

## 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

### امیر عبدالله

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۱/۲، تاریخ تصویب ۸۱/۴/۱۵)

### چکیده

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 بردارنده جنبه‌های نوآوری می باشد. در مدل تحلیلی ارائه شده فرض شده است که پروفیل تغییر شکل ورق در اثناء فرآیند شکلدهی انفجاری بصورت یک مخروط ناقص میباشد که با گذشت 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 جهت تعیین ابعاد 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<sup>۱</sup>، شکلدهی با سرعت بالا<sup>۲</sup>، شکلدهی با نرخ کرنش بالا<sup>۳</sup>، بارگذاری دینامیکی ورقهای مدور<sup>۴</sup>، بارگذاری ایمپالسی ورقهای مدور<sup>۵</sup>

### مقدمه

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، جاییکه از قابلیت 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 جمله این کاربردها میتوان به پوسته های دوکی شکل یا اوجیوال نظیر پوسته های

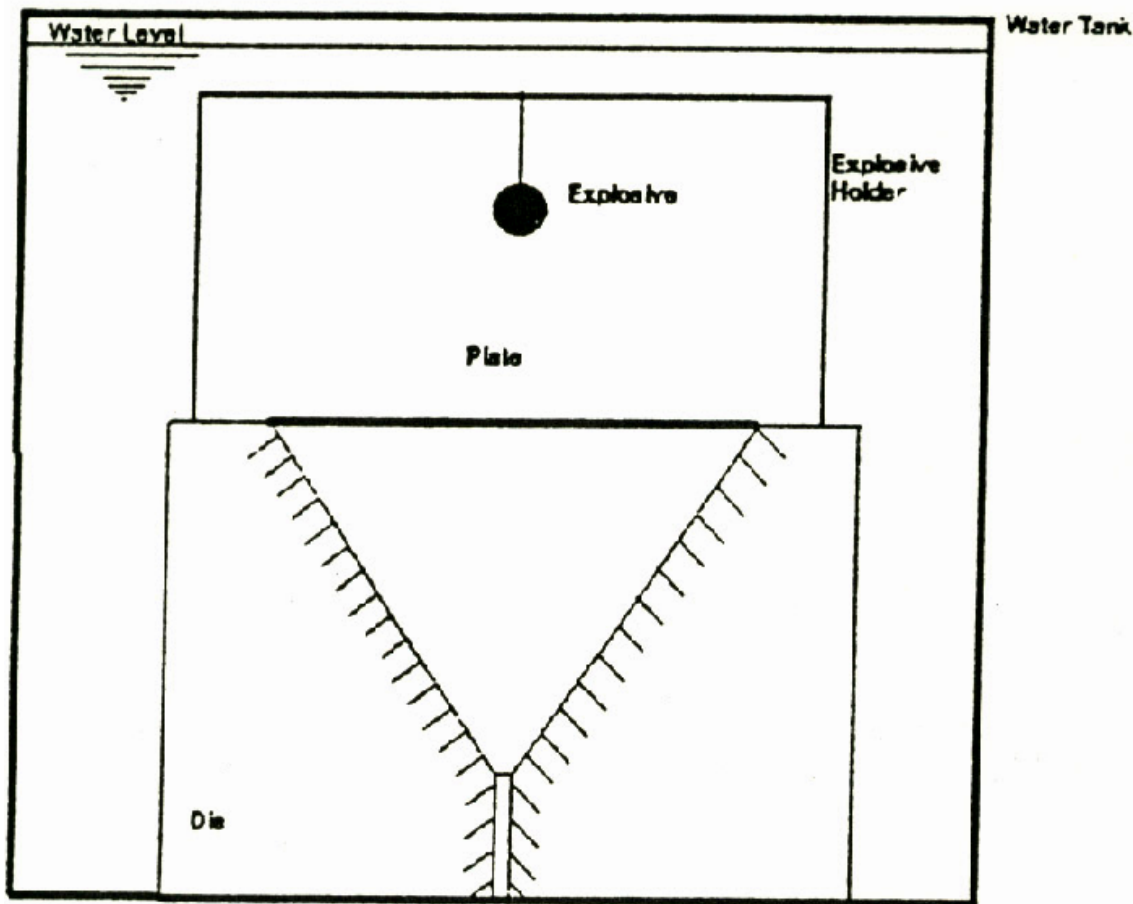
فرآیند شکلدهی انفجاری عبارتست از شکل دادن به قطعات با استفاده از انرژی مواد منفجره که به روشهای مختلفی انجام میشود. در شکلدهی انفجاری مخروط (شکل ۱) ورق بر روی یک قالب با حفره مخروطی بدون هیچگونه مهارى قرار گرفته و ماده منفجره نیز در فاصله معینی از آن استقرار می یابد، انفجار ماده منفجره سبب رانده شدن ورق به درون حفره مخروطی قالب شده و شکل مخروط بخود میگیرد. جهت افزایش راندمان، تجهیزات در یک مخزن آب قرار گرفته و انفجار در زیر آب صورت می پذیرد. فرآیند شکلدهی انفجاری در زمینه

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 ورقها بر روی دهانه قالب، اجزاء بایستی بطور کامل آبیندی گردند. بدین منظور میتوان از مواد آبیندی مناسبی جهت انسداد محل نشیمنگاه ورق و سوراخ تحتانی قالب استفاده کرد. در این خصوص خمیر مجسمهسازی 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 می باشند. در تجربیات این تحقیق از ماده منفجره خمیری شکل C4 که به آسانی شکلیپذیر 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 گشته و بوسیله سیمهای رابط به یک باطری الکتریکی در فاصله 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 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 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 زنده ایمنی و بهداشت، مراعات فاصله 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 که البته سبب کاهش قدرت انفجار و تخریب سرجنگی میشود شکلهی انفجاری بهینه ترین راه غلبه بر این معضل می باشد. نخستین بار تاردیف [۱] از روش شکلهی 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 شکلهی انفجاری مخروط همراه با تغییر شکل زیاد، نرخ کرنش بالا، شرایط مرزی متحرک در اثر عدم مهار لبه ورق و حرکت آن در طول جداره حفره قالب، تأثیر متقابل ما بین جداره حفره قالب و ورق در جریان فرآیند مسئله 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 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 می گردد. این امر به مهندس ساخت و تولید اجازه می دهد تا فرآیند تولید مخروط به روش انفجاری را بصورت مناسبی طراحی و تدوین نماید. تحقیق حاضر کوششی است در این راستا.

### آزمایشهای تجربی

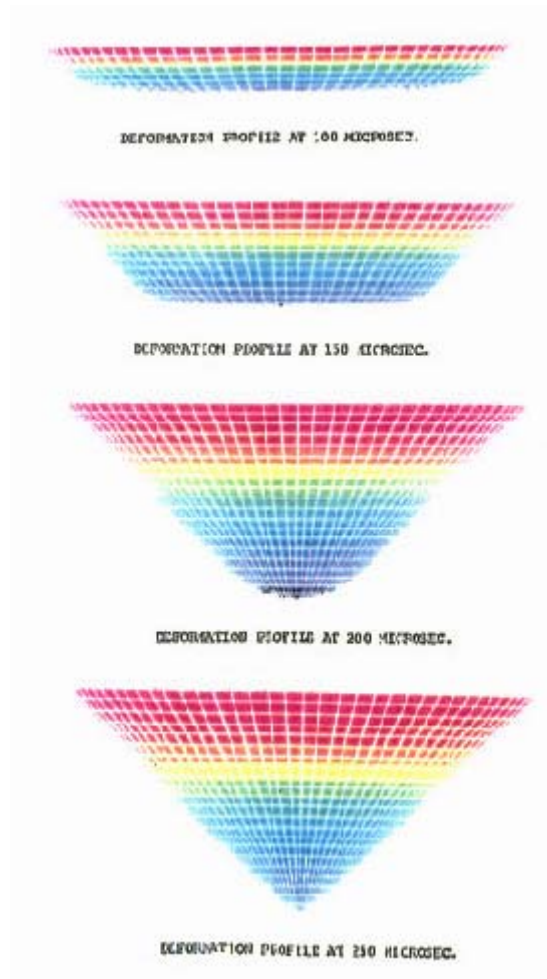
جهت نیل به مدارک و شواهد تجربی، تعداد زیادی آزمایش شکلهی انفجاری طراحی و اجراء شد. در شکل (۲) نمونههای از چیدمانی مورد استفاده در تجربیات این تحقیق نشان داده شده است. ابتدا گردههای فلزی روی دهانه قالبهای فولادی با زاویای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه بطور مناسبی قرار می گیرند (جهت قرار مطلوب



شکل ۱: شماتیک چیدمانی اجزاء در آزمایشهای تجربی.



شکل ۲: چیدمانی اجزاء در آزمایشهای تجربی.



شکل ۳: پروفیل تغییر شکل ورق در جریان شکل دهی انفجاری مخروط منتج از مدل سازی اجزاء محدود.

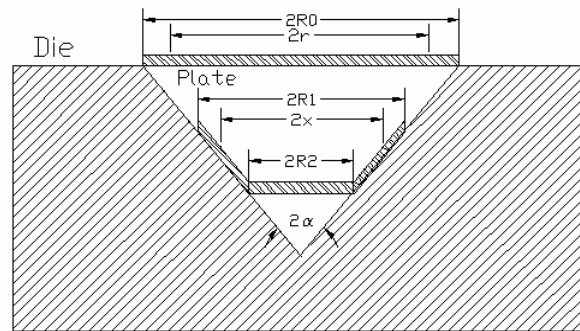


شکل ۴: پروفیل تغییر شکل ورق در جریان شکل دهی انفجاری مخروط منتج از تجربه.

### مدلسازی اجزاء محدود

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

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 ضربه ناشی از یک بار گسترده‌نمایی بصورت  $P = P_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$  به درون یک قالب مخروطی رانده میشود، به عبارت دیگر اثر موج انفجار بر روی ورق با ضربه ناشی از



شکل ۵: شمائی از مدل تحلیلی.

در این تحقیق از این انحناء صرف نظر 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. پدیده‌های از این دست بطور نظری توسط هودسون [۱۳] و بطور تجربی توسط کیوتا و کریبت [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 صرف نظر 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  $R_2$  - از محیط به سمت مرکز ورق حرکت کرده و در زمان  $t$  به شعاع  $R_2$  رسیده است. نواحی از ورق که دارای شعاعی کمتر از  $R_2$  بوده بصورت یک مخروط ناقص خم شده و نواحی با شعاع

۲. المان بندی قالب مخروطی با المان R3D3
  ۳. رفتار تنش و کرنش ماده بصورت صلب- پلاستیک کامل<sup>۷</sup>
  ۴. بار گسترده یکنواخت بر تمام سطح ورق با توزیع نمایی کاهنده نسبت به زمان با مقدار  $\theta = 200 \mu \text{ sec}$
  ۵. زمان خاتمه تغییر شکل  $t_f = 250 \mu \text{ sec}$  [۵،۱۲،۱۳،۱۴]
- در جدول (۱) جنس و خواص مواد مورد استفاده در شبیه سازی آمده است.

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

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

#### مدلسازی تحلیلی

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 مرحله 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 نبوده و از اندکی انحناء برخوردار می باشد، لیکن جهت جلوگیری از پیچیدگی تحلیل، در مدل تحلیلی ارایه شده

با توجه به شکل ۵ و معادله (۶) سرعت لولای پلاستیک بطریق زیر بدست می آید:

$$-\dot{R}_2 = v_2 \tan \alpha \quad (۸)$$

$$-\dot{R}_2 = \frac{P_0 \theta}{\rho T} \tan \alpha \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) \quad (۹)$$

شرایط اولیه در  $t = 0$ ;  $R_2 = R_0$  (۱۰)

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

$$R_2 = R_0 - \frac{P_0 \theta}{\rho T} \tan \alpha \left(t - \theta + \theta e^{-\frac{t}{\theta}}\right) \quad (۱۱)$$

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

$$\pi R_0^2 = \frac{\pi}{\sin \alpha} (R_1^2 - R_2^2) + \pi R_2^2 \quad (۱۲)$$

$$R_1 = \sqrt{R_0^2 \sin \alpha + R_2^2 (1 - \sin \alpha)} \quad (۱۳)$$

که مقدار  $R_2$  در معادله اخیر از معادله (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:

$$h_1 = \cot \alpha (R_0 - R_1) \quad (۱۴)$$

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

$$v_1 = -\cot \alpha \cdot \dot{R}_1 \quad (۱۵)$$

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 میماند [۱۵] 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 ناحیه مرکزی ورق قانون دوم حرکت بصورت زیر نوشته می شود:

$$F = m_c \cdot \frac{dv_2}{dt} \quad (۱)$$

جرم المان و نیروی وارده به آن در اثر فشار نمایی بترتیب عبارتند از:

$$m_c = \rho \cdot A \cdot T \quad (۲)$$

$$F = P \cdot A \quad (۳)$$

$$P = P_0 e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (۴)$$

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

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{P_0 e^{-\frac{t}{\theta}}}{\rho T} \quad (۵)$$

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

$$v_2 = \frac{P_0 \theta}{\rho T} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) \quad (۶)$$

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 کوچک) بصورت ذیل حاصل می گردد.

$$h_2 = \frac{P_0 \theta}{\rho T} \left(t - \theta + \theta e^{-\frac{t}{\theta}}\right) \quad (۷)$$

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:

$$P_{0f} = \frac{\rho TR_0 \cot \alpha}{\theta (t_f - \theta + \theta e^{-\frac{t_f}{\theta}})} \quad (22)$$

### نتایج و بحث

در این بخش جهت حصول مقایسه‌های 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 شکلهای انفجاری، امکان کم اندازه گیری کمیات و متغیرهای آن بالاخص در اثناء فرآیند می باشد. که عمدتاً ناشی از زمان بسیار اندک و ماهیت تخریبی و ایمنی پائین فرآیند انفجار می باشد.

#### 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 و زاویه 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 نمونه‌های از منحنیهای آن در شکل (۶) ارائه شده است، بدست آمده اند. در این منحنی فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط ناقص بر حسب شعاع قاعده کوچک آن ترسیم گردیده است که محل تقاطع منحنی با محور عمودی ( $R_2 = 0$ ) فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل ( $P_{0f}$ ) می باشد. بطور

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

$$R_1 R_1 = (1 - \sin \alpha) R_2 R_2 \quad (16)$$

از ترکیب معادلات (۱۵) و (۱۶) خواهیم داشت:

$$v_1 = -\cot \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) \frac{R_2}{R_1} R_2 \quad (17)$$

و یا با استفاده از معادله (۸) می توان نوشت:

$$v_1 = \cot \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) \frac{R_2}{R_1} v_2 \quad (18)$$

حال با فرض یک توزیع خطی پروفیل سرعت و جابجایی عمودی نقاط مختلف بصورت زیر بدست خواهند آمد:

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq R_2 & \quad \cdot \\ R_2 \leq r \leq R_0 & \quad \cdot \\ v = \begin{cases} v_2 \\ v_2 + \frac{(v_2 - v_1)}{(R_2 - R_0)}(r - R_2) \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

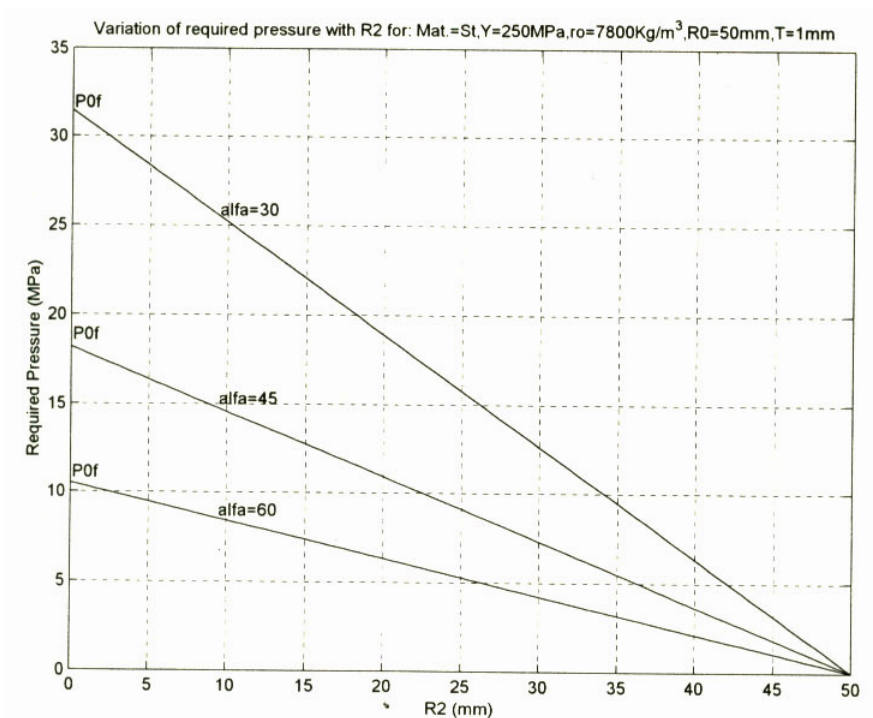
$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq R_2 & \quad \cdot \\ R_2 \leq r \leq R_0 & \quad \cdot \\ h = \begin{cases} h_2 \\ h_2 + \frac{(h_2 - h_1)}{(R_2 - R_0)}(r - R_2) \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

#### برآورد میزان فشار مورد نیاز برای تولید مخروط کامل

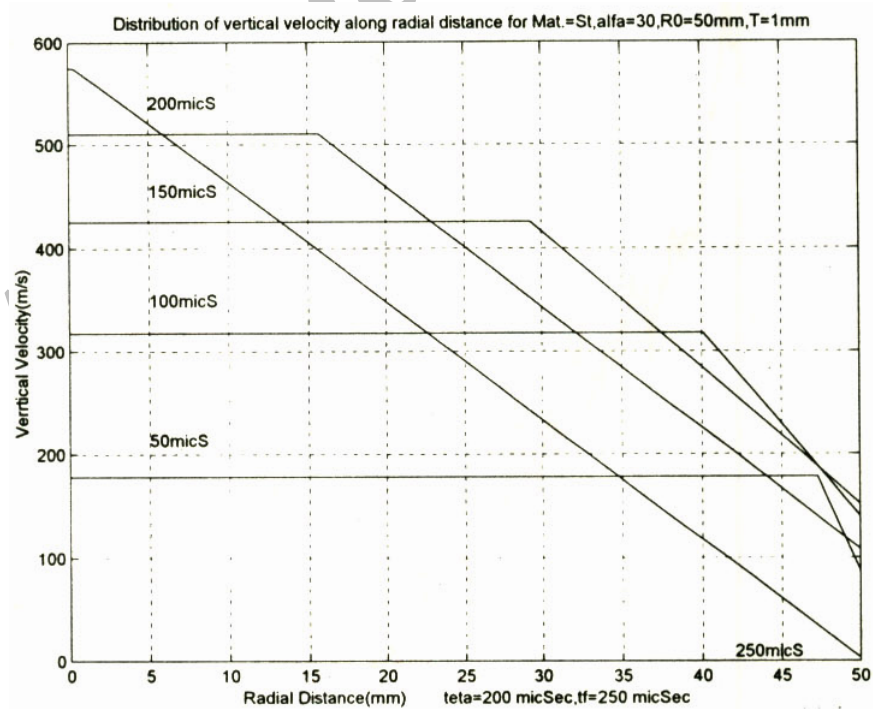
معادلات (۱۱) و (۱۳) مبین ارتباط ابعاد مخروط ناقص با پارامترهای انفجار و قالب می باشد. از این معادلات فشار مورد نیاز جهت تولید مخروطی با ابعاد خاص قابل استخراج می باشد. برای نمونه فشار مورد نیاز برای تولید مخروط ناقص با شعاع قاعدهٔ تحتانی  $R_2$  در لحظه خاتمه تغییر شکل ( $t_f$ ) بصورت ذیل با استفاده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

$$P_0 = \frac{\rho T \cot \alpha (R_0 - R_2)}{\theta (t_f - \theta + \theta e^{-\frac{t_f}{\theta}})} \quad (21)$$

کلی نتایج تحلیلی و BAQUS در این قسمت حاکی از آن است که

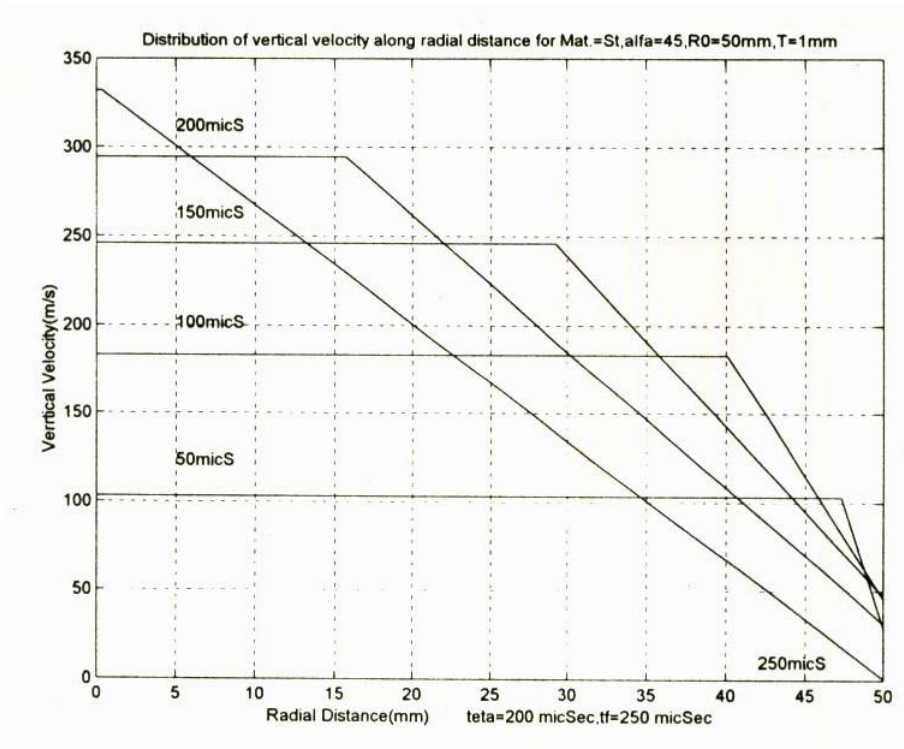


شکل ۶: نمونه منحنی های تحلیلی فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط بر حسب شعاع قاعده کوچک برای گرده فولادی به شعاع ۵۰ و ضخامت ۱ میلیمتر (محل تقاطع با محور عمودی، فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل).

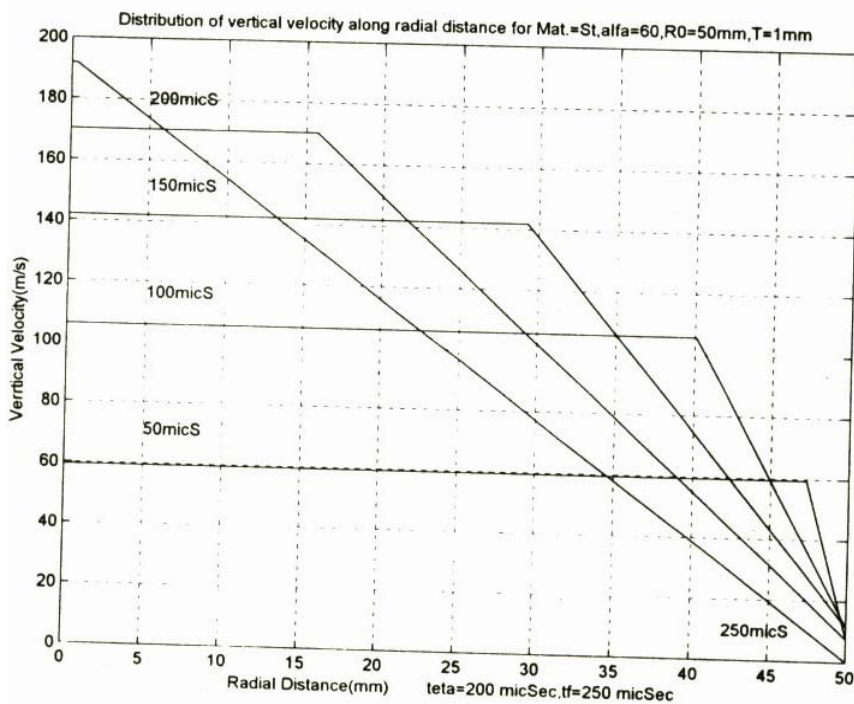


شکل ۷ - الف: پروفیل تحلیلی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیم زاویه رأس ۳۰ درجه.

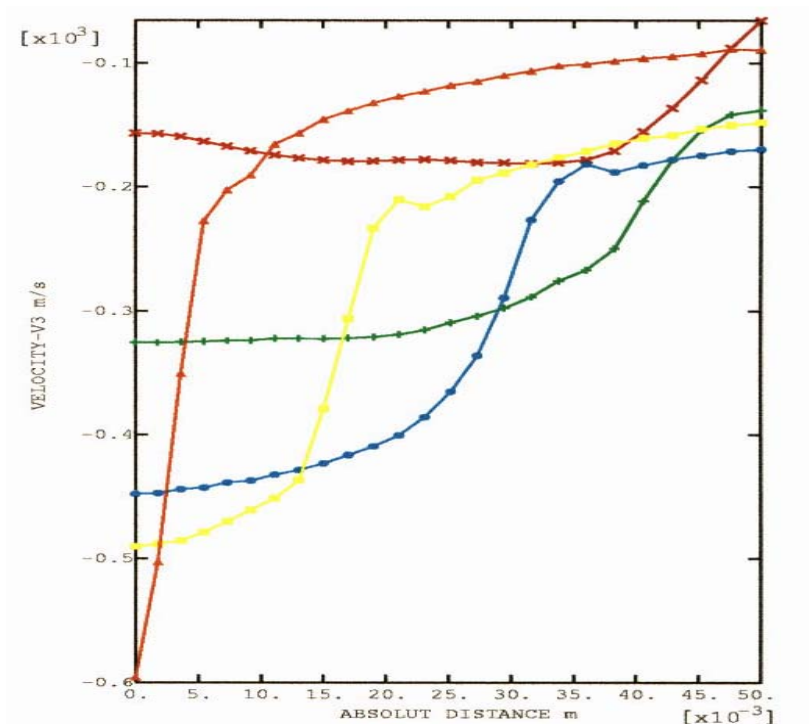




شکل ۷-ب: پروفیل تحلیلی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۴۵ درجه .

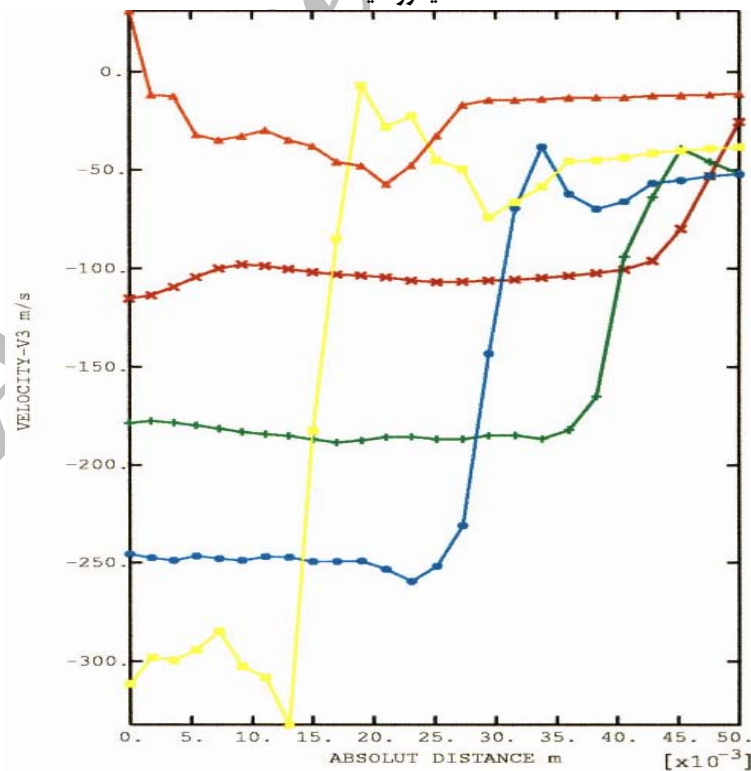


شکل ۷-پ: پروفیل تحلیلی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۶۰ درجه.



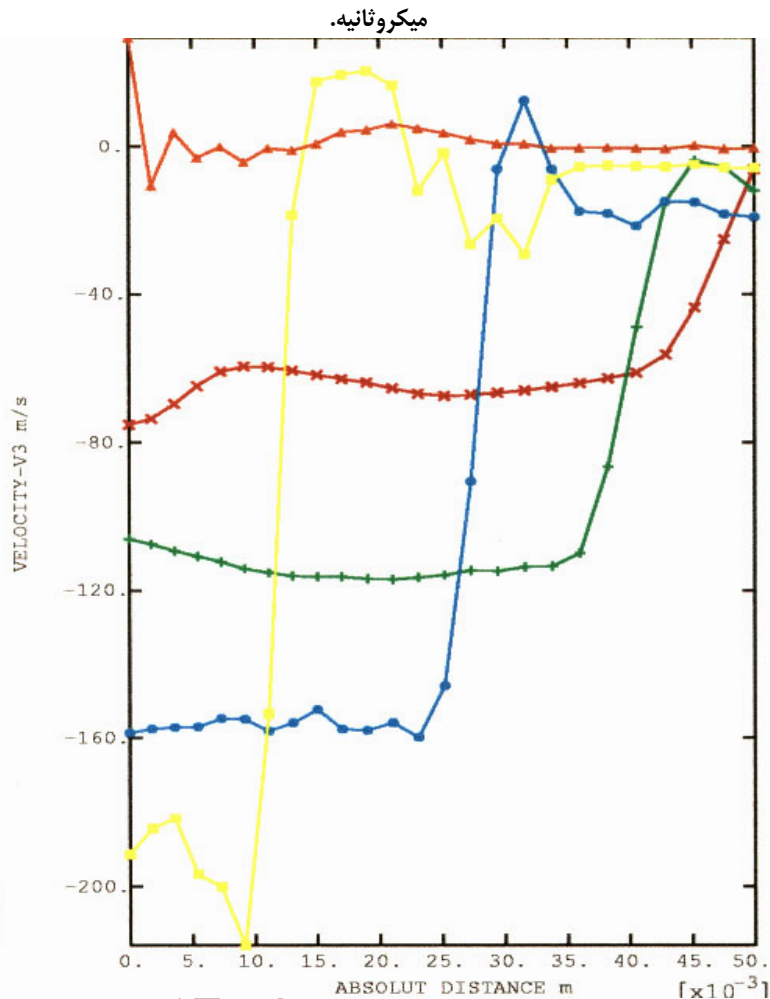
شکل ۸- الف: پروفیل عددی سرعت عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییرشکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۳۰ درجه.

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



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 میکروثانیه.



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.

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

جنس	T(mm)	$R_0$ (mm)	$\alpha$	$P_{0f}$ (MPa) تحلیلی	$P_{0f}$ (MPa) 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

Al	1.6	50	60	5.8	-
----	-----	----	----	-----	---

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.

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 کرنش محیطی مؤید فرض اول می باشند. این 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 جرم 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 شکلهای 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 شکلهای 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 پروفیسور کرمی از دانشگاه لیدز انگلستان بخاطر مساعدت بی دریغ در امر شبیهسازی اجزاء محدود، پروفیسور الحسنی از دانشگاه یومیست انگلستان بخاطر فراهم نمودن امکان 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 می دارند.

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

### پروفیل سرعت عمودی

پروفیل تحلیلی سرعت عمودی نقاط مختلف ورق در هنگام تغییرشکل بازاء 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)).

### پروفیل جابجایی عمودی

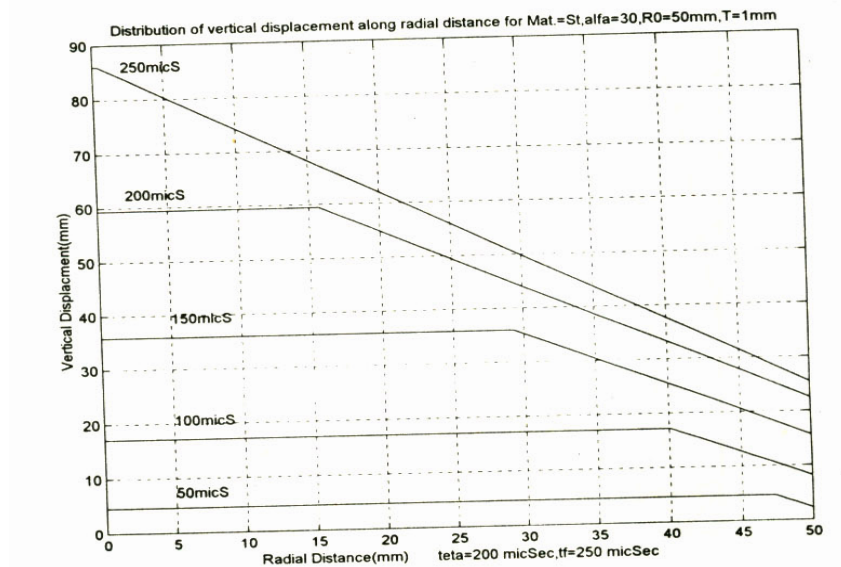
پروفیل تحلیلی جابجایی عمودی نقاط مختلف ورق در هنگام تغییرشکل بازاء نیم زاویه رأس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ با استفاده از معادله (۲۰) در شکلهای (۹) ترسیم شده است. نتایج ABAQUS نیز در شکلهای (۱۰) ارائه شده اند. پروفیلهای تحلیلی تحت فشار مورد نیاز جهت تولید مخروط کامل ترسیم شده اند که در اینصورت این پروفیلها مستقل از ضخامت ورق است (ترکیب معادلات (۲۰) و (۲۲)) که این امر با نتایج عددی و نتایج دیگر محققان [۱۹] تأیید می گردد.

### ابعاد مخروط کامل شکل یافته

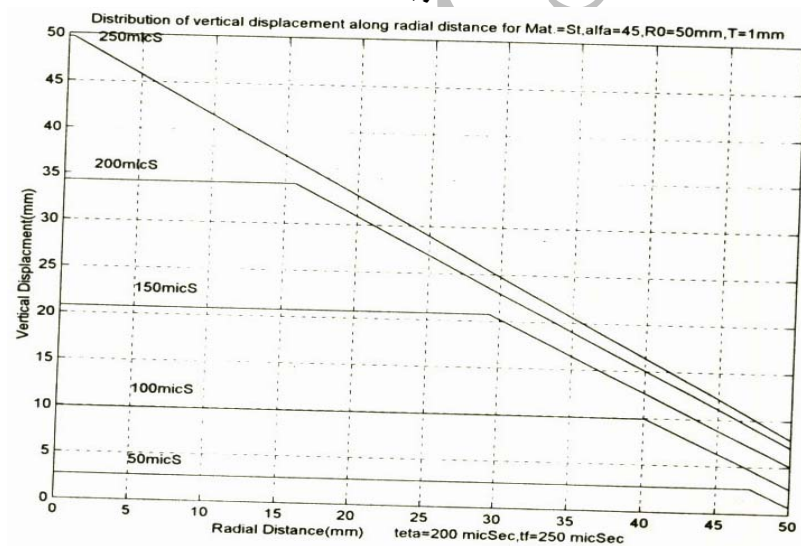
مقادیر تحلیلی قطر قاعده مخروط کامل شکل یافته با استفاده از معادله (۳۰) و مقادیر تجربی (که نمونه هایی از آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است) بقرار جدول (۳) است:

### نتیجه گیری

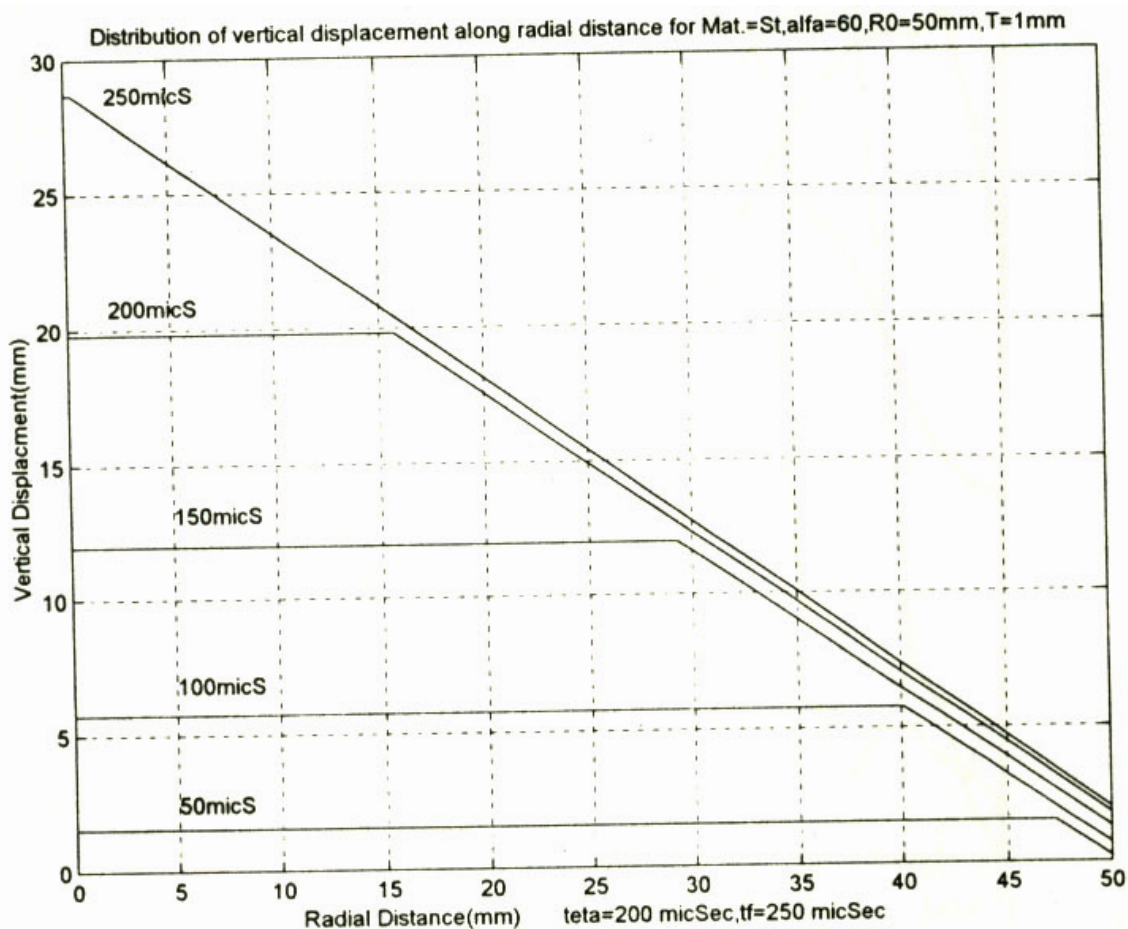
بطور خلاصه مدل ارائه شده جهت تحلیل تغییر شکل پایدار ورق در قالب مخروطی بر اساس دو فرض زیر بناء گردیده است:



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



شکل ۹- ب: پروفیل تحلیلی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۴۵ درجه.

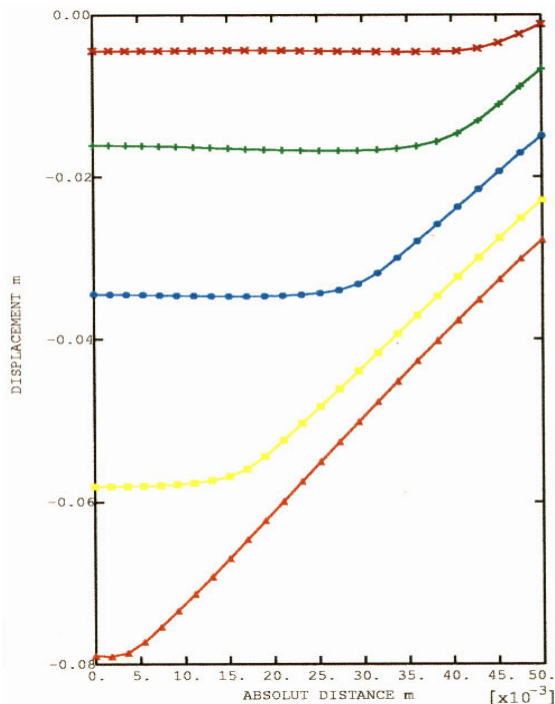


شکل ۹-پ: پروفیل تحلیلی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۶۰ درجه.

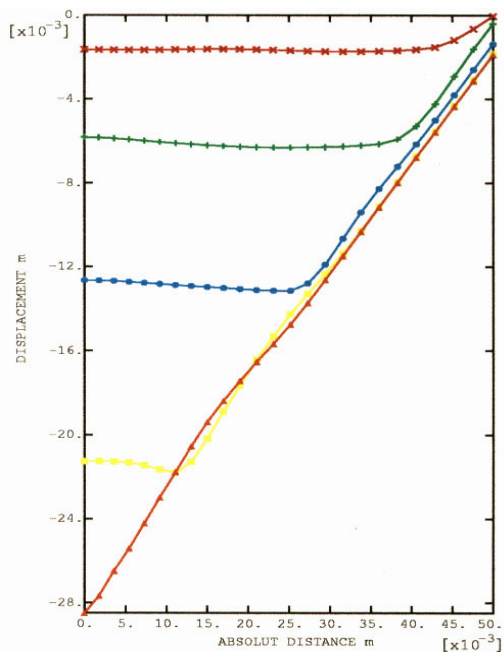
جدول ۳: مقادیر تحلیلی و تجربی قطر قاعده مخروط کامل.

جنس	T(mm)	$2\alpha$	$2R_0$ (mm)	تحلیلی $2R_{1f}$ (mm)	تجربی $2R_{1f}$ (mm)
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

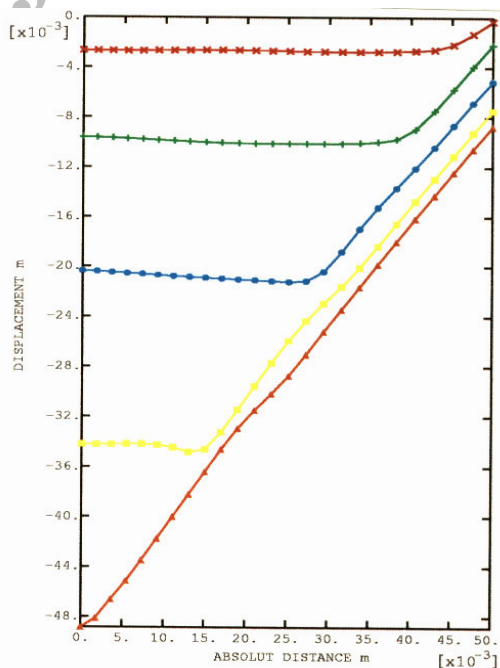




شکل ۱۰- الف: پروفیل عددی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل نیافته در زمانهای مختلف برای نیمزاویه رأس ۳۰ درجه. ( راهنمای شکل - ضربدر: ۵۰ میکروثانیه، بعلاوه: ۱۰۰ میکروثانیه، دایره توپر: ۱۵۰ میکروثانیه، دایره تو خالی: ۲۰۰ میکروثانیه، مثلث: ۲۵۰ میکروثانیه).



شکل ۱۰- ب: پروفیل عددی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل 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).



شکل ۱۰- ب: پروفیل عددی جابجایی عمودی بر حسب مختصه شعاعی تغییر شکل 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 میکروثانیه).

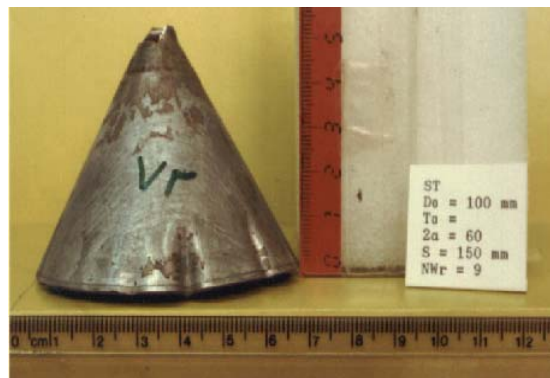
$F$  : نیروی اعمال شده بر المان مرکز ورق  
 $h$  : جابجایی عمودی نقاط مختلف ورق  
 $h_1$  : جابجایی عمودی لبه قاعده بزرگ مخروط  
 $h_2$  : جابجایی عمودی مرکز ورق  
 $m$  : نسبت تنش تسلیم دینامیکی به تنش تسلیم استاتیکی

$m_c$  : جرم المان مرکز ورق  
 $P$  : بار گسترده نمائی اعمال شده بر ورق  
 $P_0$  : حداکثر مقدار  $P$   
 $P_{0f}$  : حداکثر مقدار  $P$  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<sup>۸</sup>  
 $R_2$  : شعاع قاعده کوچک (قاعده تحتانی) مخروط ناقص

$\dot{R}_2$  : سرعت لولای پلاستیک  
 $r$  : مختصه شعاعی در دستگاه مختصات ورق تغییر شکل نیافته

$T$  : ضخامت ورق  
 $t$  : زمان  
 $t_f$  : زمان خاتمه تغییر شکل  
 $v$  : سرعت عمودی نقاط مختلف ورق  
 $v_1$  : سرعت عمودی لبه قاعده بزرگ مخروط  
 $v_2$  : سرعت عمودی مرکز ورق  
 $x$  : مختصه شعاعی المانهای روی دیواره مخروط  
 $\alpha$  : نیم زاویه رأس مخروط  
 $\theta$  : ثابت زمانی وابسته به بار گسترده نمایی  $P$   
 $\rho$  : دانسیته 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.



شکل ۱۱- 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 شکلهی 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. I. 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 Dorneval, 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.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- |  |  |
|--|--|
| 1- Explosive Forming                   | 5 – Impulsive Loading of Circular Plates |
| 2 – High Speed Metal Forming           | 6 – Moving Boundary Conditions           |
| 3 – High Strain Rate Metal Forming     | 7 - Rigid-Perfectly Plastic              |
| 4 – Dynamic Loading of Circular Plates | 8 - Fully Formed Cone                    |