



Numerical Simulation of a Composite Rupture Disc by Considering the Nonlinear Strain Path

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohebbi M.¹

Panahizadeh V.^{1*}

Hosseinpour Gollo M.¹

How to cite this article

Mohebbi M, Panahizadeh V, Hosseinpour Gollo M. Numerical Simulation of a Composite Rupture Disc by Considering the Nonlinear Strain Path. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(7):469-478.

¹ Shahid Rajaee Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Shahid Rajaee Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran. P. O. Box: 16785-163
v.panahizadeh@sru.ac.ir

Article History

Received: April 08, 2021

Accepted: May 11, 2021

ePublished: June 19, 2021

ABSTRACT

Cold work hardening and nonlinear strain path, cause the failure strain change. Therefore, it is necessary to consider the created cold-work hardening and its distribution for predicting and simulating the behavior of products. The composite rupture disc cold-work hardened during manufacturing and burst and release pressure in a pressure commensurate with this hardening. In this case, the sheet metal undergoes a nonlinear strain path during forming and after slotting during the burst test. In this paper, the burst pressure of a composite rupture disc is estimated by using finite element simulation in Abaqus-implicit and explicit and by considering the strain hardening during bulge forming before the slotting process. The burst pressure is estimated according to the maximum plastic failure strain that changes due to nonlinear strain path and work hardening. The burst pressure predictions were compared and validated by experimental tests. In this paper, the effect of slotting pattern is investigated by using FEM simulations and experiments. In the prepared samples for this paper, by slotting after bulge forming, the burst pressure reduced more than 80%. The simulation with this method predicted this pressure reduction with an error of about 3%.

Keywords Nonlinear Strain Path, Composite Rupture Disc, Finite Element Method (FEM), Predicting Burst Pressure

CITATION LINKS

[1] Failure prediction for nonlinear strain paths in sheet metal forming. [2] Path independent limiting criteria in sheet metal forming. [3] 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. [4] A formability evaluation method for sheet metal forming with non-linear strain path change. [5] A novel test method for continuous nonlinear biaxial tensile deformation of sheet metals by bulging with stepped-dies. [6] Neural network model predicting forming limits for Bi-linear strain paths. [7] A New Approach to Monitoring Rupture Disc Operation. [8] Pressure relief devices: ASME and API code simplified. [9] The Design and Manufacture of Bursting Disks. [10] Computer Simulation of Rupture Disc Design. [11] Finite Element Analysis on the Temperature- Dependent Burst Behavior of Domed 316L Austenitic Stainless Steel Rupture Disc. [12] A study on the grooving process of a cross-scored rupture disc. [13] Structural analysis on the superficial grooving stainless-steel thin-plate rupture discs. [14] Experimental and finite element optimization analysis on hydroforming process of rupture disc. [15] Stress Relaxation in Tensile Deformation of 304 Stainless Steel. [16] The Effect of Strain Rate on the Strain to Fracture of a Sheet Steel Under Biaxial Tensile Stress Conditions. [17] Equivalent plastic strain for the Hill's yield criterion under general three-dimensional loading. [18] An Experimental, Analytical, and Numerical Investigation of Hydraulic Bulge Test in Two-Layer Al-Cu Sheets. [19] An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods. [20] Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. [21] On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space.

شبیه‌سازی دیسک انفجاری کامپوزیت با در نظر گرفتن مسیر کرنش غیرخطی

مرتضی محبی

دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

ولی‌اله پناهی زاده*

دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

محمد حسین پور

دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

رایچر دیسک یا دیسک انفجاری کامپوزیت در زمان ساخت کار سخت می‌شود و در زمان استفاده در فشاری متناسب با کار سختی ایجاد شده می‌ترکد و فشار را آزاد می‌کند. کار سختی و تغییر مسیر کرنش باعث می‌شود تا کرنش شکست تغییر کند؛ بنابراین در نظر گرفتن کار سختی ایجاد شده و چگونگی توزیع آن در زمان تولید برای پیش‌بینی رفتار و شبیه‌سازی محصولات ضروری است. در این حالت ورق در زمان شکل‌دهی و بعد از ایجاد شیار در زمان رسیدن به فشار پارگی مسیر کرنش غیرخطی را طی می‌کند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس و با در نظر گرفتن میزان کرنش سختی ایجاد شده در زمان شکل‌دهی ورق قبل از ایجاد شیار، فشار پارگی رایچر دیسک کامپوزیتی پیش‌بینی می‌شود. معیار فشار پارگی، ماکزیمم کرنش پلاستیک قابل تحمل تغییر کرده در اثر کار سختی یا مسیر کرنش غیرخطی در نظر گرفته شده است. پیش‌بینی‌های فشار پارگی با آزمایش‌های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شد. در این مقاله اثر الگوی شیارها با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی بررسی شدند. در آزمایش‌های این مقاله فشار پارگی با ایجاد شیار بعد از شکل‌دهی بیشتر از ۸۰٪ کاهش می‌یابد و شبیه‌سازی با این روش با خطای حدود ۳٪ این کاهش فشار را پیش‌بینی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مسیر کرنش غیرخطی، رایچر دیسک کامپوزیتی، روش اجزا محدود، پیش‌بینی فشار پارگی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱

*نویسنده مسئول: v.panahizadeh@sru.ac.ir

۱- مقدمه

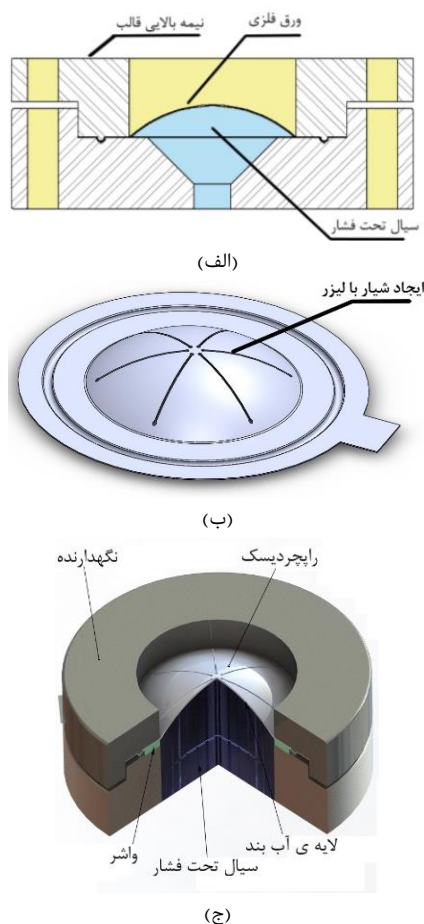
بیشتر فرایندهای فرایندهای شکل‌دهی ورق چندمرحله‌ای هستند و مسیر کرنش خطی ندارند. بر اساس نتایج کار محققان تغییر نوع بارگذاری یا به عبارتی تغییر مسیر کرنش باعث می‌شود کرنش نهایی شکست تغییر یابد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای پیش‌بینی زمان شکست، تعیین حد شکل‌دهی بر اساس نمودار FLD است. بر اساس این نمودار، 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]. جوچم و همکاران^[3] برای ایجاد مسیرهای غیر خطی کرنش و بررسی اثر آن از کشش ورق صلیبی شکل در جهت‌های مختلف به میزان متفاوت استفاده کردند. هونگرو و همکاران^[4] برای ایجاد مسیر کرنش غیر خطی و پیش

بینی 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 لایه 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^[5] در سال ۲۰۲۰ 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^[6] برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی در مسیرهای غیر خطی از مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند.

رایچر دیسک وسیله‌ای برای محافظت از تجهیزات و افراد در برابر فشارهای بیش از اندازه است و در زمان کوتاهی حجم زیادی از سیال را تخلیه می‌کند. رایچر دیسک‌ها در اندازه‌ها و دماهای کاری مختلف به کار گرفته می‌شوند. در حال حاضر رایچر دیسک‌ها در صنایع مختلفی نظیر پتروشیمی، داروسازی و صنایع غذایی استفاده می‌شوند. همچنین امروزه کاربردهای گسترده‌ای در صنایع هسته‌ای، فضایی، دفاعی، خودروسازی و راه‌آهن، سیستم‌های انرژی و قدرت و آزمایشگاه‌ها دارند^[7]. تا قبل از اینکه رایچر دیسک‌ها بالچ و کرنش سخت شوند، به صورت پوسته‌های فلزی تخت ساخته می‌شدند که کاربرد آنها محدود بود و به عنوان وسیله‌ای که فشار ترکیدگی آنها غیر قابل پیش‌بینی بود محسوب می‌شدند. فشار کاری سبب بالچ و کشش فلز می‌شد و نتیجه آن خرابی زودرس بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ فشار ترکیدگی مورد نظر بود. ابداع رایچر دیسک‌های کامپوزیتی این مشکلات را حل کرد به طوری که رایچر دیسک‌های کامپوزیتی می‌توانند تا حدود ۸۰٪ فشار ترکیدگی به کار گرفته شوند و تکه‌های آن بعد از ترکیدن پرتاب نمی‌شود^[8]. بنابراین در نظر گرفتن کرنش سختی ناشی از شکل‌دهی که در رفتار رایچر دیسک تأثیر زیادی دارد، در شبیه‌سازی ضروری است. رایچر دیسک کامپوزیتی از یک لایه فلزی شیاردار تعیین‌کننده فشار و یک لایه جهت آب بندی شیارها تشکیل شده است. به همین دلیل آن را رایچر دیسک کامپوزیت می‌نامند. علاوه بر این دو لایه از یک لایه شیاردار تحمل‌کننده فشار و کیوم نیز می‌توان در زیر این دو لایه استفاده کرد که در فشار پارگی نقشی ندارد. رعایت نسبت بیشترین فشار کاری مجاز سیستم به فشار پارگی در پاره شدن در فشار تعیین شده ضروری است، زیرا اگر این میزان از نسبت مشخصی بیشتر شود تسلیم‌های تدریجی در ماده اتفاق می‌افتد و سبب می‌شود دیسک در فشاری کمتر از فشار تعیین شده بترکد. لیک و انگلیس^[9] به صورت تجربی در مواد مختلف به بررسی این نسبت برای رایچر دیسک‌های بدون شیار پرداختند تا از خزش ماده در دمای بالا و حتی در دمای محیط جلوگیری شود. همچنین آنها با آزمایش‌های تجربی به این نتیجه رسیدند که اگر

پارامترها متغیر است و به اندازه‌ای این فشار افزایش می‌یابد تا ورق کارسختی کافی به منظور جلوگیری از تسلیم‌های تدریجی در فشار کاری را داشته باشد. سپس شیارها روی آن با استفاده از لیزر ایجاد می‌شوند. برای جلوگیری از نشت مواد از میان شیارها یک‌لایه نازک برای آب‌بندی از جنس PTFE زیر لایه فلزی قرار می‌گیرد. این لایه تغییر شکل بیشتری نسبت به ورق شیاردار شده دارد و با استحکام کم و تغییر شکل زیاد تأثیر آن در فشار پارگی ناچیز است. فشار پارگی این لایه به‌تنهایی در ابعاد آزمایش‌های این مقاله بین ۰/۷ تا ۲ bar وابسته به ضخامت آن می‌تواند تغییر کند. در صورتی که از راپچردیسک کامپوزیتی در دمای بالا استفاده شود، از لایه آب‌بند فلزی استفاده می‌شود و در صورت بالا بودن فشار پارگی آن باید تأثیر آن لایه در نظر گرفته شود. مراحل ساخت و تست راپچردیسک در این مقاله به‌صورت طرحواره در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ برخی از این نمونه‌ها در الگوهای شیار متفاوت قبل و بعد از تست فشار نشان داده شده است.

با شکل‌دهی ورق به‌صورت نیم کروی یا همان عملیات بالچ فرمینگ ورق کارسخت می‌شود و کرنش‌های پلاستیک در آن باقی می‌مانند. کارسختی ورق فلزی باعث بیشتر شدن تنش تسلیم می‌شود و راپچردیسک در زمان استفاده تا قبل از پارگی تغییر شکل



شکل ۱ الف- بالچ فرمینگ با استفاده از فشار سیال ب- ایجاد شیار ج- تست فشار پارگی ورق شیاردار شده یا راپچردیسک

به یک دیسک تخت در شرایط آنیل شده تا زمان ترکیدن، فشار وارد شود و فشار پارگی p_b نامیده شود و قطر تحت فشار d باشد برای مواد مختلف با ضخامت t_0 ، نسبت $\frac{p_b \cdot d}{t_0}$ متناسب با ضریبی از استحکام نهایی ماده (در تست کشش) است. برای مثال این ضریب برای آلومینیوم ۳/۶، برای نقره ۲/۴ برای نیکل ۳/۳ و برای مس نیز ۳/۳ است. به این ترتیب آنها توانستند تخمینی از فشار پارگی راپچردیسک بدون شیار را ارائه دهند. مورتی و راثو^[10] راپچردیسک بدون شیار را شبیه سازی کردند و رابطه بین فشار و تغییر شکل ورق را به دست آوردند. هونگبو و همکاران^[11] اثر دما را بر روی میزان کاهش فشار پارگی راپچردیسک بدون شیار با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی بررسی کردند. جیونگ و همکاران^[12] به تحقیق بر روی ایجاد شیار بر روی راپچردیسک با شیار غیر راه به در 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 پرت شدن آن جلوگیری شود. آنها بعد از مدل‌سازی یک ورق تخت، فرآیند ایجاد شیار را در نرم افزار انسیس شبیه سازی کردند و نیروی مورد نیاز برای ایجاد شیار را به دست آوردند. جیونگ و همکاران^[13] یک ورق شکل داده شده که روی آن شیار ایجاد شده است را مدل‌سازی کردند و تأثیر عمق شیار را بر روی فشار پارگی با استفاده از شبیه سازی عددی بررسی کردند. اما آنها اثر کرنش پلاستیک موجود در ورق بعد از شکل‌دهی را در شبیه سازی عددی در نظر نگرفته بودند. ونگ و همکاران^[14] به بهینه‌سازی تجربی و شبیه‌سازی شکل‌دهی راپچردیسک‌های بدون شیار با استفاده از هیدروفرمینگ پرداختند. برای ساخت راپچردیسک به گونه‌ای که در فشار مورد نظر عمل کند نیاز به آزمایش‌های تجربی زیادی می‌باشد تا پارامترهای مناسب انتخاب شوند. تاکنون بر روی شبیه‌سازی یا پیش‌بینی فشار راپچردیسک‌های کامپوزیتی کار نشده است و در مدل‌هایی مدل‌هایی که شیار آنها راه به در نیست و شیار آنها برای مشخص بودن الگوی پارگی ایجاد شده است، اثر کارسختی ایجاد شده در زمان شکل‌دهی لحاظ نشده است.

در این مقاله با شبیه‌سازی مراحل ساخت راپچردیسک کامپوزیتی و شبیه‌سازی زمان ترکیدن آن، روشی برای تخمین فشار پارگی و بررسی تأثیر پارامترها با وجود تغییر مسیر کرنش ارائه می‌شود. در این شبیه‌سازی اثر کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده و میزان نازک شدن ورق در زمان ساخت، برای شبیه‌سازی زمان پارگی راپچردیسک در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین اثر تغییر مسیر کرنش از تنش دو محوری بالچ فرمینگ قبل از ایجاد شیار به کشش تک محور بعد از ایجاد شیار در نظر گرفته می‌شود.

۲- روابط تحلیلی

برای ساخت راپچردیسک کامپوزیتی، ورق در ابتدا با استفاده از فشار سیال شکل نیم کروی می‌گیرد. این فشار متناسب با ابعاد و

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\varphi = -\frac{\varepsilon_z}{2} \quad (۳)$$

$$\varepsilon_z = \ln \frac{t}{t_0} \quad (۴)$$

بنابراین از روابط ۱، ۳ و ۴ :

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

در صورتی که ورق همسانگرد باشد:

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_z \quad (۵)$$

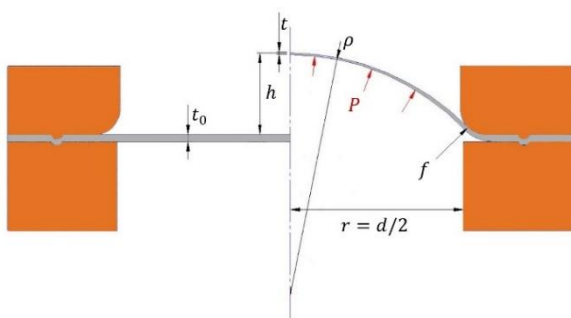
میزان کرنش ایجاد شده در ورق بعد از بالج شدن با میزان کرنش در جهت ضخامت ورق رابطه مستقیم دارد. کاهش ضخامت در راستای ورق در سراسر آن یکسان نیست و قسمتی که بیشترین ارتفاع را دارد ضخامت کمتری دارد. این ضخامت با توجه به شکل ۳ برابر است با [18]:

$$t = t_0 \left[\frac{\left(\frac{r}{\rho}\right)}{\sin^{-1}\left(\frac{r}{\rho}\right)} \right]^2 \quad (۶)$$

در این رابطه t_0 ضخامت اولیه ورق است. هرچه ارتفاع بالج بالاتر می‌رود، میزان ρ کمتر می‌شود و هرچه قطر ناحیه بالج در یک ارتفاع h ثابت بیشتر باشد، میزان ρ بیشتر خواهد شد. میزان ρ بر اساس ارتفاع شکل‌دهی محاسبه شده است [19]. این رابطه مستقل از ضخامت می‌باشد. در نتیجه میزان کرنش به وجود آمده در هر ارتفاع قبل از ایجاد شیار در راپچردیسک برابر است با:

$$\begin{cases} \varepsilon = -\ln \left[\frac{\left(\frac{r}{\rho}\right)}{\sin^{-1}\left(\frac{r}{\rho}\right)} \right] \\ \rho = \frac{(r+f)^2 + h^2 - 2rh}{2h} \end{cases} \quad (۷)$$

میزان این کرنش بر روی کرنش شکست تأثیر می‌گذارد. تا این مرحله کرنش ناشی از تنش دو محوری است اما بعد از ایجاد شیار و قرارگرفتن ورق تحت فشار سیال، ورق تحت تنش تک‌محوری قرار می‌گیرد و به عبارتی تغییر مسیر کرنش ایجاد می‌شود. برای مثال در یک آزمایش تجربی با ورقی از جنس SS316 با ضخامت ۰/۵ mm زمانی که قطر ناحیه بالج ۵۵ mm بود و تا ارتفاع ۱۰ mm شکل داده شد، میزان ρ بعد از اسکن سه بعدی برابر با ۴۳ mm شد



شکل ۳) معرفی پارامترهای آزمایش بالج



شکل ۲) الف- تعدادی از نمونه‌های آماده شده بعد از شکل‌دهی و ایجاد شیار در الگوهای متفاوت ب- تصویری از نمونه‌ها بعد از تست پارگی

پلاستیک نمی‌دهد. در تست کشش زمانی که یک ورق فلزی تغییر شکل پلاستیک بدهد و سپس باربرداری شود و مجدداً بارگذاری شود بیشترین نیروی قابل تحمل بعد از چند بار تکرار متغیر خواهد بود. همچنین تغییر سرعت بارگذاری در محیط پلاستیک رفتار نمودار تنش کرنش را تغییر می‌دهد [15, 16]. این اتفاق در راپچردیسک نیز رخ می‌دهد و زمانی که کارسخت می‌شود و به سبب آن تنش تسلیم بالاتر می‌رود، اثر این گونه بارها بر روی تغییر فشار ترکیبگی از بین می‌رود.

برای اینکه پارامترهای مؤثر بر روی میزان کرنش سختی قبل از ایجاد شیار تعیین گردد روابطی در این بخش ارائه می‌شود. محققان زمانی که یک ورق تخت فلزی به صورت نیم کروی بالج می‌شود میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در آن را محاسبه کرده‌اند. این کرنش را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد. میزان کرنش معادل پلاستیک در حالت تنش صفحه‌ای بر اساس معیار هیل ۱۹۴۸ به صورت زیر است [17].

$$d\varepsilon^p = \sqrt{\frac{1}{FH + FG + GH} [(F + H)(d\varepsilon_{11}^p)^2 + 2Hd\varepsilon_{11}^p d\varepsilon_{22}^p + (G + H)(d\varepsilon_{22}^p)^2]} \quad (۱)$$

در این رابطه $d\varepsilon^p$ نماد میزان کرنش پلاستیک در هر راستا است و F, G, H ثابت‌های معیار هیل هستند. زمانی که ماده همسانگرد همسان گرد باشد، مقدار این ثابت‌ها ۰/۵ است و کرنش معادل برابر با معیار کرنش معادل میسز می‌شود. در شکل‌دهی ورق به صورت نیم‌کروی اگر دو کرنش در راستای ورق ε_θ و ε_φ باشد این دو کرنش برابر هستند و بر اساس قانون ثابت بودن حجم، میزان این کرنشها نصف کرنش در راستای ضخامت ورق است. به عبارتی:

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_z = 0 \quad (۲)$$

فشار پارگی راپچردیسک می‌شود. همچنین با انجام آزمایش‌هایی مشخص شد این سوراخ در صورت طراحی درست امکان پرتاب شدن قسمت مرکزی بعد از ترکیدن راپچردیسک را از بین می‌برد. قطر شش سوراخ با قطر B نیز در تعیین فشار و جلوگیری از رشد ترک مؤثر است. در نمونه‌های این آزمایش‌ها این قطر بین ۱ mm تا ۲ mm است. برای آب‌بندی راپچردیسک یک لایه آب‌بند از جنس تفلون در زیر لایه فلزی قرار گرفت. برای بررسی فشار پارگی ورق بدون شیار و بررسی رابطه فشار با ارتفاع شکل‌دهی، به‌منظور مقایسه آن با شبیه‌سازی بر مبنای خواص وارد شده به نرم‌افزار آباکوس بر روی یک ورق فلزی با همان ابعاد و جنس راپچردیسک‌های ساخته شده، آزمایش بالچ انجام شد. برای استخراج نمودار فشار-ارتفاع در آزمایش بالچ از نمایشگر فشار و ارتفاع سنچ نشان داده شده در شکل ۵ الف به طور همزمان فیلم‌برداری شد و در هر ارتفاع، فشار نشان داده شده در نمودار مشخص گردید. این ورق فلزی بدون شیار تا زمان پارگی ۱۳۵ bar فشار تحمل کرد. برای بررسی خواص ورق و استفاده از آن در آباکوس از آزمایش کشش مطابق با استاندارد ASTM A370 استفاده شد. تجهیزات آزمایش بالچ یا شکل‌دهی راپچردیسک و همچنین دستگاه و تجهیزات آزمایش فشار ورق شیار داده شده یا راپچردیسک در شکل ۵ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری فشار از گیج فشار، ترانسمیتر فشار ۴-۲۰mA و نرم افزار LabVIEW استفاده شد.



(الف)



(ب)

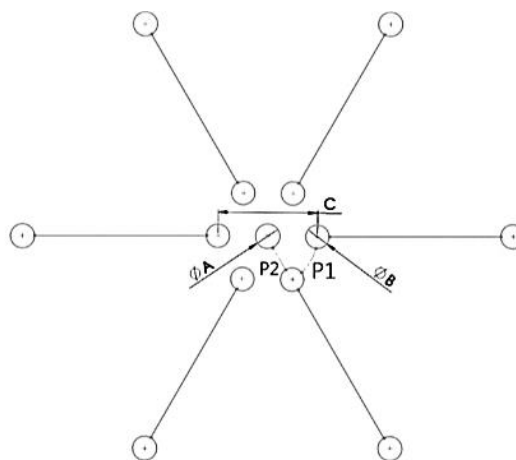
شکل ۵) الف- قالب تست بالچ ب- قالب و تجهیزات آزمایش ترکیدگی راپچردیسک

و میزان بیشترین کاهش ضخامت که در مرکز اتفاق می‌افتد برابر با ۰/۰۸ mm شد. این مقدار تقریباً برابر با رابطه ۶ است. در رابطه ۷ هرچه ρ کمتر شود، کاهش ضخامت بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان کرنش به وجود آمده در ورق افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش ارتفاع بالچ میزان کرنش پلاستیک متناسب با پارامترهای رابطه ۷ بیشتر می‌شود. در زمان ساخت راپچردیسک، ورق به اندازه کافی کرنش سخت می‌شود تا در زمان استفاده از آن، راپچردیسک وارد محیط پلاستیک نشود. سپس بر روی آن شیارهایی ایجاد می‌شود تا راپچردیسک در فشار مورد نظر بترکد. اندازه و شکل این شیارها بر روی فشار پارگی راپچردیسک مؤثر است. در این مقاله برای پیش بینی تأثیر این شیارها در فشار پارگی با در نظر گرفتن میزان کرنش سختی ایجاد شده و همچنین میزان نازک شدگی ورق، راپچردیسک شبیه سازی عددی می‌شود.

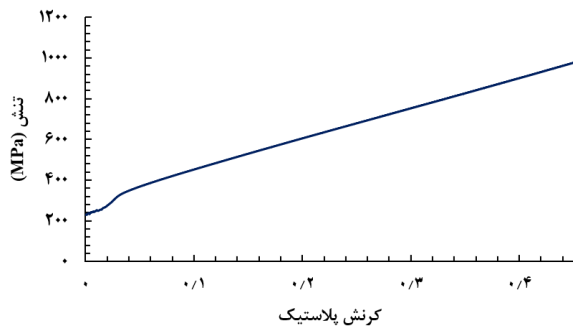
۳- آزمایش‌های تجربی

برای انجام شبیه‌سازی و بررسی میزان دقت شبیه‌سازی در پیش‌بینی فشار پارگی راپچردیسک تست کشش، تست بالچ و چند آزمایش تجربی ساخت و تست ترکیدن راپچردیسک انجام شد. برای ساخت راپچردیسک در ابتدا ورق‌های از جنس ۳۱۶L به ضخامت ۰/۳ mm به‌صورت دیسک‌هایی بریده شدند و سپس تا ارتفاع ۱۰ mm شکل‌دهی شدند. قطر قسمت بالچ شده برای هر آزمایش ۵۵ mm است. بعد از شکل‌دهی، شیارها ایجاد شدند. الگوی کلی شیارها در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور کلی راپچردیسک‌ها در دو مدل دارای سوراخ مرکزی با قطر A و بدون آن شیاردار شدند.

طول فاصله C در تعیین فشار پارگی مؤثر است؛ بنابراین نمونه‌ها با فاصله C متغیر ساخته شدند. در نمونه‌های ساخته شده این اندازه بین ۸ mm تا ۱۵ mm است. در نمونه‌هایی سوراخی به قطر A در مرکز راپچردیسک ایجاد شده است. ایجاد سوراخ مرکزی باعث تغییر



شکل ۴) الگوی شیار ایجاد شده بر روی ورق‌های فرم داده شده و نمایش مسیرهای احتمالی شکست با طول‌های P1 و P2 در تست آزمایش ورق شیارخورده

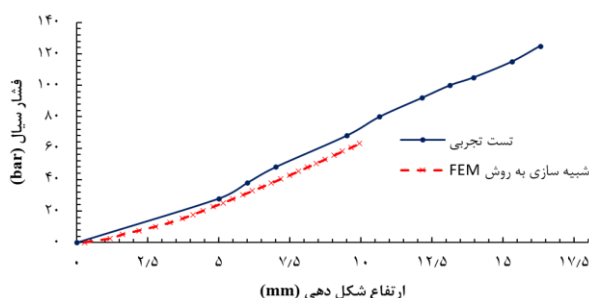


شکل ۷) رفتار تنش-کرنش پلاستیک حقیقی وارد شده به نرم افزار آباکوس

۲-۴- روش شبیه سازی عددی

در شبیه سازی با نرم افزار آباکوس، قسمت مرکزی به قطر ۵۵ mm تا ارتفاع ۱۰ mm شکل داده شد. در مرحله شکل دهی از حلگر دینامیک ضمنی استفاده شد. نوع اجزای روی ورق C3D8 بودند. برای بررسی درستی شبیه سازی تا این مرحله، از نتایج آزمون بالچ استفاده شد و رابطه بین فشار و ارتفاع شکل دهی در شبیه سازی و آزمون بالچ با هم مقایسه شدند. مقایسه این نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است.

بعد از شکل دهی ورق که به منظور ایجاد کارسختی برای جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک در فشار کاری سیستم و در نتیجه جلوگیری از تغییر فشار پارگی انجام می شود، روی ورق شکل دهی شده شیارها با غیرفعال کردن مش های محل شیار ایجاد شدند تا مراحل ساخت راپچردیسک شبیه سازی شده باشد. میزان شکل دهی مناسب به منظور جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک در فشار کاری با این روش شبیه سازی قابل پیش بینی است. بعد از شبیه سازی مراحل ساخت راپچردیسک، شبیه سازی پارگی آن با حلگر دینامیک صریح انجام شد. با این روش شبیه سازی، تأثیر نازک شدگی و کرنش های پلاستیک به وجود آمده در زمان شکل دهی، در شبیه سازی فشار پارگی لحاظ می شود. بعد از کالیبره کردن کرنش در زمان فشار پارگی با نتایج تجربی، کرنش تقریبی شکست که متأثر از کار سختی شکل دهی بالچ و تغییر مسیر کرنش است به دست می آید. از این کرنش برای تخمین فشار پارگی در الگوهای مختلف استفاده می شود. زیرا سایر نمونه ها نیز به دلیل یکسان بودن فشار شکل دهی مسیر کرنش یکسانی دارند و تفاوت آنها تنها



شکل ۸) مقایسه شبیه سازی و نتایج آزمون بالچ ورق قبل از ایجاد شیار (در آزمایش تجربی ورق تا زمان پارگی شکل دهی شده است)

در شکل دهی ورق به شکل نیم کروی قسمت مرکزی ورق تحت تنش دو محوری یکسان قرار می گیرد، اما بعد از ایجاد شیار و سپس با اعمال فشار بر روی آن، ورق تحت تنش تک محوری قرار می گیرد. به عبارتی مسیر کرنش عوض می شود. برای بررسی اثر کارسختی علاوه بر انجام این آزمایش ها، دو ورق از جنس L۳۱۶ به ضخامت ۰/۵ mm به اندازه $r=100\text{ mm}$ و $h=18\text{ mm}$ شکل دهی شدند. سپس مشابه شکل ۶ نمونه ای برای آزمایش کشش از آنها استخراج شد تا تأثیر بالچ فرمینگ بر خواص تک محوری ورق مشخص شود. این آزمایش برای جلوگیری از خطای احتمالی دو بار تکرار شد.

۴- شبیه سازی عددی

برای شبیه سازی عددی راپچردیسک کامپوزیتی از نرم افزار آباکوس استفاده شد. در ابتدا یک ورق تخت به ضخامت ۰/۳ mm در نرم افزار مدل سازی شد و خواص آزمایش آزمون کشش ورق L۳۱۶ به ضخامت ۰/۳ mm به آن داده شد.

۴-۱- خواص تعریف شده در شبیه سازی عددی

در آزمون کشش ورق از جنس SS316L تنش تسلیم ۲۲۶ MPa، استحکام نهایی ۶۵۲ MPa و درصد افزایش طول نسبی شکست در ۵۰ mm طول گیج ۷۵/۰٪ به دست آمد. با توجه به اینکه در شکل دهی بالچ، ورق کرنش های بیشتری از کرنش های آزمایش کشش تحمل می کند، نمودار تنش کرنش حقیقی در آزمون کشش با استفاده از رابطه کارسختی هولمن ($K\epsilon^n$) برون یابی شد و پس از تبدیل به نمودار تنش-کرنش پلاستیک، اطلاعات شکل ۷ وارد نرم افزار آباکوس شد. برای خواص الاستیک نیز مدول یانگ GPa۱۹۰ تعریف شد.

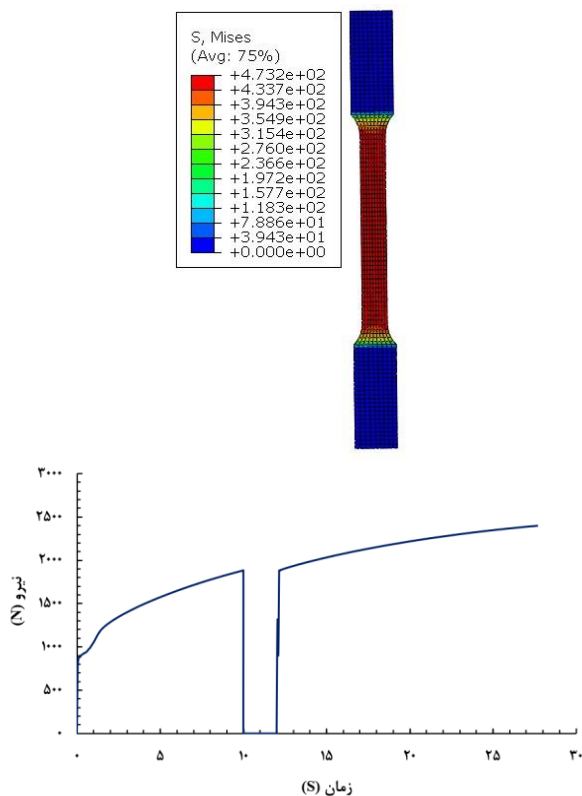


(الف)



(ب)

شکل ۶) الف- استخراج نمونه آزمون کشش از ورق شکل دهی شده به روش بالچ فرمینگ ب- انجام آزمون کشش قبل و بعد از شکل دهی



شکل ۱۰) شبیه‌سازی باربرداری و بارگذاری مجدد در آزمون کشش ورق L۳۱۶ با ضخامت ۰/۳ mm به منظور بررسی مناسب بودن کارسختی ایزوتروپیک برای استفاده در نرم افزار

محوری قرار می‌گیرند. به دلیل اینکه نوع بارگذاری در راپچردیسک‌ها که به اندازه برابر شکل‌دهی شده‌اند مشابه یکدیگر است، مسیر کرنش آنها نیز برابر است. بنابراین از میزان کرنش پلاستیک شکست یک مدل برای شبیه‌سازی مدل‌های دیگر که به همان اندازه قبل از ایجاد شیار شکل‌دهی شده‌اند، استفاده شد. میزان کرنش پلاستیک در زمان فشار پارگی برای یک مدل (بدون سوراخ مرکزی) تقریباً به میزان ۰/۲۹ به دست آمد. در نتیجه برای شبیه‌سازی راپچردیسک‌ها از این کرنش برای پیش بینی فشار پارگی مدل‌های دیگر استفاده شد.

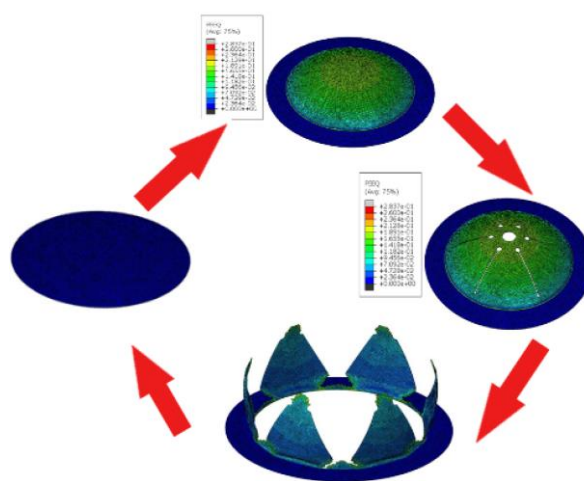
۵- نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی

مراحل ساخت راپچردیسک کامپوزیت شامل شکل‌دهی ورق به روش هیدروفورمینگ، ایجاد شیار با لیزر و استفاده از لایه آب بند غیر فلزی در زیر لایه شیاردار است. سپس نمونه‌های آماده شده تحت فشار هوا آزمایش می‌شوند تا فشار پارگی مشخص شود. فشار پارگی را ضخامت، خواص مکانیکی، میزان شکل‌دهی و الگوی شیار لایه فلزی تعیین می‌کند. این پارامترها در آزمایش‌های تجربی این مقاله در بخش آزمایش‌های تجربی معرفی گردید. بعد از ایجاد شیار، تنش‌های شکل‌دهی از دو محوری به کشش تک محوری تغییر می‌کنند و در نتیجه مسیر کرنش غیر خطی ایجاد می‌شود. همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد در

در الگوی شیار است. تغییر الگو و تخمین مجدد فشار چندین بار تکرار می‌شود تا الگوی شیار مطلوب برای رسیدن به فشار پارگی هدف پیدا شود. در صورتی که این عمل در شبیه‌سازی انجام نشود نیاز به آزمایش‌های تجربی فراوان به منظور پیدا کردن الگو و رسیدن به فشار پارگی موردنظر است. مراحل شبیه‌سازی فرایند ساخت تا شبیه‌سازی پارگی راپچردیسک در شکل ۹ نشان داده شده است.

میزان تنش‌های باقی‌مانده در راپچردیسک شبیه‌سازی شده، بعد از حذف فشار شکل‌دهی در حد تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد. اما در کرنش‌های پلاستیک تغییری به وجود نمی‌آید. برای بررسی این موضوع آزمون کشش تجربی انجام شده با معیار سخت‌شوندگی ایزوتروپیک شبیه‌سازی شد و بعد از اعمال نیرو و سپس باربرداری و بارگذاری مجدد مشاهده شد میزان کرنش‌های پلاستیک شبیه‌سازی شده قبل و بعد از بارگذاری تغییری نکرده است و نرم‌افزار به درستی سطح تنش تسلیم بعد از بارگذاری مجدد را بالاتر برده است. شکل ۱۰ رفتار نمونه در زمان باربرداری و بارگذاری مجدد را نشان می‌دهد.

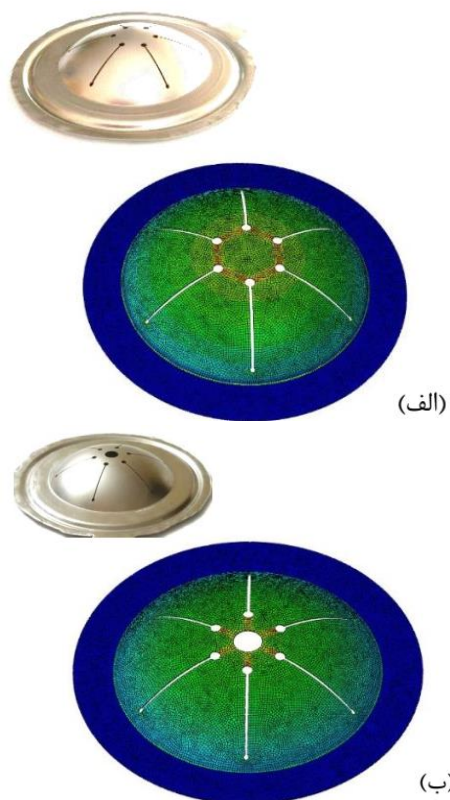
بر اساس مطالعات انجام شده میزان کرنش شکست پلاستیک معادل در بارگذاری‌های مختلف با هم متفاوت است. برای مثال کرنش پلاستیک معادل شکست در بارگذاری محوری با بارگذاری پیچشی متفاوت است و این کرنش معادل در هر دما و سرعت بارگذاری متناسب با نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش معادل می‌باشد [20,21]. برای وابستگی کرنش شکست به تنش معادل و هیدرواستاتیک شکل‌دهی روابط تحلیلی زیادی ارائه شده است. در ساخت راپچردیسک، ورق‌ها به اندازه کافی کرنش سخت می‌شوند تا در فشار کاری وارد محیط پلاستیک نشوند. از این جهت همه ورق‌ها قبل از ایجاد شیار تحت تنش دو محوری ناشی از فشار هیدروفورمینگ قرار می‌گیرند و بعد از ایجاد شیار تحت کشش تک



شکل ۹) شبیه‌سازی چرخه مراحل ساخت و آزمون ترکیب راپچردیسک. برای پیدا کردن الگوی شیار مطلوب و رسیدن به فشار هدف این چرخه تکرار می‌شود. توزیع کرنش پلاستیک قبل و بعد از ایجاد شیار برابر است.

راپچردیسک به اتمام می‌رسد و سپس فشار به صورت خطی بر روی مدل اعمال می‌شود تا شبیه‌سازی زمان پارگی نیز انجام شود. از زمان پایان بالچ میزان کرنش پلاستیک 0.18 ایجاد شده در قطعه تا حدود 90% فشار ترکیدن افزایش پیدا نمی‌کند. این در حالی است که سطح تنش در قطعه تغییر می‌کند. به عبارتی در زمان اعمال فشار مجدد تا قبل از حدود 90% فشار ترکیدن این جزء در محیط الاستیک قرار دارد و تغییر شکل پلاستیک نمی‌دهد؛ بنابراین فشار کاری این راپچردیسک بر اساس این جزء نباید بیشتر از 90% فشار ترکیدن آن باشد. اگر راپچردیسک تا این ارتفاع شکل‌دهی نمی‌شد، میزان کرنش‌های پلاستیک در زمان تست کمتر بودند یا وجود نداشتند. در نتیجه راپچردیسک در فشارهای کمتری وارد محیط پلاستیک می‌شد و باید درصد فشار کاری مجاز آن کمتر در نظر گرفته می‌شد. بیشترین تنش در زمان بالچ با فشار 63 bar در اجزاء مورد نظر ایجاد شده است. در حالی که بیشترین تنش، حاصل از فشار $16/4 \text{ bar}$ بعد از ایجاد شیار روی قطعه بوده است.

مکان شروع تغییر شکل پلاستیک در راپچردیسک‌هایی که در مرکز آن سوراخ ایجاد شده است با راپچردیسک‌های بدون شیار متفاوت است. این امر علاوه بر کاهش فشار، امکان پرتاب شدن را از بین می‌برد، به گونه‌ای که قسمت مرکزی روی هر یک از شش قسمت تقسیم می‌شود. محل شروع شکست پیش‌بینی شده در این دو نوع از راپچردیسک‌ها قبل از پارگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



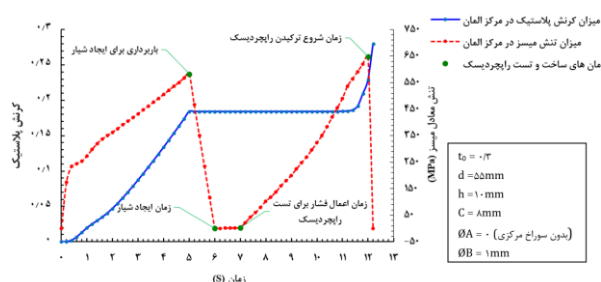
شکل ۱۲) نمایش تأثیر ایجاد سوراخ مرکزی بر روی محل شروع پارگی. الف- نمونه بدون سوراخ مرکزی ب- نمونه با سوراخ مرکزی

صورت غیر خطی بودن مسیر کرنش میزان کرنش شکست متفاوت است و بنابراین در شبیه‌سازی و تحلیل رفتار باید به این نکته توجه کرد. برای مثال از نمونه‌هایی که بعد از شکل‌دهی، نمونه تست کشش استخراج شد، تنش تسلیم از 344 MPa به 698 MPa و استحکام نهایی از 646 MPa به 786 MPa افزایش پیدا کرده بود. درصد افزایش طول نیز از 57% به 17% بعد از شکل‌دهی کاهش پیدا کرد؛ بنابراین در شبیه‌سازی راپچردیسک نمی‌توان از خواص ورق قبل از شکل‌دهی استفاده کرد. علاوه بر آن توزیع ضخامت یکسان نیست. برای حل این مشکل مرحله شکل‌دهی، شیارزنی و تست راپچردیسک با هم شبیه‌سازی شدند و بعد از شکل‌دهی ورق با حذف مش‌های قسمت شیاردار اثر کارسختی و نازک شدگی در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.

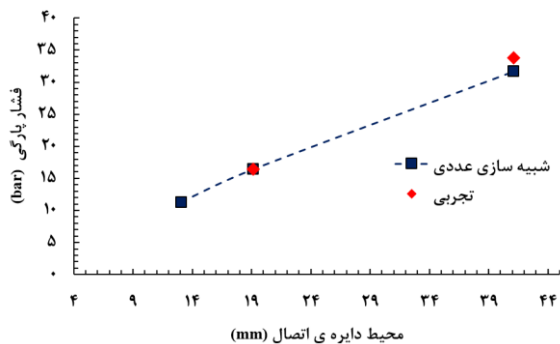
درحالی‌که ورق بدون شیار تا لحظه ترکیدن فشاری برابر با 135 bar تحمل می‌کند، ایجاد شیار بر روی آن برای ساخت راپچردیسک کامپوزیتی فشار آن را تا اندازه زیادی کاهش می‌دهد؛ بنابراین هندسه شیارهای ایجاد شده پارامتر مناسبی برای رسیدن به فشار مطلوب می‌باشند. برای پیش‌بینی فشار پارگی در اثر این متغیرها با شبیه‌سازی، میزان تقریبی کرنش پلاستیک شکست از یک مدل با آزمایش تجربی کالیبره شد و از آن برای مدل‌های دیگر استفاده شد. فشارهای پیش‌بینی شده با این روش به مقدار فشار ترکیدگی آزمایش‌های تجربی نزدیک هستند.

راپچردیسک‌ها برای اینکه از فشار پارگی تعیین شده در اثر بارهای سیکی یا ضربه‌ای انحراف پیدا نکنند، باید به گونه‌ای ساخته شوند که در فشار کاری دچار تغییر شکل پلاستیک نشوند. برای بررسی این موضوع که راپچردیسک تا چه زمانی تغییر شکل پلاستیک نمی‌دهد، نمودار کرنش پلاستیک و همچنین نمودار تنش معادل در زمان ساخت و آزمون آن بر اساس نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه شروع تغییر شکل پلاستیک از محل شکست می‌باشد، این نمودار برای یکی از اجزای محل پارگی در نظر گرفته شده است. در این نمودار ۵ ثانیه اول برای شکل‌دهی ورق به صورت نیم کروی است. سپس در مدت یک ثانیه فشار تخلیه می‌شود تا بعد از آن روی ورق به مدت یک ثانیه با غیرفعال کردن اجزا شیار ایجاد شود. بعد از ۷ ثانیه شبیه‌سازی ساخت



شکل ۱۱) رفتار المان نزدیک محل شکست در اثر اعمال فشار



شکل ۱۴) تأثیر اندازه مجموع طول اتصال (۶×P1) بر روی فشار پارگی در مدل بدون سوراخ مرکزی

۶- نتیجه‌گیری

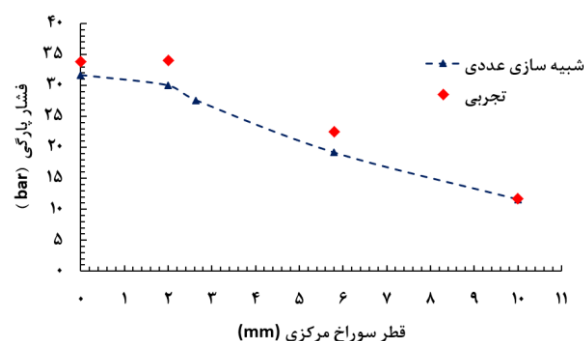
تغییر مسیر کرنش یا به عبارتی تغییر نوع بارگذاری باعث می‌شود معیارهای قدیمی‌تر که تعیین‌کننده حد شکل‌دهی در مسیرهای کرنش خطی هستند برای مسیرهای کرنش غیرخطی قابل استفاده نباشند. بیشتر فرآیندهای شکل‌دهی ورق و بارگذاری قطعات صنعتی مانند تولید و استفاده از راپچردیسک کامپوزیت مسیر کرنش خطی ندارند. در راپچردیسک کامپوزیت تغییر در میزان شکل‌دهی، فشار پارگی را تغییر خواهد داد. شبیه‌سازی مرحله شکل‌دهی و سپس ایجاد شیار با حذف اجزا و اعمال مجدد فشار سیال به ترتیب انجام شد؛ بنابراین اثر کارسختی ایجاد شده در زمان شکل‌دهی و توزیع نازک شدگی، در شبیه‌سازی آزمون پارگی در نظر گرفته شد و روشی برای پیش‌بینی فشار پارگی با توجه به این تغییر مسیر کرنش ناشی از تغییر تنش دو محوری به تک‌محوری ارائه شد. این روش شبیه‌سازی فشار پارگی راپچردیسک‌های کامپوزیت با الگوی شیار متفاوت را با میانگین خطای ۱۲٪ پیش‌بینی می‌کند. دقت شبیه‌سازی با انجام آزمایش‌های تجربی با تغییر الگوی شیار بررسی شد. در آزمایش‌های تجربی این مقاله ورق بدون شیار فشار پارگی ۱۳۵ bar دارد، اما با ایجاد شیار در الگوهای مختلف فشار پارگی بیشتر از ۱۰۰ bar کاهش می‌یابد. استفاده از این روش شبیه‌سازی در نمونه‌های آماده شده کاهش فشار را با ماکزیمم خطای ۴ bar (خطای ۳٪) پیش‌بینی می‌کند. با در نظر گرفتن کارسختی می‌توان بیشترین فشاری که راپچردیسک کامپوزیت بعد از ایجاد شیار تحمل می‌کند و تغییر شکل پلاستیک نمی‌دهد را پیدا کرد. پیدا کردن این فشار برای تعیین بیشترین فشار مجاز سیستم برای جلوگیری از تسلیم‌های تدریجی و در نتیجه کاهش فشار پارگی ضروری است. این روش شبیه‌سازی در سایر صنایع شکل‌دهی ورق که در آن بعد از شکل‌دهی، قسمت‌هایی از ورق با لیزر جدا می‌شوند و در نتیجه مسیر بارگذاری تغییر می‌کند، قابل استفاده است.

فهرست نمادها و نشانه‌ها

- C قطر دایره فرضی اتصال‌دهنده شش گلبرگ
d قطر ناحیه شکل‌دهی

برای به دست آوردن کرنش شکست، شبیه‌سازی با یک آزمون تجربی کالیبره شد. در لحظه‌ای که تمام گلبرگها در آزمایش تجربی فشار باز شدند شبیه‌سازی کرنش ۰/۲۹ را نشان می‌داد. به دلیل اینکه سایر نمونه‌ها به دلیل یکسان بودن نوع بارگذاری، مسیر کرنش غیر خطی یکسانی دارند، از این کرنش برای پیش‌بینی فشار پارگی در سایر نمونه استفاده شد. تأثیر اندازه قطر سوراخ مرکز راپچردیسک بر روی فشار پارگی در نمودار شکل ۱۳ نشان داده شده است. شبیه‌سازی نیز این نتایج را پیش‌بینی کرد. بر اساس این نمودار هرچه قطر سوراخ بزرگتر می‌شود فشار پارگی کاهش می‌یابد. دلیل کاهش فشار را می‌توان کوچکتر شدن طول مسیر P2 در اثر افزایش قطر سوراخ دانست. اندازه مجموع طول اتصال شش گلبرگ به قسمت مرکزی نیز بر روی فشار ترکیدگی تأثیرگذار است. این طول متأثر از طول C یا همان قطر دایره فرضی اتصال و ØB نشان داده شده در شکل ۴ است. به عبارتی این اندازه برابر با مجموع طول ۶ مسیر P1 است.

اثر مجموع طول مسیر اتصال در راپچردیسک‌های بدون سوراخ مرکزی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نتایج پیش‌بینی شبیه‌سازی عددی نیز در این شکل آورده شده است. هرچه طول مسیر P1 بیشتر می‌شود فشار پارگی بیشتر می‌شود. در حالی که فشار پارگی در قطعه بدون شیار برابر با ۱۳۵ bar است، بر اساس این نمودارها با ایجاد شیار فشار پارگی به میزان زیادی کاهش می‌یابد (به فشاری بین ۱۰ bar تا ۳۵ bar می‌رسد). شبیه‌سازی تا حد مطلوبی این کاهش فشار را پیش‌بینی کرده است. بیشترین خطای شبیه‌سازی به میزان ۴ bar در زمانی اتفاق افتاده است که مسیر کرنش در راپچردیسک سوراخ‌دار در زمان پارگی از حالت تک‌محوری به دو محوری نزدیک شده است. به عبارتی در این حالت نوع بارگذاری به دلیل برابر بودن طول مسیر P1 و P2 دقیقاً برابر یکی از حالت‌های شکل ۱۲ نبوده است و مسیر کرنش جدیدی به وجود آمده است. در این حالت بر خلاف سایر نمونه‌ها بعد از بارگذاری ناشی از تنش دو محوری در شکل‌دهی بالچ، نوع بارگذاری بعد از ایجاد شیار کشش تک محور نیست و در نتیجه کرنش شکست متفاوت خواهد بود.



شکل ۱۳) تأثیر قطر سوراخ مرکزی بر روی فشار پارگی

- sheet metals by bulging with stepped-dies. International Journal of Mechanical Sciences 2020;169:105321.
- 6- Bonatti C, Mohr D. Neural network model predicting forming limits for Bi-linear strain paths. International Journal of Plasticity 2020;102886.
- 7- Mu X. A New Approach to Monitoring Rupture Disc Operation. In: Volume 4: Dynamics, Control and Uncertainty, Parts A and B, Houston, Texas, USA, Friday 2012, p.473.
- 8- Malek MA. Pressure relief devices: ASME and API code simplified. New York, London: McGraw-Hill, 2006.
- 9- Lake GF, Inglis NP. The Design and Manufacture of Bursting Disks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1939;142(1):365-78.
- 10- Murty DVR, Rao YB. Computer Simulation of Rupture Disc Design. In: Volume 3: Design and Analysis, Vancouver, BC, Canada, 2006, p.233-40.
- 11- Zhu H, Xu W, Luo Z et al. Finite Element Analysis on the Temperature- Dependent Burst Behavior of Domed 316L Austenitic Stainless Steel Rupture Disc. Metals 2020;10(2):232.
- 12- Jeong JY, Lee J, Yeom S et al. A study on the grooving process of a cross-scored rupture disc. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 2012;13(2):219-27.
- 13- Jeong JY, Jo W, Kim H et al. Structural analysis on the superficial grooving stainless-steel thin-plate rupture discs. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 2014;15(6):1035-40.
- 14- Kong X, Zhang J, Li X et al. Experimental and finite element optimization analysis on hydroforming process of rupture disc. Procedia Manufacturing 2018;15:892-8.
- 15- Li X, Li J, Ding W et al. Stress Relaxation in Tensile Deformation of 304 Stainless Steel. Journal of Materials Engineering and Performance 2017;26(2):630-5.
- 16- Broomhead P, Grieve RJ. The Effect of Strain Rate on the Strain to Fracture of a Sheet Steel Under Biaxial Tensile Stress Conditions. J. Eng. Mater. Technol 1982;104(2):102-6.
- 17- Colby RB. Equivalent plastic strain for the Hill's yield criterion under general three-dimensional loading. Massachusetts Institute of Technology.
- 18- Marandi FA, Jabbari AH, Sedighi M et al. An Experimental, Analytical, and Numerical Investigation of Hydraulic Bulge Test in Two-Layer Al-Cu Sheets. J. Manuf. Sci. Eng 2017;139(3):31005.
- 19- Koç M, Billur E, Cora ÖN. An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods. Materials & Design 2011;32(1):272-81.
- 20- Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering Fracture Mechanics 1985;21(1):31-48.
- 21- Bao Y, Wierzbicki T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. International Journal of Mechanical Sciences 2004;46(1):81-98.

f	شعاع قالب تست یا شکل‌دهی بالچ
F, G, H	ضرایب ثابت در معیار هیل
h	ارتفاع شکل‌دهی
P_b	فشار پارگی
$P1$	طول مسیر اول احتمالی شکست
$P2$	طول مسیر دوم احتمالی شکست
r	شعاع ناحیه شکل‌دهی
t	ضخامت ورق بعد از شکل‌دهی در بیشترین ارتفاع
t_0	ضخامت اولیه‌ی ورق
ε_{ij}^p	میزان کرنش در هر جهت
$\varepsilon_\theta, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_z$	نشان‌دهنده کرنش اصلی در هر جهت
$\bar{\varepsilon}$	کرنش معادل
ρ	شعاع قسمت فرم داده شده به شکل کروی
$\varnothing A$	قطر سوراخ مرکزی ایجاد شده در برخی از مدل‌ها
$\varnothing B$	قطر ۶ سوراخ ایجاد شده روی دایره اتصال فرضی

تشکر و قدردانی: سپاس خداوندی را که به ما نعمت اندیشیدن بخشید. نویسندگان این مقاله از تمامی افراد مؤثر در به ثمر رسیدن این مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مقاله متعهد می‌شوند که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی دیگری ارسال نخواهد شد.

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، واگذار می‌نمایند و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است.

سهم نویسندگان: ۱- ولی اله پناهی زاده ۳۴٪ - ۲- مرتضی محبی ۳۳٪ - ۳- محمد حسین پور ۳۳٪

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Volk W, Hoffmann H, Suh J et al. Failure prediction for nonlinear strain paths in sheet metal forming. CIRP Annals 2012;61(1):259-62.
- 2- Paul SK. Path independent limiting criteria in sheet metal forming. Journal of Manufacturing Processes 2015;20:291-303.
- 3- Jocham D, Gaber C, Böttcher O et al. 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 2017;10(4):597-605.
- 4- Li H, Li G, Gao G et al. A formability evaluation method for sheet metal forming with non-linear strain path change. Int J Mater Form 2018;11(2):199-211.
- 5- He Z, Zhu H, Lin Y et al. A novel test method for continuous nonlinear biaxial tensile deformation of