بررسی تحلیلی، تجربی و عددی پروفیل سرعت و جابجایی عمودی، فشار مورد نیاز و ابعاد محصول در فرآیند شکلدهی انفجاری مخروط

داریوش جواب ور استادیار دانشکده مهندسی هوافضا – دانشگاه هوایی شهید ستاری و گروه صنایع مکانیک – سازمان هوافضا غلامحسین لیاقت

استاد گروه مهندسی مکانیک – دانشکده فنی – دانشگاه تربیت مدرس و گروه صنایع مکانیک – سازمان هوافضا ابوالفضل درویزه

استاد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه گیلان

امير عبدالله

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس (تاریخ دریافت ۷۹/۱۱/۲ ، تاریخ تصویب ۸۱/۴/۱۵)

چکیدہ

در این تحقیق فرآیند شکلدهی انفجاری از سه منظر تحلیلی ، عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته که از دو منظر نخست و برخی آزمایشهای تجربی در بردارندهٔ جنبههای نوآوری می باشد. در مدل تحلیلی ارائه شده فرض شده است که پروفیل تغییر شکل ورق در اثناء فرآنید شکلدهی انفجاری بصورت یک مخروط ناقص میباشد که با گدشت زمان در صورت اعمال فشار مناسب به سمت یک مخروط کامل میل میکند. همچنین از تغییرات ضخامت ورق در اثناء فرآیند صرفنظر گردیده است. از اهم نتایج این مدل تحلیلی ارائه معادلاتی هندسی مخروط ، توزیع سرعت و جابجایی مرکز ورق بر حسب زمان می باشد.

در شبیهسازی عددی از نرمافزار اجزاء محدود ABAQUS - Explicit استفاده گردید. نتایج حاصل از این شبیهسازی باضافه برخی نتایج تجربی انطباق مطلوبی با یکدیگر و با نتایج تحلیلی داشته اند.

واژه های کلیدی : شکلدهی انفجاری^۱ ، شکلدهی با سرعت بالا^۲ ، شکلدهی با نرخ کرنش بالا^۳ ، بارگذاری دینامیکی ورقهای مدور^۴ ، بارگذاری ایمپالسی ورقهای مدور ^۵

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 مهاری قرار گرفته و مادهٔ منفجره نیز در فاصلهٔ معینی از آن استقرار می یابد، انفجار مادهٔ منفجره سبب رانده شدن ورق به درون حفرهٔ مخروطی قالب شده و شکل مخروط بخود میگیرد. جهت افزایش راندمان، تجهیزات در یک مخزن آب قرار گرفته و انفجار در زیر آب صورت می پذیرد. فرآیند شکلدهی انفجاری در زمینه

تولید ارزان قطعات پیچیده و بزرگ در زمان کوتاه و البته در حجم پائین تولید، کاربردهای متنوع دارد. این ویژگیهای منحصر بفرد می تواند سبب استخدام این روش در صنایع گوناگون شکلدهی ورق و پوسته بالاخص در صنایع هوا – فضا و نظامی کشور گردد، جائیکه از قابلیت و پیشینه زیاد کار با مواد منفجره برخوردار می باشد. پوسته های مخروطی از جمله قطعات مهم در صنایع هوا – فضا بوده که تولید آنها به روشهای سنتی با مشکلات عدیده همراه می باشد. از جملهٔ این کاربردها میتوان به پوستههای دوکی شکل یا اوجیوال نظیر پوسته های

ورقها در دهانهٔ قالب میتوان از یک یلهٔ کوچک در دهانهٔ قالب بعنوان نشیمنگاه ورق استفاده کرد) در زیر قالبهای فلزى سوراخى جهت تخليه هواى داخل حفرة قالب تعبيه شده است. پس از قرارگیری مطلوب ورقها بر روی دهانهٔ قالب، اجزاء بایستی بطور کامل آببندی گردند. بدین منظور میتوان از مواد آببندی مناسبی جهت انسداد محل نشیمنگاه ورق و سوراخ تحتانی قالب استفاده کرد. در این خصوص خمیر مجسمهسازی در تجربیات این تحقیق عملكرد مناسبي داشته است. مرحلهٔ بعد عبارتست از استقرار مقدار مناسب مادهٔ منفجره در فاصله مناسب از سطح كار كه این دو عامل از جملهٔ مهمترین فاكتورهای دخیل در فرآیند می باشند. در تجربیات این تحقیق از مادهٔ منفجرهٔ خمیری شکل C4 که به آسانی شکلپذیر می باشد در فاصلهٔ استقرار ۱۵۰ میلیمتری از سطح کار استفاده گردید. بمنظور استقرار مناسب و با قوام مادهٔ منفجره بایستی از بست مناسبی استفاده گردد. مرحلهٔ بعد عبارتست از برقرار ساختن یک زنجیره آتش مناسب که در تجربیات این تحقیق از چاشنی الکتریکی ۶ یا ۸ که در مادهٔ منفجرهٔ C4 بطور مناسبی جاسازی گشته و بوسیلهٔ سیمهای رابط به یک باطری الکتریکی در فاصلهٔ مناسب از محل اجراء آزمایش (حداقل ۲۰۰ متر برای تا ۳۰ الی ۴۰ گرم C4) وصل میگردد. 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 بطرق 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 غوطه ور ساخت. حفر مخزن درون چالهای در زمین و تقویت اطراف آن بوسیلهٔ بتن عمر استفاده از مخزن را بالا می برد. در هر صورت نكات متعدد تجربي وجود دارد كه ذكر تمام آنها از حوصلهٔ این مقاله خارج می باشد آنچه بسیار مهم می باشد 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 فاصلهٔ امن از انفجار و پناه گیری ایمن از اهم نکات ایمنی در این خصوص می باشد.

سرجنگی و راکتها اشاره نمود. تولید سرجنگیهای کالیبر بالا با استفاده از روشهای متداولی نظیر فورج به علت بالا رفتن تناژ و کورس آن با مشکلات فراوان مواجه بوده که باعث می شود این سرجنگیها به جای فلز از فایبرگلاس ساخته شوند كه البته سبب كاهش قدرت انفجار و تخريب سرجنگی میشود شکلدهی انفجاری بهینه ترین راه غلبه بر این معضل می باشد. 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] می باشد، هر چند کار با ارزش آنها نیز تنها محدود به کسب پارهای 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[°] در اثر عدم مهار لبه ورق و حرکت آن در طول جدارهٔ حفرهٔ قالب، تأثیر متقابل ما بین جداره حفره قالب و ورق در جریان فرآیند مسئلهٔ تحقیقی نوین و بغرنجی را مطرح می سازد[۵]. کارهای تحلیلی منتشره در این زمینه منحصر به مراجع[۶،۷،۸] می باشد. ارائه یک مدل تحلیلی سبب آشکارسازی نحوهٔ ارتباط و تأثیر پارامترهای مربوط به مادهٔ منفجره (فاصله استقرار و مقدار مادهٔ منفجره) ، متغییرهای هندسی مخروط (شعاع و ضخامت ورق و زاویه رأس مخروط) و جنس ورق در فرآیند می گردد. این امر به مهندس ساخت و توليد اجازه مي دهد تا فرآيند توليد مخروط به روش انفجاری را بصورت مناسبی طراحی و تدوین نماید. تحقیق حاضر کوششی است در این راستا.

أزمایشهای تجربی

جهت نیل به مدارک و شواهد تجربی ، تعداد زیادی آزمایش شکلدهی انفجاری طراحی و اجراء شد. در شکل (۲) نمونهای از چیدمانی مورد استفاده در تجربیات این تحقیق نشان داده شده است. ابتدا گردههای فلزی روی دهانهٔ قالبهای فولادی با زاویای ۶۰ ، ۹۰ و ۱۲۰ درجه بطور مناسبی قرار می گیرند (جهت قرار مطلوب





بررسی تحلیلی، تجربی و عددی



شکل۱: شماتیک چیدمانی اجزاء در آزمایشهای تجربی .



شکل۲: چیدمانی اجزاء در آزمایشهای تجربی.





شکل۳: پروفیل تغییرشکل ورق در جریان شکل دهی انفجاری مخروط منتج از مدلسازی اجزاء محدود.

شکل۴: پروفیل تغییرشکل ورق در جریان شکل دهی انفجاری مخروط منتج از تجربه.

مدلسازى اجزاء محدود

فرآیند شکلدهی انفجاری مخروط توسط کد اجزاء محدود ABAQUS-Explicit شبیه سازی گشت [۹]. در این مدل فرض شده است که یک ورق مدور فلزی در معرض ضربهٔ ناشی از یک بار گستردهٔ نمایی بصورت $P = P_0 e^{-\frac{i}{\theta}}$ به درون یک قالب مخروطی رانده میشود، به عبارت دیگر اثر موج انفجار بر روی ورق با ضربهٔ ناشی از

یک بار گستردهٔ نمایی معادل سازی گردیده شده است [۱۰]. این معادل سازی در مراجع [۵،۱۱،۱۲] نیز مشاهده می گردد. مشخصات مدل مورد استفاده در شبیه سازی اجزاء محدود به شرح زیر است [۱۰]: ۱. المان بندی ورق با المانهای S3R و S4R

بررسی تحلیلی، تجربی و عددی



شکل۵: شمائی از مدل تحلیلی.

R3D3 ۲. المان بندی قالب مخروطی با المان R3D3 ۳. رفتار تنش وکرنش ماده بصورت صلب- پلاستیک کامل^۷ ۴. بار گسترده یکنواخت بر تمام سطح ورق با توزیع نمایی ۹. بار گسترده یکنواخت بر تمام سطح ورق با توزیع نمایی ۹. زمان خاتمه تغییر شکل $\mu \sec \mu \sec t_f = 250$ ۵. زمان خاتمه تغییر شکل sec μ sec ا

در جدول (۱) جنس و خواص مواد مورد استفاده در شپیا سازی آمده است.

۱: جنس و خواص مواد مورد استفاده در شبیه سازی.	جدول
---	------

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

مدلسازى تحليلى

شکل (۳) تغییر شکل ورق در اثناء پروسهٔ شکلدهی انفجاری مخروط منتج از اجراء کد اجزاء محدود ABAQUS را نشان میدهد که انطباق مطلوبی با نتایج تجربی دارد (شکل ۴). همانطوریکه در این شکلها دیده می شود در هر مرحلهٔ از زمان، پروفیل تغییر شکل ورق بصورت یک مخروط ناقص بوده که با پیشرفت زمان شعاع قاعدهٔ تحتانی این مخروط کوچکتر شده و در نهایت به سمت یک مخروط کامل (در صورت اعمال فشار کافی) میل می کند. هر چند در عمل و همچنین در نتایج حاصل از کد اجزاء محدود قاعدهٔ تحتانی مخروط کاملاً تخت از کد اجزاء محدود قاعدهٔ تحتانی مخروط کاملاً تخت نبوده و از اندکی انحناء برخوردار می باشد، لیکن جهت جلوگیری از پیچیدگی تحلیل، در مدل تحلیلی ارایه شده

در این تحقیق از این انحناء صرفنظر شده است و قاعده تحتانی کاملاً تخت در نظر گرفته شده است. دقیقتر میتوان گفت که یک لولای پلاستیک از محیط پیرامون ورق به سمت مرکز آن حرکت کرده که نواحی در نور دیده توسط آن بصورت جدارهٔ یک مخروط ناقص خم گشته و بر سطح دیوارهٔ قالب مماس می گردد. پدیدهای از این دست بطور نظری توسط هودسون [۱۳] و بطور تجربی توسط کیوتا و کربیت [۵] در مورد بارگذاری انفجاری در زیر آب دیافراگم فلزی گیردار به ثبوت رسیده است.

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

۱. پروفیل تغییر شکل ورق در هر لحظه از زمان یک مخروط ناقص در نظر گرفته شده است.

۲. از تغییرات ضخامت صرفنظر شده است.

فرضیه اول در مورد یک دیافراگم نازک فلزی با شرایط مرزی گیردار [۱۲،۱۳] و در جریان استمپینگ انفجاری ورق [۵،۱۵] بکار گرفته شده است.

محاسبه سرعت لولای پلاستیک ، پروفیل سرعت عمودی و پروفیل جابجایی عمودی

با توجه به فرضیات فوق الذکر یک مدل تحلیلی ساده جهت محاسبه سرعت لولای پلاستیک ، سرعت و جابجایی عمودی مرکز ورق در هنگام تغییرشکل در شکل (۵) ارائه شده است، همانطوریکه در این شکل دیده

می شود یک لولای پلاستیک با سرعت \dot{R}_2 از محیط R_2 می شود یک لولای پلاستیک با سرعت r_2 از محیط R_2 به سمت مرکز ورق حرکت کرده و در زمان t به شعاع R_2 رسیده است. نواحی از ورق که دارای شعاعی کمتر از R_2 با شعاع بوده بصورت یک مخروط ناقص خم شده و نواحی با شعاع

$$-R_2 = v_2 \tan \alpha$$

$$-\dot{R}_{2} = \frac{p_{0}\theta}{\rho T} \tan\alpha \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right)$$
(9)

در : شرايط اوليه t = 0 ; $R_2 = R_0$

(1.)

(11)

 $(1)^{(1)}$

(λ)

انتگرالگیری از معادلهٔ (۹) با توجه به شرایط اولیه (۱۰) منجر به محاسبهٔ شعاع قاعدهٔ تحتانی به صورت ذیل می گردد.

$$R_{2} = R_{0} - \frac{P_{0}\theta}{\rho T} \tan \alpha \left(t - \theta + \theta e^{-\frac{t}{\theta}} \right)$$

از دیگر سو 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.

سطح ورق اولیه =سطح جانبی مخروط ناقص

$$\pi R_0^2 = \frac{\pi}{Sin\alpha} (R_1^2 - R_2^2) + \pi R_2^2$$
(17)

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

(۱۳) که مقدار R_2 در معادلهٔ اخیر از معادلهٔ (۱۱) بدست می آید. همچنین با توجه به شکل (۵) جابجایی عمودی لبه قاعده بزرگ مخروط ($r = R_0$) از معادله زیر بدست می آید:

$$h_1 = \cot \alpha . (R_0 - R_1)$$

حال با مشتق گیری از رابطه فوق نسبت به زمان سرعت عمودی لبه قاعده بزرگ مخروط نیز بصورت زیر بدست می آید:

 $v_1 = -\cot\alpha \, . \, R_1 \tag{10}$

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 مؤلفههای عمودی نیرو مقدار این سرعت ثابت باقی میماند [1۵] ولی در اثر حضور نیروهای عمودی ناشی از فشار انفجار مقدار این سرعت ثابت باقی نمانده و با زمان تغییر می کند. برای المان بسیار کوچکی واقع بر ناحیهٔ مرکزی ورق قانون دوم حرکت بصورت زیر نوشته می شود:

$$F = m_c \cdot \frac{dv_2}{dt}$$

 $m_c = \rho \cdot A \cdot T$

$$F = D$$
 (Y)

$$P = P_0 e^{-\frac{t}{\theta}}$$

(۴)

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

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{P_0 e^{-\frac{t}{\theta}}}{\rho T}$$

(۵)

(6)

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

$$v_2 = \frac{P_0 \theta}{\rho T} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right)$$

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

$$h_{2} = \frac{P_{0}\theta}{\rho T} \left(t - \theta + \theta e^{-\frac{t}{\theta}} \right)$$

www.SID.ir

(Y)

از سوی دیگر با مشتق گیری از معادله (۱۳) خواهیم داشت:

$$R_1 \dot{R}_1 = (1 - \sin \alpha) R_2 \dot{R}_2$$
 (۱۶)
(۱۶) از ترکیب معادلات (۱۵) و (۱۶) خواهیم داشت:
 $v_1 = -\cot \alpha . (1 - \sin \alpha) \frac{R_2}{R_1} \dot{R}_2$

$$v_1 = \cot \alpha . (1 - \sin \alpha) \frac{R_2}{R_1} v_2$$
(1A)

حال با فرض یک توزیع خطی پروفیل سرعت و جابجایی
عمودی نقاط مختلف بصورت زیر بدست خواهند آمد:
$$0 \le r \le R_2$$
 ,
 $R_2 \le r \le R_0$,
 $v = \begin{cases} v_2 \\ v_2 + \frac{(v_2 - v_1)}{(R_2 - R_0)}(r - R_2) \end{cases}$

 $(7 \cdot)$

$$0 \le r \le R_2 ,$$

$$R_2 \le r \le R_0 ,$$

$$h = \begin{cases} h_2 \\ h_2 + \frac{(h_2 - h_1)}{(R_2 - R_0)} (r - R_2) \end{cases}$$

برأورد ميزان فشار مورد نياز براى توليد مخروط كامل

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 قاعدهٔ تحتانی R_2 در لحظه خاتمه تغییر شکل (f_f)) بصورت ذیل با استفاده از معادلهٔ (۱۱) بدست می آید:

$$P_{0} = \frac{\rho T Cot \alpha (R_{0} - R_{2})}{\theta (t_{f} - \theta + \theta e^{-\frac{t_{f}}{\theta}})}$$

از نتایج جالب معادلهٔ اخیر محاسبهٔ 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_{0f} بقرار ذیل خواهد بود:

$$P_{of} = \frac{\rho T R_{o} Cot \alpha}{\theta (t_{f} - \theta + \theta e^{-\frac{t_{f}}{\theta}})}$$
(17)

نتايج و بحث

در این بخش جهت حصول مقایسهای 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 آزمایشهای تجربی شکلدهی انفجاری، امکان کم اندازه گیری کمیات و متغییرهای آن بالاخص در اثناء فرآیند می باشد. که عمدتاً ناشی از زمان بسیار اندک و ماهیت تخریبی و ایمنی پائین فرآیند انفجار می پاشد.

فشار مورد نیاز جهت تولید یک مخروط کامل

یکی از پارامترهای عملی مهم در شکل دهی انفجاری مخروط برآورد جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل می باشد که این مهم در ارتباط مستقیم با برآورد فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل می باشد. نتایج تحلیلی و شبیه سازی اجزاء محدود نشان می دهند که فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل به جنس و ابعاد هندسی ورق وزاویه قالب بستگی دارد در جدول (۲) برای برخی از مقادیر تحلیلی و عددی این فشار داده شده است. مقادیر تحلیلی موجود در این جدول با استفاده از معادله (۲۱) که نمونهای از منحنیهای آن در شکل (۶) ارائه شده است، بدست آمده اند. در این منحنی فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط ناقص بر آن محسب شعاع قاعده کوچک آن ترسیم گردیده است که محرل تقاطع منحنی با محور عمودی (P_{0}) می باشد. بطور

(۲۱)



شکل۶: نمونه منحنی های تحلیلی فشار 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، فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل) .



شکل ۷ – الف: پروفیل تحلیلی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیم زاویه رأس ۳۰ درجه.





شکل ۷-پ: پروفیل تحلیلی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۶۰ درجه.



شکل ۸ – الف: پروفیل عددی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه 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-ب: پروفیل عددی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۴۵ درجه.



راهنمای شکل- ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰

شکل ۸-پ: پروفیل عددی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۶۰ درجه. راهنمای شکل- ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه.

جنون ١٠ سادير فعيني و عناقي (١٢ ١٢٠٠) مسار مورد نيار جهت توييد معروف فس					
جنس	T(mm)	R_0 (mm)	α	$P_{0f}(MPa)$	$P_{0f}(MPa)$
Υ,				تحليلى	ABAQUS
St	1	50	30	31.5	30
St	1.6	50	30	50.3	49
St	1	50	45	18	20
St	1.6	50	45	29	30
St	1	50	60	10.5	12.5
St	1.6	50	60	17.5	17
Al	1	50	30	11	10
Al	1.6	50	30	17	16
Al	1	50	45	6.3	6.5
Al	1.6	50	45	10	9.5
Al	1	50	60	3.7	4

جدول ۲: مقادیر تحلیلی و عددی(ABAQUS) فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل.

Archive of SID

نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۱، خردادماه ۱۳۸۲

Al 1.6 50 60 5.8 -

کاهش نیمزاویه رأس مخروط، افزایش ضخامت و افزایش دانسیته ورق هر کدام مستقل از دیگری منجر به افزایش فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط می گردد.

پروفيل سرعت عمودي

پروفیل تحلیلی سرعت عمودی نقاط مختلف ورق در هنگام تغییرشکل بازا، نیم زاویه رأس ۳۰ ۴۵ و ۶۰ با استفاده از معادله (۱۹) در شکلهای (۷) ترسیم شده است. نتایج ABAQUS نیز در شکلهای (۸) ارائه شده اند. پروفیلهای تحلیلی تحت فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل(معادله (۲۲)) ترسیم شدهاند که در اینصورت این پروفیلها مستقل از دانسیته و ضخامت ورق می باشند (ترکیب معادلات (۱۹) و (۲۲)).

پروفيل جابجايي عمودي

پروفیل تحلیلی جابجایی عمودی نقاط مختلف ورق در هنگام تغییرشکل بازاء نیم زاویه رأس ۴۵،۳۰ و ۶۰ با استفاده از معادله (۲۰) در شکلهای (۹) ترسیم شده است. نتایج ABAQUS نیز در شکلهای (۱۰) ارائه شده اند. پروفیلهای تحلیلی تحت فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل ترسیم شده اند که در اینصورت این پروفیلها مستقل از ضخامت ورق است (ترکیب معادلات محققان[۱۹] تأیید می گردد.

ابعاد مخروط كامل شكل يافته

مقادیر تحلیلی قطر قاعده مخروط کامل شکل یافته با استفاده از معادله (۳۰) و مقادیر تجربی (که نمونه هایی ازآن در شکل (۱۱) نشان داده شده است) بقرار جدول (۳) است:

نتيجه گيرى

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

 ۲. پروفیل تغییر شکل ورق در هر لحظه از زمان یک مخروط ناقص در نظر گرفته شده است.
 ۲. از تغییرات ضخامت صرفنظر شده است.

تخت بودن نواحی مرکزی در منحنیهای اجزاء محدود پروفیل سرعت و جابجایی عمودی و همچنین صفر بودن کرنش محیطی این نواحی در منحنیهای اجزاء محدود كرنش محيطي مؤيد فرض اول مي باشند. اين فرض همچنین با نتایج تجربی توافق قابل قبولی دارد. بعلاوه انطباق مطلوب نتایج تحلیلی، عددی و تجربی مربوط به سرعت و جابجایی عمودی، کرنش محیطی، ابعاد و جـرم ماده منفجره مورد نیاز مخروط کامل مؤید هر دو فرض و در مجموع دال بر موفقیت نخستین مدل بمنظور تحلیل تغییر شکل پایدار ورق در شکلدهی انفجاری مخروط می باشد. از اهم دستاوردهای ساخت و تولیدی این تحقیق می توان به تولید موفق مخروطهای با زاویه رأس ۹۰ و ۱۲۰ درجه با جنسها و ابعاد مختلف با استفاده از روش شکلدهی انفجاری برای اولین بار در داخل کشور اشاره کرد. در زاویه رأس ۶۰ درجه چروکیدگی بوقوع می پیوندد که بررسی تحلیلی و تجربی آن تحقیق دیگری را بخود اختصاص می دهد.

تشکر و قدردانی

پژوهشگران این تحقیق مراتب تقدیر و سپاس خویش را از آقایان پروفسور کرمی از دانشگاه لیدز انگلستان بخاطر مساعدت بی دریغ در امر شبیهسازی اجزاء محدود، پروفسور الحسنی از دانشگاه یومیست انگلستان بخاطر فراهم نمودن امکان استفاده از نرم افزار ABAQUS و دیگر راهنمائیها و همچنین از صنایع مهمات سازی و صنایع شهید باقری بخاطر فراهم نمودن امکانات انجام آزمایشهای این تحقیق ابراز می دارند.

بررسی تحلیلی، تجربی و عددی



شکل ۹- الف: پروفیل تحلیلی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۳۰





شکل ۹-پ: پروفیل تحلیلی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۶۰ درجه.

جنس	T(mm)	2α	$2 R_0 (\text{mm})$	$({ m mm})2R_{1f}$ تحلیلی	(mm) $2 R_{1f}$
					تجربى
St	1	60	80	56.5	55
Al	1	60	80	56.5	57
Cu	1	60	80	56.5	60
St	1	60	100	70.7	68
St	1	90	80	67	67
Al	1	90	80	67	67
Cu	1	90	80	67	67
St	1	90	100	84	84
St	1.6	90	100	84	84
Al	1	120	80	74.5	74.5

جدول ۳ : مقادیر تحلیلی و تجربی قطر قاعده مخروط کامل .



شکل ۱۰- الف: پروفیل عددی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۳۰ درجه. (راهنمای شکل- ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه).



شکل ۱۰– ب: پروفیل عددی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۴۵ درجه. (راهنمای شکل– ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۲۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث:

شکل ۱۰ – پ: پروفیل عددی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۶۰ درجه. (راهنمای شکل – ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه).

نيروى اعمال شده بر المان مركز ورق : Fجابجایی عمودی نقاط مختلف ورق hجابجایی عمودی لبه قاعده بزرگ مخروط : h_1 جابجایی عمودی مرکز ورق : h_2 m : نسبت تنش تسليم ديناميكي به تنش تسليم استاتىكى جرم المان مركز ورق : m_c P : بار گستردهٔ نمائی اعمال شده بر ورق P אפגו, המבו P_0 جهت تشکیل مخروط : حداکثر مقدار P مورد نیاز جهت تشکیل مخروط : P_{0f} کامل شعاع اوليه ورق تغيير شكل نيافته : R_0 : شعاع قاعدهٔ بزرگ (قاعدهٔ فوقانی) مخروط ناقص R_l $^{\wedge}$ امل : R_{1f} ، مغروط کامل : R_{1f} شعاع قاعدهٔ کوچک (قاعده تحتانی) مخروط ناقص : R_2 R₂ : سرعت لولای یلاستیک r : مختصه شعاعی در دستگاه مختصات ورق تغییر شکل نىافتە T : ضخامت ورق t : زمان t_f : زمان خاتمه تغییر شکل سرعت عمودی نقاط مختلف ورق : vسرعت عمودی لبه قاعده بزرگ مخروط : v_1 سرعت عمودی مرکز ورق : v_2 x : مختصه شعاعي المانهاي روى ديوارهٔ مخروط α : نيم زاويه رأس مخروط P . ثابت زمانی وابسته به بار گستردهٔ نمایی hetaρ : دانسيته ورق



شکل ۱۱ - الف: قطر قاعده مخروط کامل ۶۰ درجه منتج از تجربه برای گرده فولادی به قطر ۱۰۰ و ضخامت ۱ میلیمتر.



شکل ۱۱ – ب: قطر قاعده مخروط کامل ۹۰ درجه منتج از تجربه برای گرده فولادی به قطر ۸۰ و ضخامت ۱ میلیمتر.



شکل۱۱- پ: قطر قاعده مخروط کامل ۱۲۰ درجه منتج از تجربه برای گرده آلومینیمی به قطر ۸۰ و ضخامت ۱ میلیمتر.

> **فهرست علائم** A : مساحت المان مرکز ورق

مراجع

- 1 Tardif, H. P. (1959). "Explosive forming of cones by metal gathering." *Metal Progress*, Vol. 76, No. 3, PP. 84.
- 2 Travis, F. W. and Johnson, W. (1962). "The explosive forming of cones." *Proc. 3rd International Machine Tool Design Research Conference*, Birmingham, PP. 341 364.

۳ - لیاقت، غ. ح. و جواب ور، د. "گزارش آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری مخروط." صنایع شهید باقری، (۱۳۷۶). ۴ - لیاقت، غ. ح. و جواب ور، د. "آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری مخروط." صنایع مهمات سازی، (۷۹–۱۳۷۸).

5 - Cristescu, N. (1967). Dynamic Plasticity, PP. 328 - 331.

- ۶ لیاقت، غ. ح. و جواب ور، د. "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، ۳۰–۲۸ اردیبهشت (۱۳۷۷).
- ۷ لیاقت، غ. ح. و جوابور، د. "ارائه مدل تغییر شکل پایدار ورق جهت تحلیل شکلدهی انفجاری."هفتمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیک ایران ، دانشگاه سیستان و بلوچستان ، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، (۱۳۷۸).
- ۸ لیاقت، غ. ح. و جواب ور، د. "تحلیل تغییر شکل 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, Version 5.7.
- 10 Javabvar, D. (1999). "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 Johnson, W. (1972). Impact Strength of Materials, PP. 289.
- 12 -Henriksen, E. K. (1968). "The theory of explosive forming." *American Society of Tool and Manufacturing Engineers*, PP. 6,9-11.
- 13 Hudson, G. E. (1951). "A theory of the dynamic plastic deformation of a thin diaphragm." *Journal of Applied Physics*, Vol. 22, No. 1, PP. 1 11.
- 14 Mayers, M. A. (1994). Dynamic behavior of materials, John Wiley & Sons Inc., PP. 173, 300, 324.
- 15 Pikhtovnikov, R. V. and Zav'yalova, V. I. (1979). "Explosive forming of sheet Metals." *Microfilm*, University of UMIST, P. 82.
- 16 Ezra, A. A. (1973). *Principles and practice of explosive metalworking*, Pub. 1. by Industrial Newspaper Ltd., PP. 38-39.
- 17 Johnson, W. and Mellor, P. B. (1983). Engineering plasticity, Ellis Harwood Ltd.(Publ.), PP. 101.
- 18 Selly, M. and Dormeval, R. (1994). "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).
- 19 Nurick, G. N. and Martin, J. B. (1989). "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.
- 1- Explosive Forming
- 2 High Speed Metal Forming
- 3 High Strain Rate Metal Forming
- 4 Dynamic Loading of Circular Plates

- واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن
- 5 Impulsive Loading of Circular Plates
- 6 Moving Boundary Conditions
- 7 Rigid-Perfectly Plastic
- 8 Fully Formed Cone