



بررسی اثر مسیر کرنش غیرخطی بر روی خواص مکانیکی ورق فلزی به منظور پیش‌بینی فشار پارگی رایپر دیسک کامپوزیتی

مرتضی محبی¹، ولی اله پناهی زاده^{2*}، محمد حسین پور³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16785، v.panahizadeh@sru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق برای بررسی اثر شکل‌دهی در حالت تنش دو محوری بر روی خواص مکانیکی ورق در حالت کشش تک‌محوری، چند دیسک تخت فلزی در فرایند هیدروفرمینگ تحت تنش دو محوری متفاوت ناشی از فشار سیال متفاوت شکل‌دهی شدند. سپس بر روی آن‌ها شیارهایی ایجاد شد تا نوع بارگذاری از حالت تنش دو محوری به کشش تک‌محوری تغییر کند. این نمونه‌ها مجدداً تحت فشار سیال قرار گرفتند تا میزان تحمل آن‌ها در برابر فشار سیال در حالت تنش‌های تک‌محوری تعیین شود. از نتایج این تحقیق می‌توان فشار پارگی رایپر دیسک کامپوزیت را در هر اندازه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی عددی با خطای حدود 8% پیش‌بینی کرد. رایپر دیسک وسیله‌ای است که با بالا رفتن فشار سیال عمل می‌کند و مانع از آسیب‌های ناشی از فشار بیش از اندازه به تجهیزات می‌شود. در رایپر دیسک کامپوزیت مسیر کرنش غیرخطی اتفاق می‌افتد. در صورتی که نوع بارگذاری در زمان شکل‌دهی ورق تغییر کند برای مثال ورق تحت تنش دو محوری تغییر شکل دهد و سپس تحت کشش تک‌محوری قرار بگیرد، بیشترین کرنش و نیروی قابل تحمل ورق تغییر خواهد کرد. مقایسه‌ی فشار پارگی نمونه‌های آنیل شده تحت خلأ با نمونه‌های مشابه آنیل نشده بعد از کارسختی ناشی از تنش دو محوره، امکان افزایش فشار پارگی بیشتر از 64% را متناسب با میزان کارسختی نشان می‌دهد. همچنین در این مقاله با استفاده از محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی، برابری میزان کرنش ناشی از تنش دو محوره در نسبت ارتفاع به قطر شکل‌دهی ($\frac{h}{d}$) یکسان، اثبات شد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 فروردین 1400
داوری اولیه: 18 اردیبهشت 1400
پذیرش: 22 خرداد 1400

کلیدواژگان:

تنش دو محوری
مسیر کرنش غیرخطی
رایپر دیسک
شبیه‌سازی عددی و تحلیلی

Investigating the effect of nonlinear strain path on the mechanical properties of sheet metal to predict burst pressure of composite Rupture disc

Morteza Mohebbi, Valiollah Panahizadeh*, Mohammad Hoseinpour Gollo

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16785-163 Tehran, Iran, v.panahizadeh@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 11 April 2021
First Decision: 8 May 2021
Accepted: 12 June 2021

Keywords:

Nonlinear strain path
Predicting burst pressure
Composite Rupture disc
Numerical simulation

Abstract

In this paper, to investigate the effect of strain caused by biaxial stress on the mechanical properties of the sheet in a uniaxial tensile state, several metallic blank discs were bulge formed in the hydroforming process under different biaxial stress due to different fluid pressures. Then, the slotting process was done on bulge formed sheet to change the loading from biaxial stress to uniaxial tension. Again, these specimens were subjected to fluid pressure to determine their resistance to fluid pressure at uniaxial stresses. By using the results of this paper, the burst pressure of composite Rupture discs can be predicted in any size by numerical simulation with an error of about 8%. A Rupture disc is a safety device that burst as the fluid pressure increase and prevents damages due to excessive pressure on the equipment. In a composite Rupture disc, a nonlinear strain path occurs. If the type of load changes during sheet metal forming, e.g., the sheet forms under biaxial stress and then under uniaxial tension, the maximum failure strain and force will change. The burst pressure comparison of vacuum annealed specimens with similar non-annealed discs after work-hardening shows the possibility of increasing burst pressure more than 64% in proportion to created strain due to biaxial stress. Also, in this paper, by using analytical and numerical simulations, the equality of strain due to biaxial stress in the equal ratio of forming height to diameter (h/d) proved to be the same.

1- مقدمه

بارگذاری یا به عبارتی تغییر مسیر کرنش باعث می‌شود کرنش نهایی شکست تغییر یابد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای پیش‌بینی زمان شکست، تعیین حد شکل‌دهی بر اساس نمودار

بیشتر فرایندهای صنعتی شکل‌دهی ورق چندمرحله‌ای هستند و مسیر کرنش خطی ندارند. بر اساس نتایج کار محققان تغییر نوع

Please cite this article using:

M. Mohebbi, V. Panahizadeh, M. Hoseinpour Gollo, Investigating the effect of nonlinear strain path on the mechanical properties of sheet metal to predict burst pressure of composite Rupture disc, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 1- 11, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تعیین شده می‌ترکد و سیال سیستم را با دبی زیاد تخلیه می‌کند. این قطعه در زمان شکل‌دهی تحت تنش دو محوری قرار می‌گیرد و در زمان استفاده به دلیل ایجاد شیار بر روی آن تحت تنش کششی تک‌محوره قرار می‌گیرد و بنابراین به دلیل تغییر نوع بارگذاری مسیر کرنش غیرخطی دارد. برای جلوگیری از نشی سیال از شیارهایی که برای تنظیم فشار راپچردیسک ایجاد شده است، از یک لایه‌ی دیگر بدون شیار مانند فلئوروپلیمرها استفاده می‌شود. بنابراین تک‌لایه نیستند و به همین دلیل به آن‌ها راپچردیسک کامپوزیتی می‌گویند. در حال حاضر راپچردیسک‌ها در سایزهای مختلف در صنایع مختلفی نظیر پتروشیمی، داروسازی و صنایع غذایی استفاده می‌شوند. همچنین امروزه کاربردهای گسترده‌ای در صنایع هسته‌ای، فضایی، دفاعی، خودروسازی و راه‌آهن،¹ HVAC، سیستم‌های انرژی و قدرت و آزمایشگاه‌ها دارند [9]. لیک و انگلیس [10] با آزمایش‌های تجربی بر روی راپچردیسک‌های بدون شیار به این نتیجه رسیدند که اگر فشار پارگی p نامیده شود و قطر تحت فشار d باشد برای مواد مختلف با ضخامت t نسبت pd/t متناسب با ضریبی از استحکام نهایی ماده (در تست کشش) است. برای مثال این ضریب برای آلومینیوم $3/6$ ، برای نقره $4/2$ برای نیکل $3/3$ و برای مس نیز $3/3$ است. از این رابطه در پیش‌بینی فشار راپچردیسک کامپوزیتی نمی‌توان استفاده کرد. مورتی و راثو [11] راپچردیسک بدون شیار را شبیه‌سازی کردند و رابطه‌ی بین فشار و تغییر شکل ورق را به دست آوردند. هونگبو و همکاران [12] اثر دما را بر روی میزان کاهش فشار پارگی راپچردیسک بدون شیار با استفاده از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی بررسی کردند. جیونگ و همکاران [13] به تحقیق بر روی ایجاد شیار غیر راه به در بر روی راپچردیسک² با استفاده از سنبه پرداختند. این شیارها به صورت حرف X بر روی راپچردیسک ایجاد می‌شوند تا راپچردیسک‌ها الگوی باز شدن منظمی داشته باشند و از پرتاب شدن آن جلوگیری شود. آن‌ها بعد از مدل‌سازی یک ورق تخت، فرآیند ایجاد خطوط تضعیف کننده را در نرم افزار انسیس شبیه‌سازی کردند و نیروی مورد نیاز سنبه برای شیار را به دست آوردند. جیونگ و همکاران [14] یک ورق شکل‌دهی شده که روی آن شیار غیر راه به در ایجاد شده است را مدل‌سازی کردند و تأثیر عمق شیار را بر روی فشار پارگی با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی کردند. اما آن‌ها اثر کرنش پلاستیک موجود در ورق بعد از شکل‌دهی را در

FLD است. بر اساس این نمودار، حد شکل‌دهی برای هر مسیر بارگذاری تعیین می‌شود. محدودیت این روش این است که اگر ورق تحت بارگذاری با مسیر غیرخطی قرار بگیرد توانایی تخمین حد شکل‌دهی را ندارد [1، 2]. نمودار حد شکل‌دهی ورق‌ها بر مبنای تنش‌ها FLSD نام دارد. وو و همکاران [3] بر مبنای مسیرهای بارگذاری متفاوت که ترکیب دو مسیر کرنش خطی است و بر اساس شبیه‌سازی‌های کریستال پلاستیسیته به این نتیجه رسیدند که نمودار حد شکل‌دهی FLD نسبت به مسیر کرنش بسیار حساس است اما حد شکل‌دهی بر مبنای تنش FLSD به خصوص در پیش کرنش‌های کم تقریباً مستقل از مسیر است. در صورتی که میزان پیش کرنش تقریباً به اندازه‌ی حد شکل‌دهی شود، حد تنش با میزان نتیجه‌ی FLSD به دست آمده از مسیر کرنش خطی تفاوت زیادی دارد. توماس و جیونگ [4] برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی از کرنش پلاستیک معادل به عنوان کرنش آسیب برای هر مسیر کرنش خطی و غیر خطی استفاده کردند. آن‌ها مسیرها را با توجه به زاویه‌ی آن‌ها در نمودار FLD در یک مختصات قطبی رسم کردند و به هر مسیر کرنش یک کرنش معادل پلاستیک آسیب اختصاص دادند. نام معیار استفاده شده PEPS نام گرفت. جوچم و همکاران [5] برای ایجاد مسیرهای غیر خطی کرنش و بررسی اثر آن از کشش ورق صلیبی شکل به میزان متفاوت در جهت‌های مختلف استفاده کردند. هونگزو و همکاران [6] برای ایجاد مسیر کرنش غیر خطی و پیش‌بینی حد شکل‌دهی بعد از عملیات کشش، در همان قالب از یک پانچ کروی برای کشش در جهت معکوس استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند اصطکاک بین ورق و قالب تأثیر زیادی بر روی نتایج دارد و در نتیجه از دو لایه‌ی تفلون نازک بین قالب و ورق برای کاهش اصطکاک استفاده کردند. آن‌ها یک روش تحلیلی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی ارائه کردند و با نتایج تست تجربی مقایسه کردند. زوبین و همکاران [7] در سال 2020 برای ایجاد مسیرهای مختلف کرنش و بررسی اثر آن بر روی کرنش شکست، شکل قالب تست بالچ را به صورت مرحله‌ای تغییر دادند تا مسیر کرنش با اعمال فشار سیال تغییر کند. کولین و درک [8] برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی در مسیرهای غیر خطی از مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند.

یکی از کاربردهای بررسی اثر مسیر کرنش‌های غیرخطی پیش‌بینی فشار پارگی و شناخت رفتار راپچردیسک کامپوزیت است. راپچردیسک وسیله‌ای برای محافظت از تجهیزات و افراد در برابر فشارهای بیش از اندازه است. راپچردیسک در فشار

¹ Heating, ventilation, and air conditioning² Cross-scored Rupture Disc

استفاده از شبیه‌سازی، رابطه‌ای بین میزان کرنش ناشی از تنش دو محوری شکل‌دهی بالچ در هر قطر با بیشترین کرنش قابل تحمل در کشش تک‌محوره بعد از ایجاد شیار ارائه شد. با استفاده از این رابطه می‌توان فشار پارگی راچر دیسک کامپوزیت را با هر میزان شکل‌دهی تخمین زد و با استفاده از اثبات برابری مسیر کرنش در نسبت ارتفاع به قطر شکل‌دهی یا همان $\frac{h}{d}$ برابر می‌توان فشار پارگی را در قطرهای دیگر نیز با دقت خوبی پیش‌بینی کرد.

2- روابط تحلیلی

برای تولید راچر دیسک کامپوزیت در ابتدا دیسک فلزی مشابه تست بالچ شکل‌دهی می‌شود و سپس بر روی آن شیارها با استفاده از لیزر ایجاد می‌شوند. سپس یک لایه‌ی غیرفلزی برای آب‌بندی شیارها در زیر لایه‌ی فلزی قرار داده می‌شود. این لایه‌ی غیرفلزی، مقاوم در برابر خوردگی است و در فشار پارگی تأثیری ندارد. برای ایجاد تنش دو محوری در ورق می‌توان از تست بالچ استفاده کرد. این تست برای بررسی خواص مکانیکی ورق تحت تنش دو محوری استفاده می‌شود. در این حالت ورق کرنش‌هایی بیشتر از آنچه در تست کشش اتفاق می‌افتد تحمل می‌کند [16]. شماتیک این تست برای ایجاد تنش دو محوری در شکل 1 نشان داده شده است.

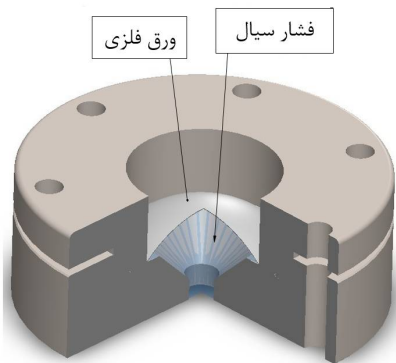


Fig. 1 Schematic of bulge test or bulge forming to create biaxial stress
شکل 1 شماتیک تست بالچ یا شکل‌دهی بالچ برای ایجاد تنش دو محوری

میزان کرنش معادل پلاستیک بر اساس معیار هیل 48 به صورت رابطه (1) خواهد بود [17]:

$$d\bar{\varepsilon}^p = \left(\frac{1}{FH + FG + GH} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(F + H)(d\varepsilon_{11}^p)^2 + 2Hd\varepsilon_{11}^p d\varepsilon_{22}^p + (G + H)(d\varepsilon_{22}^p)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

شبیه‌سازی عددی در نظر نگرفته بودند. ونگ و همکاران [15] به بهینه‌سازی تجربی و شبیه‌سازی شکل‌دهی راچر دیسک‌های بدون شیار به روش از هیدروفورمینگ پرداختند. در این تحقیق آن‌ها به بررسی پارامترهای مؤثر بر دقت ابعادی راچر دیسک بدون شیار شامل ضریب اصطکاک، نرخ بارگذاری و میزان فشار هیدرولیک پرداختند. بر اساس نتایج کار آن‌ها با تغییر ضریب اصطکاک و نرخ بارگذاری می‌توان راچر دیسک‌های با دقت بالا ساخت.

در تحقی حاضر برای ایجاد مسیرهای کرنشی غیرخطی به‌جای تغییر شکل قالب و یا استفاده از روش‌هایی که ضریب اصطکاک در نتایج تأثیر می‌گذارد، از شکل‌دهی با فشار سیال استفاده شد. برای این منظور مشابه تست بالچ دیسک‌های فلزی با فشار متفاوت سیال شکل‌دهی شدند و سپس برای بررسی اثر مسیر کرنش غیرخطی بر روی ورق‌ها شیارهای با الگوی یکسان ایجاد شد و یک لایه‌ی نازک غیرفلزی برای آب‌بندی شیارها در زیر آن‌ها قرار داده شد. سپس دیسک‌ها مجدداً تحت فشار سیال قرار گرفتند. نمونه‌هایی که بیشتر شکل‌دهی شده بودند، بعد از ایجاد شیار، فشار پارگی بیشتری داشتند. برای اثبات ارتباط این افزایش فشار پارگی با کارسختی ناشی از شکل‌دهی، نمونه‌هایی با میزان شکل‌دهی و الگوی شیار مشابه آماده شد. با این تفاوت که قبل از آزمون تعیین فشار پارگی در خلأ عملیات حرارتی آنیل شدند تا با کاهش کرنش سختی ناشی از تنش دو محوری متفاوت، فشار پارگی مجدداً بررسی شود. با حذف کارسختی با استفاده از عملیات حرارتی فشار پارگی نمونه‌ها با میزان شکل‌دهی غیر یکسان، تقریباً برابر شدند. شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که بعد از شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی بر روی همان مدل شیارها با غیرفعال کردن المان‌های الگوی شیار، ایجاد شدند و سپس مجدداً تحت فشار سیال قرار گرفتند. با این عمل اثر کرنش ناشی از تنش دو محوری ایجاد شده قبل از ایجاد شیار، در شبیه‌سازی عددی آزمایش پارگی در نظر گرفته شد. با کالیبره کردن نتایج تست تجربی و شبیه‌سازی، کرنش تقریبی پلاستیک معادل در زمان پارگی با استفاده از شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. برای بررسی بیشترین کرنش ناشی از تنش دو محوری که در مرکز دیسک در زمان شکل‌دهی و قبل از ایجاد شیار به وجود می‌آید، روابط تحلیلی توسعه داده شدند. بر اساس این رابطه قبل از شروع تست فشار پارگی، کرنش در مرکز دیسک با هر نسبت ارتفاع به قطر شکل‌دهی $\left(\frac{h}{d}\right)$ برابر، یکسان است. این نتیجه‌ی تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی شکل‌دهی بالچ در هر قطر مطابقت دارد. درنهایت با

دقت بالاتری نسبت به سایر روابط دارد. مرنندی و همکاران [19] از این رابطه برای بررسی رابطه بین ارتفاع و فشار در تست بالج ورق‌های دو لایه استفاده کردند. در این رابطه هرچه ارتفاع بالج فرمینگ بیشتر می‌شود ضخامت قسمت مرکزی کاهش می‌یابد:

$$t = t_0 \left[\frac{\left(\frac{r}{\rho}\right)}{\sin^{-1}\left(\frac{r}{\rho}\right)} \right]^2 \quad (7)$$

در این رابطه t_0 ضخامت اولیه‌ی ورق است. هرچه ارتفاع بالج بالاتر می‌رود، میزان ρ کمتر می‌شود و هرچه قطر ناحیه‌ی بالج در یک ارتفاع h ثابت بیشتر باشد، میزان ρ بیشتر خواهد شد. این رابطه مستقل از ضخامت است. در نتیجه میزان کرنش به وجود آمده در هر ارتفاع قبل از ایجاد شیار در راپچردیسک بر اساس رابطه‌ی (4) و (6) و (7) برابر است با:

$$\bar{\varepsilon} = -\ln \left[\frac{\left(\frac{r}{\rho}\right)}{\sin^{-1}\left(\frac{r}{\rho}\right)} \right]^2 \quad (8)$$

بر اساس روابط هندسی شکل 2 می‌توان نوشت:

$$(\rho - h)^2 + r^2 = \rho^2 \quad (9)$$

در نتیجه:

$$\rho = \frac{h^2 + r^2}{2h} \quad (10)$$

اگر $d = 2r$ برابر با قطر قسمت شکل‌دهی شده باشد، نسبت $\frac{r}{\rho}$ برابر است با:

$$\frac{r}{\rho} = \frac{r}{\frac{h^2 + r^2}{2h}} = \frac{2\left(\frac{h}{r}\right)}{\left(\frac{h}{r}\right)^2 + 1} = \frac{4\left(\frac{h}{d}\right)}{4\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1} \quad (11)$$

بر اساس روابط (8) و (11) کرنش به وجود آمده در مرکز نمونه در هر نسبت ارتفاع به قطر $\left(\frac{h}{d}\right)$ برابر است با:

$$\bar{\varepsilon} = -\ln \left[\frac{\left(\frac{4\left(\frac{h}{d}\right)}{4\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}\right)}{\sin^{-1}\left(\frac{4\left(\frac{h}{d}\right)}{4\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}\right)} \right]^2 \quad (12)$$

بنابراین در صورتی که نسبت $\frac{h}{d}$ در دو ورق با قطر بالج فرمینگ متفاوت، یکسان باشد، میزان کرنش ناشی از تنش دو محوری به وجود آمده در آن‌ها یکسان خواهد بود. در ادامه از این نتیجه برای معیاری به منظور پیش‌بینی فشار پارگی راپچردیسک کامپوزیت با هر میزان شکل‌دهی و در هر قطری استفاده خواهد شد. در زمان ساخت راپچردیسک، ورق به اندازه‌ی کافی کرنش سخت می‌شود تا در زمان به کارگیری، راپچردیسک وارد محیط پلاستیک نشود. سپس بر روی آن

در رابطه (1)، $d\bar{\varepsilon}^p$ نماد میزان کرنش پلاستیک در هر راستا است و H, G, F ، ثابت معیار هیل هستند. زمانی که ماده‌ی ورق همسانگرد باشد، مقدار این ثابت برابر با $0/5$ است و کرنش معادل برابر با معیار کرنش معادل میسر می‌شود. در شکل‌دهی ورق به صورت کروی اگر دو کرنش در راستای ورق ε_φ و ε_θ باشند این دو کرنش برابر هستند و بر اساس قانون ثابت بودن حجم، میزان این کرنش‌ها $\frac{1}{2}$ کرنش در راستای ضخامت ورق (ε_z) هستند. به عبارتی:

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_z = 0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\varphi = -\frac{\varepsilon_z}{2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_z = \ln \frac{t}{t_0} \quad (4)$$

بنابراین از روابط (1)، (3):

$$\bar{\varepsilon} = -\left(\frac{F + G + 4H}{4(FH + FG + GH)}\right)^{1/2} \varepsilon_z \quad (5)$$

از آنجایی که ورق‌های استفاده شده برای تست بالج آنیل هستند و ورق همسانگرد است، ضرایب ثابت برابر با $0/5$ هستند؛ بنابراین:

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_z \quad (6)$$

در نتیجه میزان کرنش معادل ایجاد شده در ورق بعد از بالج شدن با میزان کرنش در جهت ضخامت ورق برابر است. کاهش ضخامت در راستای ورق در سراسر آن یکسان نیست و قسمتی که بیشترین ارتفاع را دارد ضخامت کمتری دارد. این ضخامت در هر ارتفاع متغیر است. ابعاد شکل‌دهی بالج در شکل 2 معرفی شده است.

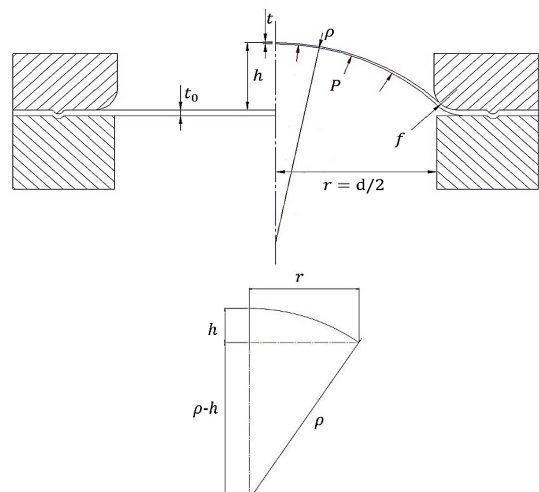


Fig. 2 Dimensions of bulge test parameters

شکل 2 معرفی ابعاد پارامترهای تست بالج

مومر و همکاران [18] روابط ارائه شده برای کاهش ضخامت قسمت مرکزی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند رابطه‌ی (7)

می‌کند. نمونه‌های شیاردار شده مجدداً در معرض فشار هوا قرار گرفتند و فشار پارگی آن‌ها تعیین شد. قالب شکل‌دهی و دستگاه تست فشار و همچنین نمای برش خورده‌ی قالب تست فشار در شکل 3 نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری فشار از سنسور انتقال‌دهنده فشار، گیج فشار و نرم افزار LabVIEW استفاده شد. در دسته‌ی چهارم آزمایش‌ها 4 نمونه بعد از شکل‌دهی و ایجاد شیار در دمای 1050°C در شرایط خلأ آنیل کامل شدند تا اثر کرنش سختی تا حدودی از بین برود و فشار پارگی در این حالت نیز تعیین شود. بعد از تعیین فشار پارگی دسته‌ی چهارم آزمایش‌ها، فشار پارگی آن‌ها با مدل‌های مشابه از دسته‌ی سوم آزمایش‌ها که بعد از ایجاد شیار آنیل نشده بودند مقایسه شد.

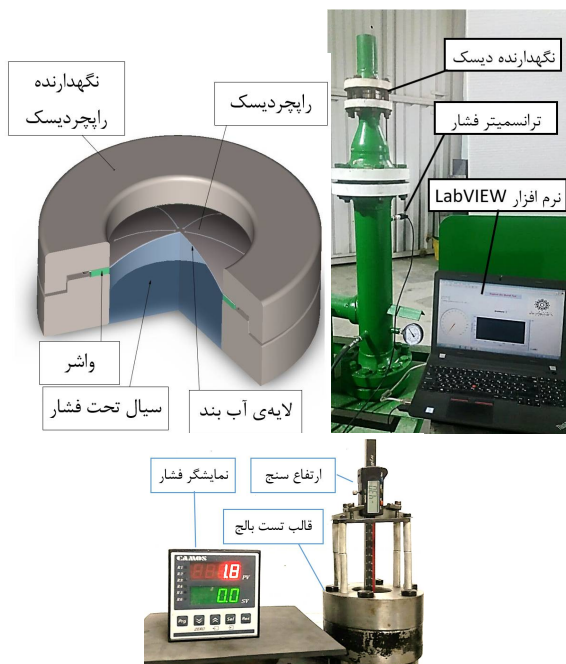


Fig. 3 Bulge forming and Rupture disc test equipment

شکل 3 تجهیزات شکل‌دهی ورق و تست راپچردیسک

هفت نمونه‌ی آماده‌شده از دسته‌ی سوم و چهارم نمونه‌ی آماده شده از دسته‌ی چهارم آزمایش‌ها که در ارتفاع‌های متفاوت شکل‌دهی و سپس با الگوی یکسان شیاردار شده‌اند در تصویر شکل 4- الف نشان داده شده‌اند. در این تصویر ارتفاع شکل‌دهی هر نمونه در کنار آن نوشته شده است. همان‌طور که از تصویر مشخص است از نمونه‌های با ارتفاع شکل‌دهی صفر، 5، 10 و 15 میلی‌متر دو نمونه ساخته شده است. این چهار نمونه تحت خلأ آنیل کامل شدند تا فشار پارگی آن‌ها با حذف کارسختی، با نمونه‌ی مشابه غیر آنیل مقایسه شود. این چهار نمونه که برای دسته‌ی چهارم تست‌ها آماده شده است، در شکل 4- ب نشان داده شده‌اند.

شیارهایی ایجاد می‌شود تا راپچردیسک در فشار مورد نظر باز شود. اندازه و شکل این شیارها و میزان شکل‌دهی قبل از ایجاد شیار، بر روی فشار پارگی راپچردیسک مؤثر است. در این مقاله برای پیش‌بینی تأثیر این شیارها و سایر پارامترها مانند میزان قطر شکل‌دهی در فشار پارگی و در نتیجه کاهش سعی و خطای تولید راپچردیسک کامپوزیت با در نظر گرفتن میزان کرنش سختی ایجاد شده و همچنین میزان نازک شدگی ورق، راپچردیسک شبیه‌سازی عددی می‌شود.

3- آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌های تجربی در این مقاله بر روی ورق AISI 316L با ضخامت 0/3mm انجام شد. به‌طورکلی در این تحقیق، 5 نوع آزمایش تجربی انجام شد. آزمایش اول تست کشش تک محور مطابق استاندارد ASTM-A370 برای استخراج خواص ورق و وارد کردن آن به نرم‌افزار آباکوس است. نوع دوم آزمایش‌ها تست بالچ یا شکل‌دهی بالچ برای بررسی صحت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری کرنش‌ها در شکل‌دهی است. در دسته‌ی سوم آزمایش‌ها 7 دیسک تخت با قطر شکل‌دهی $d=55\text{mm}$ ارتفاع شکل‌دهی بالچ متفاوت داشتند و سپس شیار با الگوی یکسان بر روی آن‌ها ایجاد شد. این نمونه‌ها مطابق استاندارد ISO 4126-2 تست پارگی شدند. در دسته‌ی چهارم آزمایش‌ها 4 نمونه ورق شکل‌دهی شده‌ی شیاردار که مشابه دسته‌ی سوم آزمایش‌ها تولید شده بودند آنیل کامل شدند تا با حذف کارسختی، ارتباط افزایش فشار پارگی با کارسختی شکل‌دهی اثبات شود. نوع پنجم آزمایش‌ها برای اثبات توانایی شبیه‌سازی ارائه شده در پیش‌بینی فشار پارگی در قطرهای دیگر انجام شد. برای این منظور ورق با قطر شکل‌دهی $d=82\text{mm}$ و نسبت شکل‌دهی $\frac{h}{d}=0/17$ شکل‌دهی شد و سپس بر روی آن شیار ایجاد شد و نتیجه‌ی آزمون فشار پارگی با میزان پیش‌بینی شبیه‌سازی مقایسه شد. در دسته‌ی سوم آزمایش‌ها برای بررسی اثر کرنش ناشی از تنش دو محوری، ورق‌ها در ارتفاع‌های مختلف مشابه تست بالچ شکل‌دهی شدند و سپس بر روی آن‌ها شیار با الگوی یکسان ایجاد شد. تنها تفاوت این نمونه‌ها میزان کرنش ایجاد شده در شکل‌دهی بالچ است. برای جلوگیری از نشتی از بین شیارها زیر این لایه‌ی شیاردار یک لایه نازک از پلاستیک PVC قرار داده شد. این لایه با ضخامت 0/15mm بسیار شکل‌پذیر است و در فشار پارگی تأثیر ناچیزی دارد. در ارتفاعی که نمونه‌های دسته‌ی سوم تست‌ها بعد از ایجاد شیار پاره می‌شوند، لایه‌ی PVC به تنهایی در بیشترین حالت 0/5bar فشار تحمل

و $d=82\text{mm}$ با نتایج آزمایش تجربی مقایسه شد. نتیجه‌ی این مقایسه در شکل 6 نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، شبیه‌سازی با دقت خوبی با نتایج تست تجربی بالچ فرمینگ مطابقت دارد. برای به دست آوردن این نمودار به صورت تجربی، از ارتفاع سنج و نمایشگر فشار نشان داده شده در شکل 3 به صورت هم‌زمان در زمان شکل‌دهی فیلم‌برداری شد. مدت‌زمان در نظر گرفته شده برای شکل‌دهی در شبیه‌سازی 6 ثانیه است. در این مدت فشار به صورت خطی تا فشاری که ارتفاع شکل‌دهی برابر با هر نمونه‌ی آزمایش تجربی باشد بالا رفت. میزان اعمال فشار مناسب برای داشتن ارتفاع مورد نظر را می‌توان از نمودار شکل 6 استخراج کرد.

برای غیرفعال کردن المان‌های شیار بعد از شکل‌دهی نیاز است تا این المان‌ها قبل از شکل‌دهی مشخص شده باشند. این الگو قبل از شکل‌دهی به گونه‌ای است که بعد از شکل‌دهی و غیرفعال کردن المان‌ها ابعاد الگوی شیار آزمایش‌های تجربی را داشته باشند. مدل اولیه‌ی آماده شده برای شبیه‌سازی که محل غیرفعال شدن المان‌های شیار و نوع بارگذاری بر روی آن مشخص است در شکل 7- الف نشان داده شده است. در شکل 7- ب نمونه بعد از شکل‌دهی و ایجاد شیار نشان داده شده است. شکل 7- ج الگوی پاره شدن نمونه در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

الگوی شیار ایجاد شده بعد از شکل‌دهی در شکل 5 نشان داده شده است.



Fig. 4 a) Slotted bulge formed discs in different height b) annealed discs

شکل 4 الف) نمونه‌های شیاردار شده بعد از شکل‌دهی در ارتفاع‌های متفاوت ب) نمونه‌های آنیل شده

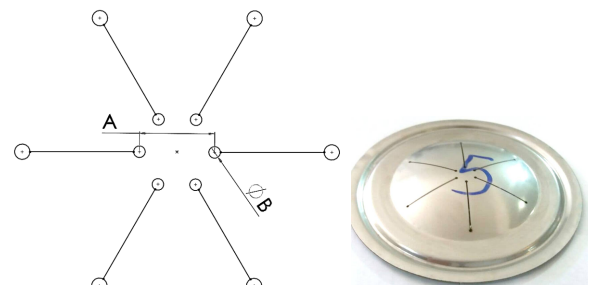


Fig. 5 The slotting pattern on discs

شکل 5 هندسه‌ی شیارهای ایجاد شده بر روی ورق شکل‌دهی شده

4- شبیه‌سازی عددی

برای این که بتوان اثر کرنش ناشی از تنش دو محوری را بر روی رفتار رایپریدیسک در حالت کشش تک‌محوری شبیه‌سازی کرد، باید تأثیر شکل‌دهی بالچ نیز در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود؛ بنابراین شبیه‌سازی در سه مرحله‌ی شکل‌دهی بالچ، ایجاد شیار و تست پارگی انجام می‌شود. شبیه‌سازی در مرحله‌ی شکل‌دهی بالچ با استفاده از حلگر ضمنی انجام شد. ایجاد شیار با روش غیرفعال کردن المان بعد از شکل‌دهی بالچ در حالت استاتیک انجام شد و در ادامه برای این که بتوان شکست در تست پارگی را شبیه‌سازی کرد از حلگر صریح استفاده شد. استفاده از روش غیرفعال کردن المان برای ایجاد شیارها در مدل‌های المان پوسته امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین از المان‌های نوع حجمی C3D8 استفاده شد.

خواص ورق از نتایج تست کشش به دست آورده شد و بعد از برون‌یابی وارد نرم‌افزار آباکوس شد. برای بررسی دقت شبیه‌سازی رابطه‌ی بیشترین ارتفاع ورق شکل‌دهی شده در برابر فشار وارد شده به آن در نمونه‌های با قطر شکل‌دهی $d=55\text{mm}$

5- نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

ورق‌هایی که در ارتفاع‌های مختلف فرم داده شده بودند و الگوی شیار یکسانی بر روی آن‌ها ایجاد شده بود یا همان نمونه‌های دسته‌ی سوم آزمایش‌ها با استفاده از فشار هوا تست پارگی شدند. نتایج فشار پارگی این آزمایش‌ها در نمودار شکل 8 نشان داده شده است.

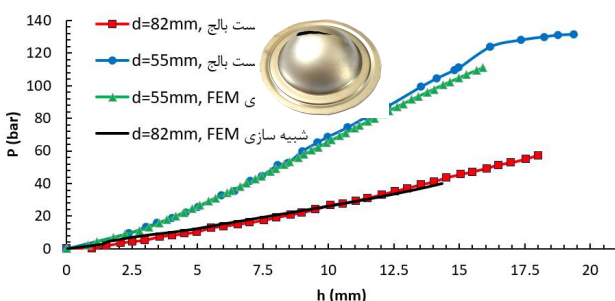


Fig. 6 Experimental and numerical comparison of forming pressure in two different diameters (d)

شکل 6 مقایسه‌ی فشار شکل‌دهی در دو قطر (d) متفاوت با استفاده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در لحظه‌ی قبل از پارگی توزیع کرنش از مرکز دیسک تا محیط آن در هر نمونه تغییر می‌کند و مشابه نمودار شکل 9 می‌شود. این در حالی است که توزیع کرنش در زمان شروع تست پارگی و بعد از ایجاد شیار مشابه شکل 10 است.

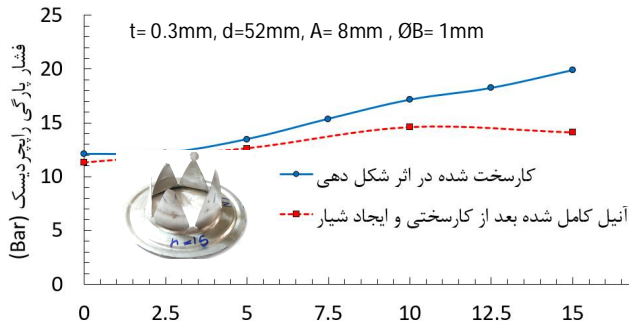


Fig. 8 The effect of increasing the bulge forming height on the burst pressure of slotted disc and comparing results with annealed samples under the same condition

شکل 8 تأثیر افزایش ارتفاع شکل‌دهی بر روی فشار پارگی بعد از ایجاد شیار و مقایسه‌ی آن با نمونه‌های آنیل شده در شرایط یکسان

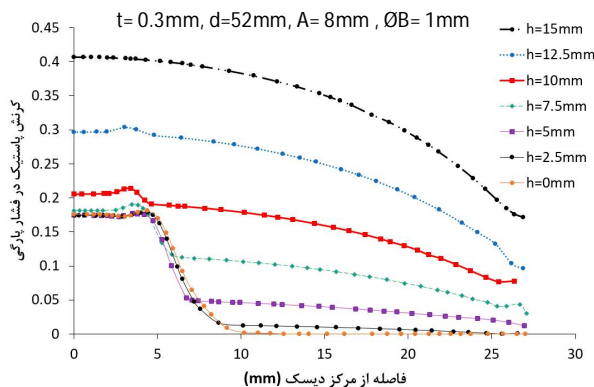


Fig. 9 Plastic strain distribution from the center to surrounding of slotted discs in burst pressure

شکل 9 کرنش از مرکز دیسک‌های شیاردار تا اطراف در فشار پارگی

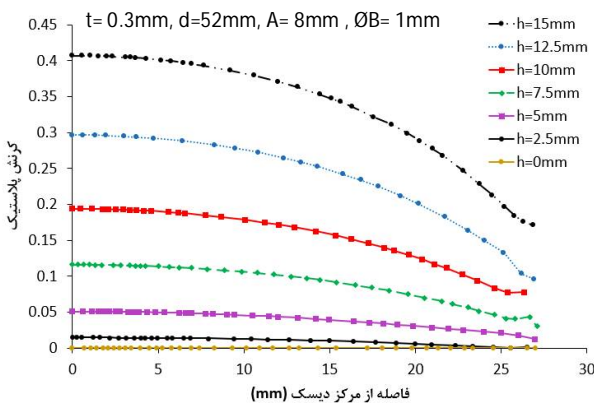


Fig. 10 Plastic strain distribution after slotting, before burst test

شکل 10 کرنش پلاستیک بعد از ایجاد شیار و قبل از تست پارگی

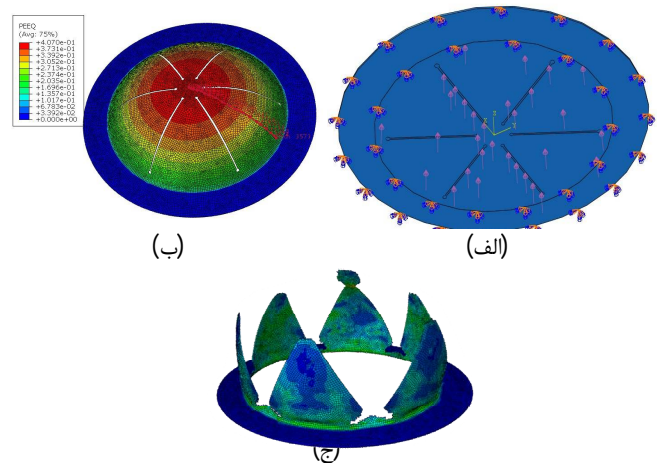


Fig. 7 FEM simulation steps a) Initial model and displaying loading, constraints, and places for deactivating elements. b) Slotted model after forming c) Ruptured disc model

شکل 7 مراحل شبیه‌سازی الف) مدل اولیه و نمایش نوع بارگذاری و تعیین محل‌های غیرفعال کردن المان ب) حذف الگوی شیار بعد از شکل‌دهی ج) شبیه‌سازی الگوی پاره شدن راپچردیسک

بر اساس این نمودار، قبل از ایجاد شیار هرچه ارتفاع شکل‌دهی بیشتر شده و ورق بیشتر در معرض تنش دو محوری قرار گرفته است، فشار پارگی آن بعد از ایجاد شیار بیشتر شده است. همان‌طور که در قسمت تحلیل روابط شکل‌دهی تست بالچ بیان شد، هرچه ورق ارتفاع بیشتری می‌گیرد قسمت مرکزی آن کارسخت‌تر می‌شود و ضخامت آن کاهش می‌یابد. در این نمونه‌ها درحالی‌که ورق‌های با شکل‌دهی بیشتر نازک‌تر شده بودند، اما فشار بیشتری را تحمل کردند. نمونه‌هایی که با شرایط یکسان در خلأ و در دمای 1050°C آنیل شده بودند یا همان نمونه‌های دسته‌ی چهارم آزمایش‌ها فشار پارگی کمتری نسبت به حالت غیر آنیل دارند. بر اساس شکل 8 در حالت آنیل، هرچه ارتفاع شکل‌دهی بیشتر می‌شود، میزان درصد کاهش فشار نسبت به حالت غیر آنیل بیشتر است. زیرا در این حالت کارسختی به وجود آمده تقریباً از بین می‌رود و کاهش ضخامت در ارتفاع‌های بیشتر نیز در تعیین فشار اثر خود را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی به‌گونه‌ای انجام شد که اثر کرنش سختی ناشی از تنش دو محوری و توزیع غیر یکسان ضخامت در شبیه‌سازی تست پارگی در نظر گرفته شده باشد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی توزیع کرنش پلاستیک در نمونه‌هایی که با ارتفاع متفاوت شکل‌دهی شده‌اند یکسان نیست. در نمونه‌ای که شکل‌دهی نشده است، کرنش پلاستیک در تمام نقاط برابر با صفر است. اما در نمونه‌ای که بیشترین شکل‌دهی یا ارتفاع را دارد، توزیع کرنش پلاستیک بیشترین غیر یکنواختی را دارد. به عبارتی در هر ارتفاع بیشترین کرنش پلاستیک در مرکز اتفاق می‌افتد. بر اساس نتایج

پلاستیک بدهد و سپس باربرداری شود و دوباره بارگذاری شود و این عمل چندین بار تکرار شود بیشترین نیروی قابل تحمل متغیر خواهد بود. همچنین تغییر سرعت بارگذاری در محیط پلاستیک رفتار نمودار تنش کرنش را تغییر می‌دهد [20-22]. کاهش نیروی قابل تحمل ورق در تغییر شکل‌های پلاستیک مکرر را می‌توان به خستگی کم سیکل ارتباط داد. این اتفاق در رایچر دیسک نیز رخ می‌دهد و زمانی که کارسخت می‌شود و به سبب آن تنش تسلیم بالاتر می‌رود، اثر این گونه بارها بر روی تغییر فشار پارگی از بین می‌رود. با استفاده از این روش شبیه‌سازی که در آن اثر کارسختی قبل از ایجاد شیار در نظر گرفته شده است می‌توان فشاری که در آن رایچر دیسک کامپوزیت تغییر شکل پلاستیک می‌دهد را تعیین کرد.

بر اساس آنچه در قسمت روابط تحلیلی اثبات شد در نمونه‌های با نسبت $\frac{h}{d}$ برابر، میزان کرنش ناشی از تنش دو محوری به وجود آمده در آن‌ها یکسان خواهد بود. بنابراین با توجه به این نکته و به دست آوردن کرنش در هر نسبت $\frac{h}{d}$ برای یک نمونه، می‌توان میزان کرنش ناشی از تنش دو محوری قبل از ایجاد شیار را برای سایر نمونه‌ها با قطر مختلف به دست آورد و تأثیر این کرنش را بر روی نمونه‌ها بعد از ایجاد شیار و قرار گرفتن تحت نیروی کششی تک محوری بررسی کرد. برای اثبات این موضوع بالچ فرمینگ در نمونه‌ای با قطر 82mm شبیه‌سازی شد و بعد از مقایسه‌ی نمودار ارتفاع فشار با تست تجربی و بررسی صحت شبیه‌سازی میزان کرنش در هر نسبت $\frac{h}{d}$ با نمونه‌ی با قطر 54mm مقایسه شد. بر اساس این مقایسه در هر نسبت $\frac{h}{d}$ میزان کرنش به وجود آمده در آن‌ها برابر است. علاوه بر شبیه‌سازی، برای به دست آوردن کرنش در هر نسبت $\frac{h}{d}$ می‌توان این کرنش را با استفاده از رابطه‌ی (12) نیز تقریب زد. مقایسه‌ی این رابطه با نتایج شبیه‌سازی در دو سایز مختلف در شکل 12 نشان داده شده است. بر اساس این نمودار مسیر و میزان کرنش در هر نسبت $\frac{h}{d}$ برابر، یکسان است. بعد از ایجاد شیار همه‌ی نمونه‌ها تحت کشش تک محور قرار می‌گیرند و در آنجا نیز نمونه‌های با $\frac{h}{d}$ برابر، مسیر کرنش یکسانی دارند. بنابراین با وجود مسیر کرنش غیر خطی مسیر کرنش در نسبت $\frac{h}{d}$ برابر، یکسان است.

همان‌طور که در مقدمه مطرح شد، بر اساس نتایج کار محققان و مستندات نرم‌افزار آباکوس برخی از معیارهای آسیب مانند FLD در ورق‌ها و یا جانسون کوک که وابسته به مسیر کرنش هستند، در صورتی که نوع بارگذاری تغییر کند یا به عبارتی مسیر بارگذاری عوض شود، نمی‌توانند کرنش شکست را

تا قبل از ایجاد شیار، تنش‌ها به صورت دو محوری هستند اما زمانی که شیار ایجاد می‌شود این تنش‌ها به تک‌محوری تغییر می‌کنند. در تست پارگی نمونه‌های آماده شده، کرنش‌ها در مرکز نمونه بیشتر رشد پیدا می‌کنند و سپس در قسمتی که کمترین سطح مقطع را دارد کرنش بیشتری اتفاق می‌افتد تا از آن محل پارگی رخ دهد.

بر اساس شکل 9 نمونه‌هایی که در آن‌ها کرنش ناشی از تنش دو محوری کم است و یا کرنشی ایجاد نشده است، در زمان تست پارگی تغییر شکل پلاستیک زیادی می‌دهند. اما کرنش پلاستیک آن‌ها بیشتر از 0/2 نمی‌شود. هرچه ارتفاع شکل‌دهی بیشتر می‌شود و در نتیجه نمونه‌ها تغییر شکل بیشتری می‌دهند، در زمان تست پارگی که نیروها به صورت کشش تک محوری هستند، کرنش پلاستیک شکست در آن‌ها بیشتر می‌شود و تغییر شکل دائمی کمتری نیز می‌دهند.

رفتار المان در محدوده‌ی محل پارگی برای هر رایچر دیسک از نتایج شبیه‌سازی استخراج شد. شکل 11 رفتار این المان‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نمودارها هرچه در ورق کارسختی ناشی از تنش دو محوری بیشتر بوده است یا به عبارتی هرچه در اثر این تنش دو محوری کرنش بیشتری ایجاد شده است، المان نزدیک محل شکست در تست پارگی رفتار تردتری از خود نشان داده است اما در مجموع از زمان شکل‌دهی تا بارگذاری بعد از ایجاد شیار، کرنش بیشتری را تحمل کرده است. دلیل ترد شدن کارسختی بیشتر ناشی از تنش دو محوری قبل از ایجاد شیار است.

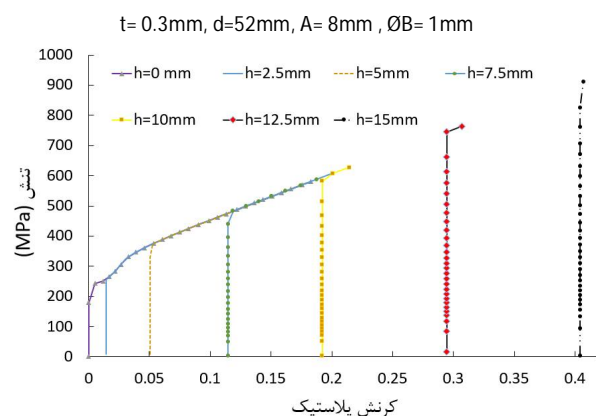


Fig. 11 True stress-plastic strain curve for element near the rupture site after slotting in the burst test

شکل 11 نمودار تنش - کرنش پلاستیک حقیقی برای المانی نزدیک محل شکست در تست ترکیدگی بعد از ایجاد شیار

در تست کشش زمانی که یک ورق فلزی تغییر شکل

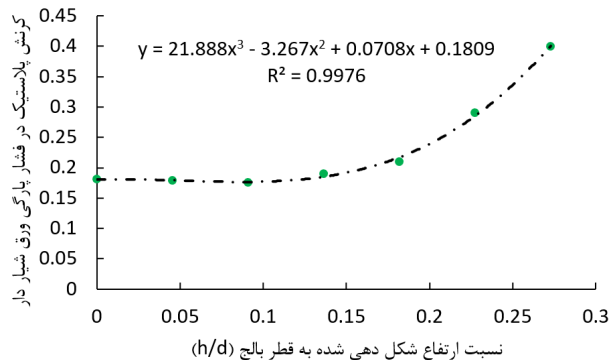


Fig. 13 The effect of height to diameter ratio in bulge forming (strain due to biaxial stress) on the failure strain at burst pressure (failure strain in uniaxial tension)

شکل 13 تأثیر نسبت ارتفاع شکل دهی به قطر شکل دهی (که متناسب با کرنش ناشی از تنش دو محوری است) بر روی کرنش پلاستیک در لحظه‌ی فشار پارگی دیسک شیاردار (کرنش ناشی از کشش تک محور)

در زمان تست راپچردیسک محل پارگی که در زمان شکل‌دهی تحت تنش دو محوری قرار داشت، به دلیل ایجاد شیار تحت تنش کششی قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که برابری مسیر کرنش در هر نسبت $\frac{h}{d}$ به صورت شبیه‌سازی و تحلیلی اثبات شد و با توجه به این نکته که اگر مسیر و میزان کرنش برابر باشد کرنش شکست برابر خواهد بود، از این نمودار برای سایر قطرهای d نیز می‌توان استفاده کرد. برای اثبات این موضوع، نمونه با قطر $d=82\text{mm}$ تا نسبت $\frac{h}{d}=0/17$ فرم داده شد (دسته‌ی پنجم آزمایش‌های تجربی). با توجه به این‌که در نسبت $\frac{h}{d}$ برابر، میزان و مسیر کرنش ناشی از تنش دو محوری برابر خواهد بود، بر اساس رابطه‌ی استخراج شده از شکل 13 که بر اساس نمونه با $d=54\text{mm}$ به دست آمده است در صورتی که نمونه قبل از ایجاد شیار تا $\frac{h}{d}=0/17$ فرم داده شود بعد از ایجاد شیار کرنش معادل پلاستیک تقریبی شکست آن برابر با $0/2$ خواهد بود. از این کرنش معادل پلاستیک شکست برای پیش‌بینی فشار پارگی راپچردیسک شیاردار با $d=82\text{mm}$ استفاده شد. این نمونه قبل از ایجاد شیار فشار پارگی 82bar داشت و بعد از ایجاد شیار با توجه به الگوی شیار به وجود آمده فشار پارگی آن به 5bar کاهش یافت. با استفاده از شبیه‌سازی با کرنش معادل پلاستیک شکست $0/2$ فشار پارگی بعد از ایجاد شیار $5/4\text{ bar}$ تخمین زده شد. فشار تخمین زده شده نسبت به فشار پارگی راپچردیسک در آزمایش تجربی حدود 8% بیشتر محاسبه شده است. بنابراین با استفاده از این روش، شبیه‌سازی عددی با تقریب خوبی فشار پارگی در هر قطر را پیش‌بینی می‌کند.

با دقت مناسب پیش‌بینی کنند. معیار FLSD نیز در پیش‌کرنش‌های زیاد مستقل از مسیر نیست.

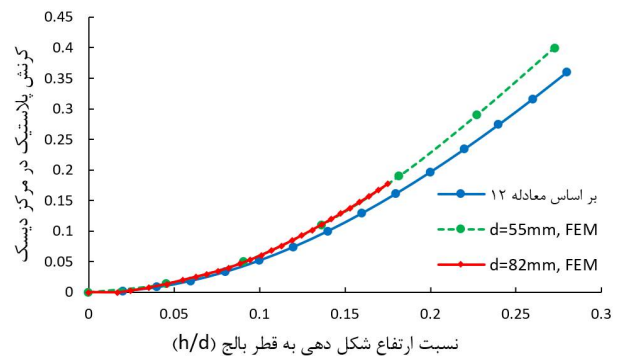


Fig. 12 The strain created in the center of the disc at any height to diameter ratio (h/d) in the bulge forming process

شکل 12 کرنش به وجود آمده در مرکز دیسک در هر نسبت ارتفاع به قطر در فرایند شکل‌دهی بالچ

بنابراین تخمین فشار پارگی راپچردیسک با توجه به این‌که مسیر بارگذاری بعد از ایجاد شیار عوض می‌شود نیاز به معیاری مناسب دارد. برای این‌که تأثیر کرنش سختی ناشی از تنش دو محوری بر روی کرنش پلاستیک تقریبی شکست بعد از ایجاد شیار بررسی شود، در آزمایش‌های تجربی در هر نسبت $\frac{h}{d}$ تولید شده (منظور از h ارتفاع نهایی شکل‌دهی شده قبل از ایجاد شیار است)، با کالیبره کردن فشار پارگی بعد از ایجاد شیار با کرنش معادل در شبیه‌سازی، میزان تقریبی کرنش پلاستیک شکست معادل، به دست آورده شد. در واقع در شبیه‌سازی، در لحظه‌ی فشار پارگی به دست آمده از آزمایش تجربی، میزان کرنش پلاستیک اندازه‌گیری شد. نمودار نسبت $\frac{h}{d}$ در برابر کرنش پلاستیک شکست راپچردیسک شیاردار برای نمونه‌ها با قطر $d=52\text{mm}$ در شکل 13 نشان داده شده است.

بر اساس نمودار شکل 13 هرچه ورق تحت فشار سیال بیشتری قبل از ایجاد شیار قرار گیرد کرنش پلاستیک شکست آن در زمان تست پارگی بیشتر خواهد بود. از آنجایی که نسبت $\frac{h}{d}$ بر اساس رابطه‌ی (12) با میزان کرنش ناشی از تنش دو محوری رابطه‌ی مستقیم دارد، می‌توان این نمودار را اثر میزان کرنش ناشی از تنش دو محوری بر روی کرنش شکست ناشی از کشش تک محوری تفسیر کرد. رابطه‌ی نشان داده شده در شکل 13 تأثیر نسبت ارتفاع به قطر شکل‌دهی را بر روی کرنش معادل پلاستیک زمان پارگی نشان می‌دهد.

7- مراجع

- [1] W. Volk, H. Hoffmann, J. Suh, J. Kim, Failure prediction for nonlinear strain paths in sheet metal forming, *CIRP Annals* 61 (2012) 259–262.
- [2] S.K. Paul, Path independent limiting criteria in sheet metal forming, *Journal of Manufacturing Processes* 20 (2015) 291–303.
- [3] P.D. Wu, A. Graf, S.R. MacEwen, D.J. Lloyd, M. Jain, K.W. Neale, On forming limit stress diagram analysis, *International Journal of Solids and Structures* 42 (2005) 2225–2241.
- [4] T.B. Stoughton, J.W. Yoon, Path independent forming limits in strain and stress spaces, *International Journal of Solids and Structures* 49 (2012) 3616–3625.
- [5] D. Jocham, C. Gaber, O. Böttcher, P. Wiedemann, W. Volk, Experimental prediction of sheet metal formability of AW-5754 for non-linear strain paths by using a cruciform specimen and a blank holder with adjustable draw beads on a sheet metal testing machine, *Int J Mater Form* 10 (2017) 597–605.
- [6] H. Li, G. Li, G. Gao, W. Zhang, X. Wu, A formability evaluation method for sheet metal forming with non-linear strain path change, *Int J Mater Form* 11 (2018) 199–211.
- [7] Z. He, H. Zhu, Y. Lin, D.J. Politis, L. Wang, S. Yuan, A novel test method for continuous nonlinear biaxial tensile deformation of sheet metals by bulging with stepped-dies, *International Journal of Mechanical Sciences* 169 (2020) 105321.
- [8] C. Bonatti, D. Mohr, Neural network model predicting forming limits for Bi-linear strain paths, *International Journal of Plasticity* (2020) 102886.
- [9] X. Mu, A New Approach to Monitoring Rupture Disc Operation, in: *Volume 4: Dynamics, Control and Uncertainty, Parts A and B*, ASME, Friday 2012, p. 473.
- [10] G.F. Lake, N.P. Inglis, The Design and Manufacture of Bursting Disks, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 142 (1939) 365–378.
- [11] D.V.R. Murty, Y.B. Rao, Computer Simulation of Rupture Disc Design, in: *Volume 3: Design and Analysis*, ASME, 2006, pp. 233–240.
- [12] H. Zhu, W. Xu, Z. Luo, H. Zheng, Finite Element Analysis on the Temperature- Dependent Burst Behavior of Domed 316L Austenitic Stainless Steel Rupture Disc, *Metals* 10 (2020) 232.
- [13] J.Y. Jeong, J. Lee, S. Yeom, W. Choi, T.G. Kim, S.C. Hong, M. Ryu, H. Kim, S.B. Lee, A study on the grooving process of a cross-scored rupture disc, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13 (2012) 219–227.
- [14] J.Y. Jeong, W. Jo, H. Kim, S.H. Baek, S.B. Lee, Structural analysis on the superficial grooving stainless-steel thin-plate rupture discs, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 15 (2014) 1035–1040.
- [15] X. Kong, J. Zhang, X. Li, Z. Jin, H. Zhong, Y. Zhan, F. Han, Experimental and finite element optimization analysis on hydroforming process of

در رایچر دیسک‌ها برای این که قسمت مرکزی که در آن شیار ایجاد نمی‌شود، بعد از ترکیدن پرتاب نشود، اندازه‌ی A کوچک طراحی می‌شود. در نتیجه تفاوت کرنش در اثر تغییرات A زیاد نیست. اما به‌طور کلی، در صورتی که قطر این ناحیه بیشتر در نظر گرفته شود برای دقت بیشتر باید کرنش ناشی از تنش دو محوری در محل شکست در نظر گرفته شود.

6- نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های تجربی انجام شده هرچه در ورق کرنش ناشی از تنش دو محوری بیشتر می‌شود، فشار بیشتری در زمان پارگی تحت کشش تک‌محوری تحمل می‌کند. فشار پارگی می‌تواند بیشتر از 64% با افزایش کرنش ناشی از تنش دو محوری افزایش یابد. آنیل کردن بعد از شکل‌دهی و ایجاد شیار می‌تواند این افزایش فشار را از بین ببرد. نمونه‌های مشابهی که در کوره خلأ آنیل شده بودند، فشار کمتری نسبت به حالت غیر آنیل داشتند. این نسبت کاهش فشار در نمونه‌هایی که بیشتر کارسخت شده بودند به میزان بیشتری بود. در واقع آنیل کردن کارسختی ناشی از کرنش پلاستیک تنش دو محوری که سبب بالارفتن فشار پارگی می‌شود را از بین می‌برد. در رایچر دیسک کامپوزیت به دلیل شکل‌دهی و سپس ایجاد شیار، نوع بارگذاری در ورق تغییر می‌کند و مسیر کرنش غیرخطی به وجود می‌آید. پیش‌بینی فشار پارگی در این حالت و در میزان شکل‌دهی‌های متفاوت نیاز به استفاده از معیارهای مناسب دارد. در معیارهای جدیدتر مانند PEPS از کرنش معادل پلاستیک آسیب برای هر مسیر بارگذاری استفاده شده است. در این مقاله نیز برای هر مسیر کرنش، از یک کرنش معادل پلاستیک برای پیش‌بینی آسیب استفاده شد. با استفاده از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی برابری مسیر کرنش در هر نسبت ارتفاع به قطر یکسان اثبات شد. با استفاده از شبیه‌سازی، کرنش معادل پلاستیک تقریبی شکست نمونه‌ها در زمان پارگی به دست آورده شد و با بررسی ارتباط آن با کرنش ناشی از تنش دو محوری ایجاد شده قبل از ایجاد شیار رابطه‌ای بین میزان شکل‌دهی و کرنش معادل پلاستیک در زمان فشار پارگی ارائه شد و این روش به‌عنوان معیاری برای پیش‌بینی کرنش معادل پلاستیک تقریبی شکست در شبیه‌سازی بیان شد. با این روش می‌توان فشار پارگی رایچر دیسک کامپوزیت را در هر قطر با دقت حدود 8% پیش‌بینی کرد. روش تست‌های تجربی این مقاله می‌تواند روشی مناسب برای مقایسه‌ی معیارهای آسیب مسیرهای کرنش غیرخطی برای سایر محققان باشد.

- Hashemi, An Experimental, Analytical, and Numerical Investigation of Hydraulic Bulge Test in Two-Layer Al-Cu Sheets, *J. Manuf. Sci. Eng* 139 (2017) 31005.
- [20] X. Li, J. Li, W. Ding, S. Zhao, J. Chen, Stress Relaxation in Tensile Deformation of 304 Stainless Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance* 26 (2017) 630–635.
- [21] P. Broomhead, R.J. Grieve, The Effect of Strain Rate on the Strain to Fracture of a Sheet Steel Under Biaxial Tensile Stress Conditions, *J. Eng. Mater. Technol* 104 (1982) 102–106.
- [22] K. Zhao, W. Fang, B. Wang, D. Ren, The Effect of Unloading Positions and Times on Sheet Metal's Stress-Strain Curve, *JMMCE* 06 (2018) 408–423.
- rupture disc, *Procedia Manufacturing* 15 (2018) 892–898.
- [16] G. Gutscher, H.-C. Wu, G. Ngaile, T. Altan, Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test, *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2004) 1–7.
- [17] R.B. Colby, Equivalent plastic strain for the Hill's yield criterion under general three-dimensional loading.
- [18] M. Koç, E. Billur, Ö.N. Cora, An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods, *Materials & Design* 32 (2011) 272–281.
- [19] F.A. Marandi, A.H. Jabbari, M. Sedighi, R.