

رهیافتی نوین برای برآورد میزان خرج لازم در فرایند شکل دادن انفجاری ورق

داریوش جواب ور

تهران - دانشگاه هوایی شهید ستاری - دانشکده مهندسی هوافضا

پست الکترونیکی: Jawabvar@yahoo.com

چکیده

در این رهیافت نخست مقدار ایمپالس دریافتی یک ورق فلزی مدور ناشی از انفجار زیر آب یک خرج انفجاری متمرکز و مستقر در فاصله ای معین از سطح ورق برآورد می گردد. سپس انرژی کرنش ناشی از تغییر شکل ورق در یک قالب مخروطی محاسبه می گردد. در مرحله بعد با در نظر گرفتن بازده مکانیکی فرآیند مقدار انرژی لازم تعیین می گردد. بر اساس نتایج این مرحله، سرعت و ایمپالس مورد نیاز تعیین می گردد. سرانجام از تساوی ایمپالس حاصله با ایمپالس دریافتی ورق جرم خرج انفجاری لازم جهت تکمیل عملیات شکل دهی انفجاری مخروط بدست می آید. تعدادی آزمایش نیز طراحی و اجراء شد و نتایج تجربی مستخرج از آنها همراه نتایج تجربی محققین دیگر با نتایج نظری مکتسب از این تحقیق مورد مقایسه قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: شکل دادن با نرخ کرنش بالا - شکل دادن انفجاری - شکل دادن سریع

مقدمه

گردیده، ورق بنحو مقتضی روی قالب جاگیر شده و کل مجموعه در مخزن آب استقرار می یابد آنگاه انفجار خرج سبب رانده شدن ورق به درون حفره قالب می شود. فرآیند شکل دهی انفجاری در زمینه تولید ارزان قطعات پیچیده و بزرگ در زمان کوتاه و البته در حجم پایین تولید، کاربردهای متنوع دارد.

فرآیند شکل دهی انفجاری که سرآغاز آن به سال ۱۸۸۸ میلادی برمی گردد، عبارتست از شکل دادن به قطعات با استفاده از انرژی مواد منفجره که به روشهای مختلفی انجام می شود. در عملیات موسوم به استقرار خرج در فاصله، ماده منفجره در فاصله معینی از قطعه تعبیه

تحقیقات مشابه در مورد آب است ولی بدلیل راندمان پایین هوا نسبت به آب، بندرت از هوا در شکل دهی انفجاری استفاده می شود [۱۱]. بدلیل استفاده زیاد از آب به عنوان محیط انتقال، مهم است تا در مورد مکانیک انتقال انرژی ناشی از انفجار زیر آب شناخت حاصل گردد. هنگامیکه یک ماده منفجره شیمیایی در زیر آب منفجر می گردد، تبدیل به یک ترکیب گازی با فشار زیاد و جرم معادل مقدار اولیه آن می گردد. ناشی از حباب گاز یک شوک اولیه در آب منتشر می گردد، تخمین زده شده است که در فاصله کوتاهی از منبع انفجار، این شوک اولیه در حدود ۵۰ درصد کل انرژی خرج را حمل می نماید. انبساط حباب گازی تازمانی که فشار داخلی آن به مقدار فشار آب محیط بر آن تنزل یابد ادامه می یابد. سپس این حباب شروع به انقباض تحت فشار آب محیط بر آن می نماید تا به حداقل اندازه خود برسد، در این حالت فشار آن بیشتر از فشار آب بوده و مجدداً شروع به انبساط می نماید. با آغاز انبساط حباب موج شوک دیگری در آب منتشر می شود. بدین ترتیب حباب بطور پیوسته منبسط و منقبض شده و همزمان در آب حرکت می کند که این حرکت بدلیل خاصیت شناوری آن یا به سمت سطح آب است یا بسمت سطوح مجاور. حداکثر شعاعی که حباب گاز به آن دست می یابد با عمق استغراق حباب کاهش می یابد. پیروید نوسانات حباب نیز با اندازه خرج افزایش و با عمق استغراق آن کاهش می یابد. موج های ثانویه ناشی از انبساط متعاقب انقباض حباب تا حداقل شعاع، تنها کسر کوچکی از کل انرژی را با خود حمل می کنند و عملاً در عملیات شکل دهی فلزات نقشی ندارند. موج شوک اولیه و سیلان بلادرنگ آب در پی آن کل کار را در عملیات شکل دهی انجام می دهد.

موج شوک اولیه موجود در سیال در تماس با ورق یک سرعت اولیه به ورق می دهد. متعاقباً حرکت ورق باعث ارسال یک موج بازگشتی کاهنده در آب می گردد که سبب کاهش فشار در آب مجاور ورق می گردد تا اینکه پدیده کاویتاسیون بوقوع می پیوندد. در این حالت قطعه کار بطور ناگهانی توسط حجمی از بخار آب جدا می شود و حرکت آن بوسیله مهار مرزها آهسته می گردد.

فرمول های تجربی ناشی از اندازه گیری های انفجار زیر آب به دست آمده اند. با این فرمول ها می توان حداکثر فشار، ایمپالس و انرژی بر واحد سطح موج شوک اولیه را تخمین زد. هرچند که فرمول های مربوط به حداکثر فشار و ایمپالس بر اساس اندازه گیری های میدانی آزاد بوده و در صورت استفاده از آنها برای یک قطعه کار تغییرشکل پذیر بایستی

این ویژگیهای منحصر بفرد می تواند سبب استفاده از این روش در صنایع گوناگون شکل دهی ورق و پوسته بالاخص در صنایع هوافضا و نظامی کشور گردد، جایکه از قابلیت و پیشینه زیاد کار با مواد منفجره برخوردار می باشد.

این روش در مورد اشکال خیلی پیچیده و همچنین فلزات با خواص ویژه نظیر فولاد زنگ نزن کار سخت پذیر دارای توجیه اقتصادی بوده و همچنین در مورد آلیاژهایی که روشهای سنتی شکل دهی آنها با مشکلاتی همراه است دارای کاربرد می باشد. از مزایای دیگر این روش سرمایه گذاری اولیه اندک جهت تجهیزات مورد نیاز می باشد. نمونه هایی از کاربرد این روش در ساخت قطعات صنایع هوافضا بقرار ذیل است [۱]:

- پوسته های مخروطی شکل نظیر آسترهای (Liner) بمبکهای خرج گود (Shaped Charge Bomblet) سرچنگیهای خوشه ای و سرچنگیهای خرج گود، همچنین نازلهای همگرا و واگرا، پوسته موشک و پوسته موتور جت
- پوسته های عدسی شکل و گنبدی نظیر صفحات بشقابی منعکس کننده رادار تا قطر ۱۲ متر
- پوسته های دوکی شکل (Ogive) نظیر پوسته سرچنگی، راکت و پوسته های با پروفیل آیرودینامیکی
- پوسته های لوله ای شکل تا قطر ۱/۴ متر و تا طول ۹/۱ متر

با افزایش اندازه این قطعات، تولید آنها با استفاده از روشهای متداول نظیر فورج به علت بالا رفتن تناژ و کورس آن مشکلات فراوانی ایجاد می نماید. به عنوان نمونه این مشکلات باعث می شوند که سرچنگیهای کالیبر بالا را به جای فلز از فایبرگلاس بسازند. که این امر سبب کاهش قدرت انفجار سرچنگی می شود. فرآیند شکل دهی انفجاری تنها روش مناسب و بهینه جهت غلبه بر این مشکل است.

تحقیقات در زمینه شکل دهی انفجاری همچنان ادامه دارد بگونه ای که در کنفرانس های جهانی بررسی رفتار فیزیکی و مکانیکی مواد تحت بارگذاری دینامیکی، این روش همواره یکی از مقوله های مطرح می باشد [۲]. همچنین برخی از مراجع عمده داخلی در این زمینه عبارتند از مراجع ۱۰-۳.

دینامیک انفجار زیر آب

هرچند تحقیقات انجام شده در مورد انتقال امواج شوک در هوا بیشتر از

خارج از یک موج شوک انبساطی توسعه می یابد. هنگام تصادم موج شوک ناشی از یک خرج متمرکز با یک ورق، تنها مؤلفه های عمود بر ورق ایمپالس در اعطای سرعت عمودی به ورق مؤثر می باشند [۱۱]. ایمپالس آزاد (بدون بر خورد با چیزی) در یک موج شوک حاصل از انفجار در زیر آب و عمود بر موج شوک از رابطه زیر بدست می آید:

$$I = \frac{BM^{\frac{F+1}{3}}}{R^F} \quad (1)$$

I : ایمپالس بر واحد سطح بر حسب پوند ثانیه بر اینچ مربع

M : جرم خرج بر حسب پوند

R : فاصله از خرج بر حسب اینچ

F و B : ثوابت تجربی مربوط به ماده منفجره

فرض شود مطابق شکل ۱ خرج متمرکزی در فاصله L از مرکز ورق مدوری که بر روی قالبی با قطر دهانه D قرار دارد مسقر می باشد. محتوی ایمپالس المان AB موج شوک به المان AC ورق منتقل و متأثر از آن ورق یک سرعت عمودی دریافت می کند. کل ایمپالس المان AB موج شوک که با امتداد عمودی زاویه ϕ را می سازد برابر

است با $\frac{BM^{\frac{F+1}{3}}}{R^F} \overline{AB}$. مؤلفه ایمپالس عمود بر ورق این ایمپالس برابر

$$\frac{BM^{\frac{F+1}{3}}}{R^F} \overline{AB} \cos \phi$$

شدت ایمپالس (ایمپالس بر واحد سطح) عمود بر المان \overline{AC} عبارتست از:

$$\frac{BM^{\frac{F+1}{3}}}{R^F} \left(\frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} \right) \cos \phi = \frac{BM^{\frac{F+1}{3}}}{R^F} \cos^2 \phi \quad (2)$$

در نتیجه ایمپالس عمود بر یک المان حلقوی به شعاع r و پهنای dr عبارت خواهد بود از:

اندرکنش موج شوک و قطعه کار را نیز در نظر گرفت. از سوی دیگر فرمول های تجربی مربوط به چگالی انرژی با استفاده از مشاهدات مربوط به اثر موج شوک بر سنجه های دیافراگمی بدست آمده اند که در نتیجه بطور ضمنی مشتمل بر آثار متقابل دیافراگم تغییرشکل پذیر با موج شوک دریافتی و پدیده بارگذاری مجدد می باشد. در هر صورت پدیده پیچیده انتقال انرژی ناشی از انفجار زیر آب هنوز بطور کامل از نظر ریاضی حل نشده است. روشهای متعددی جهت بررسی این پدیده موجود است که از جمله کاربردی ترین آنها در شکل دهی انفجاری سه روش ذیل می باشند:

اولین روش بر اساس انرژی ویژه ماده منفجره یعنی انرژی بر واحد جرم ماده منفجره و شکل قطعه کار نسبت به خرج استوار می باشد. اثر محیط انتقال انرژی بوسیله یک ضریب تجربی بیان می شود. اغلب جداول مربوط به خواص مواد منفجره مشتمل بر انرژی ویژه ماده منفجره یا شدت آن نسبت به TNT که دارای انرژی ویژه شناخته شده ای است می باشند.

روش دوم بر اساس فرمول های تجربی چگالی مستخرج از اندازه گیری های انفجار زیر آب توسط گیج های دیافراگمی استوار می باشد که مشتمل بر آثار بارگذاری مجدد می باشد. چگالی انرژی بدست آمده بوسیله این فرمولها روی کل سطح قطعه کار انتگرال گیری می شود. استفاده از این روش محدود به مواد منفجره ای است که ثوابت مطلوب انرژی آنها در دست باشند. اغلب جداول خواص مواد منفجره متأسفانه فاقد این ثوابت می باشند.

هر دو روش فوق الذکر تقریب های کران بالای انرژی ماده منفجره منتقل شده به قطعه کار ناشی از موج شوک اولیه و پدیده بارگذاری مجدد است. روش سوم، تقریب های کران پائین بر اساس فرمول های تجربی فشار و ایمپالس می باشد. روش سوم فقط در غیاب پدیده بارگذاری مجدد معتبر می باشد. در این تحقیق، روش اخیر جهت برآورد ایمپالس منتقله به یک ورق مدور تخت ناشی از انفجار زیر آب یک خرج متمرکز که در فاصله معینی از سطح ورق مستقر شده است بکار گرفته می شود سپس با توجه به آن و به مدد رهیافتی نوین میزان خرج انفجاری لازم محاسبه گردد.

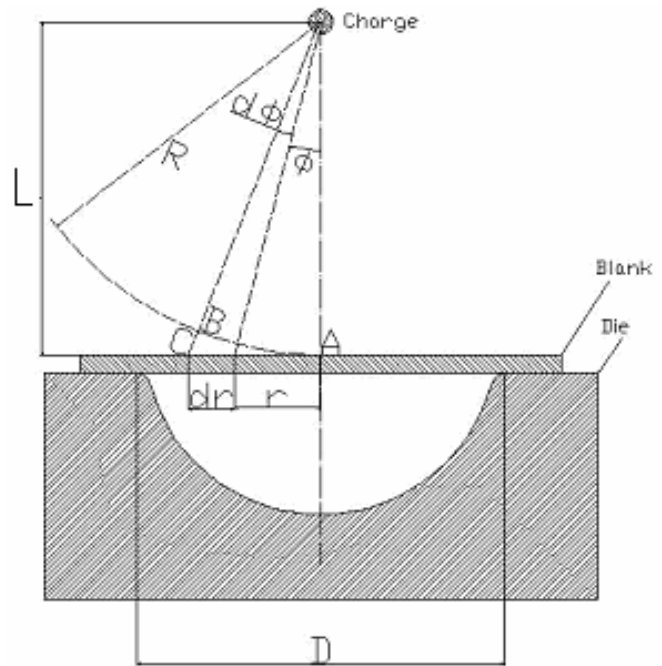
ایمپالس منتقله به ورق مدور تخت توسط یک خرج متمرکز

این روش بر اساس روابط تجربی مستخرج از انفجار زیر آب استوار است و تنها برای محیط انتقال آب معتبر است. ایمپالس بصورت شعاعی و بسمت

$$\cos^2 \phi = \frac{L^2}{r^2 + L^2} \quad (6)$$

$$I_n = 2\pi BM \frac{F+1}{3} L^2 \int_0^{D/2} \frac{r}{(r^2 + L^2)^{F/2+1}} dr \quad (7)$$

$$I_n = 2\pi BM \frac{F+1}{3} D^{2-F} \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{1}{F} \left[\frac{1}{(L/D)^F} - \frac{1}{((L/D)^2 + 1/4)^{F/2}} \right] \quad (8)$$



انرژی کرنشی

ورود به مبحث پیش بینی مقدار خرج مورد نیاز برای عملیات شکل دهی انفجاری مشخص مستلزم محاسبه انرژی کرنش تغییرشکل قطعه می باشد. روابط فیما بین تنش و کرنش از اجزاء مهم در محاسبه انرژی کرنش محسوب می گردند [۱].

نمو انرژی کرنش بر واحد حجم du که توسط نمو اندک کرنش ایجاد می شود عبارتست از:

$$du = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (9)$$

که در معادله فوق σ_1 ، σ_2 و σ_3 تنش های اصلی و ε_1 ، ε_2 و ε_3 کرنش های اصلی می باشند. با استفاده از نظریه سیلان پلاستیکی سنت ونان که بر فرض ثبات حجم در حین تغییرشکل استوار است، معادله فوق به معادله زیر بر حسب تنش مؤثر (σ_{eff}) و کرنش مؤثر (ε_{eff}) تبدیل می گردد:

$$du = \sigma_{eff} d\varepsilon_{eff} \quad (10)$$

شکل ۱- انتقال ایمپالس از یک خرج متمرکز به یک ورق تخت

$$dI_n = \frac{BM}{R^F} \cos^2 \phi 2\pi r dr \quad (3)$$

کل ایمپالس عمود بر ورق (I_n) از انتگرال گیری معادله فوق و بصورت ذیل بدست می آید:

$$I_n = 2\pi BM \frac{F+1}{3} \int_0^{D/2} \frac{r}{R^F} \cos^2 \phi dr \quad (4)$$

اکنون با توجه به روابط هندسی:

$$R = (r^2 + L^2)^{1/2} \quad (5)$$

که در آن:

$$\sigma_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (12)$$

زمینه متعلق به تراویس و جانسون [۱۳] 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.

جهت نیل به یک مدل ساده تحلیلی در این تحقیق فرض می شود که ضخامت ورق (t) در جریان تغییر شکل ثابت باقی می ماند. در اینصورت، اگر چنانکه در شکل ۲ دیده می شود، ناحیه ای به شعاع r از ورق به ناحیه ای از مخروط با شعاع قاعده x و طول یال l تبدیل شود آنگاه اصل بقاء حجم تبدیل به برابری سطوح این دو ناحیه می گردد، یعنی:

$$\pi r^2 = \pi x l \quad (15)$$

با توجه به ملاحظات هندسی:

$$l = \frac{x}{\sin \alpha} \quad (16)$$

از ترکیب دو معادله فوق داریم:

$$\frac{x^2}{r^2} = \sin \alpha \quad (17)$$

کرنش محیطی برابر است با:

$$\varepsilon_{\theta} = \ln\left(\frac{x}{r}\right) \quad (18)$$

از ترکیب دو معادله اخیر خواهیم داشت:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{2} \ln(\sin \alpha) \quad (19)$$

با فرض کار سخت ناپذیری ماده $\sigma_{eff} = Y$ که در آن Y تنش تسلیم در آزمایش تک محوره است، با جایگذاری رابطه مذکور در معادله (۱۰) و انتگرال گیری خواهیم داشت:

$$u = Y \varepsilon_{eff} \quad (13)$$

جهت محاسبه کل انرژی کرنش تغییر شکل (U) لازم است که از معادله اخیر روی حجم ماده (V) انتگرال گیری شود، بنابراین:

$$U = \int u dV \quad (14)$$

برآورد انرژی کرنش تغییر شکل ورق در قالب مخروطی

نخستین بار تاردیف [۱۲] از روش شکل دهی انفجاری جهت تولید مخروط از گرده های فلزی استفاده نمود اما کار او در بردارنده یک بررسی دقیق تجربی و یا تحلیلی نبوده است. تنها بررسی نسبتاً جامع تجربی در این

از ترکیب سه معادله اخیر خواهیم داشت:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_\theta| \quad (24)$$

معادله اخیر با توجه به معادله (۱۹) بصورت زیر در می آید:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{1}{\sin \alpha} \right) \quad (25)$$

از ترکیب معادله اخیر و معادلات (۱۳) و (۱۴) انرژی کرنش مطابق رابطه زیر حاصل می گردد:

$$U = \frac{\pi D^2 t Y}{4\sqrt{3}} \ln \left(\frac{1}{\sin \alpha} \right) \quad (26)$$

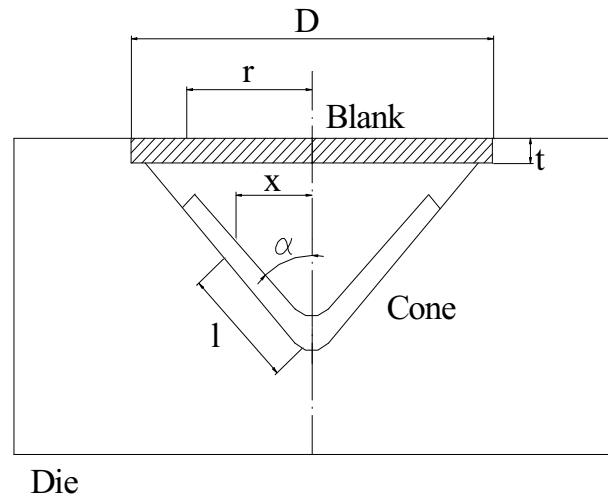
که در معادله اخیر D قطر ورق است.

مقدار خرج لازم برای عملیات شکل دهی انفجاری

مخروط

بسیار مهم است که اثر نرخ کرنش بر تنش تسلیم فلز مورد ملاحظه قرار گیرد. در مورد اغلب فلزات نتایج رسمی و معتبر در این خصوص بالاخص در نرخ های کرنش شدید و نزدیک به بارگذاری انفجاری بندرت منتشر شده اند. در مورد فولاد کربن متوسط و مس نسبت تنش تسلیم دینامیکی به استاتیکی (Y/Y_0) معمولاً در حدود ۲ می باشد [۱۴]. در مورد آلومینیم به دلیل عدم در اختیار داشتن داده های معتبر تجربی رابطه ساده ذیل می تواند تخمینی از این نسبت ارائه نماید [۱۴]:

$$\frac{Y}{Y_0} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \quad (27)$$



شکل ۲- شکل دهی انفجاری مخروط

ناشی از اصل ثبات حجم مجموع سه کرنش محیطی، یالی و ضخامتی برابر صفر است، یعنی:

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_l + \varepsilon_t = 0 \quad (20)$$

با توجه به فرض عدم تغییر ضخامت، کرنش ضخامتی برابر صفر است. یعنی:

$$\varepsilon_t = 0 \quad (21)$$

از ترکیب دو معادله اخیر خواهیم داشت:

$$\varepsilon_l = -\varepsilon_\theta \quad (22)$$

کرنش مؤثر برابر است با:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_l)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_t)^2 + (\varepsilon_l - \varepsilon_t)^2} \quad (23)$$

(۲۹) حاصل می‌شود:

$$W = U/\eta \quad (۳۰)$$

و یا با در نظر گرفتن $\eta = 0.5$:

$$W = 2U \quad (۳۱)$$

موج شوک انفجار به ورق ایمپالسی عمودی اعطا می‌کند که مقدار آن در معادله (۸) بدست آمد. این ایمپالس عمودی به ورق سرعت عمودی (v) را می‌دهد که انرژی جنبشی لازم جهت تغییرشکل ورق را فراهم می‌سازد. از آنجائیکه در ادامه، هدف یافتن مقدار خرج لازم بر اساس نوعی روش انرژی می‌باشد و در روش انرژی نیز تنها ابتدا و انتها تغییرشکل مورد نظر است در نتیجه بطور معقولی می‌توان در آغاز تغییرشکل سرعت اولیه ورق را در سرتاسر آن ثابت در نظر گرفت یا حتی در غیر اینصورت، متوسط سرعت اولیه را نظر گرفت و محاسبات را ادامه داد. ناشی از این سرعت اولیه انرژی جنبشی لازم جهت انجام کار واقعی تغییرشکل ورق تأمین می‌شود، یعنی:

$$W = mv^2/2 \quad (۳۲)$$

در نتیجه سرعت مورد نیاز ورق بصورت زیر بدست می‌آید:

$$v = \sqrt{2W/m} \quad (۳۳)$$

و از اینجا ایمپالس لازم ورق (I_p) بدست می‌آید:

$$I_p = mv \quad (۳۴)$$

از تساوی ایمپالس لازم ورق با ایمپالس دریافتی (معادله (۸)):

که در معادله فوق، \mathcal{E}_0 و \mathcal{E} بترتیب نرخ‌های کرنش استاتیکی و دینامیکی می‌باشند. در شرایط استاتیکی نرخ کرنش دارای مرتبه‌ای در حدود 10^{-3} می‌باشد [۱۴] در حالیکه تحت شرایط شکل دهی انفجاری مرتبه نرخ کرنش در حدود 10^7 است [۱۵]. m نیز نمای حساسیت به نرخ کرنش بوده که مقدار آن برای آلومینیم در حدود 0.3 است [۱۶]. بر حسب این مقادیر عددی، نسبت تنش تسلیم دینامیکی به استاتیکی برای آلومینیم در حدود ۲ بدست می‌آید. بنا بر این با احتساب $Y = 2Y_0$ معادله (۲۶) به معادله زیر بر حسب تنش تسلیم استاتیکی تبدیل می‌گردد:

$$U = \frac{\pi D^2 t Y_0}{2\sqrt{3}} \ln\left(\frac{1}{\sin \alpha}\right) \quad (۲۸)$$

نکته مهم قابل ملاحظه دیگر در این خصوص این است که کار واقعی لازم برای ایجاد تغییرشکل (W)، علاوه بر انرژی کرنش مشتمل بر انرژی لازم جهت غلبه بر آثار اصطکاک و آثار مرتبط با نیروهای اینرسی نیز می‌باشد. با الهام از تحلیل موسوم به کار/ایده آل مرسوم در برخی فرآیندهای متداول شکل دهی، جهت غلبه بر این مشکل مفهوم بازده تغییرشکل (η) مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازده بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$\eta = U/W \quad (۲۹)$$

اگر چه در شکل دهی انفجاری مقدار بازده یقیناً متأثر از پارامترهای شکل دادن نظیر هندسه یا زاویه قالب و ضریب اصطکاک مابین سطوح قالب و ورق می‌باشد ولی تعیین مقدار دقیق آن مشکل است. مقادیر تجربی بازده در برخی از فرآیندهای رایج شکل دهی مابین 0.5 تا 0.65 است [۱۶]. در اینجا نیز در غیاب مقادیر دقیق بازده و بدلیل شدید بودن نیروهای فشاری ناشی از انفجار و در نتیجه بالا بودن نیروهای اصطکاک حاصل، مقدار 0.5 برای بازده اختیار می‌گردد. بر این اساس از معادله

این آزمایشها گرده ورق بر روی یک قالب با حفره مخروطی بدون هیچگونه مهاریه قرار گرفته و ماده منفجره نیز در فاصله معینی از آن استقرار می یابد (شکل ۳)، 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. سایر مشخصات این آزمایشها به قرار زیر است [۱۷]:

- قالبها مخروطی با نیمزویه رأس ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه
- ثوابت ماده منفجره مورد استفاده B=19.7 و F=0.98 و فاصله استقرار آن ۱۵۰ میلیمتر
- ورقهای فلزی مدور از جنس فولاد، آلومینیم و مس بترتیب با استحکام ۲۵۰، ۹۱، ۱۶۹ مگاپاسکال و ابعاد هندسی مندرج در جدول ۱.

$$I_p = I_n \quad (35)$$

جرم ماده منفجره مورد نیاز (M) حاصل می گردد:

$$M = \left\{ 2\pi B D^{2-F} \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{1}{F} \left[\frac{1}{(L/D)^F} - \frac{1}{((L/D)^2 + 1/4)^{F/2}} \right] I_p^{-1} \right\}^{\frac{3}{F+1}} \quad (36)$$

آزمایشهای تجربی

تعدادی آزمایش جهت بررسی اعتبار معادله (۳۶) طراحی و انجام شد. در



شکل ۳- چیدمانی اجزاء آزمایش های شکل دهی انفجاری: قالب، گرده ورق، ماده منفجره و مخزن آب [۱۸]

جدول ۱- مقادیر تحلیلی و تجربی جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط [۱۷، ۱۸]

α	D (mm)	T (mm)	ماده	M (gr)	
				تجربی	تحلیلی
فولاد	۱/۶	۱۰۰	۳۰	۳۴/۲	۴۲
فولاد	۱/۶	۱۰۰	۴۵	۲۰/۲	۱۹
فولاد	۱	۸۰	۳۰	۱۶	۲۴
آلومینیم	۱	۸۰	۳۰	۴	۶
آلومینیم	۱	۸۰	۴۵	۲/۴	۳
مس	۱	۸۰	۳۰	۱۳/۳	۹
مس	۱	۸۰	۴۵	۷/۸	۶

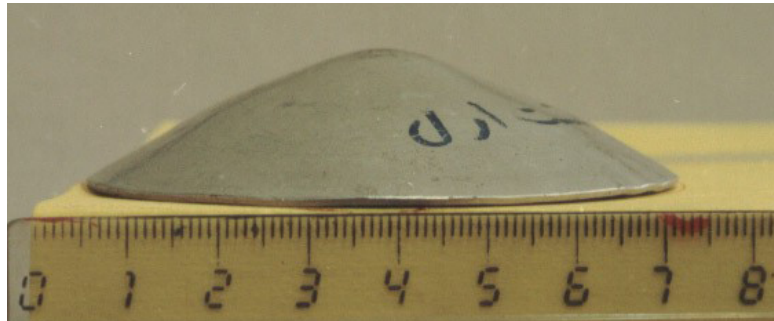
نتایج و بحث

نمونه قطعات حاصل از این آزمایشها در شکل های ۴ تا ۷ نمایش داده شده اند. مقایسه نتایج نظری مستخرج از معادله (۳۷) و نتایج تجربی جرم ماده منفجره مورد نیاز در جدول ۱ ارائه شده اند. در جدول ۲ نتایج نظری این تحقیق با نتایج تجربی مرجع [۱۳] مقایسه شده است.

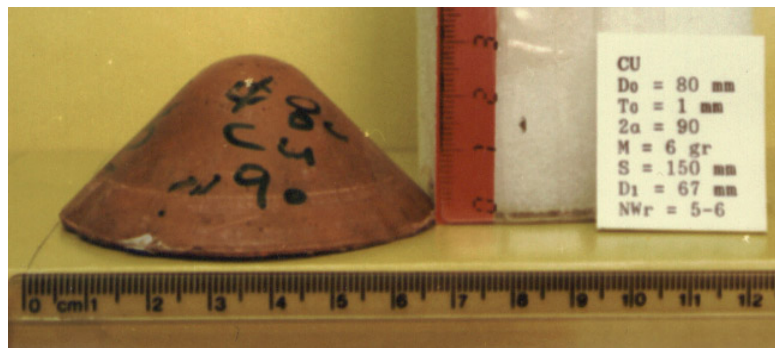
همچنین از نتایج تجربی مرجع [۱۳] نیز جهت مقایسه با نتایج تحلیلی حاصل از این تحقیق استفاده شده است. مواد مورد استفاده جهت ورق های فلزی در این مرجع شامل فولاد و آلومینیم بترتیب با تنش های تسلیم ۲۵۰ و ۱۱۵ مگاپاسکال می باشند. سایر شرایط تجربی در تحقیق حاضر و مرجع مذکور مشابه هم می باشند.



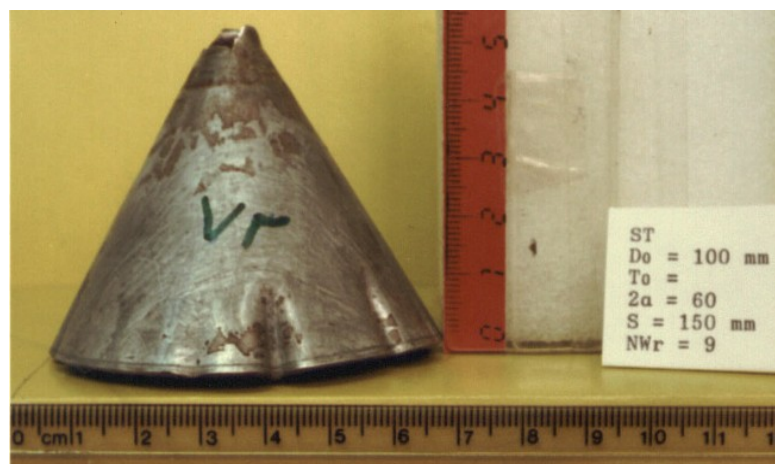
شکل ۴- نمونه مخروط با نیمزاویه رأس ۴۵ درجه فولادی شکل یافته انفجاری [۱۷]



شکل ۵- نمونه مخروط با نیمزاویه رأس ۶۰ درجه آلومینیمی شکل یافته انفجاری [۱۷]



شکل ۶- نمونه مخروط با نیمزاویه رأس ۴۵ درجه مسی شکل یافته انفجاری [۱۸]



شکل ۷- نمونه مخروط با نیمزاویه رأس ۳۰ درجه فولادی شکل یافته انفجاری [۱۷]

جدول ۲- مقادیر تحلیلی و تجربی جرم ماده منفجره مورد نیاز جهت تولید مخروط [۱۳]

ماده	T (mm)	(mm) D	α	M (gr)	
				تجربی	تحلیلی
فولاد	۱	۱۰۰	۳۰	۱۶/۸	۱۹
فولاد	۱	۱۰۰	۴۵	۱۰	۱۲/۷
فولاد	۱	۱۰۰	۶۰	۵	۶
فولاد	۱/۶	۱۰۰	۳۰	۳۴/۲	۴۸
فولاد ^۱	۱/۶	۱۰۰	۴۵	۲۰/۲	۱۹
فولاد	۱/۶	۱۰۰	۶۰	۱۰/۴	۹/۵
آلومینیم	۱	۱۰۰	۴۵	۲/۵	۳/۲
آلومینیم	۱	۱۰۰	۶۰	۱/۳	۱/۶
آلومینیم	۱/۶	۱۰۰	۳۰	۸/۵	۶/۵
آلومینیم	۱/۶	۱۰۰	۴۵	۵	۴
آلومینیم	۱/۶	۱۰۰	۶۰	۲/۶	۲/۱

۱- تکرار این آزمایش توسط محقق این مقاله منجر به نتیجه یکسانی گردیده است (رجوع به جدول ۱).

رأس ۳۰ درجه بیشتر است. این امر می تواند ناشی از تغییر شکل ناپایدار ورق و در نتیجه انحراف فرآیند تغییر شکل از مدل پایدار ارایه شده در این مقاله باشد. کوچک بودن زاویه مخروط در این حالت منجر به تمایل تنش های محیطی شدید به ورق در جریان تغییر شکل می شود که خود منجر به کمانش پلاستیک موسوم به چروکیدگی^۱ در قسمتهایی از مخروط می شود. این پدیده در شکل ۷ مشاهده می شود.

نتیجه گیری

مدل تحلیلی ارایه شده در این مقاله که بر اساس دو فرض ثابت ماندن ضخامت ورق و عدم کارسختی ماده بنا شده است و همچنین آثار اصطکاک، اینرسی و تغییر خواص مکانیکی ماده در آن با لحاظ برخی

در شکل دهی انفجاری معمولاً تغییر شکل های پلاستیکی بزرگ همراه با نرخ های کرنش شدید بوقوع می پیوندد. فیزیک فرآیند در گیر پدیدههایی نظیر انفجار خرج و انتقال موج حاصل از آن در آب، اندرکنش مایع/ جامد هنگام رسیدن موج به ورق، اندرکنش جامد/ جامد ناشی از ملاحظات ضربه ای و آثار اصطکاک در هنگام تغییر شکل سریع ورق در قالب، آثار اینرسی، شیمی ماده منفجره و بالاخره تغییرات خواص مکانیکی فلز در نرخ های کرنش بالاست. مدلهای تحلیلی دقیقی که جامع تمام پدیده های مذکور باشند، در حال حاضر موجود نمی باشند. در برخی موارد می توان با لحاظ برخی فرض ها، بستر لازم را جهت ارایه روشهای تحلیلی مهیا نمود. اعمال این فرض ها طبعاً از جامعیت و کامل بودن مدل تحلیلی کاسته و منجر به بروز اختلاف بین نتایج تحلیلی و تجربی می گردد. این اختلاف البته در حد معقول آن در نتایج این تحقیق نیز مشاهده می شود. اختلاف بین نتایج تحلیلی و تجربی در نیمزاویه

1- wrinkling

علوم مهندسی، شماره چهارم- جلد دوازدهم، زمستان ۱۳۸۰، ص ۱-۲۴.

۸- جواب ور، داریوش، مکانیک انتقال انرژی و تغییر شکل ورق مدور در عملیات شکل دهی انفجاری استقرار خرج در فاصله، اولین کنگره بین‌المللی (هفتمین کنگره ملی) مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه تربیت مدرس، آذر ۱۳۸۴.

۹- 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، ۳۰-۲۸ اردیبهشت ۱۳۷۷.

۱۰- 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.

11- Ezra, A.A., Principles and Practice of Explosive Metalworking, Publ. by Industrial Newspaper Ltd., PP. 32-33, 43-45, (1973).

12- Tardif, H.P., Explosive Forming of Cones by Metal Gathering, Metal Progress, Vol. 76, No. 3, P. 84, (Sep. 1959).

13- Travis, F.W., Johnson, W., The Explosive Forming of Cones, Proc. 3rd International Machine Tool Design Research Conference, Birmingham, PP. 341 - 364, (1962).

14- Johnson, W., Impact Strength of Materials, Publ. by Edward Arnold Ltd., London, PP. 132-135, (1972).

15- Mayers, M.A., Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons Inc., P. 299, (1994).

16- Hosford, W.F., Caddell, R.M., Metal Forming: Mechanics & Metallurgy, Publ. by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, PP. 83, 106-107, (1983).

۱۷- لیاقت، غ، جواب ور، د، گزارش آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری مخروط، صنایع شهید باقری، (۱۳۷۶).

۱۸- لیاقت، غ، جواب ور، د، گزارش آزمایش های تجربی شکل دهی انفجاری مخروط، صنایع مهمات سازی، (۷۹-۱۳۷۸).

ضرایب ثابت معادل سازی شده اند، به گواه یافته های تجربی این تحقیق و دیگر محققین، منجر به نتایج قابل قبولی در پیش بینی میزان ماده منفجره لازم در عملیات موسوم به شکل دادن انفجاری مخروط شده است. اگرچه مسلماً قضاوت نهایی در این خصوص نیازمند پژوهش های تجربی فزونتر در آینده است.

مراجع

۱- جواب ور، د، لیاقت، غ، مبانی شکل دهی انفجاری، سازمان هوافضا، معاونت آموزش، پژوهش و فناوری، ص ص. ۲، ۴۱، ۴۲، ۴۴، (۱۳۸۳).

2- 3rd. International Conference on Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading (DYMAT 91), Strasbourg, France, (14-18 Oct. 1991).

۳- جواب ور، داریوش- لیاقت، غلامحسین- درویزه، ابوالفضل- عبدالله، امیر، 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، جلد ۳۷، شماره ۱، خرداد ماه ۱۳۸۲، ص ۹۷-۱۱۲.

۴- جواب ور، داریوش- لیاقت، غلامحسین- درویزه، ابوالفضل- عبدالله، امیر، بررسی تحلیلی، تجربی و عددی پروفیل کرنش و جرم ماده منفجره مورد نیاز در شکل دهی انفجاری مخروط، نشریه علمی- پژوهشی امیرکبیر، سال چهاردهم / شماره ب-۵۲ / تابستان ۱۳۸۲، ص ۷۶۵-۷۷۹.

۵- لیاقت، غلامحسین- درویزه، ابوالفضل- عبدالله، امیر- جواب ور، داریوش، اثر ورق گیر در کنترل چروکیدگی مخروط و بررسی تحلیلی و تجربی آن در شکل دهی انفجاری، نشریه علمی-پژوهشی امیرکبیر، سال سیزدهم / شماره ۵۲ / پاییز ۱۳۸۱، ص ۵۹۰-۵۸۰.

۶- لیاقت، غلامحسین - درویزه، ابوالفضل- عبدالله، امیر- جواب ور، داریوش، تحلیل فرایند شکل دهی انفجاری مخروط، مقایسه با نتایج تجربی و شبیه سازی اجزاء محدود، نشریه علمی-پژوهشی امیرکبیر، سال سیزدهم / شماره ۵۰ / بهار ۱۳۸۱، ص ۲۶۴-۲۵۰.

۷- لیاقت، غلامحسین - درویزه، ابوالفضل- عبدالله، امیر- جواب ور، داریوش، تحلیل پدیده چروکیدگی در شکل دهی انفجاری مخروط و مقایسه با نتایج تجربی، دانشگاه علم صنعت ایران، مجله بین المللی