

# اثر ورق گیر در کنترل چروکیدگی مخروط و بررسی تحلیلی و تجربی آن در شکل دهی انفجاری

غلامحسین لیاقت

دانشیار

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

ابوالفضل درویزه

دانشیار

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

امیر عبدا...

استادیار

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

داریوش جواب ور

استادیار

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

## چکیده

در این تحقیق پدیده چروکیدگی مخروط در شکل دهی انفجاری از نظر تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل تحلیلی ارائه شده بر اساس روش انرژی می باشد که در نهایت منجر به معادله حاکم بر پدیده چروکیدگی در شکل دهی انفجاری مخروط می گردد. با حل این معادله می توان تعداد و موضع شروع چروک ها را تعیین کرد. همچنین با استفاده از این معادله می توان به بررسی آثار کمی و کیفی خواص مکانیکی و ابعاد ورق بر پدیده چروکیدگی پرداخت. در این تحقیق معادله حاکم بر پدیده چروکیدگی که در مرجع [22] ارائه شده است اصلاح گردیده و نیز با بکارگیری ورق گیر جهت کنترل چروکیدگی، روش متداول شکل دهی انفجاری مخروط گسترش یافته است. میان نتایج تحلیلی و تجربی انطباق مطلوبی وجود دارد.

## کلمات کلیدی

چروکیدگی، شکل دهی انفجاری، کمانش پالسی دینامیکی، کمانش پلاستودینامیک، ناپایداری پلاستودینامیک.

## Effect of Blank Holder on The Control of Cone Wrinkling and Analytical-Experimental Study of It During Explosive Forming

G. Liaghat

Associate Professor

Tarbiat Modarres University, Department of  
Mechanical Engineering

A. Abdullah

Assistant Professor

Tarbiat Modarres University,  
Department of Mechanical Engineering

A. Darvizeh

Associate Professor

Gilan University, Department of  
Mechanical Engineering

D. Javabvar

Assistant Professor

Department of Aerospace Engineering,  
Shaheed Sattari Air University

## Abstracts

*In this paper an analytical and experimental investigation of wrinkling of cone in the explosive forming is presented. An analytical method based on energy analysis is presented which gives governing equation of wrinkling. Solution of this equation determines the number and initiation point of wrinkles. Effects of mechanical property and plate dimensions on wrinkling may be analyzed by this equation. In this paper governing equation of wrinkling which was presented in Ref. [22] is modified and explosive cone forming is developed by using blank holder to control the cone wrinkling. The analytical results of this paper agree with the experimental results.*

## Keywords

*Wrinkling, Explosive Forming, Dynamic Pulse Buckling, Dynamic Plastic Buckling, Dynamic Plastic Instability.*

بروش شکل دهی انفجاری علی رقم تولید موفق مخروط با زاویه رأس ۹۰ و ۱۲۰ درجه در حالات متعددی در زاویه رأس ۶۰ درجه چروکیدگی بوقوع می پیوندد (شکل ۱ ب [4]). این نوع ناپایداری پلاستودینامیک که چروکیدگی (Wrinkling) نامیده می شود در کار تجربی تراویس و جانسون [2] نیز مشاهده می گردد. تحقیق در این زمینه بدلیل اهمیت کنترل این پدیده نامطلوب و بهبود کیفی محصول نهایی مورد علاقه مهندسين ساخت و تولید می باشد.

در این مقاله این پدیده از نظر تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مدل تحلیلی ارائه شده بر اساس روش انرژی می باشد که در نهایت منجر به معادله حاکم بر پدیده چروکیدگی در شکل دهی انفجاری مخروط می گردد. این معادله مبین رابطه میان تعداد و موضع شروع چروک ها بوده که به کمک آن می توان به بررسی تأثیر کمی و کیفی خواص مکانیکی و ابعاد ورق بر پدیده چروکیدگی پرداخت.

## ۱- تحلیل پدیده چروکیدگی با استفاده از معیار انرژی

جهت ارایه هر گونه مدل تحلیلی بمنظور بررسی پدیده چروکیدگی در شکل دهی انفجاری، شناخت هندسه چروک ها نخستین استلزام مهم می باشد. بدین منظور تجربیات متعددی با پارامترهای مختلف طراحی، وضع و اجراء گشت. نتیجه این تجربیات [4,5] همچنانکه در شکل ۱ پ دیده می شود نشان می دهد که مقطع طولی چروک در امتداد مولد مخروط مثلثی است که قاعده آن منطبق بر قاعده مخروط و رأس آن واقع بر جداره مخروط می باشد همچنین با فرض تقارن و صرفنظر از تمامی عواملی که منجر به تمرکز موضعی چروک ها می گردند (در بند ۳ در رابطه با این عوامل بحث می گردد) مقطع عرضی چروک در صفحات موازی با قاعده مخروط سینوسی فرض می شود. این فرض در مرجع [9] جهت تحلیل چروکیدگی ورق مدور در جریان فرایند استاتیکی استمپینگ بکار گرفته شده است. در مدل تحلیلی حاضر که شمایی از آن در شکل ۲ دیده می شود پروفیل تغییر شکل لحظه ای بصورت یک مخروط ناقص می باشد [3, 10, 11, 12] که با گذشت زمان به سمت یک مخروط کامل میل می نماید. در نقطه ای به فاصله شعاعی  $x_w$  از محور مخروط چروکیدگی شروع و تا قاعده بزرگ مخروط ادامه می یابد. در این مدل جهت احتراز از پیچیدگی تحلیل از تغییرات ضخامت ورق در هنگام تغییرشکل صرفنظر می گردد. با توجه به مطالب فوق الذکر و شکل ۲ تغییر شکل اضافی ناشی از چروکیدگی را می توان بصورت ذیل نوشت:

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 (شکل ۱) ورق بر روی یک قالب با حفره مخروطی بدون هیچگونه مهارى 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 بخود می گیرد. جهت افزایش راندمان، تجهیزات در یک مخزن آب قرار گرفته و انفجار در زیر آب صورت می پذیرد. 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 کاربرد 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 کار با مواد منفجره بر خوردار 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 سرچنگی و راکت ها اشاره نمود. تولید سرچنگی های کالیبر بالا با استفاده از روش های متداولی نظیر فورج به علت بالا رفتن تناژ و کورس پرس با مشکلات فراوان مواجه بوده که باعث می شود این سرچنگی ها به جای فلز از فایبر گلاس ساخته شوند که البته سبب کاهش قدرت انفجار و تخریب سرچنگی می شود. شکل دهی انفجاری بهینه ترین راه غلبه بر این معضل می باشد.

نخستین بار تاردیف [1] از روش شکل دهی انفجاری جهت مخروط از گرده های 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 [2] می باشد، هر چند کار با ارزش آنها نیز تنها محدود به کسب پاره ای نتایج تجربی بوده است. تحقیق در این زمینه به دلایل متعدد از جمله ماهیت شکل دهی 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، اندر کنش ما بین جداره حفره قالب و ورق در جریان فرایند مسئله تحقیقی نوین و بغرنجی را مطرح می سازد [3]. بااستثناء کارهای تجربی اشاره شده در فوق، تحقیقات منتشره در این زمینه منحصر به منابع [4,5,6,7,8] می باشد.

در ضمن تجربیات صورت پذیرفته جهت تولید مخروط

از دیگر سو مطابق قانون سیلان پلاستیکی لوی میز  
[14] معادله زیر را خواهیم داشت:

$$\frac{\sigma_l - \sigma_T}{\sigma_\theta - \sigma_T} = \frac{\dot{\epsilon}_l - \dot{\epsilon}_T}{\dot{\epsilon}_\theta - \dot{\epsilon}_T} \quad (11)$$

و با صرفنظر کردن از تغییر شکل الاستیک و قانون ثبات  
حجم در تغییر شکل پلاستیک خواهیم داشت:

$$\dot{\epsilon}_l + \dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_T = 0 \quad (12)$$

با در نظر گرفتن معیار تسلیم ون - میسنز [14] بصورت  
زیر:

$$(\sigma_l - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_l - \sigma_T)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_T)^2 = 2Y_d^2 \quad (13)$$

و با صرفنظر کردن از مقدار تنش در راستای ضخامت  
( $\sigma_r = 0$ ) آنچنانکه در تئوری ورق و پوسته معمول است و  
همچنین با توجه به فرض اساسی در این مدل یعنی صرفنظر  
کردن از تغییرات ضخامت ( $\dot{\epsilon}_T = 0$ ) می توان از معادلات  
(11)، (12) و (13) به نتیجه زیر رسید:

$$\sigma_l = -\sigma_\theta = \frac{Y_d}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

جایگذاری معادلات (7) الی (10) و (14) در معادله (6)  
و حل انتگرال مربوطه منجر به رابطه زیر خواهد گردید:

$$\Delta T = - \frac{T_0 Y_d G^2 \pi}{2\sqrt{3} \sin \alpha}$$

$$\left[ (\sin^2 \alpha - n^2) \frac{R_1^2}{2} (1-z^2) + 2n^2 z R_1^2 (1-z) + n^2 z^2 R_1^2 \ln z \right] \quad (15)$$

اکنون به محاسبه انرژی کرنش ناشی از خمش پلاستیک  
بصورت زیر پرداخته می شود [10]:

$$\Delta U = \frac{D}{2} \iint \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial l^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial l^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial l \partial y} \right)^2 \right] \right] dl dy \quad (16)$$

از جایگذاری معادله (5) و مقدار  $\nu = 0.5$  در حالت تغییر

$$w = \begin{cases} G(x-x_w) \sin n\theta, & x_w \leq x \leq R_1 \\ 0, & R_2 \leq x \leq x_w \end{cases} \quad (1)$$

که در معادله فوق  $G$  دارای مقداری مثبت می باشد.  
باتوجه به شکل 2 داریم:

$$R_2 \leq x_w \leq R_1 \quad (2)$$

$$\frac{R_2}{R_1} \leq z = \frac{x_w}{R_1} \leq 1 \quad (3)$$

طبق معیار انرژی، کماتش و ناپایداری زمانی به وقوع  
خواهد پیوست که کار انجام شده توسط نیروهای غشایی برابر  
با انرژی کرنش ناشی از خمش پلاستیک گردد [9]. اما کار  
انجام شده توسط نیروهای غشایی عبارتست از [13,9]:

$$\Delta T = - \frac{1}{2} \iint \left[ N_l \left( \frac{\partial w}{\partial l} \right)^2 + N_y \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] dl dy \quad (4)$$

که انتگرال فوق باید روی سطح جانبی مخروط ناقص  
محاسبه شود. همچنین بین دستگاه مختصات یالی - مماسی  
مخروط ( $l, y$ ) و دستگاه مختصات استوانه ای ( $x, \theta$ ) روابط  
زیر برقرار است:

$$dl = \frac{dx}{\sin \alpha}; \quad dy = x d\theta \quad (5)$$

با جایگذاری معادله (5) در معادله (4) خواهیم داشت:

$$\Delta T = - \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{x_1}^{R_1} \left[ N_l \left( \sin \alpha \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left( \frac{\partial w}{x \partial \theta} \right)^2 \right] \frac{x}{\sin \alpha} dx d\theta \quad (6)$$

همچنین با مشتق گیری از معادله (1) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = G \sin n\theta \quad (7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \theta} = Gn(x-x_w) \cos n\theta \quad (8)$$

مقادیر نیروهای غشایی بر واحد طول عبارتند از:

$$N_l = \sigma_l \cdot T_0 \quad (9)$$

$$N_y = \sigma_y \cdot T_0 \quad (10)$$

شکل پلاستیک در انتگرال فوق خواهیم داشت:

چروکیدگی به شرح زیر رسیده می شود:

$$a_1 n^4 + a_2 n^2 + a_3 = 0 \quad (25)$$

که در معادله فوق مقدار  $a_0, a_1, a_2, a_3$  بصورت ذیل می باشند:

$$a_0 = \frac{T_0 Y_d}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

$$a_1 = D \left( -Lnz + 2z - \frac{z^2}{2} - \frac{3}{2} \right) \quad (27)$$

$$a_2 = -D \sin^2 \alpha Lnz + a_0 R_1^2 \left( -\frac{1-z^2}{2} + 2z(1-z) + z^2 Lnz \right) \quad (28)$$

$$a_3 = a_0 R_1^2 \sin^2 \alpha \frac{1-z^2}{2} \quad (29)$$

مقدار تنش تسلیم دینامیکی در معادله (26) معمولاً مضربی از تنش تسلیم استاتیکی بصورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$Y_d = m \cdot Y_s \quad (30)$$

معادله (25) تحت عنوان معادله z-n نامیده می شود که در واقع نتیجه تحلیل ارائه شده در این مقاله و معادله اصلی حاکم بر پدیده چروکیدگی مخروط در شکل دهی انفجاری می باشد. حل این معادله منجر به دو جواب زیر برای n می گردد:

$$n_1 = \sqrt{\frac{-a_2 + \sqrt{\Delta}}{2a_1}} \quad (31)$$

$$n_2 = \sqrt{\frac{-a_2 - \sqrt{\Delta}}{2a_1}} \quad (32)$$

که در معادلات اخیر  $\Delta$  مبین معادله (32) از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta = a_2^2 - 4a_1 a_3 \quad (33)$$

در صورتی که علاقمند به بررسی چروکیدگی مخروط کامل باشیم قبل از هر چیز بایستی شعاع قاعده مخروط کامل

$$\Delta U = \frac{D}{2} \int_0^{2\pi} \int_{x_w}^{R_1}$$

$$\left[ \left( \sin^2 \alpha \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{x^2 \partial \theta^2} \right)^2 \left[ \frac{\sin^2 \alpha}{x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \left( \frac{\sin \alpha}{x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} \right)^2 \right] \right] \frac{x}{\sin \alpha} dx d\theta \quad (17)$$

با مشتق گیری از معادلات (7) و (8) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} = -Gn^2 (x-x_w) \sin n\theta \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} = Gn \cos n\theta \quad (20)$$

مقدار D در معادله (17) بقرار ذیل است [9]:

$$D = \frac{E_0 T_0^3}{12(1-\nu^2)} \quad (21)$$

با جایگذاری مقدار  $\nu=0.5$  در حالت تغییر شکل پلاستیک در معادله (21) خواهیم داشت:

$$D = \frac{E_0 T_0^3}{9} \quad (22)$$

همچنین  $E_0$  بصورت زیر تعریف می شود [9]:

$$E_0 = \frac{4EE_p}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_p})^2} \quad (23)$$

و با جایگذاری معادلات (18)، (19) و (20) در معادله (17) و پس از انتگرالگیری معادله زیر بدست می آید:

$$\Delta U = \frac{n^2 D G^2 \pi}{2 \sin \alpha} \left[ n^2 \left( -Lnz + 2z - \frac{z^2}{2} - \frac{3}{2} \right) - \sin^2 \alpha Lnz \right] \quad (24)$$

حال مطابق آنچه که قبلاً در مورد معیار انرژی گفته شد، از تساوی معادلات (15) و (24) به معادله اساسی

را بدست آورد که این امر با بکارگیری اصل ثبات حجم در پلاستیسیته که با صرفنظر از تغییرات ضخامت به تساوی سطوح جانبی مخروط کامل با ورق اولیه منجر می‌گردد، بصورت ذیل محقق می‌گردد:

$$\pi R_0^2 = \frac{\pi R_{1f}^2}{\sin \alpha} \quad (24)$$

$$R_{1f} = R_0 \sqrt{\sin \alpha} \quad (25)$$

### ۳. نتایج و بحث

آزمایش‌های تجربی متعدد تحت زوایای رأس  $60^\circ$ ،  $90^\circ$  و  $120^\circ$  درجه نشان می‌دهند که چروکیدگی شدید تحت زاویه  $60^\circ$  درجه بوقوع می‌پیوندد. در صورتیکه تحت زوایای رأس  $90^\circ$  و  $120^\circ$  درجه، چروکیدگی بندرت آنهم بمقدار بسیار محدود در لبه رخ می‌دهد. علت بروز چروکیدگی شدید تحت زاویه  $60^\circ$  درجه، تغییر شکل محیطی زیاد و در نتیجه ایجاد تنش‌های محیطی فشاری بالا [16, 15] در پوسته مخروط در مقایسه با زوایای  $90^\circ$  و  $120^\circ$  درجه می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که زاویه  $60^\circ$  درجه از حیث بروز پدیده چروکیدگی یک زاویه بحرانی بحساب می‌آید، به آن معنا که فراتر از آن احتمال وقوع چروکیدگی بااستثنا لبه منتهی است. بروز چروکیدگی لبه حتی در زوایای غیر بحرانی علاوه بر مصداق تجربی بطریق تحلیلی با استفاده از معادله  $z-n$  کاملاً قابل توجیه می‌باشد به این صورت که این معادله در  $z=1$  (لبه) مستقل از زاویه رأس و سایر پارامترها دارای یک جواب بدیهی و نامعین می‌باشد (شکل ۳ [5]).

معادلات (۲۱) و (۲۲) برای مواد با خواص مکانیکی ذکر شده در جدول ۱ و زاویه رأس  $60^\circ$  درجه ( $\alpha=30^\circ$ ) با استفاده از نرم افزار MATLAB حل و نتایج بترتیب در منحنی‌های موجود در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. در هر شکل سه منحنی به ازاء  $m=1, 2, 3$  برای مخروط کامل رسم شده است. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج تحلیلی و تجربی در جدول ۲ صورت پذیرفته است.

وجود دو جواب تحلیلی  $n_1$  و  $n_2$  چروکیدگی مخروط در شکل دهی انفجاری را پدیده‌ای آشوبناک جلوه‌گر می‌سازد. این امر با مراجعه به نتایج موجود در جدول ۲ قوت می‌گیرد به این ترتیب که نتایج تجربی در برخی موارد نزدیک به  $n_1$  و در برخی موارد نزدیک به  $n_2$  و در موارد دیگر به هر دو (هنگامی که  $n_1$  و  $n_2$  نزدیک همدیگرند) نزدیک می‌باشند.

واقعیت آنست که همچنانکه دیگر محققان هم اذعان داشته‌اند یک توزیع معین چروکیدگی در تجربیات بسختی تکرار پذیر می‌باشد [18] این امر می‌تواند ناشی از آن باشد

که چروکیدگی بشدت متأثر از میزان نامتقارنی در اجزاء، ناهمسانی در هندسه و خواص مکانیکی ماده (انایزوتروپی) [19] و میزان عیب (Imperfection) در میادین سرعت و جابجایی می‌باشد [20]. بعلاوه آنچنانکه محققان ابراز داشته‌اند لزومی به گسترش چروکیدگی به تمام سطح نمی‌باشد [12] بعبارت دیگر موضعی بودن و عدم تقارن پدیده چروکیدگی دینامیکی امر نامعمولی نمی‌باشد. موضعی شدن چروکیدگی همچنین می‌تواند سبب بهم پیوستن دو یا چند چروک و تشکیل یک چروک بزرگتر یا اصطلاحاً چین (شکل ۶ب) بدهند. موضعی شدن چروکیدگی همچنین می‌تواند منجر به توزیع نامتقارن چروک‌های ناهمسان با ابعاد هندسی متفاوت گردد (برای مشاهده نمونه‌هایی از این توزیع نامتقارن در مورد پوسته‌های استوانه‌ای می‌توان به مرجع [17] مراجعه کرد).

دیگر نتایجی که از بررسی شکل‌های ۴ و ۵ بدست می‌آیند بشرح زیر می‌باشند:

۱- برای هر منحنی  $z-n$  مقداری  $z$  وجود دارد که فراتر از آن مقدار  $n$  صفر می‌شود. این مقدار از  $z$  که از تقاطع منحنی  $z-n$  با محور افقی حاصل می‌گردند مبین حداکثر مقدار  $z$  (حداقل طول چروک) در چروکیدگی می‌باشد. بعنوان مثال اگر در شکل ۴ منحنی  $z-n$  با  $m=2$  را در نظر بگیریم می‌توان گفت که امکان داشتن چروک‌هایی با  $z$  فراتر از  $0.7$  وجود ندارد. این مقدار از  $z$  با افزایش  $m$  که مبین افزایش نرخ کرنش و حساسیت ماده نسبت به نرخ کرنش است افزایش می‌یابد.

۲- با افزایش  $m$  که مبین افزایش نرخ کرنش و حساسیت ماده نسبت به نرخ کرنش می‌باشد مد شماره  $n_1$  افزایش و مد شماره  $n_2$  اندکی کاهش می‌یابد. نتایج دیگر محققان حاکی از آنست که کماتش دینامیکی در مد شماره‌های بزرگتری نسبت به کماتش استاتیکی رخ می‌دهد [17] که این موضوع موافق اثر افزایش  $m$  بر روی  $n_1$  و مخالف اثر افزایش  $m$  بر روی  $n_2$  می‌باشد.

۳- اثر  $m$  بر روی  $n_2$  کمتر از اثر آن بر روی  $n_1$  می‌باشد و در منحنی‌های  $z-n$  مربوط به  $n_2$  ناحیه وسیعی از  $z$  وجود دارد که این تأثیر صفرمی باشد.

۴- با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ همچنین ۵ و ۴ مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت شعاع به ضخامت ورق (نازکتر شدن پوسته) مد شماره‌های  $n_1$  و  $n_2$  افزایش می‌یابد که این امر موافق با نتایج دیگر محققان است [21, 19].

۵- بطور کلی در تمامی شکل‌ها مد شماره  $n_1$  بزرگتر از  $n_2$  می‌باشد.  
۶- در صورتیکه عبارت  $\Delta$  ارائه شده در معادله (۲۳) با

هر مقدار  $Z$  منفی گردد در آنصورت  $n_1$  و  $n_2$  موهومی گردیده و به لحاظ فیزیکی به آن معناست که امکان وقوع چروکیدگی منتفی است. اما در صورت مثبت بودن  $\Delta$  آنگاه چروکیدگی رخ نخواهد داد اگر معادله بر حسب  $n^2$  درجه دوم (۲۵) دارای دو ریشه ( $n_1^2$  و  $n_2^2$ ) منفی یا یک ریشه منفی و یک ریشه صفر باشد و این نیز زمانی محقق است که در معادله (۲۵) حاصل جمع دو ریشه  $\left(-\frac{a_2}{a_1}\right)$  منفی و حاصل ضرب آنها  $\left(\frac{a_3}{a_1}\right)$  مثبت یا صفر باشد. همچنین در صورت صفر بودن  $\Delta$  شرط عدم چروکیدگی آنست که ریشه مضاعف (یا دو برابر آن) منفی یا صفر باشد. پس بعنوان یک نتیجه عملی از تحلیل ارائه شده می توان شرط لازم و کافی کنترل و جلوگیری از چروکیدگی را بصورت زیر بیان کرد:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta < 0, \quad \forall z \\ \text{or} \\ \Delta > 0 \text{ and } -\frac{a_2}{a_1} < 0 \text{ and } \frac{a_3}{a_1} \geq 0 \\ \text{or} \\ \Delta = 0 \text{ and } -\frac{a_2}{a_1} \leq 0 \end{array} \right. \quad (26)$$

روش متداول کنترل چروکیدگی در فرایندهای مرسوم شکل دهی ورق ها استفاده از ورق گیر می باشد. در این تحقیق برای نخستین بار کارآیی ورق گیر در کنترل چروکیدگی ورق در اثناء شکل دهی انفجاری مخروط (شکل IV) محک زده شد. نتایج تجربی متعدد در این زمینه حاکی از آن است که بازده این روش وابسته به دو مشخصه مقدار و میزان یکنواختی عواملی چون فشار ورق گیر، پرداخت و روانکاری سطوح درگیر، جنس و انایزوتروپی ورق می باشد. انحراف از مقدار بهینه این عوامل می تواند منجر به تزايد تنش های کششی و در نتیجه پارگی محصول گردد [15]، امری که در نمونه مسی ارائه شده در شکل ۷ ب بوقوع پیوست. همچنین انحراف از میزان بهینه یکنواختی عوامل فوق الذکر می تواند منجر به کشش ناهمسان و یا نامتقارن گردد. انایزوتروپی ورق می تواند منجر به گوشه دار شدن (earing) محصول نهایی گردد، امری که در نمونه فولادی ارائه شده در شکل ۷ ب بوقوع پیوست. در مورد نمونه فولادی تعداد گوشه ها معمولاً چنانچه عدد می باشد. در صورت حذف این پدیده بوسیله برش یا روش دیگر بایستی عملکرد ورق گیر در این مورد موفق ارزیابی گردد.

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله مدل تحلیلی ارائه شده منجر به معادله  $Z-n$

گردید که این معادله اطلاعات قابل توجهی را در مورد نحوه دخالت پارامترهای هندسی و خواص مکانیکی ورق در بروز و کنترل چروکیدگی می دهد. با حل این معادله می توان تعداد و موضع شروع چروک ها را تعیین کرد. همچنین با استفاده از این معادله می توان به بررسی آثار کمی و کیفی خواص مکانیکی و ابعاد ورق بر پدیده چروکیدگی پرداخت. در این تحقیق همچنین با بکارگیری ورقگیر جهت کنترل چروکیدگی، روش متداول شکل دهی انفجاری مخروط گسترش یافته است. در این تحقیق همچنین مشخص گردید که عملکرد موفق ورق گیر تابع عواملی چون فشار آن و جنس ورق می باشد. میان نتایج تحلیلی و تجربی این تحقیق انطباق مطلوبی وجود دارد.

## فهرست نمادها

$a_0, a_1, a_2, a_3$ : توابعی متشکل از خواص مکانیکی و ابعاد مخروط و همچنین موضع بدون بعد شروع

چروکیدگی

D: مدول سختی خمشی

E: مدول یانگ

$E_0$ : مدول کمانش

$E_p$ : مدول کار سختی

G: دامنه چروک ها

$l, y$ : دستگاه مختصات یالی - مماسی مخروط

m: نسبت تنش تسلیم دینامیکی به تنش تسلیم استاتیکی

$N_l$ : نیروی غشایی یالی بر واحد طول

$N_y$ : نیروی غشایی محیطی بر واحد طول

$n, n_1, n_2$ : شماره مد (Mode Number) یا نصف تعداد چروک ها

$R_0$ : شعاع اولیه ورق

$R_1$ : شعاع قاعده بزرگتر مخروط ناقص

$R_{1f}$ : شعاع قاعده مخروط کاملاً شکل یافته

$R_2$ : شعاع قاعده کوچکتر مخروط ناقص

$T_0$ : ضخامت اولیه ورق

w: خیز اضافی ناشی از چروکیدگی

$x, \theta$ : دستگاه مختصات استوانه ای

$x_w$ : موضع شروع چروکیدگی

$Y_d$ : تنش تسلیم دینامیکی

$Y_s$ : تنش تسلیم استاتیکی

Z: موضع بدون بعد شروع چروکیدگی

$\alpha$ : نصف زاویه رأس مخروط

$\Delta$ : مبین معادله جبری درجه دوم

$\Delta T$ : کار انجام شده توسط نیروهای غشایی

$\Delta U$ : انرژی کرنش خمش پلاستیک

$\epsilon_l$ : نرخ کرنش یالی

$\epsilon_T$ : نرخ کرنش ضخامتی

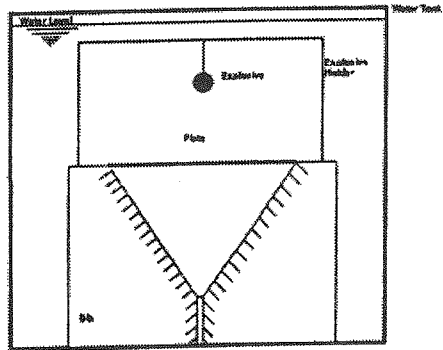
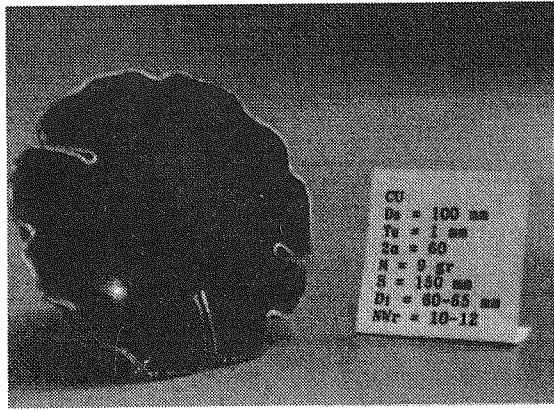
$\epsilon_\theta$ : نرخ کرنش محیطی

$\nu$ : ضریب پواسون

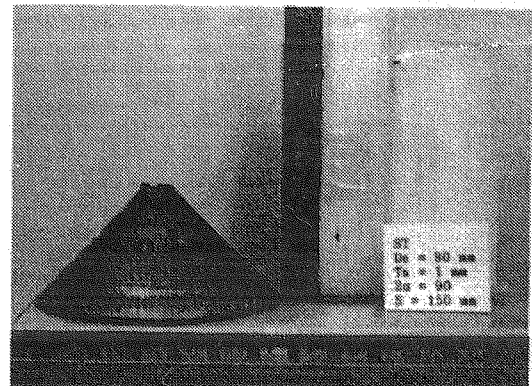
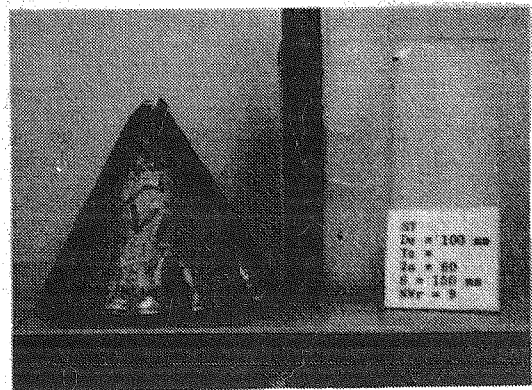
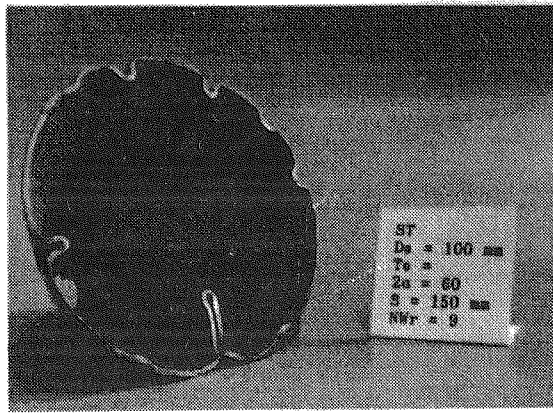
$\sigma_l$ : تنش یالی

$\sigma_T$ : تنش ضخامتی

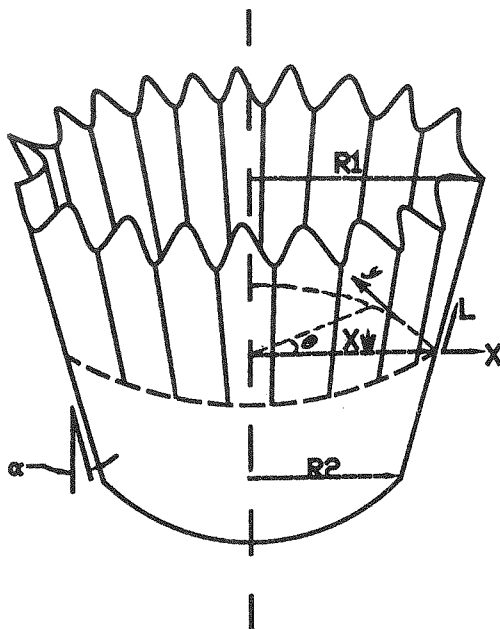
$\sigma_\theta$ : تنش محیطی



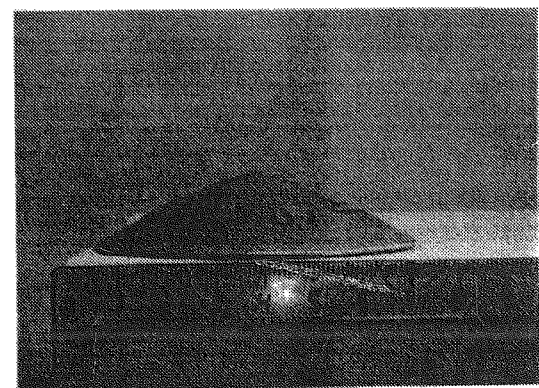
شکل (۱-آ) شماتیک چیدمانی اجزاء در آزمایش های تجربی.



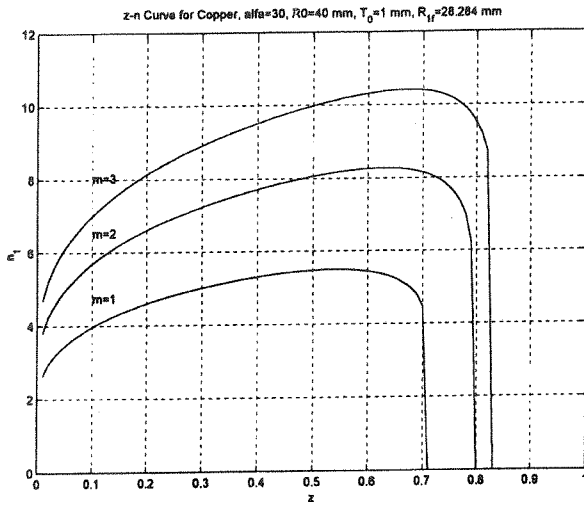
شکل (۱-ب) پروفیل طولی چروک در مخروط ۶۰ درجه.



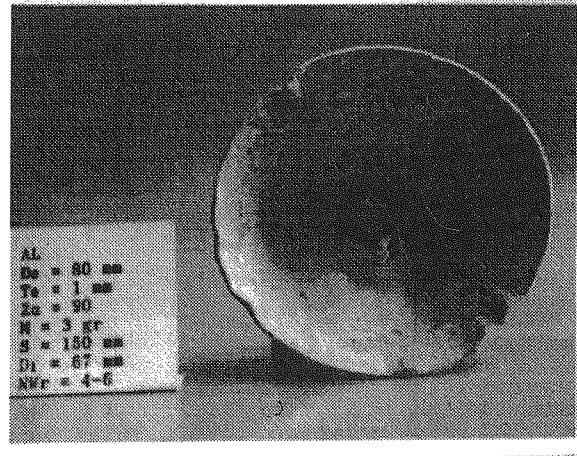
شکل (۲) مدل سازی تحلیلی چروکیدگی در جریان شکل دهی انفجاری مخروط.



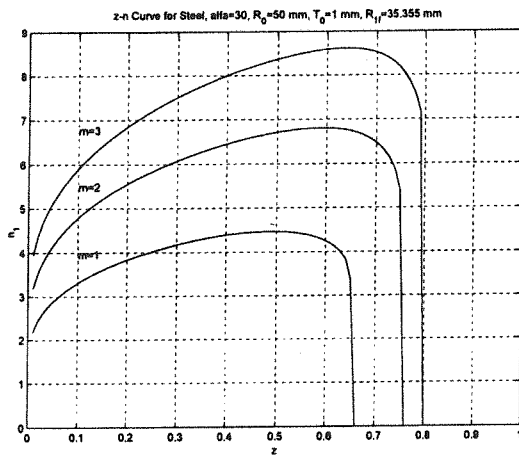
شکل (۱-ب) نمونه ای از مخروط های تولید شده با استفاده از روش شکل دهی انفجاری از بالا به پایین بترتیب: مخروط ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه



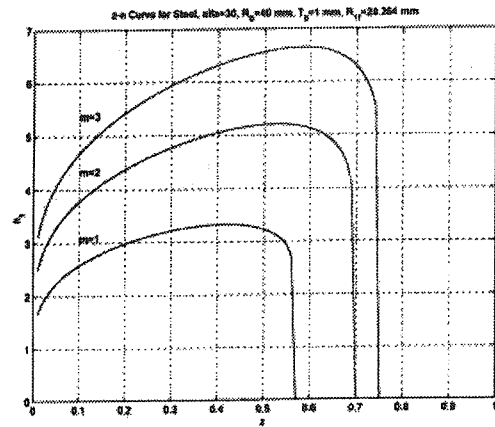
شکل (۴) منحنی های  $z-n_1$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای  
گرده مسی به شعاع  $40$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.



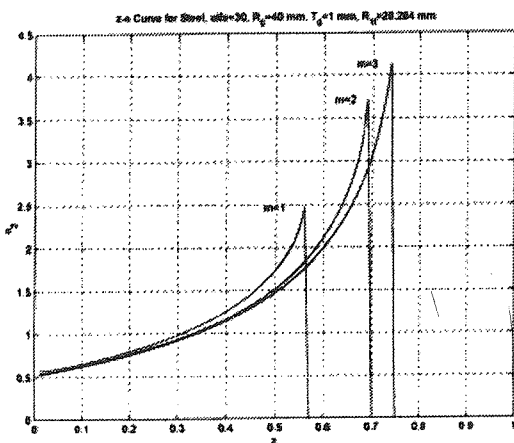
شکل (۳) چروکیدگی لبه در نمونه آلومینیومی.



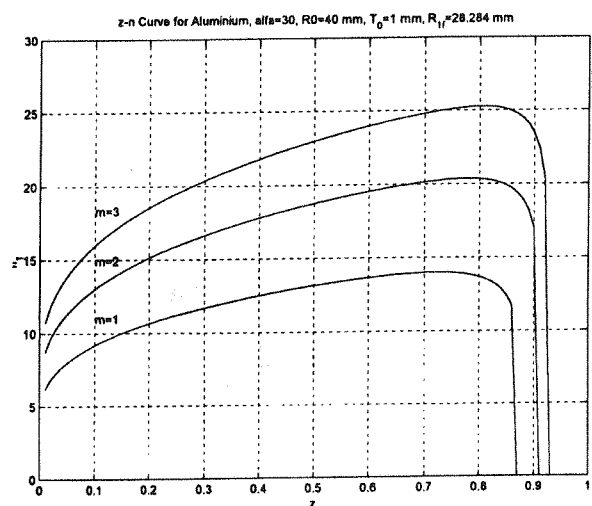
شکل (۴) منحنی های  $z-n_1$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای  
گرده فولادی به شعاع  $50$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.



شکل (۴) منحنی های  $z-n_1$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای  
گرده فولادی به شعاع  $40$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.

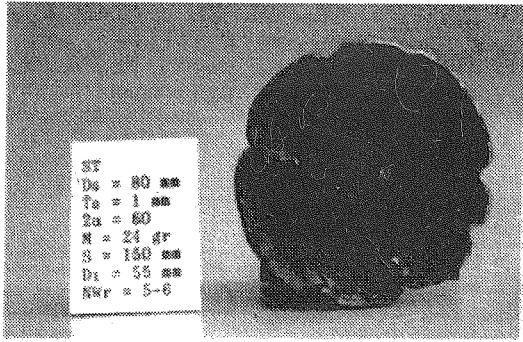


شکل (۵) منحنی های  $z-n_2$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای  
گرده فولادی به شعاع  $40$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.

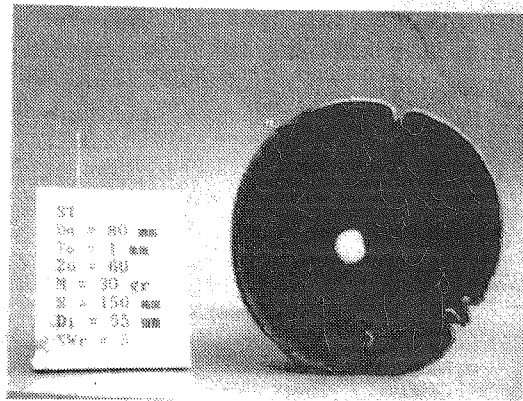


شکل (۴) منحنی های  $z-n_1$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای گرده  
آلومینیومی به شعاع  $40$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.

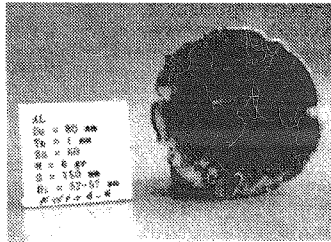




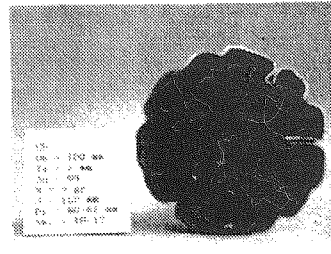
شکل (۶-۶) تعداد چروک در مخروط کامل  $n=6$  و درجه حاصل از گرده فولادی به شعاع  $40^\circ$  و ضخامت  $1$  میلیمتر ( $z=0.56, n=6$ ).



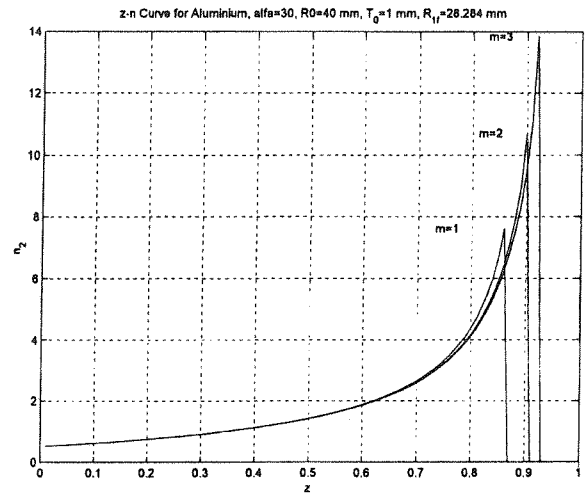
شکل (۶-۵) تعداد چروک در مخروط کامل  $60^\circ$  درجه حاصل از گرده فولادی به شعاع  $40^\circ$  و ضخامت  $1$  میلیمتر ( $z=0.69, n=5$ ).



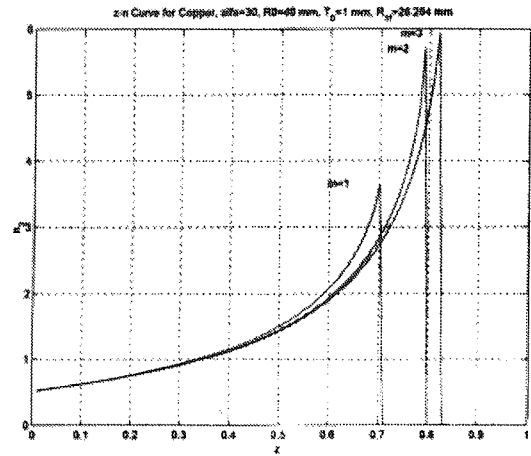
شکل (۶-۴) تعداد چروک در مخروط کامل  $60^\circ$  درجه حاصل از گرده آلومینیومی به شعاع  $40^\circ$  و ضخامت  $1$  میلیمتر ( $n=6-8, z=0.7$ ).



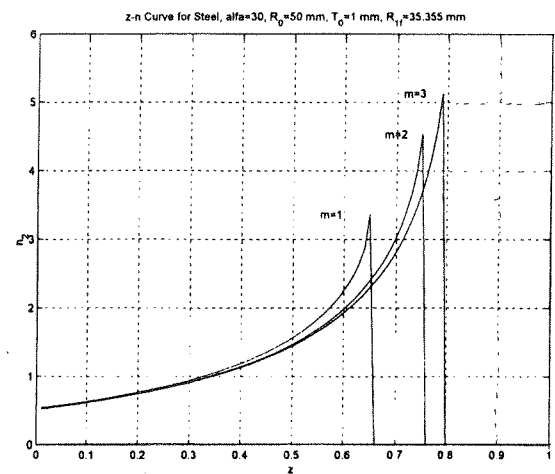
شکل (۶-۳) تعداد چروک کامل  $60^\circ$  درجه حاصل از گرده مسی به شعاع  $40^\circ$  و ضخامت  $1$  میلیمتر ( $n=10-12, z=0.43$ ).



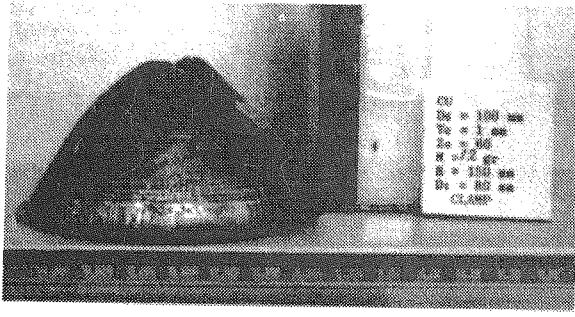
شکل (۵-ب) منحنی های  $z-n_2$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای گرده آلومینیومی به شعاع  $40^\circ$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.



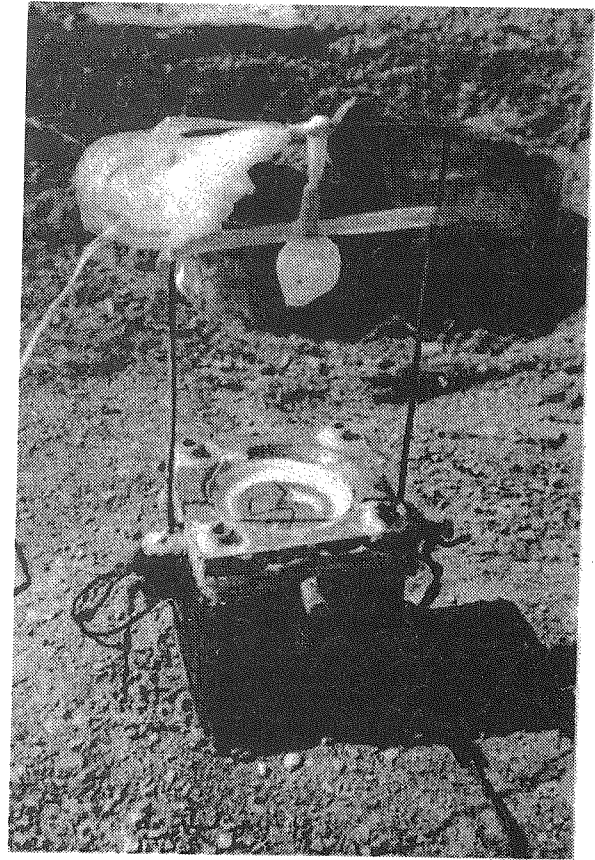
شکل (۵-پ) منحنی های  $z-n_2$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای گرده مسی به شعاع  $40^\circ$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.



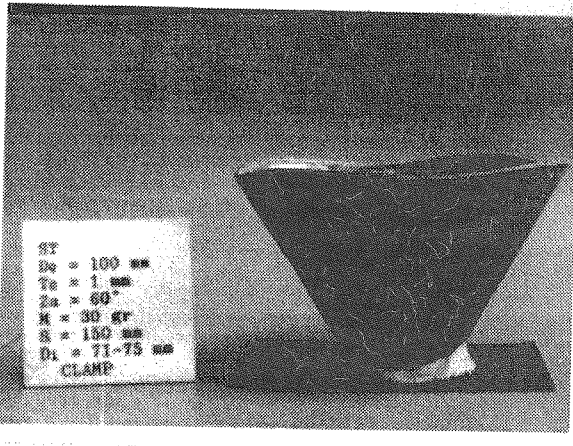
شکل (۵-ت) منحنی های  $z-n_2$  مخروط کامل  $60^\circ$  درجه برای گرده فولادی به شعاع  $40^\circ$  و ضخامت  $1$  میلیمتر.



شکل (۷) پارگی در نمونه مسی هنگام استفاده از ورق گیر.



شکل (۷-آ) پیکارگیری ورق گیر جهت کنترل چروکیدگی در شکل دهی انفجاری مخروط.



شکل (۷) حذف چروکیدگی در نمونه فولادی و گوشه دار شدن لبه هنگام استفاده از ورق گیر.

جدول (۱) خواص مکانیکی مواد مورد استفاده.

| Material | $Y_e (MPa)$ | $E (MPa)$ | $E_p (MPa)$ | $E_0 (MPa)$ |
|----------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| Cu       | ۱۶۹/۵۴      | ۱۱۵۰۰۰    | ۸۲۸ [۱۷]    | ۲۸۱۴        |
| Al       | ۹۱/۴۶       | ۶۹۰۰۰     | ۲۸۰۰ [۱۷]   | ۷۷۵۹        |
| St       | ۲۳۹/۲۵      | ۲۰۰۰۰۰    | ۲۰۰۰۰ [۹]   | ۴۶۱۷۷       |

جدول (۲) مقادیر تحلیلی و تجربی [۵]  $n$  و  $z$  برای مواد مختلف با ضخامت ۱ و شعاع اولیه ۲۰ میلیمتر.

| material | z    | $z n_1$ |       |        | $z n_2$ |     |        | تجربی |        |
|----------|------|---------|-------|--------|---------|-----|--------|-------|--------|
|          |      | m=۱     | m=۲   | مرجع   | m=۱     | m=۲ | مرجع   | n     | مرجع   |
| St       | ۰.۵۶ | ۵-۶     | ۱۰    | شکل ۱۲ | ۲-۵     | ۳-۴ | شکل ۱۵ | ۶     | شکل ۱۴ |
| St       | ۰.۶۹ | -       | ۸     | شکل ۱۴ | -       | ۷   | شکل ۱۵ | ۵     | شکل ۱۶ |
| Al       | ۰.۷  | ۲۸      | ۴۰    | شکل ۱۶ | ۵-۶     | ۵-۶ | شکل ۱۶ | ۶-۸   | شکل ۱۶ |
| Cu       | ۰.۲۳ | ۱۱      | ۱۵-۱۶ | شکل ۱۶ | ۲-۳     | ۲-۳ | شکل ۱۶ | ۱۰-۱۲ | شکل ۱۶ |

- [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] N. Cristescu, Dynamic Plasticity, PP. 302, 330, (1967).
- [۴] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، گزارش آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری مخروط، صنایع شهید باقری، ۱۳۷۶.
- [۵] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری مخروط، صنایع مهمات سازی، ۱۳۷۸-۷۹.
- [۶] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، شکل دهی مخروط 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، ۳۰-۲۸ اردیبهشت ۱۳۷۷.
- [۷] لیاقت، غلامحسین - جواب ور، داریوش، ارایه مدل تغییر شکل 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 تغییر شکل ناپایدار ورق فلزی 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] T. X. Yu, W. Johnson and W. J. Stronge, Stamping and Springback of Circular Plates Deformed in Hemispherical Dies, Int. J. Mech. Sci, Vol. 26, No. 2, PP. 131-148, (1984).
- [10] 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).
- [11] Eric K. Henriksen, The Theory of Explosive Forming, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, PP. 6,9,11,(1968).
- [12] R. V. Pikhovnikov, V. I. Zav'yalova, Explosive Forming of Sheet Metals, P. 82.
- [13] A. C. Ugral, Stress in Plates and Shells, PP. 159, 239.
- [14] W. Johnson, P.B.Mellor, Engineering Plasticity, Ellis Harwood Ltd. (Publ.), PP. 64, 82, (1983).
- [15] Ahmetoglu, Mustafa A. ^ Cormans, Arjan ^ Kinzel, Gray L. ^ Altan, Taylan, Improving Drawability by Using Variable Blank Holder Force and Pressure in Deep Drawing of Round and Non-Symmetric Parts, Sheet Metal and Stamping Symposium, SAE Special Publications, N. 944, Publ. by SAE, Warrendale, PA, U.S.A., PP. 113-120,(1993).
- [16] Adams, G. G., Plate Elastic Wrinkling of A Tensioned Circular Using Von Karman Plate Theory, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, V. 60, N. 2, PP. 520-525, (Jun 1993).
- [17] Lindbrg, H. E. and Florence, A. L., Dynamic Pulse Buckling - Theory and Experiment, PP. 2, 95-97, (1987).
- [18] Chirs H. Jenkins and John W. Leonard, Nonlinear Dynamic Response of Membranes: State of Art, Appl. Mech. Rev., 44(7), PP. 319-328 (July 1991).
- [19] Narayanasamy, R. ^ Sowerby, R., Wrinkling of Sheet Metals When Drawing through A Conical Die, Journal of Materials Processing Technology V. 41, N. 3, PP. 277-290, (Mar. 1994).
- [20] N. Jones, Recent Progress in The Dynamic Plastic Behavior of Structures - Part I, Shock Vib. Dig., 10(9), PP. 21-33, (1978).
- [21] Stronge, W. J. ^ Sutcliffe, M. P. F. ^ Yu, T. X., Wrinkling of Elastoplastic Circular Plates during Stamping, Experimental Mechanics V. 26, N. 4, PP. 345-353, (Dec. 1986).
- [۲۲] لیاقت، غلامحسین و دیگران، تحلیل پدیده چروکیدگی در شکل دهی انفجاری مخروط و مقایسه با نتایج تجربی، مجله بین المللی علوم و مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، آماده چاپ.