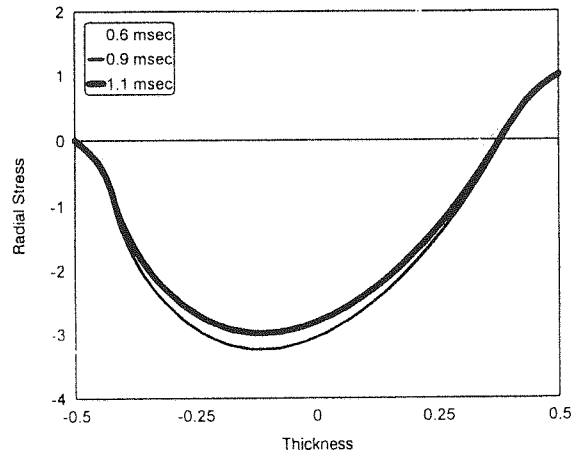
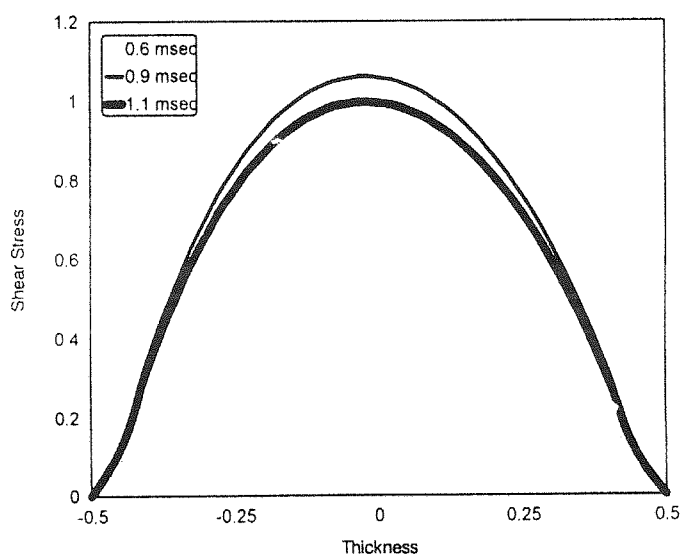


شکل (۱۲) تغییرات $\bar{\sigma}_\theta$ بر حسب شعاع \bar{r} (تک لایه 0 و $S=10$).



شکل (۱۱) تغییرات $\bar{\sigma}_r$ بر حسب شعاع \bar{r} (تک لایه 0 و $S=10$).



شکل (۱۳) تغییرات $\bar{\tau}_{r\theta}$ بر حسب شعاع \bar{r} (تک لایه 0 و $S=10$).

مراجع

- [1] J.G. Ren, "Exact solutions for laminated cylindrical shells in cylindrical bending", J. of composites Science and Technology, 29, PP. 169-187 (1987).
- [2] J.G. Ren, "Analysis of simply-supported laminated circular cylindrical shell roofs", Composites Structures, 11, PP. 277-292 (1989).
- [3] Alavandi Bhimaraddi & K. Chandrashekhara, "Three-dimensional elasticity solution for Static response of simply supported orthotropic cylindrical shell", J. of composite structures, 20, PP. 227-235 (1995).
- [4] K. Bhaskar & T.K. Varadan, "Exact elasticity solution for laminated anisotropic cylindrical shells", J. of Applied Mechanics, Vol. 60, PP. 41-47, March (1993).
- [5] K. Chandrashekhara and B.S. Kumar, "Static analysis of thick laminated circular cylindrical shells", J. of Pressure Vessel Technology, vol. 115, pp. 193-200 (1993).
- [6] H.S. Jing and K.G. Tzeng, "Elasticity solution for laminated anisotropic cylindrical panels in cylindrical bending", Composite Structures, vol. 30, pp. 307-317 (1995).
- [7] K. Chandrashekhara and K. S. Nanjunda Rao,

- “Analysis of a long thick orthotropic circular cylindrical shell panel”, J. of Engineering Mechanics, pp. 575-579 (June 1996).
- [8] M. Shakeri, M.R. Eslami, A. Alibiglu, “Dynamic analysis of thick laminated anisotropic cylindrical panel”, The Sixth East Asia-Pacific Conferences on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan. PP. 714-725, January 14-16, (1998).
- [9] M. Shakeri, M. R. Eslami, M.H. Yas, A. Alibiglu, “Elasticity solution for laminated anisotropic cylindrical panel under impulse”, First Asian-australasian Conference on Composite Materials (ACCM-1), Osaka, Japan, pp. 746-1, 746-2 (October 7-9, 1998).
- [10] Hung S. J. and Kuan G. T., “Elasticity solution for laminated anisotropic cylindrical panels in cylindrical bending”, Composite Structures, vol.30, pp. 307-317, (1995).

تحلیل فرایند شکل دهی انفجاری مخروط، مقایسه با نتایج تجربی و شبیه سازی اجزاء محدود

دکتر ابوالفضل درویشه
دانشیار
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی،
دانشگاه گیلان

مهندس داریوش جواب ور
دانشجوی دکتری
مهندسی مکانیک دانشکده فنی،
دانشگاه تربیت مدرس

دکتر غلامحسین لیاقت
دانشیار
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی،
دانشگاه تربیت مدرس

دکتر امیر عبدا...
استادیار
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی،
دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این تحقیق فرایند شکل دهی انفجاری از سه منظر تحلیلی، عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته که از دو منظر نخست و برخی آزمایش های تجربی در بر دارنده جنبه های نوآوری می باشد. در مدل تحلیلی ارائه شده فرض شده است که پروفیل تغییر شکل ورق در اثناء فرایند شکل دهی انفجاری بصورت یک مخروط ناقص می باشد که با گذشت زمان در صورت اعمال فشار مناسب به سمت یک مخروط کامل میل می کند. همچنین از تغییرات ضخامت ورق در اثناء فرایند صرف نظر گردیده است. از اهم نتایج این مدل تحلیلی ارائه معادلاتی جهت تعیین ابعاد هندسی مخروط، توزیع سرعت و جابجایی مرکز ورق بر حسب زمان، توزیع کرنش محیطی نقاط مختلف ورق تغییر شکل یافته بر حسب زمان و جرم ماده منفجره جهت تولید مخروط کامل می باشد. در شبیه سازی عددی از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS-Explicit استفاده گردید. نتایج حاصل از این شبیه سازی با اضافه برخی نتایج تجربی انطباق مطلوبی با یکدیگر و با نتایج تحلیلی داشته اند.

کلمات کلیدی

شکل دهی انفجاری، شکل دهی با سرعت بالا، شکل دهی با نرخ کرنش بالا، بارگذاری دینامیکی ورق های مدور، بارگذاری ایستاتی ورق های مدور

Analysis of Cone Forming Explosive of and a Comparison of Experimental, FEM and Analytical Results

G.Liaghat
Associate Professor
Department of Mechanical Engineering,
Tarbiat Modarres University

A. Abdullah
Assistant Professor
Department of Mechanical Engineering,
Tarbiat Modarres University

A. Darvizeh
Associate Professor
Department of Mechanical Engineering,
Gilan University

D. Javabvar
Ph. D Student
Department of Mechanical Engineering,
Tarbiat Modarres University

Abstract

Explosive forming of cone was investigated from some new analytical, numerical and experimental aspects. In the analytical modelling, it is supposed that deformation profile of plate is a truncated cone during process which will be deformed to a fully formed cone at the end of process. The variation of plate thickness was also neglected. Analysis required equations for determining cone dimensions, distribution of plate center velocity and displacement, distribution of hoop strain during process and required charge mass to produce fully formed cone are also given in this analytical model. ABAQUS/Explicit package was used for FEM simulation. The results of analytical model given in this paper are in agreement with experimental and numerical (FEM) results.

Keywords

Explosive Forming, High Speed Metal Forming, High Strain Rate Metal Forming, Dynamic Loading of Circular Plates, Impulsive Loading of Circular Plates

فرایند شکل دهی انفجاری عبارتست از شکل دادن به قطعات با استفاده از انرژی مواد منفجره که به روش های مختلفی انجام می شود. در شکل دهی انفجاری، مخروط ورق بر روی یک قالب مخروطی قرار گرفته و ماده منفجره نیز در فاصله معینی از آن استقرار می یابد، انفجار ماده منفجره سبب رانده شدن ورق به درون حفره مخروطی قالب شده و شکل مخروط را به خود می گیرد. جهت افزایش راندمان، تجهیزات در یک مخزن آب قرار گرفته و انفجار در زیر آب صورت می پذیرد [۱]. فرایند شکل دهی انفجاری در زمینه تولید ارزان قطعات پیچیده و بزرگ در زمان کوتاه و البته در حجم پائین تولید، کاربردهای متنوع دارد. این ویژگی های منحصر بفرد می تواند سبب استخدام این روش در صنایع گوناگون شکل دهی ورق و پوسته بالاخص در صنایع هوا-فضا و نظامی کشور گردد، جائیکه از قابلیت و پیشینه زیاد کاربا مواد منفجره برخوردار می باشد. پوسته های مخروطی از جمله قطعات مهم در صنایع هوا-فضا بوده که تولید آنها به روش های سنتی با مشکلات عدیده همراه می باشد. از جمله این کاربردها می توان به پوسته های دوکی شکل یا اوجیوال نظیر پوسته های سر جنگی و راکت ها اشاره نمود. تولیدسر جنگی های کالیبر بالا با استفاده از روش های متداولی نظیر فورج به علت بالا رفتن تناژ و کورس آن با مشکلات فراوان مواجه بوده که باعث می شود این سر جنگی ها به جای فلز از فایبر گلاس ساخته شوند که البته سبب کاهش قدرت انفجار و تخریب سر جنگی می شود شکل دهی انفجاری بهینه ترین راه غلبه بر این معضل می باشد.

در جریان جنگ جهانی دوم نیلور، هودسون، ریچاردسون و کیرک وود اولین محققینی بودند که در زمینه اثر بارهای دینامیکی بر روی رفتار صفحات فلزی نازک مطالعاتی انجام دادند [۲].

هودسون [۳] نظریه ساده ای که در آن تنش های محیطی و تنش های شعاعی لحاظ شده بودند را ارائه داد، اما پدیده انتشار موج و اندر کنش متقابل دو موج خمشی و کششی را نادیده گرفت. هدف اصلی او عبارت بود از تبیین شکل نهایی دیافراگم گیردار پس از تغییر شکل دینامیکی در اثر یک موج انفجاری در زیر آب، مدل ارائه شده از سوی او از این قرار است که یک لولای پلاستیک که شکل دیافراگم را تغییر می دهد از مرکز گیردار به سمت مرکز ورق با سرعت ثابتی حرکت می کند و این در حالیست که نواحی مرکزی دیافراگم که هنوز لولای پلاستیک بدانجا نرسیده است، تخت باقی مانده و در جهت عرضی حرکت می کنند. با رسیدن لولای پلاستیک به مرکز ورق فاز اول تغییر شکل پایان پذیرفته و به دلیل بر

خورداری ورق از مقداری انرژی جنبشی ناشی از فاز اول، فاز دوم تغییر شکل بصورت تغییر شکل چرخشی یال های مخروط در صفحات شعاعی عمود بر قاعده مخروط بوقوع می پیوندد. هودسون تنها اثر نیروهای غشایی را مهم فرض کرده و از دخالت ممان های خمشی صرفنظر نموده است. همچنین او اثر نرخ کرنش را نیز وارد تحلیل خود نکرده است. پروسه حل او منجر به یک سری دستگاه معادلات دیفرانسیل غیر خطی می شود که حل آنها تحت شرایط خاص منجر به تعیین پروفیل تغییر شکل یافته نهایی، توزیع ضخامت و زمان خاتمه تغییر شکل ورق می گردد. او تغییر شکل نهایی دیافراگم، را تقریباً مخروطی بدست می آورد، در حالیکه در نخستین بار تاردیف [۴] از روش شکل دهی انفجاری جهت تولید مخروط از گرده های فلزی استفاده نمود. سوای جدید بودن و پیش کسوتی، کار او در بردارنده یک بررسی دقیق تجربی و یا تحلیلی بوده است. تنها بررسی نسبتاً جامع تجربی در این زمینه متعلق به تراویس و جانسون [۵] می باشد، اما کار با ارزش آنها نیز تنها محدود به کسب پاره ای نتایج تجربی بوده است.

تحقیق در زمینه شکل دهی انفجاری مخروط از دو دیدگاه حائز اهمیت و جدید می باشد. دیدگاه نخست مربوط به حالت تغییر شکل پایدار ورق در اثر انفجار در داخل حفره قالب مخروطی می باشد. از آنجائیکه در این حالت ورق بدون هیچگونه مهاری در دهانه قالب قرار می گیرد، در اثناء فرایند تغییر شکل، لبه ورق در امتداد جداره قالب حرکت کرده و در نتیجه مسئله از لحاظ شرایط مرزی ثابت نمی باشد. از طرف دیگر جهت نیل به پروفیل مخروط کامل، ورق مجبور به تحمل تغییر شکل زیاد می باشد که بالاخص در مورد زوایای رأس کمتر این موضوع نمود بیشتری خواهد داشت. همچنین بدلیل وجود قالب، اندر کنش میان قالب و ورق مسئله را به لحاظ تحلیلی پیچیده تر می کند [۵].

با ارائه یک مدل جهت تحلیل تغییر شکل ورق در حالت پایدار، نحوه ارتباط با تأثیر پارامترهای مربوط به ماده منفجره (فاصله استقرار و مقدار ماده منفجره)، متغیرهای هندسی مخروط (شعاع و ضخامت ورق و زاویه رأس مخروط) و جنس ورق نمود بهتری خواهد داشت. این امر به مهندس ساخت و تولید اجازه می دهد تا فرایند تولید مخروط به روش انفجاری را بصورت مناسبی طراحی و تدوین نماید.

دیدگاه دوم مربوط به تغییر شکل ناپایدار ورق در داخل حفره مخروطی قالب می باشد. این نوع ناپایداری پلاستودینامیک که معمولاً چروکیدگی (Wrinkling) نامیده

می شود در کار تجربی تراویس و جانسون [۶] و همچنین گرمی [۷] مشاهده گردیده است. ولی تاکنون بصورت مجزی مورد بررسی و تحقیق جدی قرار نگرفته است. علیرقم عدم غنای تحقیقاتی در زمینه شکل دهی انفجاری، تحقیقات در این زمینه هنوز ادامه داشته و در کنفرانس های جهانی بررسی رفتار فیزیکی و مکانیکی مواد تحت بارگذاری دینامیکی، شکل دهی انفجاری یکی از مقوله های مورد بحث می باشد [۸]. جدیدترین تحقیقات داخلی در این زمینه نیز در مراجع [۱،۹،۱۰] آمده اند.

۲- مدل سازی اجزاء محدود [۱۶]

فرایند شکل دهی انفجاری توسط کد اجزاء محدود ABAQUS Explicit شبیه سازی شد [۱۱]. در این مدل فرض شده است که یک ورق مدور فلزی در معرض ضربه ناشی از یک بار گسترده نمایی بصورت $P=P_0 e^{-t/\theta}$ به درون یک قالب مخروطی رانده می شود (شکل ۱)، به عبارت دیگر اثر موج انفجار بر روی ورق با ضربه ناشی از یک بار گسترده نمایی معادل سازی گردیده است [۶،۱۷]. مقدار مناسب θ برابر 200 μsec بوده [۱۶] و مقدار P_0 بصورت یک متغیر ورودی می باشد.

مشخصات مدل مورد استفاده در شبیه سازی اجزاء محدود به شرح زیر است:

- المان بندی ورق با المان های S4R و S3R
- المان بندی قالب مخروطی با المان های R3D3
- رفتار تنش و کرنش ماده بصورت الاستیک خطی - پلاستیک کامل (Linear Elastic - Perfectly Plastic)
- بار گسترده یکنواخت بر تمام سطح ورق با توزیع نمایی کاهنده نسبت به زمان
- توضیح آنکه تنش تسلیم مواد مورد استفاده از راه آزمایش حاصل گردیدند.

۳- آزمایش های تجربی [۱۲ و ۱۳]

جهت نیل به مدارک و شواهد تجربی، تعداد زیادی آزمایش شکل دهی انفجاری طراحی و اجراء شد. در شکل ۲ نمونه ای از قالب های بکار رفته و چیدمانی اجزاء نشان داده شده است. ابتدا گرده های فلزی از جنس فولاد و آلومینیم و به قطرهای ۸۰ و ۱۰۰ میلیمتر و ضخامتهای ۱/۶ و ۱ میلیمتر روی دهانه قالب های فولادی با زوایای ۹۰، ۶۰ و ۱۲۰ درجه بطور مناسبی قرار می گیرند (جهت قرار مطلوب ورق ها در دهانه قالب می توان از یک پله کوچک در دهانه قالب بعنوان نشیمنگاه ورق استفاده کرد) در زیر قالب های فلزی سوراخی جهت تخلیه هوای داخل حوزه قالب تعبیه شده است. پس از قرار

گیری مطلوب ورق ها بر روی دهانه قالب، اجزاء بایستی بطور کامل آب بندی گردند. بدین منظور می توان از مواد آب بندی مناسبی جهت انسداد محل نشیمنگاه ورق و سوراخ تحتانی قالب استفاده کرد. در این خصوص خمیر مجسمه سازی در تجربیات این تحقیق عملکرد مناسبی داشته است. مرحله بعد عبارتست از استقرار مقدار مناسب ماده منفجره در فاصله مناسب از سطح کار که این دو عامل از جمله مهمترین فاکتورهای دخیل در فرایند می باشند. در تجربیات این تحقیق از ماده منفجره خمیری شکل C4 که به آسانی شکل پذیر می باشد در فاصله استقرار ۱۵۰ میلیمتری از سطح کار استفاده گردید. بمنظور استقرار مناسب و با قوام ماده منفجره بایستی از بست مناسبی استفاده گردد. مرحله بعد عبارتست از برقرار ساختن یک زنجیره آتش مناسب که در تجربیات این تحقیق از چاشنی الکتریکی ۶ یا ۸ که در ماده منفجره C4 بطور مناسبی جاسازی شده و بوسیله سیم های رابط به یک باطری الکتریکی در فاصله مناسب از محل اجراء آزمایش (حداقل ۲۰۰ متر برای تا ۲۰ الی ۴۰ گرم C4) وصل می گردد. جهت ایمنی، قرارگیری کلیه پرسنل در حفاظ یک سنگر بتنی لازم می باشد. مرحله نهایی عبارتست از قرار دادن قالب در یک مخزن آب که به طرق مختلفی امکان پذیر است، می توان قالب را روی یک نشیمنگاه مناسب در کف مخزن مستقر کرد و یا بوسیله زنجیر و قلاب از داریستی فلزی که در بیرون مخزن بر پا شده است، در درون مخزن آب غوطه ور ساخت. حفر مخزن درون چاله ای در زمین و تقویت اطراف آن بوسیله بتن، عمر استفاده از مخزن را بالا می برد. در هر صورت نکات متعدد تجربی وجود دارد که ذکر تمام آنها از حوصله این مقاله خارج می باشد، آنچه بسیار مهم است مسئله رعایت ایمنی کامل در کار با مواد منفجره می باشد که در این میان استفاده از نیروی متخصص جهت کار با مواد منفجره، بهره گیری از کارشناسان زبده ایمنی و بهداشت، مراعات فاصله امن از انفجار و پناهگیری ایمن از اهم نکات ایمنی در این خصوص می باشد.

۴- مدل سازی تحلیلی

شکل های ۳ و ۴ مد تغییر شکل ورق در اثناء پروسه شکل دهی انفجاری مخروط منتج از اجزاء کد اجزاء محدود ABAQUS را نشان می دهد که انطباق مطلوبی با نتایج تجربی دارد (شکل ۵ [۱۲]). همانطوریکه در این اشکال دیده می شود در هر مرحله از زمان، پروفیل تغییر شکل ورق بصورت یک مخروط ناقص بوده که با پیشرفت زمان شعاع قاعده تحتانی این مخروط کوچکتر شده و در نهایت به سمت یک مخروط کامل (در صورت اعمال فشار کافی) میل می کند.

$$m = P \cdot A \cdot T \quad (2)$$

$$F = P \cdot A \quad (3)$$

$$P = P_0 e^{-t/\theta} \quad (4)$$

از جایگذاری معادلات (۲) و (۳) و (۴) در (۱) خواهیم داشت:

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{P_0 e^{-t/\theta}}{\rho T} \quad (5)$$

معادله زیر برای تعیین سرعت عمودی ناحیه تخت مرکزی از انتگرال معادله (۵) با توجه به سرعت اولیه صفر ورق بدست می آید:

$$v_2 = \frac{P_0 \theta}{\rho T} (1 - e^{-t/\theta}) \quad (6)$$

همچنین با عنایت به شرایط اولیه یعنی صفر بودن جابجایی عمودی در زمان صفر و با انتگرالگیری از معادله (۶) جابجایی عمودی ناحیه تخت مرکزی (قاعده تحتانی) بصورت ذیل حاصل می گردد.

$$h_2 = \frac{P_0 \theta}{\rho T} (t - \theta + \theta e^{-t/\theta}) \quad (7)$$

با توجه به هندسه شکل ۶ و معادله (۶) سرعت لولای پلاستیک بطریق زیر بدست می آید:

$$-R_2 = v_2 \tan \alpha \quad (8)$$

$$-R_2 = \frac{P_0 \theta}{\rho T} \tan \alpha (1 - e^{-t/\theta}) \quad (9)$$

$$R_2 = R_0 \quad \text{در } t=0; \quad (10)$$

انتگرال گیری از معادله (۹) با توجه به شرایط اولیه (۱۰) منجر به محاسبه شعاع قاعده تحتانی به صورت ذیل می گردد.

$$R_2 = R_0 - \frac{P_0 \theta}{\rho T} \tan \alpha (t - \theta + \theta e^{-t/\theta}) \quad (11)$$

از سوی دیگر قانون بقاء حجم در پلاستیسیته با فرض عدم تغییر ضخامت به تساوی سطوح جانبی مخروط ناقص و ورق اولیه منجر شده که در نتیجه آن شعاع قاعده فوقانی مخروط یعنی R_1 بصورت ذیل حاصل می گردد.

هر چند در عمل و همچنین در نتایج حاصل از کد اجزاء محدود قاعده تحتانی مخروط کاملاً تخت نبوده و از اندکی انحنا بر خوردار می باشد، لیکن جهت جلوگیری از پیچیدگی تحلیل، در مدل تحلیلی ارائه شده در شکل ۶ از این انحنا صرف نظر شده است و قاعده تحتانی کاملاً تخت در نظر گرفته شده است.

دقیقتر می توان گفت که یک لولای پلاستیک از محیط پیرامون ورق به سمت مرکز آن حرکت کرده که نواحی در نور دیده توسط آن بصورت جداره یک مخروط ناقص خم گشته و بر سطح دیواره قالب مماس می گردد. پدیده ای از این دست در تجربیات و نظریات محققین بسیاری مشاهده می شود [۳].

۱-۴- محاسبه سرعت لولای پلاستیک، سرعت عمودی و جابجایی عمودی مرکز ورق در هنگام تغییر شکل

جهت شبیه سازی پدیده انفجار بمنظور احراز پیچیدگی مدل تحلیلی، تنها اثر دریافتی موج انفجار توسط ورق در نظر گرفته می شود، بدین منظور این اثر با ضربه ناشی از یک بار گسترده نمایی معادل سازی گردید [۱۷ و ۶]. با توجه به مد تغییر شکل حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود (شکل های ۳ و ۴) و نتایج تجربی (شکل ۵) یک مدل تحلیلی ساده جهت محاسبه سرعت لولای پلاستیک، سرعت و جابجایی عمودی مرکز ورق در هنگام تغییر شکل در شکل ۶ ارائه شده است، همانطوریکه در این شکل دیده می شود یک لولای پلاستیک با سرعت R_2 از محیط به سمت مرکز ورق حرکت کرده و در زمان t به شعاع R_2 رسیده است. نواحی از ورق که دارای شعاعی بیشتر از R_2 بوده بصورت یک مخروط ناقص خم شده و نواحی با شعاع کمتر از R_2 بصورت تخت باقی مانده و هنوز تغییر شکلی را احساس نکرده اند. این ناحیه تخت با سرعت عمودی v_2 به سمت پائین حرکت می کند. در غیاب مؤلفه های عمودی نیرو مقدار این سرعت ثابت باقی می ماند [۳] ولی در اثر حضور نیروهای عمودی ناشی از فشار انفجار مقدار این سرعت ثابت باقی نمانده و با زمان تغییر می کند. در اینجا جهت ساده سازی مدل از تغییرات ضخامت ورق صرف نظر می شود. لازم به ذکر است با اینکه این فرض کاملاً صحیح نمی باشد، ولی تأثیر چندانی بر نتایج حاصل از این تحلیل ندارد. در اینصورت برای المان بسیار کوچکی واقع بر ناحیه مرکزی ورق (شکل ۶) قانون دوم حرکت بصورت زیر نوشته می شود.

$$F = m \cdot \frac{dv_2}{dt} \quad (1)$$

سطح جانبی مخروط ناقص = سطح ورق اولیه

$$\pi R_0^2 = \frac{\pi}{\sin \alpha} (R_1^2 - R_2^2) + \pi R_2^2 \quad (12)$$

$$R_1 = \sqrt{R_0^2 \sin \alpha + R_2^2 (1 - \sin \alpha)} \quad (13)$$

که مقدار R_2 در معادله اخیر از معادله (۱۱) بدست می آید.

۴-۲- برآورد میزان فشار و جرم ماده منفجره مورد نیاز برای تولید مخروط کامل

معادلات (۱۱) و (۱۳) مبین ارتباط ابعاد مخروط ناقص با پارامترهای انفجار و قالب می باشد. از این معادلات فشار مورد نیاز جهت تولید مخروطی با ابعاد خاص قابل استخراج می باشد. برای نمونه فشار مورد نیاز برای تولید مخروط ناقص با شعاع قاعده تحتانی R_2 در لحظه خاتمه تغییر شکل (t_f) بصورت ذیل با استفاده از معادله (۱۱) بدست می آید:

$$P_0 = \frac{\rho T \cot \alpha (R_0 - R_2)}{\theta (t_f - \theta + \theta e^{-t_f/\theta})} \quad (14)$$

از نتایج جالب معادله اخیر محاسبه فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل می باشد. که بدین منظور کافی است R_2 یعنی شعاع قاعده تحتانی مخروط ناقص به سمت صفر میل کند، در این صورت فشار مورد نیاز P_{2f} به قرار ذیل خواهد بود:

$$P_{0f} = \frac{\rho T R_0 \cot \alpha}{\theta (t_f - \theta + \theta e^{-t_f/\theta})} \quad (15)$$

استفاده از سه جمله اول بسط نمایی ذیل:

$$e^{-t_f/\theta} = 1 - t_f/\theta + t_f^2/2\theta^2 \quad (16)$$

باعث ارائه نمایش ساده تر از معادله (۱۵) بصورت ذیل می گردد:

$$P_{0f} = \frac{2\rho R_0 T \cot \alpha}{t_f^2} \quad (17)$$

تعیین مقدار دقیق زمان خاتمه تغییر شکل بسیار مشکل است، اما مقدار تقریبی آن $t_f \approx 250 \mu\text{sec}$ است [۱۶]. از جمله مهمترین متغیرهای ساخت و تولید در فرایند شکل دهی انفجاری برآورد جرم ماده منفجره مورد نیاز بوده که در اینجا

بدان پرداخته می شود. بدین منظور از قانون بقاء ممنتوم (اندازه حرکت) که در مورد فرایندهای شکل دهی با مواد منفجره بصورت بقاء ایمپالس بر واحد سطح نیز قابل بیان می باشد، استفاده می شود. فشار ناشی از موج انفجار تابعی نمایی از زمان به شکل زیر دارد [۱۴]:

$$P_e = P_m e^{-t/\theta} \quad (18)$$

که در معادله فوق مقدار θ تقریباً $10-30 \mu\text{sec}$ بوده [۱۷ و ۶] که در اغلب محاسبات این مقدار آن برابر $20 \mu\text{sec}$ در نظر گرفته شده است نیز P_m با جرم ماده منفجره و فاصله استقرار آن از ورق دارای رابطه ذیل است [۱۴]:

$$P_m = k \left(\frac{M^{1/3}}{S} \right)^\beta \quad (19)$$

بدلیل انعکاس موج از روی سطح ورق مقدار ایمپالس بر واحد سطح ورق ناشی از انفجار دو برابر شده و دارای مقدار زیر خواهد بود:

$$I_e = 2 \int_0^{t_f} P_m e^{-t/\theta} dt \quad (20)$$

$$I_e = 2 \theta_e (1 - e^{-t_f/\theta}) \quad (21)$$

درمدل ارائه شده در (شکل ۶) ورق در معرض ضربه ناشی از یک بار گسترده با توزیع نمایی زمانی زیر قرار دارد:

$$P = P_0 e^{-t/\theta} \quad (22)$$

مقدار ایمپالس بر واحد سطح ورق ناشی از این بار عبارتست از:

$$I = \int_0^{t_f} P_0 e^{-t/\theta} dt \quad (23)$$

$$I = P_0 \theta (1 - e^{-t_f/\theta}) \quad (24)$$

حال با استفاده از قانون بقاء ایمپالس بر واحد سطح یعنی با معادل سازی معادلات (۲۱) و (۲۴) خواهیم داشت:

$$P_m = \frac{P_0 \theta}{2\theta_e} \left(\frac{1 - e^{-t_f/\theta}}{1 - e^{-t_f/\theta_e}} \right) \quad (25)$$

همچنین حل معادله (۱۹) بر حسب جرم ماده منفجره منجر

می شود به :

$$P_{mf} = \frac{P_{0f}\theta}{2\theta_e} \left(\frac{1 - e^{-t_f/\theta}}{1 - e^{-t_f/\theta}} \right) \quad (26)$$

با جایگذاری مقدار P_m از معادله (25) در معادله (26) جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید یک مخروط ناقص با شعاع قاعده تحتانی R_2 بدست می آید. همانطوریکه قبلاً بحث شد جهت تولید یک مخروط کامل ($R_2=0$) مقدار معینی از P_0 مورد نیاز می باشد که P_{0f} نامیده می شود و مقدار آن با استفاده از معادلات (15) یا (17) بدست می آید که با جایگذاری این مقدار در معادله (25) و (26) جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل بصورت زیر بدست می آید :

$$P_{mf} = \frac{P_{0f}\theta}{2\theta_e} \left(\frac{1 - e^{-t_f/\theta}}{1 - e^{-t_f/\theta}} \right) \quad (27)$$

$$M_f = \left[S \left(\frac{P_{mf}}{k} \right)^{1/\beta} \right]^3 \quad (28)$$

۴-۳- توزیع کرنش محیطی

شکل ۷ ورق را در دو حالت بدون تغییر شکل یعنی لحظه $t=0$ و در یک زمان دلخواه t که بصورت یک مخروط ناقص تغییر شکل یافته نشان می دهد. اگر ناحیه ای از ورق اولیه به شعاع r به مخروط ناقصی به شعاع فوقانی x و شعاع تحتانی R_2 تبدیل شده باشد، در این صورت با فرض ثابت انگاشتن ضخامت، اصل بقاء حجم، تبدیل به اصل بقاء سطوح جانبی این دو ناحیه می شود یعنی :

$$\pi r^2 = \int_{R_2}^x \frac{2\pi x dx}{\sin \alpha} + \pi R_2^2 \quad (29)$$

از انتگرال گیری معادله (29) خواهیم داشت :

$$x^2 = r^2 \sin \alpha + R_2^2 (1 - \sin \alpha) \quad (30)$$

کرنش محیطی به صورت ذیل می شود :

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2} \ln \frac{x^2}{r^2} \quad (31)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2} \ln \left[\sin \alpha + \left(\frac{R_2}{r} \right)^2 (1 - \sin \alpha) \right], R_2 < r < R_0 \quad (32)$$

در معادله اخیر مقدار R_2 خود تابعی از زمان بوده که با استفاده از معادله (11) بدست می آید و بدین ترتیب معادله (32) مقادیر کرنش محیطی در جداره مخروط ناقص را به صورت تابعی از زمان نشان می دهد. نتایج زیر برای مقادیر کرنش محیطی صریحاً از معادله (32) قابل حصول می باشند.

$$r = R_2; \quad \varepsilon_\theta = 0 \quad (33)$$

$$r = R_0;$$

$$\varepsilon_{\theta m} = \frac{1}{2} \ln \left[\sin \alpha + \left(\frac{R_2}{R_0} \right)^2 (1 - \sin \alpha) \right] \quad (34)$$

همچنین شعاع قاعده فوقانی مخروط یعنی R_1 با استفاده از معادله (30) بصورت زیر بدست می آید :

$$r = R_0; \quad R_1^2 = R_0^2 \sin \alpha + R_2^2 (1 - \sin \alpha) \quad (35)$$

نتایج مشاهده پذیر و قابل مقایسه با تجربه زمانی بدست می آید که مقدار کرنش ماکزیمم و شعاع قاعده فوقانی را در مخروط کامل بدست آورده که در این حالت کفایت مقدار R_2 یعنی شعاع تحتانی مخروط در معادلات (34) و (35) برابر صفر اختیار گردد که در اینصورت معادلات زیر مقدار کرنش حداکثر و شعاع قاعده مخروط را بدست می دهند.

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2} \ln (\sin \alpha) \quad (36)$$

$$R_{1f} = R_0 \sqrt{\sin \alpha} \quad (37)$$

۴-۴- نتایج تحلیلی، عددی و تجربی

در این بخش جهت حصول مقایسه ای میان نتایج تحلیلی و عددی، حالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین حتی المقدور سعی گردیده تا این نتایج با برخی از نتایج تجربی قابل اندازه گیری نیز مقایسه شوند. محدودیت عمده در آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری، امکان پائین اندازه گیری کمیتات و متغیرهای آن بالاخص در اثناء فرایند می باشد. که عمدتاً ناشی از زمان بسیار اندک و ماهیت تخریبی و ایمنی پائین فرایند انفجار می باشد.

۴-۴-۱- سرعت عمودی مرکز ورق

حالت اول: توزیع سرعت عمودی مرکز یک گرده فولادی به ضخامت ۱ میلیمتر در معرض یک فشار گسترده نمایی با مقدار ماکزیمم $P_0=25\text{MPa}$ و زاویه 60° درجه با استفاده از

جدول (۴) مقادیر تحلیلی و عددی سرعت عمودی مرکز گروه فولادی.

$$(P_0 = 48 \text{ MPa}, T = 1.6 \text{ mm}, 2\alpha = 60^\circ)$$

زمان μsec	$v_2 (m/s)$	
	تحلیلی	ABAQUS
50	170	160
100	302	320
150	405	440
200	486	480

جدول (۳) مقادیر تحلیلی و عددی سرعت عمودی مرکز گروه فولادی.

$$(P_0 = 12.5 \text{ MPa}, T = 1 \text{ mm}, 2\alpha = 120^\circ)$$

زمان μsec	$v_2 (m/s)$	
	تحلیلی	ABAQUS
50	71	80
100	126	130
150	169	200
200	202	270

۳-۵. توزیع کرنش محیطی

توزیع کرنش محیطی در نقاط مختلف یک گروه فولادی به ضخامت $1/6$ میلیمتر در یک قالب 60° در معرض $P_0=33 \text{ MPa}$ در زمان های مختلف با استفاده از معادلات تحلیلی (۱۱) و (۳۲) عبارتست از :

$$R_2 = 50 - 105.7 \left(\frac{t}{200} - 1 + e^{-t/200} \right) \quad (39)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2} \text{Ln} \left(0.707 + 0.293 \left(\frac{R_2}{r} \right)^2 \right) \quad (40)$$

برخی از مقادیر عددی منتج از معادلات اخیر در جدول (۵) نشان داده شده است. نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود در شکل ۱۲ و جدول ۵ آمده است.

معادله تحلیلی (۵) بصورت زیر است (دانشیته فولاد 7800 و دانشیته آلومینیوم 2700 کیلوگرم بر مترمکعب است).

$$v_2 = 641 (1 - e^{-t/200}) \quad (38)$$

همچنین شکل ۸ توزیع سرعت عمودی نقاط مختلف همین گروه را در زمان های مختلف تغییر شکل با استفاده از مدل سازی عددی و با توجه به معادله (۳۸) مقادیر سرعت عمودی مرکز گروه منتج از مدل سازی تحلیلی جهت مقایسه آسانتر در جدول ۱ نشان داده شده اند.

جدول (۱) مقادیر تحلیلی و عددی سرعت عمومی مرکز گروه فولادی.

$$(P_0 = 25 \text{ MPa}, T = 1 \text{ mm}, 2\alpha = 90^\circ)$$

زمان μsec	$v_2 (m/s)$	
	تحلیلی	ABAQUS
50	142	160
100	270	240
150	326	340
200	400	370

به طریق اولی نتایج مربوط به حالت قالب 60° درجه با مقادیر $P_0=48 \text{ MPa}$ و $T=1.6 \text{ mm}$ در شکل (۹) و جدول (۳) نمایش داده شده است.

همچنین شکل (۱۰) و جدول (۳) نتایج مربوط به حالت قالب 120° درجه با مقادیر $P_0=12.5 \text{ MPa}$ و $T=1 \text{ mm}$ را نمایش می دهند.

۲-۵. جابجایی عمودی مرکز ورق

شکل (۱۱) توزیع جابجایی عمودی نقاط مختلف یک گروه فولادی در زمان های مختلف تغییر شکل در یک قالب 60° درجه و در حالت $P_0=30 \text{ MPa}$ و $T=1 \text{ mm}$ با استفاده از مدل اجزاء محدود نشان می دهد. با توجه به این شکل جابجایی عمودی مرکز گروه و با توجه به معادله ۷ نتایج تحلیلی در جدول ۴ آمده است.

جدول (۶) توزیع کرنش محیطی در نقاط مختلف يك گرده فولادی.

$$(P_0 = 17 \text{ MPa}, T = 1.6 \text{ mm}, 2\alpha = 120^\circ)$$

t μsec	R ₂ (mm)	r (mm)	ε _θ	
			تحليلی	ABAQUS
150	29	45	-0.03	-0.02
		50	-0.04	-0.04
200	15	30	-0.05	-0.03
		35	-0.057	-0.04
		50	-0.065	-0.06

جدول (۷) توزیع کرنش محیطی در نقاط مختلف يك گرده فولادی.

$$(P_0 = 30 \text{ MPa}, T = 1 \text{ mm}, 2\alpha = 60^\circ)$$

t μsec	R ₂ (mm)	r (mm)	ε _θ	
			تحليلی	ABAQUS
200	17	25	-0.156	-0.125
		35	-0.24	-0.225
250	2.3	10	-0.25	-0.23
		30	-0.34	-0.35

برای يك مخروط کاملاً شكل یافته مقادير ماكزيمم کرنش محیطی با استفاده از معادله تحليل (۳۶) و همچنین با استفاده از مدل اجزاء محدود در جدول (۸) آمده است:

جدول (۸) مقادير تحليلی و عددی کرنش ماكزيمم برای يك مخروط كامل.

2α (درجه)	ε _{θmf}	
	تحليلی	ABAQUS
60	-0.35	-0.39
90	-0.17	-0.17
120	-0.07	-0.06

شكل ۱۵ يك مصداق تجربی مهم در تاييد معادله تحليلی

در حالت قالب ۱۲۰ درجه و گرده فولادی به ضخامت ۱/۶ ميليمتر و P₀=17MPa نتايج مربوط به دو مدل در جدول ۶ و شكل ۱۳ نمايش داده شده است. همچنين در حالت قالب ۶۰ درجه و گرده فولادی به ضخامت ۱ ميليمتر و P₀=30MPa نتايج مربوط به دو مدل در جدول ۷ و شكل ۱۴ نمايش داده شده است.

جدول (۴) مقادير تحليلی و عددی سرعت عمودی مرکز گرده فولادی.

$$(P_0 = 30 \text{ MPa}, T = 1 \text{ mm}, 2\alpha = 60^\circ)$$

زمان μsec	h ₂ (mm)	
	تحليلی	ABAQUS
50	4.4	4.4
100	16.4	15.5
150	34.2	34.8
200	56.6	57.7

جدول (۵) توزیع کرنش محیطی در نقاط مختلف يك گرده فولادی.

$$(P_0 = 33 \text{ MPa}, T = 1.6 \text{ mm}, 2\alpha = 90^\circ)$$

t μsec	R ₂ (mm)	r (mm)	ε _θ	
			تحليلی	ABAQUS
100	38.7	45	-0.039	-0.02
		50	-0.06	-0.05
150	26.5	35	-0.06	-0.05
		40	-0.089	-0.08
		50	-0.118	-0.115
200	11	25	-0.13	-0.095
		30	-0.14	-0.12
		50	-0.16	-0.17

(۳۷) می باشد. در این آزمایش زاویه رأس قالب ۹۰ درجه و شعاع اولیه گرده فولادی ۴۰ میلیمتر بوده است. با استفاده از معادله تحلیلی (۳۷) قطر مخروط کاملاً شکل یافته ۶۷ میلیمتر بدست می آید که دقیقاً منطبق بر نتیجه تجربی می باشد.

۴-۵- جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل

در جدول ۹ مقادیر تجربی و تحلیلی جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل با توجه به جنس و هندسه مخروط آورده شده است. مقادیر تحلیلی با استفاده از معادلات (۱۷)، (۲۷) و (۲۸) بدست آمده اند. ثوابت ماده منفجره عبارتند از [۱۴]:

$$\beta = 1.13; k = 385000; s = 15 \text{ cm}$$

جدول (۹) مقادیر تجربی و تحلیلی جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل.

جنس	2α	R_0 (mm)	T (mm)	M_f (gr)	
				تحلیلی	تجربی
فولاد	90	50	1	10.3	12.7 [5]
فولاد	90	50	1.6	17.7	19 [13]
فولاد	60	50	1	21.8	19 [5]
فولاد	120	50	1	8.4	8 [5]
آلومینیم	90	50	1	4.7	6 [5]
آلومینیم	90	50	1.6	5	5-6 [5]
آلومینیم	90	40	1	2.6	3 [13]
آلومینیم	60	40	1	5.8	6 [13]
آلومینیم	120	50	1	1.5	1.5 [5]
آلومینیم	120	50	1.6	2	2 [5]

بحث

اساس تحلیل ارائه شده در این تحقیق بر این اصل استوار بوده است که در اثناء فرایند شکل دهی انفجاری مخروط، پروفیل تغییر شکل ورق بصورت یک مخروط ناقص می باشد که نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی و همچنین نتایج تجربی مؤید این فرض می باشد.

توجه به منحنی جابجایی در شکل ۴ و نتایج تجربی در شکل (۵) همچنین یکنواختی سرعت عمودی نقاط مرکزی در منحنی های ۹، ۸ و ۱۰ صحت مدعای فوق را نشان می دهد. همچنین در منحنی های کرنش محیطی در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در تمامی زمان تغییر شکل بجز زمان پایانی، در نواحی مرکزی، کرنش معادل صفر را نشان می دهند که این موضوع نیز کاملاً با نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی که بر اساس تخت باقی ماندن نواحی مرکزی ارائه شده است (معادله (۳۳)) قابل توجیه می باشد و بالاخره انطباق قابل قبول نتایج تحلیلی و تجربی در مورد ابعاد مخروط نهایی و جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل (شکل ۱۵ و جدول ۹) دیگر مؤیدان مدل ارائه شده می باشند.

در برخی از آزمایش های تجربی [۱۲ و ۱۳]، نواحی مرکزی قطعه کار بالاخص در محل شیارهای کم عمق حاصل از اثر سوزن خط کش جهت ایجاد مش بندی برای اندازه گیری کرنش، دچار پارگی و سوراخ می گردد (شکل های ۱۶ و ۱۷) که به نظر می رسد ناشی از کشش مفرط این نواحی در زمان های پایانی تغییر شکل باشد. مشاهده کرنش های مثبت شدید در مرکز ورق در منحنی های کرنش حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود (شکل های ۱۲ و ۱۳ و ۱۴) سبب تقویت ایده فوق می گردد.

در آزمایش های تجربی [۱۲ و ۱۳] یک گرادیان ضخامت در طول دیواره مخروط مشاهده می گردد که در اغلب موارد با یک روند کاهش از سمت قاعده مخروط به سمت رأس آن همراه می باشد. این پدیده توسط روش اجزاء محدود شبیه سازی شد (شکل ۱۸) ولی لحاظ آن در مدل تحلیلی سبب پیچیدگی بسیاری می شود و به همین دلیل بررسی کمی و کیفی این پدیده از جنبه های تجربی و تحلیلی موضوع یک کار تحقیقاتی دیگر می باشد.

در قالب با زاویه ۶۰ درجه پدیده چروکیدگی بوجود می آید (شکل ۱۹) این پدیده همچنین در تنها کار تجربی قابل ملاحظه در زمینه شکل دهی انفجاری مخروط [۵] مشاهده گردیده است، ولی مورد بررسی نظری و تجربی قرار گرفته نشده است و راهکاری نیز جهت کنترل آن اندیشیده نشده است. بررسی کامل این پدیده بطریق تحلیلی و تجربی بخش مکمل تحقیق حاضر بوده که موضوع مقاله مفصل دیگری می باشد [۱۵]. در این مقاله با استفاده از روش انرژی و ارائه یک مدل تحلیلی مسئله کمانش پلاستودینامیک (چروکیدگی در شکل دهی انفجاری مخروط) مورد بررسی نظری و مقایسه با نتایج تجربی قرار گرفته شده است. بکارگیری صحیح ورق گیر جهت کنترل چروکیدگی از جمله نوآوری های تحقیق بالا می باشد.

در حالات متعددی در زاویه ۶۰ درجه پدیده گوشه دار شدن محصول نهایی به وقوع پیوست که می تواند ناشی از انیزوتروپی باشد. تعداد این گوشه ها در صورت استفاده از ورق گیر برای فولادی چهار عدد می باشد (شکل ۲۰) [۱۳]. همچنین در نمونه های به نسبت کوچک فولادی (شعاع ۲۵ و ضخامت ۱ میلیمتر) تحت زاویه رأس ۶۰ درجه علیرغم دقت زیاد در هم مرکز سازی ورق و ماده منفجره، تغییر شکل نامتقارنی بوقوع پیوست (شکل ۲۱) که بنظر می رسد ناشی از گونه ای ناپایداری موسوم به تغییر شکل ناهمسان (Uneven Draw) باشد، این پدیده زمانی بوقوع می پیوندد که اندازه ورق به اندازه کافی بزرگ نباشد که این مقدار به اندازه کافی بزرگ خود تابع پارامترهای متعدد شکل دهی انفجاری می باشد [۱۴].

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق تحلیل شکل دهی انفجاری مخروط ارائه شد و با نتایج شبیه سازی اجزاء محدود مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج حاصل از این دو مدل با یکدیگر و در برخی موارد با نتایج تجربی انطباق مطلوبی داشته اند. اهم دستاوردهای نوین این تحقیق عبارتند از: مد تغییر شکل ورق، توزیع سرعت و جابجایی نقاط مختلف ورق در هنگام تغییر شکل، کرنش محیطی و وزن ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل.

۸- تشکر و قدردانی

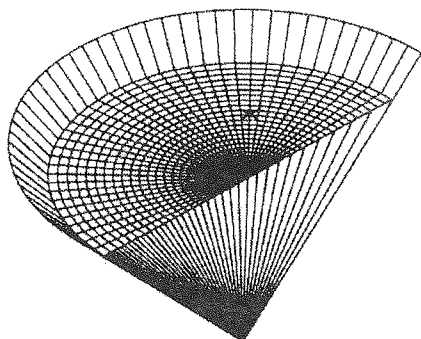
پژوهشگران این تحقیق مراتب تقدیر و سپاس خویش را از آقایان پروفسور گرمی از دانشگاه لیدز انگلستان بخاطر مساعدت بیدریغ در امر شبیه سازی اجزاء محدود و همچنین پروفسور الحسنی از دانشگاه یومیست انگلستان بخاطر فراهم نمودن امکان استفاده از نرم افزار ABAQUS و دیگر راهنمایی ها ابراز می دارند.

فهرست علائم

- A: مساحت المان مرکز ورق
- F: نیروی اعمال شده بر المان مرکز ورق
- h_2 : جابجایی عمودی مرکز ورق
- I: ایمپالس بر واحد سطح ورق ناشی از بار گسترده نمائی P
- I_1 : ایمپالس بر واحد سطح ورق ناشی از انفجار
- k: ثابت ماده منفجره
- M: جرم ماده منفجره
- M_F : جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تشکیل مخروط کامل

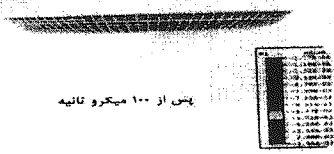
- m: جرم المان مرکز ورق
- p: بار گسترده نمائی اعمال شده بر ورق
- P_0 : حداکثر مقدار P
- P_{of} : حداکثر مقدار P مورد نیاز جهت تشکیل مخروط کامل
- P_e : فشار ناشی از موج انفجار
- P_m : حداکثر مقدار P_e
- P_{mf} : حداکثر مقدار P_e مورد نیاز جهت تشکیل مخروط کامل
- R_0 : شعاع اولیه ورق تغییر شکل نیافته
- R_1 : شعاع قاعده بزرگ (قاعده فوقانی) مخروط ناقص
- R_{1f} : شعاع قاعده مخروط کامل (Fully Formed Cone)
- R2: شعاع قاعده کوچک (قاعده تحتانی) مخروط ناقص
- R2: سرعت لولای پلاستیک
- r: مختصه شعاعی در دستگاه مختصات ورق تغییر شکل نیافته
- S: فاصله استقرار ماده منفجره
- T: ضخامت ورق
- t: زمان
- t_r : زمان خاتمه تغییر شکل
- v_2 : سرعت عمودی مرکز ورق
- x: مختصه شعاعی المان های روی دیواره مخروط
- α : نیم زاویه رأس مخروط
- β : ثابت ماده منفجره
- θ : ثابت زمانی وابسته به بار گسترده نمایی P
- θ_e : ثابت زمانی وابسته به ماده منفجره
- ϵ_0 : کرنش محیطی
- ϵ_{0m} : کرنش محیطی حداکثر
- ϵ_{0mf} : کرنش محیطی حداکثر مخروط کامل

ABAQUS

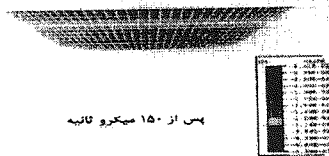


شکل (۱) چیدمانی ورق در مدل سازی ABAQUS.

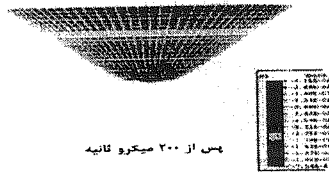
ABAQUS



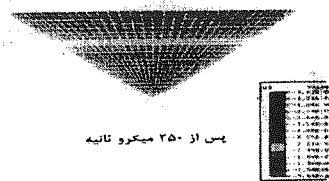
ABAQUS



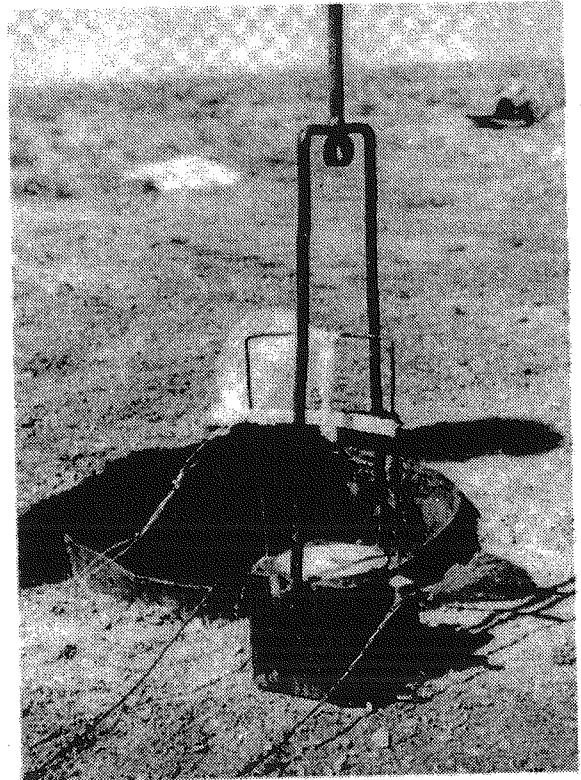
ABAQUS



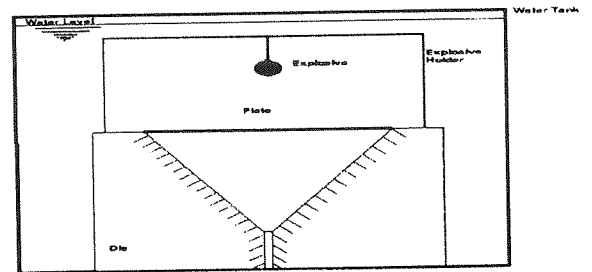
ABAQUS



شکل (۳) پروفیل تغییر شکل ورق در شکل دهی انفجاری مخروط.



شکل (۲) = الف) چیدمانی آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری مخروط.

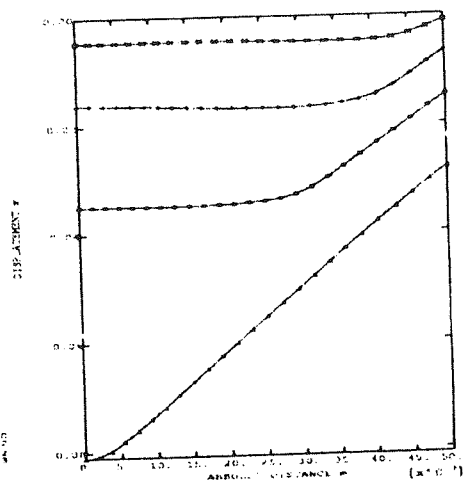


شکل (۲) = ب) شماتیک چیدمانی اجزاء آزمایش های تجربی.

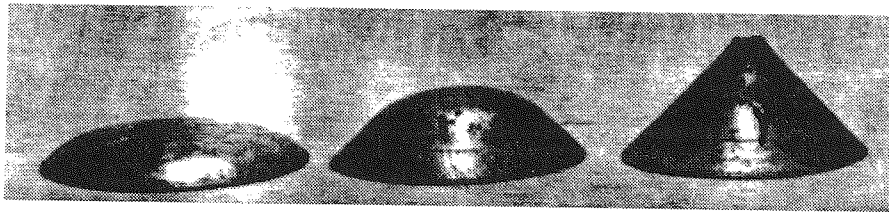
ABAQUS

- ۵۰ میکرو تانیه
- ۱۰۰ میکرو تانیه
- ۱۵۰ میکرو تانیه
- ۲۰۰ میکرو تانیه
- ۲۵۰ میکرو تانیه

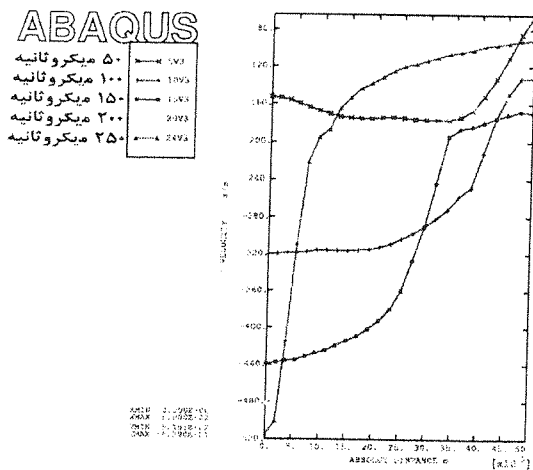
MAX 0.000000
MIN 9.010000
AVERAGE 1.433000



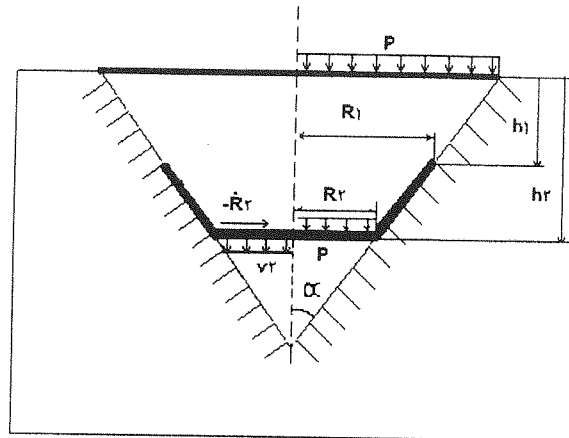
شکل (۴) پروفیل تغییر شکل ورق در شکل دهی انفجاری مخروط.



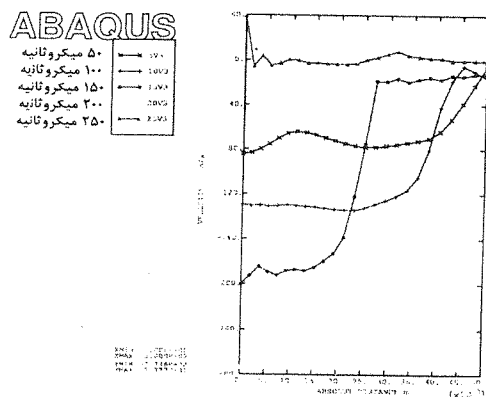
شکل (۵) مد تغییر شکل ورق در تجربیات شکل دهی انفجاری مخروط.



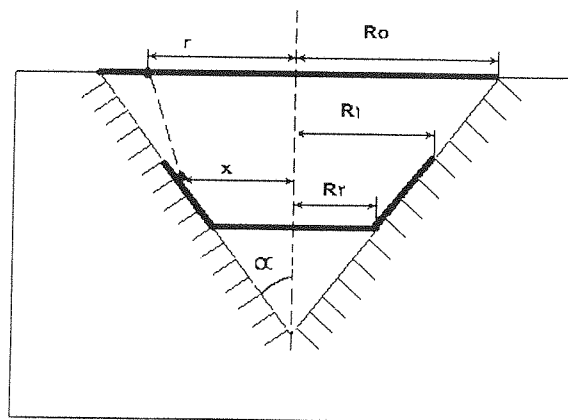
شکل (۹) سرعت عمومی نقاط مختلف در زمان های متفاوت در نمونه ۶۰ درجه به ضخامت ۱/۶ میلیمتر



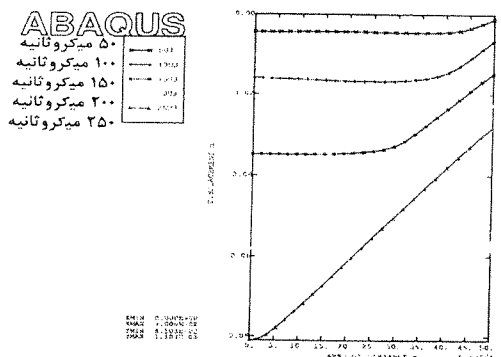
شکل (۶) شمائی از مدل تحلیلی ارائه شده در این تحقیق.



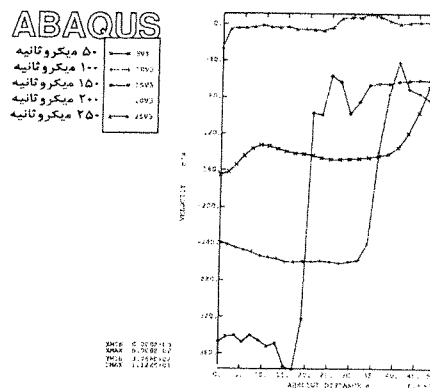
شکل (۱۰) توزیع سرعت عمومی نقاط مختلف ورق فولادیه ضخامت ۱ میلیمتر در زمان های مختلف در قالب ۱۲۰ درجه فولاد.



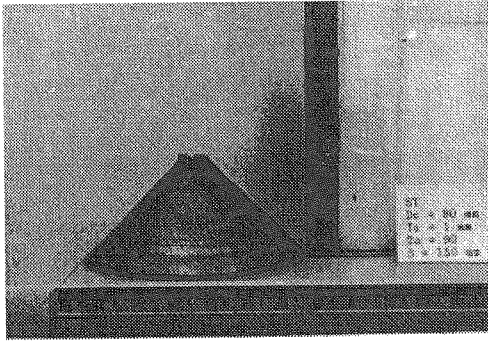
شکل (۷) شمائی از مدل ارائه شده جهت محاسبه کرنش محیطی.



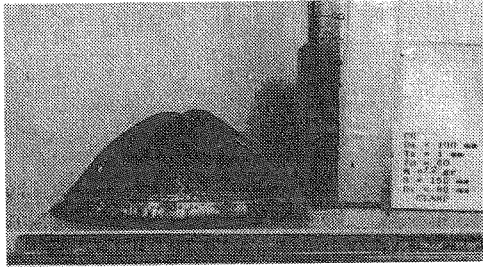
شکل (۱۱) جابجایی عمومی نقاط مختلف در زمان های متفاوت در نمونه فولادی ۶۰ درجه به ضخامت ۱ میلیمتر.



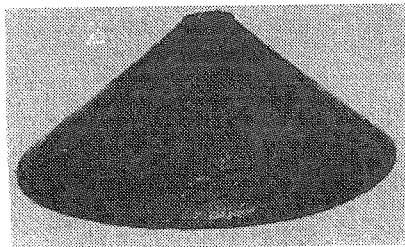
شکل (۸) سرعت عمومی نقاط مختلف در زمان های متفاوت در نمونه ۹۰ درجه فولادی به ضخامت ۱ میلیمتر.



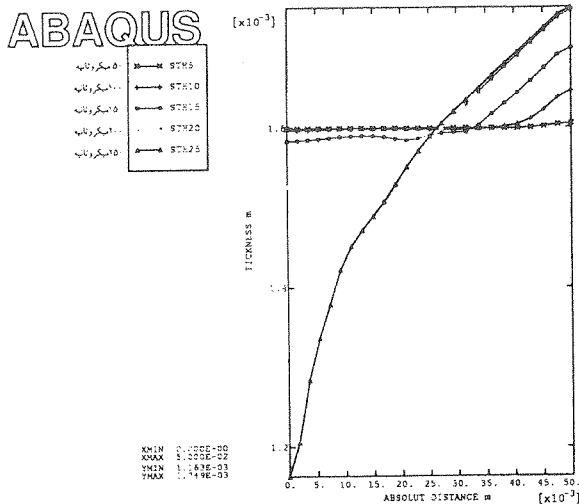
شکل (۱۵) مخروط فولادی ۹۰ درجه تولید شده در آزمایش های تجربی این تحقیق.



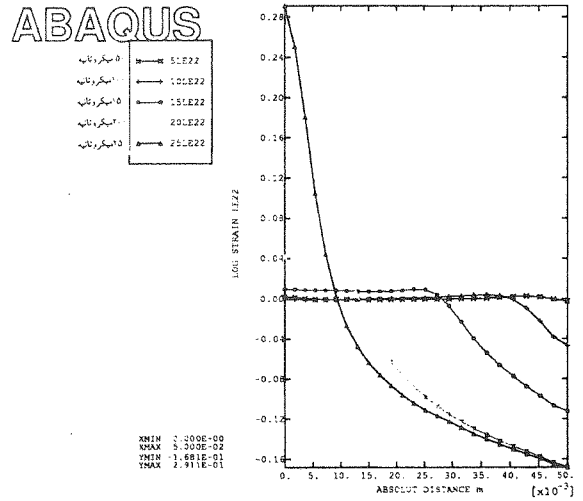
شکل (۱۶) پارگی در محل خطوط مش بندی در نمونه ۶۰ درجه مسی.



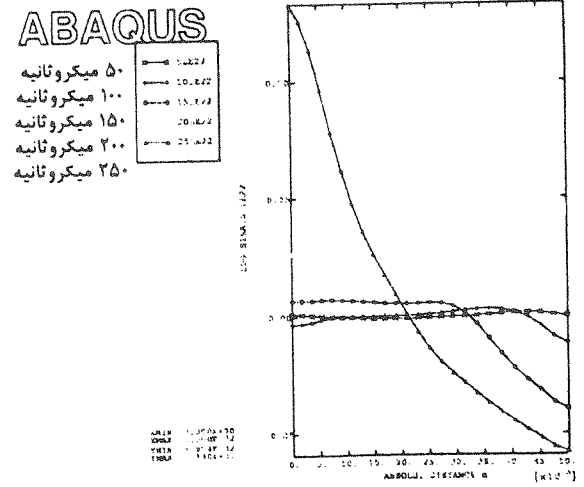
شکل (۱۷) ایجاد سوراخ در محصول نهایی بدلیل بر فشار هوای درون قالب به بیرون.



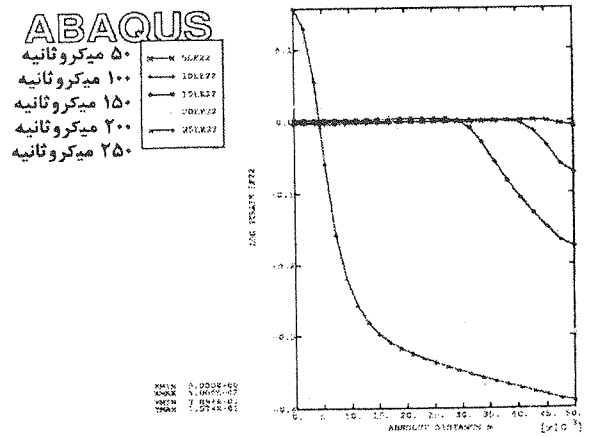
شکل (۱۸) گردآیان ضخامت در نقاط مختلف و زمان های متفاوت در شکل دهی انفجاری مخروط منتج از شبیه سازی اجزاء محدود.



شکل (۱۲) توزیع کرنش محیطی نقاط مختلف پک گرده فولادی به شعاع اولیه ۵۰ و ضخامت ۱/۶ میلیمتر در زمان های متفاوت در قالب ۹۰.



شکل (۱۳) توزیع کرنش نقاط مختلف در زمان های متفاوت در نمونه ۱۴۰ درجه.



شکل (۱۴) توزیع کرنش نقاط مختلف در زمان های متفاوت در نمونه ۶۰ درجه به ضخامت ۱ میلیمتر.