

# بررسی تحلیلی، تجربی و عددی پروفیل کرنش و جرم ماده منفجره مورد نیاز در شکل دهی انفجاری مخروط

غلامحسین لیاقت

استاد

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

داریوش جواب ور

استادیار

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

ابوالفضل درویشه

استاد

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

امیر عبدالله

استادیار

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

در این تحقیق فرآیند شکل دهی انفجاری مخروط از سه منظر تحلیلی، عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته که از دو منظر نخست و برخی آزمایشهای تجربی در بردارنده جنبه های نوآوری می باشد. در مدل تحلیلی ارائه شده فرض شده است که پروفیل تغییر شکل ورق در اثناء فرآیند 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 فرآیند صرف نظر گردیده است. از اهم نتایج این مدل تحلیلی ارائه معادلاتی جهت تعیین توزیع کرنش محیطی نقاط مختلف ورق تغییر شکل یافته بر حسب زمان و جرم ماده منفجره مورد نیاز 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 دارند.

## کلمات کلیدی

شکل دهی انفجاری (Explosive Forming)، شکل دهی با سرعت بالا (High Speed Metal Forming)، شکل دهی با نرخ کرنش بالا (High Strain Rate Metal Forming)، بارگذاری دینامیکی ورقهای مدور (Dynamic Loading of Circular Plates)، بارگذاری ایмпالسی ورقهای مدور (Impulsive Loading of Circular Plates)

## Analytical, Experimental and Numerical Study of Hoop Strain Profile and Required Charge Mass During Cone Explosive Forming

G. Liaghat

Professor

Department of Mechanical Engineering,  
Tarbiat Modarres University

D. Javabvar

Assistant Professor

Department of Aerospace Engineering,  
Shaheed Sattari Air University

A. Darvize

Professor

Department of Mechanical Engineering,  
Gillan University

A. Abdullah

Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering,  
Tarbiat Modarres University

## Abstract

*Cone-shaped explosion forming of cone was investigated by new analytical, experimental and numerical approach. In the analytical modelling, it is supposed that deformation profile of plate is a truncated cone during process that will be deformed to a fully formed cone at the end of process. The variation of plate thickness was also neglected. Analysis of the required equations for determining the distribution of hoop strain during the process and the required charge mass are also given in this model.*

*ABAQUS/Explicit package was used for the FEM simulation. The results of the analytical model given in this paper are in agreement with the experimental and the 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*

## مقدمه

فرآیند شکل‌دهی انفجاری عبارتست از شکل دادن به قطعات با استفاده از انرژی مواد منفجره که به روشهای مختلفی انجام می‌شود. در شکل‌دهی انفجاری مخروط (شکل ۱)، ورق بر روی یک قالب با حفره مخروطی بدون هیچگونه مهاریهی قرار گرفته و ماده منفجره نیز در فاصله معینی از آن استقرار می‌یابد. انفجار ماده منفجره سبب رانده شدن ورق به درون حفره مخروطی قالب شده و شکل مخروط بخود می‌گیرد. جهت افزایش راندمان، تجهیزات در یک مخزن آب قرار گرفته و انفجار در زیر آب صورت می‌پذیرد. فرآیند شکل‌دهی انفجاری در زمینه تولید ارزان قطعات پیچیده و بزرگ در زمان کوتاه و البته در حجم پایین تولید کاربردهای متنوع دارد. این ویژگیهای منحصر بفرد می‌تواند سبب کاربرد این روش در صنایع گوناگون شکل‌دهی ورق و پوسته بالاخص در صنایع هوافضا و نظامی کشور گردد، جائیکه از قابلیت و پیشینه زیاد کار با مواد منفجره برخوردار می‌باشد. پوسته‌های مخروطی از جمله قطعات مهم در صنایع هوافضا بوده که تولید آنها به روشهای سنتی با مشکلات عدیده همراه می‌باشد. از جمله این کاربردها می‌توان به پوسته‌های دوکی شکل نظیر پوسته‌های سر جنگی و راکت‌ها اشاره نمود. تولید سر جنگی‌های کالیبر بالا با استفاده از روشهای متداولی نظیر فورج به علت بالا رفتن تناژ و کورس آن با مشکلات فراوان مواجهه بوده که باعث میشود این سر جنگی‌ها به جای فلز از فایبر گلاس ساخته شوند که البته سبب کاهش قدرت انفجار و تخریب سر جنگی می‌شود. شکل‌دهی انفجاری راه بهینه غلبه بر این معضل می‌باشد.

نخستین بار تاردیف [۱] از روش شکل‌دهی انفجاری جهت تولید مخروط از گرده‌های فلزی استفاده نمود اما سوای جدید بودن و پیش کسوتی کار او در بردارنده یک بررسی دقیق تجربی و یا تحلیلی نبوده است. تنها بررسی نسبتاً جامع تجربی در این زمینه متعلق به تراویس و جانسون [۲] می‌باشد، هرچند کار با ارزش آنها نیز تنها محدود به کسب نتایج تجربی بوده است. کارهای تجربی اخیر در مراجع [۳، ۴] آمده است. تحلیل این فرآیند به دلایل متعدد از جمله ماهیت شکل‌دهی انفجاری مخروط همراه با تغییر شکل زیاد، نرخ کرنش بالا، شرایط مرزی متحرک (Moving Boundary Conditions) در اثر عدم مهار لبه ورق و حرکت آن در طول جداره حفره قالب، اندرکنش مابین جداره حفره قالب و ورق در جریان فرآیند مسئله تحقیقی نوین و بفرنجی را مطرح می‌سازد [۵]. کارهای تحلیلی منتشره در این زمینه منحصر به مراجع [۶، ۷، ۸] می‌باشد.

ارائه یک مدل تحلیلی سبب آشکارسازی نحوه ارتباط و 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 در فرآیند می‌گردد. این امر به مهندس ساخت و تولید اجازه می‌دهد تا فرآیند تولید مخروط به روش انفجاری را بصورت مناسبی طراحی و تدوین نماید. هدف از این تحقیق که در مقاله حاضر و مقاله [۱۵] ارائه می‌گردد دستیابی به این مهم است.

## ۱- آزمایشهای تجربی

جهت نیل به مدارک و شواهد تجربی، تعداد زیادی آزمایش شکل‌دهی انفجاری طراحی و اجراء شد [۴،۳].

### ۱-۱- قطعات کار

جنس، خواص مکانیکی و فیزیکی مواد مورد استفاده در تجربیات این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱) جنس و خواص مواد مورد استفاده در تجربیات این تحقیق.

جنس	E(GPa)	$Y_s$ (MPa)	$\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )
St	200	249.25	7800
Al	69	91.46	2700
Cu	115	169.54	8940

توضیح آنکه هر جا که به نتایج تجربی رجوع داده می‌شود، مرجع نتایج تجربی این تحقیق [۴،۳] می‌باشد با استثناء معدود مواردی که از نتایج تجربی [۲] در ارتباط با جرم ماده منفجره مورد نیاز برای تولید مخروط کامل بمنظور مقایسه با نتایج تحلیلی استفاده می‌گردد. جنس و خواص مواد مورد استفاده در تجربیات مرجع [۲] در جدول ۲ آمده است:

جدول (۲) جنس و خواص مواد مورد استفاده در تجربیات مرجع [۲].

جنس	E(GPa)	$Y_s$ (MPa)	$\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )
St	200	249.25	7800
Al	69	115	2700

### ۱-۲- چیدمانی اجزاء

ابتدا گردهای فلزی روی دهانه قالبهای فولادی با زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه بطور مناسبی قرار می‌گیرند (جهت قرار مطلوب ورق‌ها در دهانه قالب می‌توان از یک پله کوچک در دهانه قالب بعنوان نشیمنگاه ورق استفاده کرد) در زیر قالب‌های فلزی سوراخی جهت تخلیه هوای داخل حفره قالب تعبیه شده است. پس از قرارگیری مطلوب ورق بر روی دهانه قالب، اجزاء بایستی بطور کامل آب بندی گردند. بدین منظور می‌توان 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 فرآیند می‌باشند. در تجربیات این تحقیق از ماده منفجره خمیری C4 که به آسانی شکل پذیر می‌باشد در فاصله 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 گشته و بوسیله سیم‌های رابط به یک باتری الکتریکی در فاصله مناسب از محل اجراء آزمایش (حداقل ۲۰۰ متر برای ۳۰ الی ۴۰ گرم C4) وصل می‌گردد. جهت ایمنی قرارگیری کلیه پرسنل در حفاظ یک سنگر بتنی لازم می‌باشد. مرحله نهایی عبارتست از قرار دادن قالب در یک مخزن آب که به طرق مختلفی امکان‌پذیر است، می‌توان قالب را روی یک نشیمنگاه مناسب در کف مخزن مستقر کرد و یا بوسیله زنجیر و قلاب از داربستی فلزی که در بیرون مخزن برپا شده است در درون مخزن آب غوطه‌ور ساخت. حفر مخزن درون چاله‌ای در زمین و تقویت اطراف آن بوسیله بتن عمر استفاده از مخزن را بالا می‌برد. در هر صورت نکات متعدد تجربی وجود دارد که ذکر تمام آنها از حوصله این مقاله خارج می‌باشد. آنچه بسیار مهم می‌باشد مسئله رعایت ایمنی کامل در کار با مواد منفجره می‌باشد که در این میان استفاده از

نیروی متخصص جهت کار با مواد منفجره، بهره‌گیری از کارشناسان زنده ایمنی و بهداشت، مراعات فاصله امن از انفجار و پناهگیری ایمن از اهم نکات ایمنی در این خصوص می‌باشد. شکل ۲ نمونه‌ای از چیدمانی مورد استفاده در تجربیات این تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۱-۳- کرنش سنجی

دوایر متحدالمرکزی با استفاده از اثر سوزن فولادی نشانگر با عمق ناچیز بر روی گرده‌های فلزی ایجاد گردیده و پس از فرآیند نیز میزان جابجایی آثار سنجیده شده و سپس با استفاده از معادله کرنش محیطی محاسبه می‌گردد. اندازه‌گیری فواصل با استفاده از دستگاهی نوری موسوم به پروفایل پروژکتور با دقت  $0/001$  میلیمتر صورت پذیرفته است.

### ۲- مدل‌سازی اجزاء محدود

فرآیند شکل دهی انفجاری مخروط توسط کد اجزاء محدود ABAQUS-Explicit شبیه‌سازی گشت [۹]. در این مدل فرض شده است که یک ورق مدور فلزی در معرض ضربه ناشی از یک بار گسترده نمایی بصورت  $P = P_0 e^{-\frac{t}{\theta}}$  به درون یک قالب مخروطی رانده می‌شود، به عبارت دیگر اثر موج انفجار بر روی ورق با ضربه ناشی از یک بار گسترده نمایی معادل‌سازی شده است [۱۰]. این معادل‌سازی در مراجع [۱۲، ۱۱، ۵] نیز مشاهده می‌گردد.

مشخصات مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزاء محدود به شرح زیر است [۱۰]:

۱- المان بندی ورق با المانهای S3R و S4R

۲- المان بندی قالب مخروطی با المان R3D3

۳- رفتار تنش و کرنش ماده بصورت الاستیک خطی - پلاستیک کامل (Linear Elastic-Perfectly Plastic)

۴- بار گسترده یکنواخت بر تمام سطح ورق با توزیع نمایی کاهنده نسبت به زمان با مقدار  $\theta = 200 \mu sec$

۵- زمان خاتمه تغییرشکل  $t_f = 250 \mu sec$  [۱۴، ۱۳، ۱۲، ۵]

### ۳- مدل‌سازی تحلیلی

بطور خلاصه مدل ارائه شده جهت تحلیل تغییرشکل پایدار ورق در قالب مخروطی بر اساس دو فرض زیر بناء گردیده است:

- ۱- پروفیل تغییرشکل ورق در هر لحظه از زمان یک مخروط ناقص با قاعده کوچک تخت در نظر گرفته شده است که با گذشت زمان به سمت یک مخروط کامل (در صورت اعمال فشار کافی) میل می‌کند. شعاع قاعده کوچک این مخروط ناقص در هر لحظه از زمان به کمک معادلات زیر بدست می‌آید [۱۵]:

$$R_2 = R_0 - \frac{P_0 \theta}{\rho T} \tan \alpha \left( t - \theta + \theta e^{-\frac{t}{\theta}} \right) \quad (1)$$

$$P_{0f} = \frac{\rho T R_0 \cot \alpha}{\theta \left( t_f - \theta + \theta e^{-\frac{t_f}{\theta}} \right)} \quad (2)$$

۲- از تغییرات ضخامت صرف‌نظر شده است.

### ۳-۱- توزیع کرنش محیطی

شکل ۳ ورق را در دو حالت بدون تغییرشکل یعنی لحظه  $t=0$  و در یک زمان دلخواه  $t$  که بصورت یک مخروط ناقص با قاعده کوچک تخت تغییرشکل یافته نشان می‌دهد. اگر ناحیه ای از ورق اولیه به شعاع  $r$  به مخروط ناقصی به شعاع فوقانی  $x$  و

شعاع قاعده کوچک  $R_2$  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:

$$\pi r^2 = \int_{R_2}^x \frac{2\pi x dx}{\sin \alpha} + \pi R_2^2 \quad (3)$$

از انتگرال گیری معادله (۳) خواهیم داشت:

$$x^2 = r^2 \sin \alpha + R_2^2 (1 - \sin \alpha) \quad (4)$$

کرنش محیطی در ناحیه قاعده کوچک بدلیل تخت فرض کردن آن و در نتیجه عدم تغییر شکل صفر می باشد و در دیواره آن خواهیم داشت:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2} \operatorname{Ln} \frac{x^2}{r^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq r \leq R_2 \\ \frac{1}{2} \operatorname{Ln} \left[ \sin \alpha + \left( \frac{R_2}{r} \right)^2 (1 - \sin \alpha) \right] & , \quad R_2 \leq r \leq R_0 \end{cases} \quad (6)$$

در معادله اخیر  $R_2$  خود تابعی از زمان بوده که با استفاده از معادلات (۱) و (۲) بدست می آید و بدین ترتیب معادله (۶) مقادیر کرنش محیطی در جداره مخروط ناقص را بصورت تابعی از زمان نشان می دهد. نتایج زیر برای مقادیر کرنش محیطی صریحاً از معادله (۶) قابل حصول می باشند:

$$\text{در } r = R_2 ; \quad \varepsilon_\theta = 0 \quad (7)$$

$$\text{در } r = R_0 ; \quad \varepsilon_{\theta m} = \frac{1}{2} \operatorname{Ln} \left[ \sin \alpha + \left( \frac{R_2}{R_0} \right)^2 (1 - \sin \alpha) \right] \quad (8)$$

به عبارت دیگر مقدار کرنش محیطی در شعاع قاعده کوچک مخروط برابر صفر و در شعاع قاعده بزرگ مخروط ماکزیمم می باشد. نتایج مشاهده پذیر و قابل مقایسه با تجربه زمانی بدست می آید که مقدار کرنش ماکزیمم در مخروط کامل بدست آید بدین منظور کفایت مقدار  $R_2$  یعنی شعاع قاعده کوچک مخروط در معادله (۸) برابر صفر اختیار گردد که در اینصورت معادله زیر مقدار کرنش حداکثر را بدست می دهد:

$$\varepsilon_{\theta mf} = \frac{1}{2} \operatorname{Ln}(\sin \alpha) \quad (9)$$

### ۳-۲- برآورد میزان جرم ماده منفجره مورد نیاز برای تولید مخروط کامل

از جمله مهمترین متغیرهای ساخت و تولید در فرآیند شکل دهی انفجاری برآورد جرم ماده منفجره مورد نیاز بوده که در اینجا بدان پرداخته می شود. بدین منظور ابتدا کل انرژی دریافتی ورق ناشی از شوک موج و سپس کار تغییرشکل پلاستیک

ورق محاسبه آنگاه از تساوی این دو جرم ماده منفجره مورد نیاز برآورد می‌گردد. دانسیته انرژی یک شوک موج ناشی از یک انفجار زیر آب از رابطه تجربی زیر بدست می‌آید [۱۶]:

$$E_d = \frac{C \cdot M^{\frac{G+1}{3}}}{R^G} \quad (10)$$

ثوابت ماده منفجره عبارتند از [۱۶]:  $C=520000$  و  $G=2.12$ . با توجه به شکل ۴ مقدار انرژی دریافتی یک المان حلقوی از شوک موج کروی که با مرکز شوک موج زاویه  $d\phi$  را می‌سازد عبارتست از:

$$dE_T = \frac{C \cdot M^{\frac{G+1}{3}}}{R^G} 2\pi r \cdot R d\phi \quad (11)$$

با توجه به شکل ۴ داریم:

$$\cos \phi = \frac{2\pi r R d\phi}{2\pi r dr} \quad (12)$$

از ترکیب دو معادله فوق انرژی دریافتی یک المان حلقوی ورق بصورت زیر بدست می‌آید:

$$dE_T = \frac{C \cdot M^{\frac{G+1}{3}}}{R^G} \cos \phi \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (13)$$

که با توجه به شکل ۴ داریم:

$$\cos \phi = \frac{R}{L} \quad (14)$$

با جایگزینی معادله (۱۴) در معادله (۱۳) و انتگرال‌گیری از آن در بازه  $r=0$  تا  $r=D/2$  کل انرژی دریافتی ورق بصورت زیر بدست می‌آید:

$$E_T = \frac{2\pi C \cdot M^{\frac{G+1}{3}}}{(G-1) \cdot L^{G-2}} \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{D}{2L} \right)^2 \right]^{\frac{G-1}{2}}} \right\} \quad (15)$$

کرنش مؤثر مربوط به یک المان مخروط بر حسب کرنش‌های محیطی، طولی و ضخامتی آن عبارتست از [۱۷]:

$$\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_l)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_T)^2 + (\varepsilon_l - \varepsilon_T)^2} \quad (16)$$

از دیگر سو اصل ثبات حجم برای یک المان در پلاستیسیته بصورت صفر شدن مجموع سه مؤلفه کرنش آن بیان می‌شود یعنی:

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_l + \varepsilon_T = 0 \quad (17)$$

مفروض داشتن ضخامت سبب صفر شدن کرنش ضخامتی می‌گردد یعنی:

$$\varepsilon_T = 0 \quad (18)$$

از ترکیب معادلات (17) و (18) داریم:

$$\varepsilon_l = -\varepsilon_\theta \quad (19)$$

جایگزاری (18) و (19) در (16) منجر می‌شود به:

$$\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_\theta \quad (20)$$

از آنجائیکه مقدار کرنش محیطی در لبه (شعاع قاعده بزرگ) مخروط ناقص ماکزیمم است (رجوع به معادله (8)) با توجه به معادله (20) مقدار کرنش مؤثر در لبه نیز ماکزیمم بوده و مقدار آن از معادله زیر بدست خواهد آمد:

$$\varepsilon_{em} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{\theta m} \quad (21)$$

در حالت مخروط کامل مقدار کرنش مؤثر لبه از جایگزاری کرنش محیطی ماکزیمم مخروط کامل در معادله (20) بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon_{emf} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{\theta mf} \quad (22)$$

با توجه به صفر بودن کرنش محیطی در بازه  $0 \leq r \leq R_2$  (به دلیل تخت فرض کردن قاعده کوچک مخروط، رجوع به معادله (6)) با توجه به معادله (20) مقدار کرنش مؤثر در این ناحیه صفر بوده و در نتیجه با یک تقریب خطی مقدار متوسط کرنش مؤثر در طول جداره مخروط ( $R_2 \leq r \leq R_0$ ) بصورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\bar{\varepsilon}_e = \frac{0 + \varepsilon_e}{2} = 0.5 \varepsilon_e \quad (23)$$

با توجه به معادله فوق مقدار متوسط کرنش مؤثر در مخروط ناقص و کامل بترتیب ذیل می‌باشند:

$$\bar{\varepsilon}_{em} = 0.5 \varepsilon_{em} \quad (24)$$

$$\bar{\varepsilon}_{emf} = 0.5 \varepsilon_{emf} \quad (25)$$

مقدار کار پلاستیک در هنگام تغییرشکل از معادله زیر بدست می‌آید:

$$W_p = V \cdot \bar{\varepsilon}_{emf} \cdot Y_d \quad (26)$$

در این تحقیق بین تنش تسلیم دینامیکی و استاتیکی رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$Y_d = m \cdot Y_s \quad (27)$$

که مقدار  $m$  برای فولاد و آلومینیم بترتیب ۲ و ۱ [۱۴] و مس ۱ [۱۸] در نظر گرفته می‌شود. در معادله (۲۶) حجم مخروط ناقص بدون احتساب حجم قاعده کوچک (بدلیل تخت فرض کردن آن و در نتیجه عدم تغییرشکل) عبارتست از:

$$V = \pi T(R_0^2 - R_2^2) \quad (28)$$

به طریق اولی مقدار کار پلاستیک و حجم مخروط کامل ( $R_2 = 0$ ) بترتیب ذیل می‌باشند:

$$W_{pf} = V_f \cdot \bar{\varepsilon}_{emf} \cdot Y_d \quad (29)$$

$$V_f = \pi T R_0^2 \quad (30)$$

سرانجام از تساوی کل انرژی دریافتی ورق با کار تغییرشکل پلاستیک آن جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط ناقص و کامل بترتیب از معادلات زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$M = \left[ \frac{G-1}{2\pi C} L^{G-2} W_p \left\{ 1 - \left( 1 + \left( \frac{D}{2L} \right)^2 \right)^{\frac{1-G}{2}} \right\}^{-1} \right]^{\frac{3}{G+1}} \quad (31)$$

$$M_f = \left[ \frac{G-1}{2\pi C} L^{G-2} W_{pf} \left\{ 1 - \left( 1 + \left( \frac{D}{2L} \right)^2 \right)^{\frac{1-G}{2}} \right\}^{-1} \right]^{\frac{3}{G+1}} \quad (32)$$

## ۴- نتایج و بحث

در این بخش جهت حصول مقایسه‌ای میان نتایج تحلیلی و عددی، حالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین حتی المقدور سعی گردیده تا این نتایج با برخی از نتایج تجربی قابل اندازه‌گیری نیز مقایسه شوند. محدودیت عمده در آزمایشهای تجربی شکل‌دهی انفجاری، امکان کم اندازه‌گیری، کمیات و متغیرهای آن بالاخص در اثناء فرآیند می‌باشد که عمدتاً ناشی از زمان بسیار اندک و ماهیت تخریبی و ایمنی پائین فرآیند انفجار می‌باشد.



## ع-۱- پروفیل کرنش محیطی

پروفیل کرنش محیطی نقاط مختلف ورق در هنگام تغییرشکل بازاء نیم زاویه رأس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در زمانهای ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ میکروثانیه با استفاده از معادله (۶) در شکل‌های ۵ ترسیم شده است. نتایج ABAQUS نیز در شکل‌های ۶ ارائه شده است. با توجه به این شکل‌ها و معادله (۹) مقادیر عددی و تحلیلی کرنش محیطی ماکزیمم مخروط کامل شکل یافته در جدول ۳ ارائه شده است:

جدول (۳) مقادیر تحلیلی و عددی کرنش محیطی ماکزیمم مخروط کامل.

$\alpha$	(تحلیلی) $\varepsilon_{\theta mf}$	$\varepsilon_{\theta mf}$ (ABAQUS)
30	-0.346	-0.382
45	-0.173	-0.173
60	-0.072	-0.062

برخی نتایج تجربی مربوط به توزیع کرنش محیطی گرده‌های فولادی به همراه مقایسه با نتایج تحلیلی متناظر با آنها در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. نتایج تجربی بصورت دایره‌های توخالی و نتایج تحلیلی بصورت خط پر در این شکل‌ها نمایش داده شده‌اند. شکل‌های ۷- الف، ۷- ب و ۷- پ مربوط به ورق با شعاع ۸، ۱۵ و ۱۸ گرم می‌باشد. شکل‌های ۸- الف، ۸- ب و ۸- پ مربوط به ورق با شعاع ۴۰ و ضخامت ۱ میلی‌متر و نیم‌زاویه رأس ۳۰ درجه بوده و جرم ماده منفجره متناظر با هر حالت بترتیب ۸، ۱۵ و ۱۸ گرم می‌باشد. در تمامی موارد بین نتایج تجربی و تحلیلی انطباق قابل قبولی وجود دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش جرم ماده منفجره مقادیر کرنش افزایش می‌یابد که این امر ناشی از افزایش تغییرشکل می‌باشد. با نزدیک شدن جرم ماده منفجره به مقدار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل، مقادیر کرنش لبه به مقادیر تحلیلی خود که از معادله (۹) قابل استخراج است نزدیک می‌شوند که این امر بالاخص در شکل ۷ پ مصداق بارز می‌یابد. نحوه ترسیم منحنی‌های تحلیلی کرنش با در دست داشتن جرم ماده منفجره بدینصورت است که ابتدا کل انرژی دریافتی ورق ناشی از جرم معلوم ماده منفجره محاسبه گردیده، سپس با مساوی قرار دادن این مقدار با کار تغییرشکل پلاستیک، متوسط کرنش مؤثر و در پی آن کرنش محیطی لبه و در نهایت شعاع قاعده کوچک مخروط محاسبه و با بکارگیری آن در معادله (۶) توزیع کرنش محیطی حاصل می‌گردد.

بطور کلی آنچه‌انکه از نتایج تحلیلی و ABAQUS استنتاج می‌گردد مقدار کرنش محیطی در نواحی مرکزی بااستثناء زمان پایان فرآیند معادل صفر بوده در حالیکه نواحی بیرونی دارای کرنش منفی بوده که مقدار آن در لبه ورق ماکزیمم بوده، مقدار کرنش در کلیه نقاط با افزایش زمان افزایش یافته و در زمان پایان فرآیند به ماکزیمم می‌رسد. این در حالیست که با افزایش زمان شعاع ناحیه با کرنش صفر کاهش می‌یابد. این نتایج همچنین حکایت از آن دارند که پروفیل کرنش محیطی مستقل از ضخامت و جنس ورق بوده و تنها وابسته به زاویه رأس مخروط می‌باشد بنحوی که مقدار کمی کرنش با کاهش زاویه رأس مخروط افزایش می‌یابد که در نتیجه امکان وقوع چروکیدگی در زوایای کوچکتر افزایش می‌یابد بطوریکه در عمل هم این پدیده در زاویه رأس ۶۰ درجه بوقوع می‌پیوندد. تنها اختلاف عمده میان نتایج تحلیلی، ABAQUS و تجربی در زمان خاتمه فرآیند و در مرکز ورق بوقوع می‌پیوندد بطوریکه در شبیه‌سازی ABAQUS این ناحیه واجد کرنش مثبت بوده که می‌تواند دلالت بر کشش مفرط این ناحیه داشته باشد که این موضوع نیز خود دلالت بر افزایش تحذب این ناحیه در مراحل پایانی تغییرشکل دارد که در واقع هم تجربیات حکایت از مقداری تحذب در ناحیه مرکزی دارند.

## ع-۲- جرم ماده منفجره مورد نیاز

جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط با جنس‌ها و ابعاد مختلف و در زوایای مختلف در جداول ۴ و ۵ آمده است. مقادیر تجربی موجود در جدول ۴ مربوط به مرجع [۲] و مقادیر تجربی موجود در جدول ۵ مربوط به مرجع [۴] می‌باشد. همچنین مقادیر تحلیلی موجود در این جداول با استفاده از معادله ۳۱ که بصورت نمونه در شکل ۹ ترسیم شده است استخراج

گردیده‌اند. این منحنی جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط ناقص را بر حسب شعاع قاعده کوچک و در نیم زاویه رأس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بدست می‌دهند. محل تقاطع این نمودارها با محور عمودی ( $R_2 = 0$ ) جرم مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل ( $M_f$ ) می‌باشد.

جدول (۴) مقادیر تحلیلی و تجربی [۲] جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل.

جنس	T(mm)	(mm) $R_0$	(mm) $R_2$	$\alpha$	$M_f$ (gr)	$M_f$ (gr) تجربی
St	1	50	0	30	26	19 [4]
St	1	50	0	45	13.5	12.7
St	1	50	0	60	6	6
St	1.6	50	0	30	41	48
St	1.6	50	0	45	21	19
St	1.6	50	0	60	9	9.5
Al	1	50	0	30	6.3	-
Al	1	50	0	45	3.25	3.2
Al	1	50	0	60	1.5	1.59
Al	1.6	50	0	30	10	6.5
Al	1.6	50	0	45	5	4
Al	1.6	50	0	45	2.2	2.1

جدول (۵) مقادیر تحلیلی و تجربی [۴] جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل.

جنس	T(mm)	(mm) $R_0$	(mm) $R_1$	(mm) $R_2$	$\alpha$	$M_f$ (gr)	$M_f$ (gr) تجربی
St	1	40	27.5	0	30	25	24
St	1.6	50	42	0	45	20	19
Al	1	40	31	18 مخروط ناقص	30	3.5	3
Al	1	40	28.5	0	30	5	6
Al	1	40	33.5	0	45	2.5	3
Cu	1	40	30	0	30	9	9
Cu	1	40	33.5	0	45	4.7	6

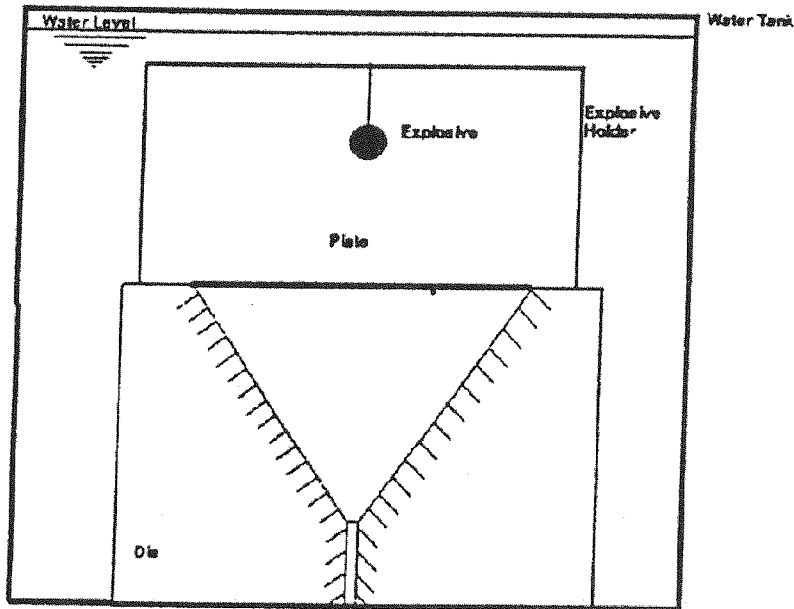
بطور کلی نتایج تحلیلی و تجربی مربوط به این قسمت حاکی از آن است که کاهش نیم‌زاویه رأس مخروط و همچنین افزایش ضخامت ورق هر کدام مستقل از دیگری منجر به افزایش جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط می‌گردد. در مورد جنس عامل تأثیرگذار تنش تسلیم دینامیکی می‌باشد که خود متأثر از تنش تسلیم استاتیکی و میزان حساسیت به نرخ کرنش ماده می‌باشد. برای یک ماده حساس به نرخ کرنش نظیر فولاد تحت شرایط یکسان افزایش سرعت تغییر شکل یا بعبارت دیگر افزایش نرخ کرنش (افزایش  $m$ ) منجر به افزایش جرم ماده منفجره مورد نیاز می‌گردد. این موضوع بطور ضمنی حاکی از آن است که پروسه‌های شکل‌دهی دینامیکی مواد حساس به نرخ کرنش ( $m > 1$ ) نسبت به پروسه‌های شکل‌دهی استاتیکی ( $m = 1$ ) نیازمند انرژی بیشتری می‌باشند.

## ۵- نتیجه گیری

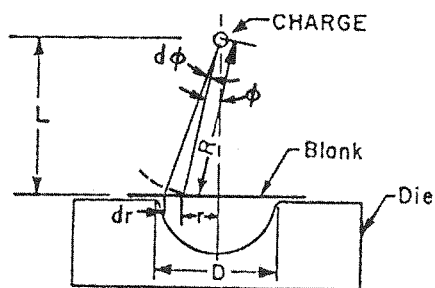
در این تحقیق با ارائه یک مدل تحلیلی پروفیل کرنش و جرم ماده منفجره مورد نیاز در فرآیند شکل‌دهی انفجاری مخروط تعیین گردید. میان نتایج حاصل از این مدل تحلیلی و نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود انطباق مطلوبی وجود دارد.

## تشکر و قدردانی

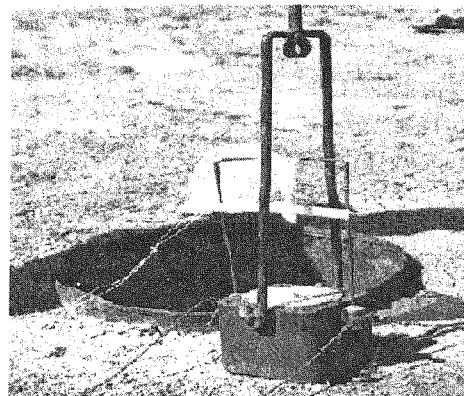
پژوهشگران این تحقیق مراتب تقدیر و سپاس خویش را از آقایان پروفسور کرمی از دانشگاه لیدز انگلستان بخاطر مساعدت بیدریغ در امر شبیه سازی اجزاء محدود، پروفسور الحسنی از دانشگاه یومیست انگلستان بخاطر فراهم نمودن امکانات استفاده از نرم افزار ABAQUS و دیگر راهنماییها و همچنین از صنایع مهمات سازی و صنایع شهید باقری بخاطر فراهم نمودن امکانات انجام آزمایشهای این تحقیق ابراز می‌دارند.



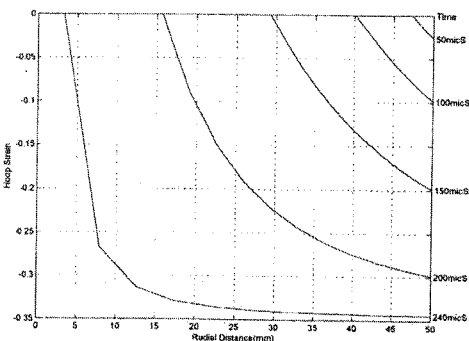
شکل (۱) شماتیک چیدمانی اجزاء در آزمایشهای تجربی.



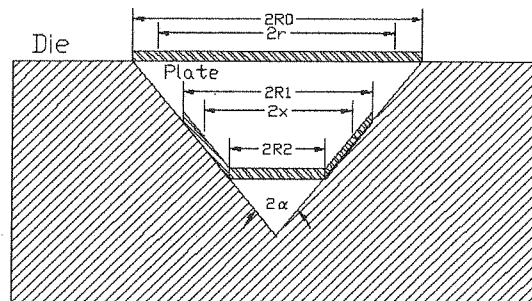
شکل (۴) مدل هندسی برآورد انرژی دریافتی ورق ناشی از تصادم شوک موج [۱۶]



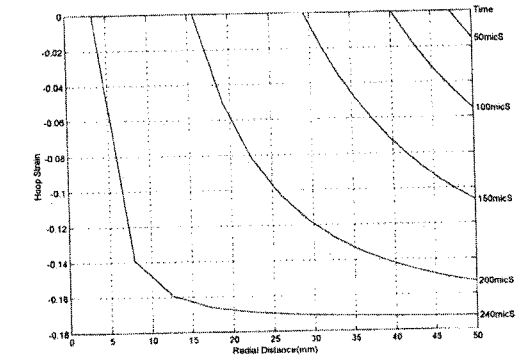
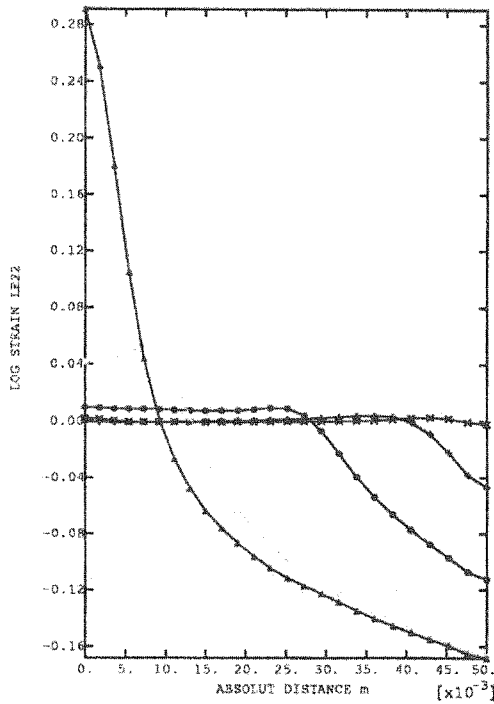
شکل (۲) چیدمانی اجزاء در آزمایشهای تجربی.



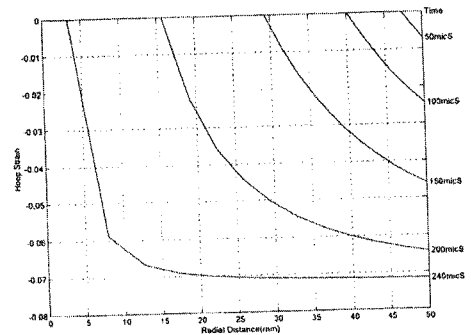
شکل (۵) الف) پروفیل تحلیلی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزایه رأس ۳۰ درجه.



شکل (۳) شمای از مدل تحلیلی ارائه شده جهت محاسبه کرنش محیطی.

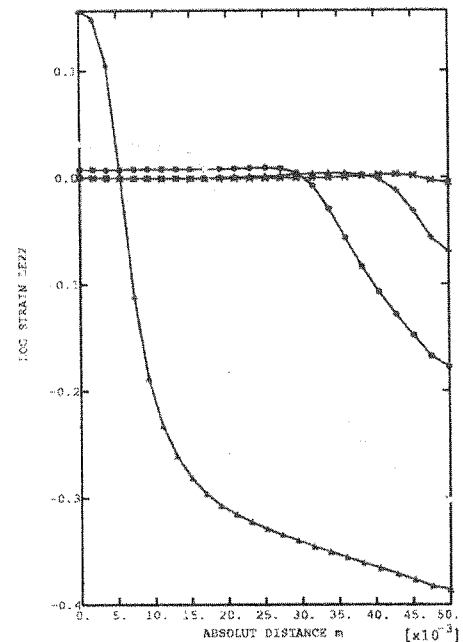
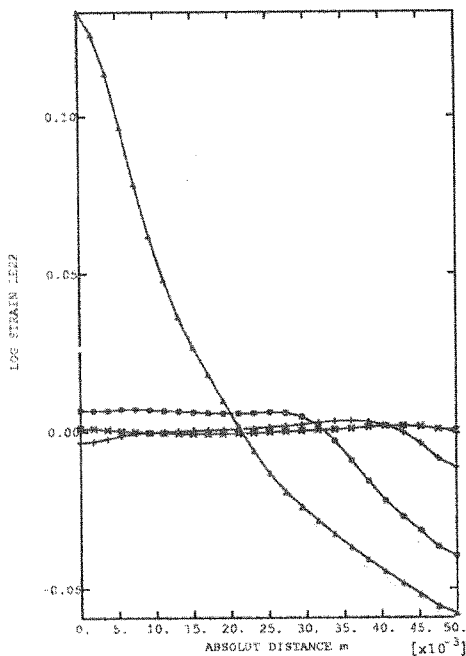


شکل (ب- ۵) پروفیل تحلیلی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزایه رأس ۴۵ درجه.



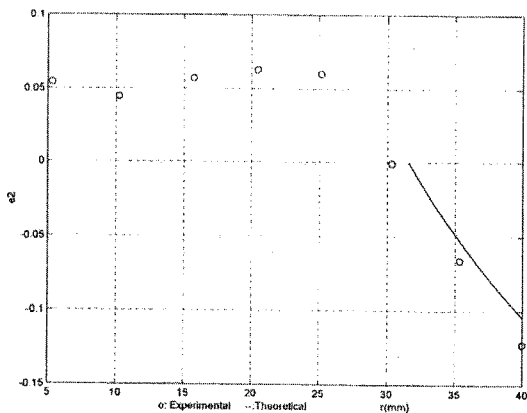
شکل (پ- ۵) پروفیل تحلیلی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزایه رأس ۶۰ درجه.

شکل (ب- ۶) پروفیل عددی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزایه رأس ۴۵ درجه. راهنمای شکل - ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه.

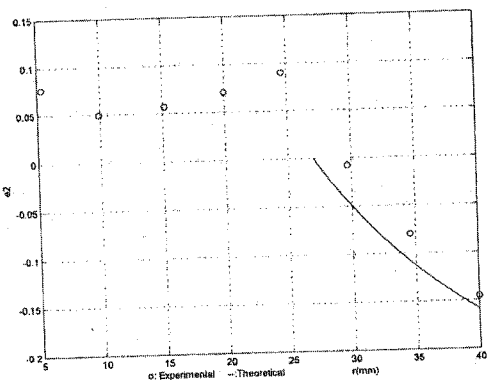


شکل (ب- ۶) پروفیل عددی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزایه رأس ۶۰ درجه. راهنمای شکل - ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه.

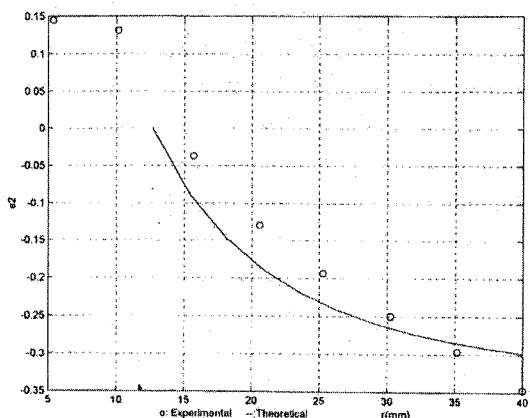
شکل (الف- ۶) پروفیل عددی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزایه رأس ۳۰ درجه. راهنمای شکل - ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه.



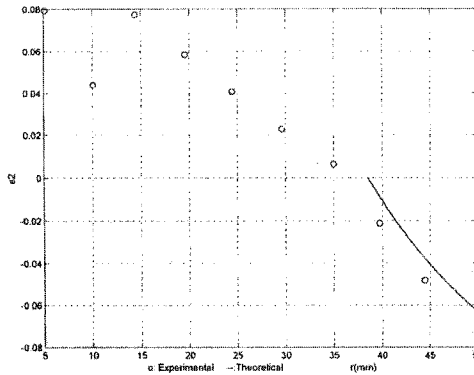
شکل (۸-الف) پروفیل تجربی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته برای نیمزاویه رأس ۳۰ درجه، گرده فولادی با شعاع ۴۰ و ضخامت ۱ میلیمتر، جرم ماده منفجره ۸ گرم. راهنمای شکل - خط پر: تحلیلی، دایره: تجربی.



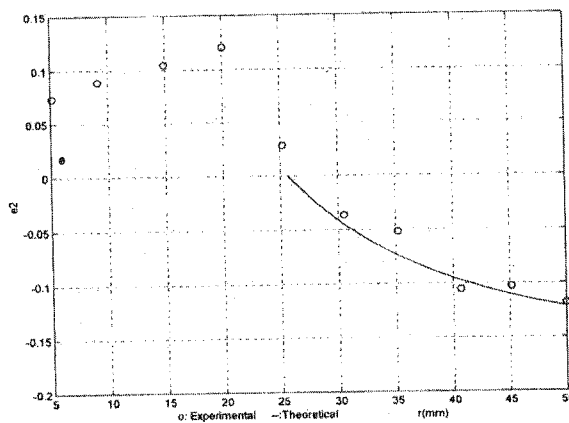
شکل (۸-ب) پروفیل تجربی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته برای نیمزاویه رأس ۳۰ درجه، گرده فولادی با شعاع ۴۰ و ضخامت ۱ میلیمتر، جرم ماده منفجره ۱۲ گرم. راهنمای شکل - خط پر: تحلیلی، دایره: تجربی.



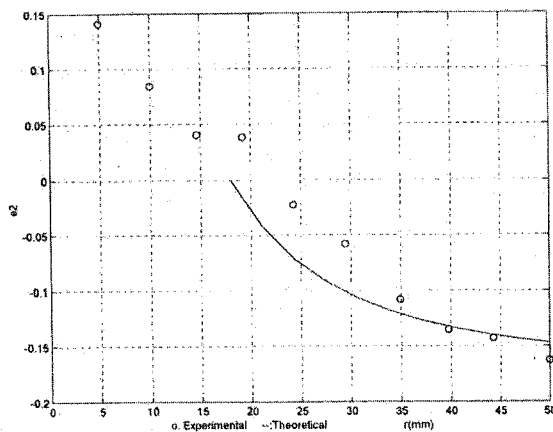
شکل (۸-پ) پروفیل تجربی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته برای نیمزاویه رأس ۳۰ درجه، گرده فولادی با شعاع ۴۰ و ضخامت ۱ میلیمتر، جرم ماده منفجره ۲۲ گرم. راهنمای شکل - خط پر: تحلیلی، دایره: تجربی.



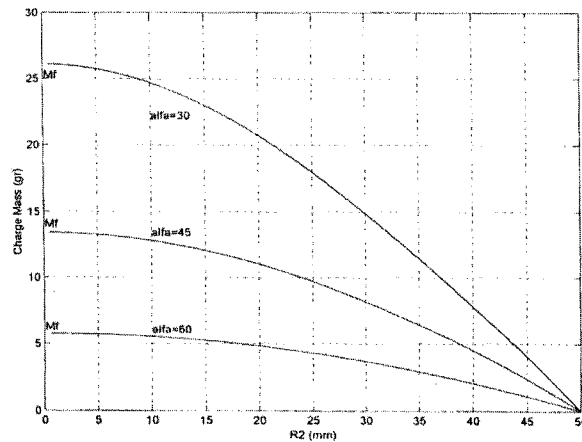
شکل (۷-الف) پروفیل تجربی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته برای نیمزاویه رأس ۴۵ درجه، گرده فولادی با شعاع ۵۰ و ضخامت ۱/۶ میلیمتر، جرم ماده منفجره ۸ گرم. راهنمای شکل - خط پر: تحلیلی، دایره: تجربی.



شکل (۷-ب) پروفیل تجربی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته برای نیمزاویه رأس ۴۵ درجه، گرده فولادی با شعاع ۵۰ و ضخامت ۱/۶ میلیمتر، جرم ماده منفجره ۱۵ گرم. راهنمای شکل - خط پر: تحلیلی، دایره: تجربی.



شکل (۷-پ) پروفیل تجربی کرنش محیطی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته برای نیمزاویه رأس ۴۵ درجه، گرده فولادی با شعاع ۵۰ و ضخامت ۱/۶ میلیمتر، جرم ماده منفجره ۱۸ گرم. راهنمای شکل - خط پر: تحلیلی، دایره: تجربی.



شکل (۹) منحنی های تحلیلی جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط بر حسب شعاع قاعده کوچک برای گرده فولادی به شعاع ۵۰ و ضخامت ۱ میلیمتر. (محل تقاطع با محور عمودی، جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل).

## فهرست نمادها

$C$ : ثابت ماده منفجره	$W_p$ : کار تغییر شکل پلاستیک مخروط ناقص
$D$ : قطر ورق	$W_{pf}$ : کار تغییر شکل مخروط کامل
$E_d$ : دانسیته انرژی شوک موج ناشی از انفجار زیر آب	$X$ : مختصه شعاعی المانهای روی دیواره مخروط
$E_T$ : کل انرژی دریافتی ورق ناشی از شوک موج	$Y_d$ : تنش تسلیم دینامیکی
$G$ : ثابت ماده منفجره	$Y_s$ : تنش تسلیم استاتیکی
$L$ : فاصله استقرار ماده منفجره	$\alpha$ : نیمزاویه رأس مخروط
$M$ : جرم ماده منفجره	$\epsilon_e$ : کرنش مؤثر
$M_f$ : جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تشکیل مخروط کامل	$\epsilon_{em}$ : کرنش مؤثر لبه
$m$ : نسبت تنش تسلیم دینامیکی به تنش تسلیم استاتیکی	$\epsilon_{emf}$ : کرنش مؤثر لبه مخروط کامل
$P$ : بار گسترده نمایی اعمال شده بر ورق	$\epsilon_e$ : متوسط کرنش مؤثر
$P_0$ : حداکثر مقدار $P$	$\epsilon_{em}$ : متوسط کرنش مؤثر مخروط ناقص
$P_{0f}$ : حداکثر مقدار $P$ مورد نیاز جهت تشکیل مخروط کامل	$\epsilon_{emf}$ : متوسط کرنش مؤثر مخروط کامل
$R$ : مختصه شعاعی المانی واقع بر جبهه شوک موج در لحظه تصادم با ورق	$\epsilon_\theta$ : کرنش محیطی
$R_0$ : شعاع اولیه ورق	$\epsilon_{\theta m}$ : کرنش محیطی حداکثر
$R_2$ : شعاع قاعده کوچک (قاعده تحتانی) مخروط ناقص	$\epsilon_{\theta mf}$ : کرنش محیطی حداکثر مخروط کامل
$r$ : مختصه شعاعی در دستگاه مختصات ورق تغییر شکل نیافته	$\epsilon_\theta$ : زاویه مختصه شعاعی با امتداد قائم مربوط به المانی واقع بر جبهه شوک موج در لحظه تصادم با ورق
$T$ : ضخامت ورق	$\theta$ : ثابت زمانی وابسته به بار گسترده نمایی $P$
$t$ : زمان	
$t_f$ : زمان خاتمه تغییر شکل	
$V$ : حجم مخروط ناقص	
$V_f$ : حجم مخروط کامل	

## مراجع

- [1] H.P. Tardif, Explosive Forming of Cones by Metal Gathering, Metal Progress, Vol. 76, No. 3, P. 84, (Sep. 1959).
- [2] F. W. Travis and W. Johnson, The Explosive Forming of Cones, Proc. 3rd International Machine Tool Design Research Conference, Birmingham, PP. 341 - 364, (1962).
- [3] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، گزارش آزمایشهای تجربی شکل دهی انفجاری مخروط، صنایع شهید باقری، ۱۳۷۶.
- [4] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، آزمایشهای تجربی شکل دهی انفجاری مخروط، صنایع مهمات سازی، ۷۹-۱۳۷۸.
- [5] N. Cristescu, Dynamic Plasticity, PP. 328 - 331, (1967).

- [۶] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، شکل دهی مخروط ها به روش انفجاری، ششمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک و سومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، ص. ۱۵۱۴-۱۵۰۷، ۲۸-۳۰ اردیبهشت ۱۳۷۷.
- [۷] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، ارائه مدل تغییرشکل پایدار ورق جهت تحلیل شکل دهی انفجاری، هفتمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، ۱۳۷۸.
- [۸] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، تحلیل تغییرشکل ناپایدار ورق فلزی مدور در قالب مخروطی در هنگام شکل دهی انفجاری، هفتمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، ۱۳۷۸.
- [9] ABAQUS, HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN ( UK ) LTD.
- [10] Javabvar, Daryosh, Simulation of Explosive Forming of Cone, Using Finite Element Method (ABAQUS), Report of Ph.D Research, University of UMIST, Department of Mechanical Engineering, (05/11/99).
- [11] W. Johnson, Impact Strength of Materials, P. 289, (1972).
- [12] Erick K. Henriksen, The Theory of Explosive Forming, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, PP. 6,9,11, (1968).
- [13] G. E. Hudson, A Theory of the Dynamic Plastic Deformation of a Thin Diaphragm, Journal of Applied Physics, Vol. 22, No. 1, PP. 1 - 11, (Jan. 1951).
- [14] Marc Andre Meyers, Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons Inc., PP.173, 300, 324, (1994).
- [۱۵] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، بررسی تحلیلی، تجربی و عددی پروفیل سرعت و جابجایی عمودی، فشار مورد نیاز و ابعاد محصول در فرآیند شکل دهی انفجاری مخروط، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، آماده چاپ.
- [16] A.A. Ezra, Principles and Practice of Explosive Metalworking, Publ. by Industrial Newspaper Ltd., PP. 38,39, (1973).
- [17] W. Johnson, P.B. Mellor, Engineering Plasticity, Ellis Harwood Ltd.(Publ.), P.101, (1983).
- [18] M. Selly, R. Dormeval, Some Results on The Dynamic Deformation of Copper, High Velocity Deformation of Solids, (eds.)Kozo Kawata, Jumpei Shioiri, Symposium Tokyo/Japan, PP.83-97, (24-27 August 1994).
- [19] G.N. Nurick and J.B. Martin, Deformation of Thin Plates Subjected to Impulsive Loading a Review - Part I: Theoretical Considerations, Int. J. Impact Engng., Vol. 8, No. 2, PP. 159 - 170, (1989).