ۵/۵ میلی‌متر) مطابق شکل ۱۸ طبق معیار منتخب آرگون بررسی شد. با توجه به اینکه مقدار D/D_{crit} در زاویه خم ۶۰ درجه به عدد ۱ می‌رسد، شکست رخ می‌دهد.

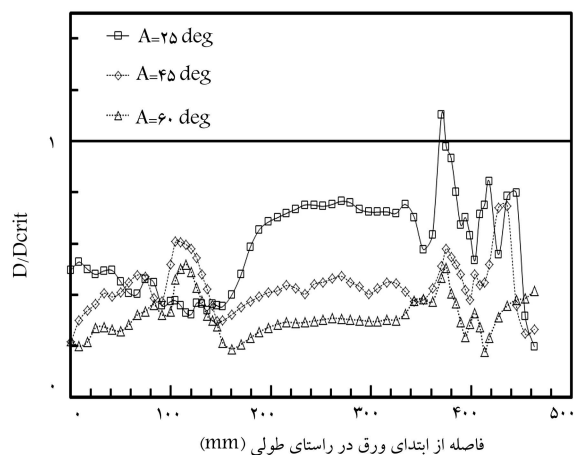
۷. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین عیوب فرایندهای شکل‌دهی ورقی، پدیده پارگی است. در این پژوهش به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مقطع



شکل ۱۶. اثر ضخامت ورق بر پارگی برای شعاع‌های خم ۲/۵، ۵/۵ و ۵ میلی‌متر.

کانالی‌شکل با استفاده از معیارهای شکست نرم و معیار FLD پرداخته شد. به این منظور شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. با انتخاب شش معیار شکست نرم که مقادیر بحرانی شکست آن‌ها از طریق آزمون کشش ساده محاسبه‌پذیر بود و معیار FLD، به بررسی عیب پارگی در فرایند پرداخته شد. همچنین تأثیر پارامترهای ضخامت ورق، شعاع، و زاویه خم روی عیب پارگی بررسی شد. سپس آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی انجام گرفت. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، صحت‌سنجی نتایج عددی انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:



شکل ۱۸. تأثیر زاویه ی خم بر پارگی برای شعاع خم ۰/۵ mm و ضخامت ورق ۲ mm.

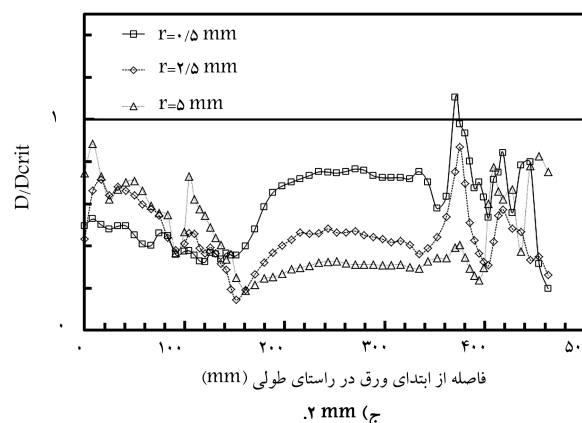
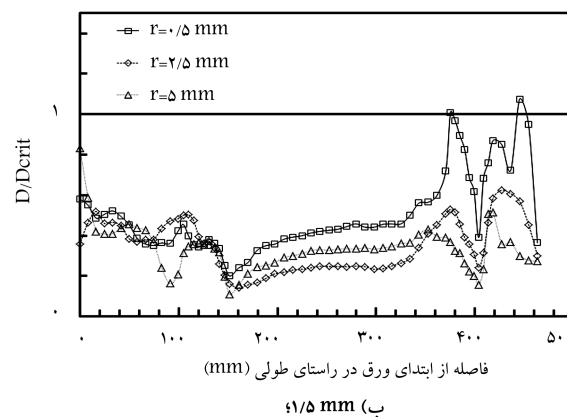
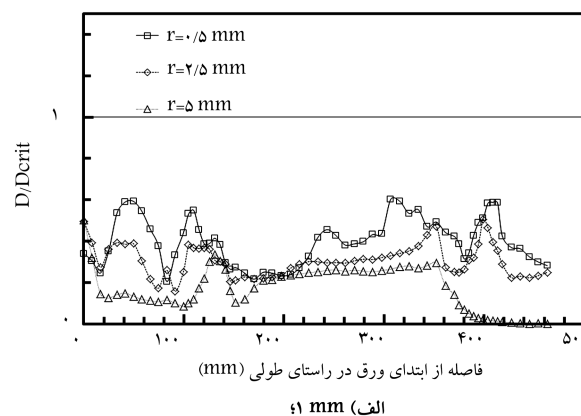
۱. مطابق آزمایش های تجربی انجام شده طبق جدول ۲، در زوایای خم ۲۵ و ۴۵ درجه تمام محصولات سالم بود و پدیده ی پارگی مشاهده نشد. پدیده ی پارگی فقط در زاویه ی خم ۶۰ درجه برای دو حالت، ضخامت ۱/۵ میلی متر با شعاع خم ۰/۵ میلی متر به فاصله ی ۳۰۷ میلی متر از ابتدای محصول در راستای طولی، و برای ضخامت ۲ میلی متر با شعاع خم ۰/۵ میلی متر پارگی به فاصله ی ۳۲۱ میلی متر از ابتدای محصول در راستای طولی در محل ناحیه ی انتقال مشاهده شد.

۲. محل بروز پارگی در فرایند مناسب ترین معیار برای پیش بینی پدیده ی پارگی در فرایند انتخاب شد. با مقایسه ی محل بروز پارگی در آزمایش های تجربی و پیش بینی آن توسط معیارهای شکست نرم و معیار FLD، کمترین درصد خطا مربوط به معیار آرگون بود که مقادیر آن به ترتیب ۲۲/۲ و ۱۴/۸ درصد برای دو محصول با ضخامت ۱/۵ و ۲ است. بنابراین، معیار شکست نرم آرگون مناسب ترین معیار برای پیش بینی پدیده ی پارگی در این فرایند انتخاب شد.

۳. بعد از انتخاب معیار شکست نرم آرگون به عنوان مناسب ترین معیار، اثر پارامترهای ضخامت ورق، شعاع، و زاویه ی خم روی عیب پارگی با استفاده از این معیار بررسی شد که نتایج آن به شرح زیر است:

۱.۳. با افزایش ضخامت ورق و زاویه ی خم احتمال بروز عیب پارگی در محصول افزایش می یابد.

۲.۳. با افزایش شعاع خم احتمال بروز عیب پارگی در محصول کاهش می یابد.



شکل ۱۷. تأثیر شعاع خم بر پارگی برای ضخامت های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی متر.

پانویس ها

1. Ayada
2. Marc mentat
3. copra
4. cockroft-latham
5. equivalent strain (Stren)

6. Argon (Argo)
7. Freudenthal (Frue)
8. Tresca energy (Tren)
9. maximum shear stress (MSS)

منابع (References)

1. Dadgar Asl, Y., Tajdari, M., Moslemi Naeini, H., Davoodi, B., Azizi Tafti, R. and Panahizadeh, V.R. "Prediction of required torque in cold roll forming process of a channel sections using artificial neural networks", *Modares Mechanical Engineering*, **15**(7), pp. 209-214 (in Persian) (2015).
2. Groche, P., von Breitenbach, G., Jöckel, M. and Zettler, A. "New tooling concepts for future roll forming applications", *4th International Conference on Industrial Tools (ITIC)*, pp. 121-126 (2003).
3. Groche, P., Zettler, A., Berner, S. and Schneider, G. "Development and verification of one-step-model for the design of flexible roll formed parts", *International Journal of Material Forming*, **4**, pp. 371-377 (2011).
4. Larrañaga, J., Berner, S., Galdos, L. and Groche, P. "Geometrical accuracy improvement in flexible roll forming lines", *AIP Conference Proceedings*, **1315**, pp. 557-562 (2011).
5. Panahizadeh Rahimlu, V. "numerical and experimental investigation of spring back and Prediction of fracture on cold roll forming of channel section", Ph.D. thesis, Tariat Modares University (in persian) (2014).
6. Yanzhi, G., Qiang, Li. and Yan, Y. "Fracture finite element analysis for roll forming of U- section parts of TRIP 600 steel", *Applied Mechanics and Materials*, **249-250**, pp. 874-880 (2013).
7. Ona, H., Shou, I. and Hoshi, K. "On strain distributions in the formation of flexible channel section development of flexible cold roll forming machine", *Advanced Materials Research*, **576**, pp. 137-140 (2012).
8. Abee, A., Berrner, S. and Sedlmaier, A. "Accuracy improvement of roll formed profile with variable cross section", *Proceeding of 9th International Conference of Plasticity (ICTP)*, Gyeongju, Korea (2008).
9. Gulceken, E., Abeé, A., Sedlmaier, A. and Livatyali, H. "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 (21-23 Jun 2007).
10. Groche, P., Zettler, A. and Berner, S. "Development of a one-step-model for the design of flexible roll-formed parts", *The 9th International Conference on Material Forming*, Glasgow, United Kingdom (26-28 April 2006).
11. Kasaei, M.M., Moslemi Naeini, H., Abbaszadeh, B., Mohammadi, M., Ghodsi, M., Kiuchi, M., Zolghadr, R., Liaghat, G., Azizi Tafti, R. and Salmani Tehrani, M. "Flange wrinkling in flexible roll forming process", *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014*, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan (19-24 October 2014).
12. Kasaei, M.M., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G., Silva, C., Silva, M. and and Martins, P. "Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming", *Journal of Procedia Engineering Design*, **81**, pp. 245-250 (2015).
13. Mohammadi, M., Moslemi Naeini, H., Kasaei, M., Salmani Tehrani, M. and Abbas Zadeh, B. "Investigation of web warping of profiles with changing cross section in flexible roll forming process", *Modares Mechanical Engineering*, **14**(6), pp. 72-80 (in Persian) (2014).
14. Hana, H.N. and Kimb, K.H. "A ductile fracture criterion in sheet metal forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, **142**, pp. 231-238 (2003).
15. Shenga, H.L., Yuyingb, Y., Zhongqib, Y., Zhenzhongc, S. and Yongzhib W. "The application of a ductile fracture criterion to the prediction of the forming limit of sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, pp. 5443-5447 (2009).
16. Wua, Z., Li, S., Zhang, W. and Wanga, W. "Ductile fracture simulation of hydropiercing process based on various criteria in 3D modeling", *Materials and Design*, **31**, pp. 3661-3671 (2010).
17. Linardona, C., Favierb, D., Chagnonb, G. and Grueza, B. "A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria", *Journal of Materials Processing Technology*, **214**, pp. 347-357 (2013).
18. Rice, J.R. and Tracey, D.M. "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", *J. Mech. Phys. Solids*, **17**, pp. 201-217 (1969).
19. Deilami Azodi, H. "Theoretical and experimental investigation on the effects of working conditions in hydromechanical deep drawing process", Ph.D. thesis, Tariat Modares University (in persian) (2008).