

# شکلدهی مخروطی ورقهای فلزی به روش انفجار مخلوط گازها

مجید علی طاویلی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل درویشه<sup>۲</sup>، علی اصغر پاشایی<sup>۳</sup>، رحمان یوسفی مقدم<sup>۴</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

\*رشت، صندوق پستی ۳۷۵۶

tavoli@guilan.ac.ir

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۴)

**چکیده-** در این تحقیق شیوه جدیدی برای شکلدهی ورقهای فلزی به روش انفجار مخلوط گازها ارائه شده است که در آن ورق فلزی تحت اثر شوک فشار ناشی از انفجار با سرعت بالا، تغییر شکل پلاستیک پیدا می‌کند. سامانه شکلدهی برای اولین بار در کشور طراحی و ساخته شده و مشتمل است بر مخزن استوانه‌ای شکل جدار ضخیم، قالبهای شکلدهی و متعلقات لازم برای اندازه‌گیری. در این روش، شکلدهی بدون نیاز به سمبه انجام می‌شود و می‌توان ورقهای با ضخامت اولیه مختلف را به شکلهای متنوعی برای کاربردهای مختلف مهندسی تبدیل کرد. نتایج تجربی مربوط به اثر پارامترهایی نظیر درصد مخلوط گاز، ضخامت ورق، شرایط مرزی و جنس ورق بر توزیع کرنش محیطی و کرنش ضخامتی، ارائه می‌شود. همچنین مدلی تحلیلی بر اساس محاسبه کار پلاستیک، برای تغییر شکل ورق پیشنهاد شده است.

**کلید واژگان:** ورقهای فلزی، شکلدهی مخروطی، شکلدهی با سرعت بالا، انفجار مخلوط گازها.

## ۱- مقدمه

این عمل مهم است، فشار فوق‌العاده بالایی است که در فاصله زمانی بسیار کوتاه بر قطعه کار اعمال می‌شود. روشهای شکلدهی با سرعت بالا را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم کرد:

الف) الکتریکی: الکترومغناطیس و الکتروهیدرولیک؛

ب) مکانیکی: پنوماتیکی؛

ج) شیمیایی: انفجار ماده منفجرشونده [۶].

فرایند شکلدهی با سرعت بالا<sup>۱</sup> فرایندی است که در آن مقداری انرژی در زمان کوتاهی آزاد شده و قطعه کار، با سرعت بالا دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود [۱-۵]. در این روش ورق فلزی به سرعت بالایی می‌رسد و فرایند در کسر بسیار کوچکی از ثانیه پایان می‌پذیرد. آنچه در

1. High Velocity Forming (H.V.F)

روشهای شکلدهی با نرخ انرژی بالا نسبت به شیوه‌های سنتی برتریهایی دارد که مهمترین آنها عبارت است از:

- ۱- امکان تولید قطعات با ابعاد بزرگ.
  - ۲- سهولت تولید قطعات از مواد ویژه که با شیوه‌های سنتی به آسانی شکلدهی آنها امکانپذیر نیست.
  - ۳- امکان ساخت قطعاتی که به دلیل اندازه یا جنس نمی‌توان آنها را با روشهای معمولی تولید کرد.
  - ۴- امکان به‌دست آوردن دقت بیشتر نسبت به روش سنتی.
  - ۵- کاهش بهای ساخت قطعات در تعداد کم.
- اگر چه روشهای فوق کاملاً تجربی بوده و برای دستیابی به نتایج دلخواه، به انجام آزمایشهایی گوناگون نیاز است؛ لیکن به‌کارگیری روشهای بهینه‌سازی نظیر روش داده‌پردازی گروهی<sup>۱</sup> [۹] به‌منظور گزینش پارامترهای مؤثر، توانسته است موجب تسریع در دستیابی به اهداف آزمایش شود.

## ۲- فرایند شکلدهی فلز به روش انفجار مخلوط گازها

یکی از روشهای شکلدهی انفجاری، روش شکلدهی انفجاری با گاز<sup>۲</sup> است. در این فرایند موج فشاری حاصل از احتراق مخلوط گازها در مخزن، باعث تغییر شکل قطعه کار می‌شود. قطعه کار را می‌توان با شرایط مرزی متنوعی مستقر کرد [۱۰].

پدیده انفجار (با مخلوط گاز انفجاری) در سال ۱۸۸۱ توسط دو گروه کشف شد [۱۱، ۱۲]. این دو گروه در حالی که انتشار شعله را در لوله‌ها بررسی می‌کردند، اعلام کردند که تحت شرایطی خاص، شعله با سرعت چندین

در دو روش الکترومغناطیسی از تداخل میدان مغناطیسی دفعی با شدت بالا و جریان القایی در قطعه کار، نیروهای الکترومغناطیسی سبب تغییر شکل پلاستیک قطعه کار می‌شود. از آنجاکه ایجاد میدان با شدت مناسب نیازمند تجهیزات لازم است و نیز انرژی تولید شده برای شکلدهی قطعات صنعتی ضخیم کفایت نمی‌کند، از این روش فقط برای قطعات با ضخامت کم استفاده می‌شود. روش الکتروهیدرولیک به منبع انرژی الکتریکی نیاز دارد. در این روش امکان تولید به‌صورت خودکار وجود دارد لذا از آن در تولید قطعات کوچک و متوسط که به انرژی زیادی نیاز ندارند استفاده می‌شود. تخلیه الکتریکی و ایجاد جرقه بین الکترودهای درون محفظه شکلدهی شوک فشاری را به‌وجود می‌آورد که موجب حرکت ورق و در نتیجه تغییر شکل آن می‌شود [۷].

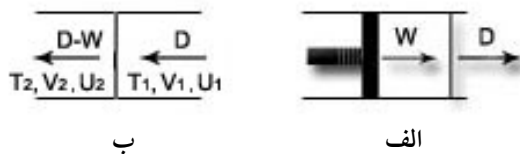
در روش شکلدهی با چکش آبی، قطعه کار در یک انتهای ستون آب و در سوی دیگر، پیستون متحرک قرار داده می‌شود. انرژی ورودی، بر اثر برخورد چکش به پیستون ایجاد می‌شود و با انتقال موج ضربه به ستون آب و به قطعه کار، قطعه به‌داخل قالب رانده شده و شکل می‌گیرد [۸].

در روشهای شیمیایی و از آن جمله روش انفجاری، ابعاد قطعاتی که می‌توان شکل داد بزرگ است و به تجهیزات سرمایه‌ای نیاز نیست. همچنین به دلیل تنوع جنس و شکل مواد منفجره (کروی، استوانه‌ای و صفحه‌ای)، شکلهای تولید شده نیز متنوع است. معمولاً انرژی تولید شده به‌صورت مستقیم یا از طریق سیال واسطه، به فلز انتقال می‌یابد. شکلدهی فلزها به روش انفجاری برای انبساط لوله‌ها، انبساط دهانه مخازن، شکلدهی بازتابنده رادار، لبه‌سازی لوله‌ها و سوراخکاری به‌کار می‌رود [۲، ۳].

در روشهای الکتروهیدرولیک، چکش آبی و انفجاری، موج فشاری ایجاد شده عموماً توسط یک سیال به قطعه کار منتقل می‌شود.

1. Group Method Data Handling (GMDH)  
2. Explosive Gas Forming (EGF)

بماند. بنابراین سرعت یک تابع پلکانی زمانی است که اندازه و بلندی مراحل آن کوچک است. هر مرحله، یک موج فشاری کوچک را از میان گازی که هم اکنون (به وسیله موج قبلی) گرم شده و در جلوی پیستون است انتقال می دهد که به این دلیل به سبقت گرفتن تمایل دارد. با توجه به اینکه سرعت، فشار و دمای حاصل در جبهه موج به طور مداوم تمایل به افزایش دارند، در نبود فرایندهای اتلاف، (مانند انتشار گرما و انتقال چسبندگی)، با شیب مناسبی باید به پایان برسد. موجی که در یک محدوده مؤثر غیر پیوسته توسعه یافته باشد، موج ضربه ای نامیده می شود. در شکل (۱-الف) پیستون با سرعت  $w$  حرکت و موج ضربه ای با سرعت  $D$  حرکت می کند. با یک انتقال ساده، شکل (۱-ب) سیستمی را با یک موج ضربه ای ایستاده نشان می دهد.



شکل ۱ سیستم با یک موج ضربه

با توجه به قانون بقای جرم از دو طرف ضربه داریم:

$$U_1 / V_1 = U_2 / V_2 \quad (1)$$

از آنجا که ضربه بر واحد جرم مساوی سرعت  $U$  است و جرم بر واحد زمان  $U/V$ ، لذا ضربه انتقال یافته به طرف دیگر  $U_2/V_2$ ، از آنجا که قسمتی از ضربه به فشار هیدرواستاتیکی تبدیل می شود، لذا بر طبق قانون بقای ضربه، داریم:

$$P_1 + U_1^2 / V_1 = P_2 + U_2^2 / V_2 \quad (2)$$

برابر سرعت صوت انتشار پیدا می کند. برای مخلوط گاز قابل احتراق در لوله ای با قطر یکنواخت، اصولاً موج احتراقی تحت شتاب سریعی قرار می گیرد تا موج انفجاری به وجود آید.

در زمینه این نوع شکلدهی اطلاعات اندکی در مجلات و گزارشهای علمی منتشر شده است. مفصل ترین مطالب در این زمینه، در خصوص انتخاب مناسب نسبت درصد مخلوط گازها و فشار اولیه برای انفجار در شکلدهی آزاد ورقه های فلزی است که در مرجع [۱۳] ارائه شده.

تحقیقاتی نیز بر روی محدودیتهای فرایند در هنگام انفجار انجام شده است. از جمله نتایج این تحقیقات، قابل کنترل بودن پهنای ناحیه فشار و وجود نقطه برخورد گاز - قطعه کار است.

### ۳- نظریه موج انفجار

در حدود ۲۵ سال بعد از کشف موج انفجاری، اولین کوششها در تعریف استدلالی این فرایند به وسیله بکر<sup>۱</sup> بر روی شکل پایه انفجار و تئوری موج ضربه انجام شد [۱۴]. این نظریه شامل دو قسمت بود: تشکیل ضربه در محیط تراکم پذیر، و تقویت موج ضربه به وسیله انرژی عکس العمل شیمیایی. درباره دو موضوع فوق در کتابهای احتراق [۱۴، ۱۵]، نظریاتی به شرح ذیل ارائه شده است:

تشکیل موج ضربه ای در گاز از نظر مفهومی، مانند سرعت و شتاب پیستون در گاز خنثی برای مکانیزم شیمیایی است. تغییر مکان دائمی پیستون را می توانیم به صورت یک حرکت ناپیوسته در نظر بگیریم به طوری که، در هر لحظه از زمان، با حجم مناسب در مرکز این جزء از زمان، سرعت پیستون ثابت باقی

1. Becker

#### ۴- تحلیل تغییر شکل دینامیکی ورق دایره‌ای تحت موج فشار

در این تحلیل از روش انرژی استفاده می‌کنیم. فرض می‌شود ورق تحت موج فشار به صورت بخشی از کره تغییر شکل می‌یابد. با استفاده از اصل ثبات حجم در تغییر شکل پلاستیک، می‌توان حجم اولیه ورق دایره‌ای ( $\pi D^2 t / 4$ ) که قطر قالب و  $t$  ضخامت اولیه ورق است) را با حجم فلز در بخشی از کره ( $\frac{2}{3} \pi R w t$ ) که شعاع  $R$  انحنای  $w$  بیشینه خیز و  $t$  ضخامت نهایی است) برابر قرار داد و لذا محاسبه کرنش مؤثر امکانپذیر می‌شود.

$$\epsilon_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_{\theta}^2 + \epsilon_t^2 + \epsilon_r^2)} = L_n \left( 1 + \epsilon \left( \frac{W}{D} \right)^2 \right) \quad (11)$$

$\epsilon_{\theta}$  کرنش محیطی،  $\epsilon_r$  کرنش شعاعی و  $\epsilon_t$  کرنش ضخامتی است. انرژی کل که به صورت کار پلاستیک سبب تغییر شکل فوق می‌شود با معادله زیر بیان می‌شود:

$$U_T = \int_V \int_0^{\epsilon_{eff}} \sigma_{eff} \cdot d\epsilon_{eff} \cdot dV \quad (12)$$

$V$  حجم است. با صرف نظر کردن از اثر نرخ کرنش و با استفاده از معادله تنش و کرنش مؤثر  $\sigma_{eff} = K \epsilon_{eff}^n$ ، معادله زیر برای انرژی تغییر شکل ورق به دست می‌آید:

$$U_T = \frac{\pi}{\epsilon} D^2 t \cdot \frac{K}{n+1} \left[ L_n \left( 1 + \epsilon \left( \frac{W}{D} \right)^2 \right) \right]^{n+1} \quad (13)$$

معادله (۱۳) کار پلاستیک در تغییر شکل کششی بخش پیرامونی لبه ورق را شامل نمی‌شود. در تعمیم روش انرژی برای تعیین کار پلاستیک لازم برای تغییر شکل ورق به بخشی از کره و منظور کردن انرژی تغییر شکل لبه ورق با توجه به شکل ۲، روابط زیر را می‌نویسیم:

بقای انرژی از معادله دوم به دست می‌آید. اگر انرژی داخلی گاز را  $E$  در نظر بگیریم، داریم:

$$E_1 + U_1^2 / 2 + P_1 V_1 = E_2 + U_2^2 / 2 + P_2 V_2 \quad (3)$$

با ساده کردن معادلات نتیجه می‌شود:

$$U_1^2 = V_1^2 * ((P_2 - P_1) / (V_1 - V_2)) \quad (4)$$

$$U_2^2 = V_2^2 * ((P_2 - P_1) / (V_1 - V_2)) \quad (5)$$

$$E_2 - E_1 = 1/2 * (P_2 - P_1) * (V_1 - V_2) \quad (6)$$

معادله اخیر رابطه بین انرژی داخلی قبل و بعد از فشار را بر اثر موج ضربه که تابعی از فشار و حجم مخصوص است، نشان می‌دهد. با به کار بردن معادلات فوق، سرعت موج ضربه،  $D$  را می‌توان چنین توصیف کرد:

$$D = U_1 = V_1 * ((P_2 - P_1) / (V_1 - V_2))^{1/2} \quad (7)$$

همینطور سرعت  $W$  قبل از موج:

$$W = U_1 - U_2 = (V_1 - V_2) * ((P_2 + P_1) / (V_1 - V_2))^{1/2} \quad (8)$$

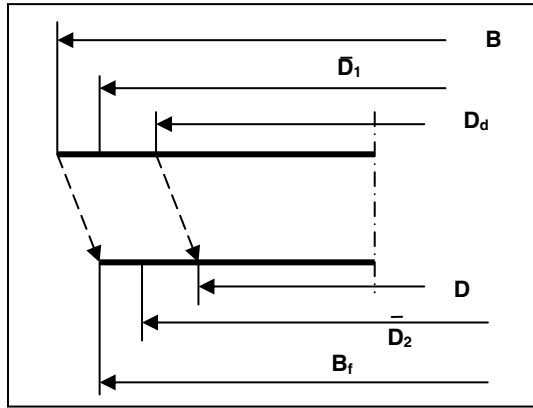
برای به دست آوردن دما و فشار در موج برای هر جریان با سرعت  $W$  معادله ذیل معرفی می‌شود:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (9)$$

و معادله انرژی چنین است:

$$E_2 - E_1 = E = C_v (T_2 - T_1) \quad (10)$$

$C_v$  مقدار متوسط ثابت مخصوص گرمایی بین دمای  $T_1$  و  $T_2$  است.



شکل ۳ نمایش تغییر شکل در ناحیه پیرامونی ورق

معادله ثبات حجم به صورت زیر نوشته می شود.

$$\frac{\pi}{\xi} (B^y - D^y) = \frac{\pi}{\xi} (B_f^y - D^y) \quad (20)$$

با استفاده از معادله (۱۹) و (۲۰)، معادله کرنش محیطی

نوشته می شود:

$$\varepsilon_{\theta} = L_n \left( \frac{D^y + B^y - B_f^y}{D^y} \right)^{1/\gamma} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{\gamma} L_n \left( 1 + \frac{B^y - B_f^y}{D^y} \right)$$

برای کرنش مؤثر معادله زیر را می توانیم بنویسیم:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma}} \varepsilon_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} L_n \left( 1 + \frac{B^y - B_f^y}{D^y} \right) \quad (22)$$

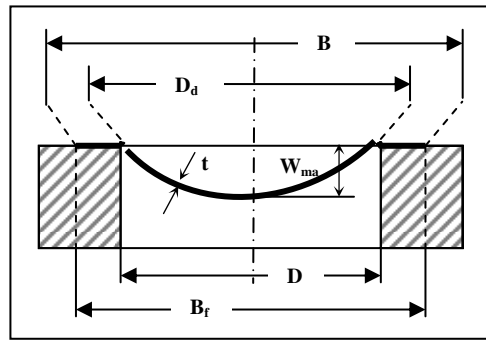
کار پلاستیک برای تغییر شکل کششی بخش پیرامونی

یا بال ورق با معادله زیر بیان می شود:

$$U_{T,f} = \int_D^{B_f} \int_0^{\varepsilon_{eff}} \sigma_{eff} \cdot \frac{\pi D_2 t}{2} dD_2 \quad (23)$$

$$\sigma_{eff} = k \cdot \varepsilon_{eff}^n$$

$$U_{T,f} = \frac{\pi \cdot k \cdot t}{2(n+1)} \int_D^{B_f} D_2 \left[ L_n \left( 1 + \frac{B^2 - B_f^2}{D_2^2} \right) \right]^{n+1} dD_2$$



شکل ۲ پروفیل تقریبی تغییر شکل تحت بار انفجاری

$$\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{\gamma}{3}} (\varepsilon_{\theta}^y + \varepsilon_r^y + \varepsilon_t^y) = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma}} \varepsilon_{\theta} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\theta} \cong \varepsilon_{\theta, max} \left( \frac{x}{D_d} \right)^{\gamma} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{\theta, max} = L_n D_d / D \quad (16)$$

$$D_d^y = D^y + \xi W_{max}^y \quad (17)$$

کار پلاستیک در شکلهی ورق به بخشی از کره:

$$U_{T,d} = \int_V \int_0^{\varepsilon_{eff}} \sigma_{eff} \cdot d\varepsilon_{eff} \cdot dV = \int_V \frac{K \varepsilon_{eff}^{n+1}}{n+1} dV$$

$$U_{T,d} = \int_0^{D_d} \frac{K}{n+1} \left( \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma}} \varepsilon_{\theta, max} \left( \frac{x}{D_d} \right)^{\gamma} \right)^{n+1} \cdot \frac{\pi \cdot x t}{\gamma} dx$$

$$U_{T,d} = \frac{\pi D_d^y \cdot t \cdot k}{\gamma(n+1)} \int_0^{D_d} \left( \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma}} \varepsilon_{\theta, max} \right)^{n+1} \left( \frac{x}{D_d} \right)^{\gamma(n+1)} \cdot \left( \frac{x}{D_d} \right) d \left( \frac{x}{D_d} \right)$$

$$U_{T,d} = \frac{\pi}{\xi} D_d^y \cdot t \cdot \frac{k}{(n+1)(n+\gamma)} \left( \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma}} L_n \frac{D_d}{D} \right)^{n+1} \quad (18)$$

انرژی تغییر شکل بخش پیرامونی ورق (لبه ورق) را با

توجه به شکل ۳ تعیین می کنیم. کرنش محیطی برابر است با:

$$\varepsilon_{\theta} = L_n \frac{D_1}{D^y} \quad (19)$$

نشان داده شده است. آزمایشات شکلدهی انفجاری بدون استثنا با استفاده از مخلوط گازها باید در محفظه‌ای بسته انجام پذیرد.

البته در روشهای دیگر شکل‌دهی با سرعت بالا می‌توان در محیط باز یا بسته این عملیات را انجام داد. به دلیل فقدان اطلاعات کافی در زمینه معادلات حاکم بر این فرایند و همچنین ساخت سامانه انفجاری، طراحی و ساخت این دستگاه از طریق مهندسی معکوس انجام شده است.

### ۱-۵- ایمنی

نخستین نکته قابل توجه در آزمایشهای شکلدهی انفجاری و سایر روشهای انفجاری، رعایت کامل موارد ایمنی است، زیرا ممکن است خسارت‌ها و صدمات جانی و مالی جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. داشتن اطلاعات کافی در زمینه میزان حساسیت این مواد نسبت به شرایط محیطی نظیر فشار، حرارت، جرقه، حمل و نقل، نگهداری، اجرای عملیات انفجاری در محل‌های استاندارد، رعایت فاصله ایمنی استاندارد، پناهگیری امن و فوریت‌های اولیه پزشکی، از اهم موارد ایمنی است.

### ۲-۵- ساخت تجهیزات

هدف از طراحی این دستگاه، انجام آزمایشهای لازم برای دستیابی به پارامترهای مطلوب در ساخت شکل‌های مخروط و گنبدی به روش شکلدهی انفجاری یا گازی است. قسمتهای مختلف این سامانه بخشهای زیر است:

- محفظه انفجار از جنس فولاد صنعتی؛
- سیلندر با قطر ۱۲ سانتیمتر و ضخامت ۳ سانتیمتر؛
- درپوش ابتدایی برای انسداد ابتدای سیلندر؛
- رینگ واسط؛
- درپوش انتهایی برای انسداد انتهای سیلندر؛

قطر متوسط  $\bar{D}_1$  را برای بال ورق قبل از تغییر شکل با رابطه زیر تعریف می‌کنیم:

$$\bar{D}_1 = \frac{B^{\gamma} + D_d^{\gamma}}{\gamma} \quad (24)$$

به‌طور مشابه، قطر متوسط  $\bar{D}_\gamma$  را برای بال ورق پس از تغییر شکل در نظر می‌گیریم:

$$\bar{D}_\gamma = \frac{B_f^{\gamma} + D^{\gamma}}{\gamma} \quad (25)$$

با استفاده از روابط اخیر کرنش محیطی متوسط و کرنش مؤثر متوسط را با روابط زیر می‌توان توصیف کرد:

$$\bar{\epsilon}_\theta = \frac{1}{\gamma} L_n \frac{\bar{D}_1^{\gamma}}{\bar{D}_\gamma^{\gamma}} \quad (26)$$

$$\bar{\epsilon}_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} L_n \frac{B^{\gamma} + D_d^{\gamma}}{B_f^{\gamma} + D^{\gamma}} \quad (27)$$

روابط اخیر به ما امکان می‌دهد که معادله انرژی تغییر شکل بال ورق را به‌صورت زیر بنویسیم:

$$U_{T,f} = \frac{\pi (B^{\gamma} - D_d^{\gamma})}{\xi} \cdot \frac{k}{n+1} \left( \frac{1}{\sqrt{3}} L_n \frac{B^{\gamma} + D_d^{\gamma}}{B_f^{\gamma} + D^{\gamma}} \right)^{n+1} \quad (28)$$

کار پلاستیک کل در تغییر شکل ورق از جمع روابط (۱۸) و (۲۸) نتیجه می‌شود:

$$U_T = U_{T,d} + U_{T,f} \quad (29)$$

## ۵- طراحی و ساخت سامانه شکلدهی انفجاری

در این قسمت به طراحی و ساخت موفقیت‌آمیز سامانه شکلدهی انفجاری پرداخته می‌شود. این سامانه در شکل ۴

ایجاد شده بر اثر انفجار گاز به سمت ورق حرکت کرده و آن را به درون قالب می‌راند تا ورق به صورت آزاد یا مقید تغییر شکل پیدا کند. اندازه‌گیریهای انجام شده بر روی ورق پس از تغییر شکل، با اندازه‌گیریهای انجام شده بر روی ورق اولیه مقایسه می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها امکان ترسیم توزیع کرنشهای محیطی و کرنش در جهت ضخامت ورق را فراهم می‌کند. تعداد زیادی آزمایش در دو حالت با قالب، بدون قالب و با استفاده از گازهای هیدروژن، اکسیژن و هوای خشک انجام شده است. در تمامی مراحل برای دقیق بودن نتایج سعی شده تا در هر وضعیت حداقل ۲ یا ۳ آزمایش انجام شود.

### ۳-۶- شکلدهی با قالب

تمامی آزمایش‌های با قالب، بر روی ورقهای فولادی نرم با قطر اولیه ۱۶ سانتیمتر و ضخامت اولیه ۱ میلی‌متر انجام شد. به منظور اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر بر روی نمونه‌ها، خطوط دایره‌ای شکلی از شعاع ۱۰ تا ۶۰ میلی‌متر به فواصل مساوی شعاعی ۱۰ میلی‌متری ترسیم شد. برای شکلدهی مخروطی از قالبهایی با زاویه راس ۹۰، ۱۲۰، و ۶۰ درجه استفاده شد.

### ۱-۳-۶- آزمایشهای مرحله اول

فشار مخلوط گاز ۴ بار، ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و زاویه رأس مخروط ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این آزمایشها با تغییر نسبت  $H_0$  از ۲۵ تا ۸۸/۵٪ انجام شد.  $C_1$  تا  $C_7$  نشان‌دهنده قطر دوایر بر روی قطعه است.  $D_1$  تا  $D_7$  و  $T_1$  تا  $T_7$  نشان‌دهنده قطر و ضخامت قطعه پس از تغییر شکل در محیط دایره متناظر است.  $t_c$  و  $h_c$  قطر و ضخامت قطعه پس از تغییر شکل در مرکز ورق است.  $H_0$  فشار هیدروژن،  $O_0$  فشار اکسیژن،  $H$  درصد هیدروژن قبل از انفجار و  $P_0$  فشار بعد از انفجار است. با توجه به نمودارها

- واشرها؛

- قالبهای مخروطی ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه؛

- سیستم جرقه شامل کلید، خازن و شمع؛

- مجموعه کپسولهای اکسیژن، هوا و هیدروژن؛

- سیستم انتقال گاز؛

- فشارسنجها؛

- سیستم تخلیه هوا.

## ۶- آزمایشها

### ۱-۶- آماده‌سازی آزمایشها

با توجه به دشواری تکرار آزمایش باید از سالم بودن کلیه قطعات اطمینان حاصل شود. برای انجام آزمایش باید اعمال زیر به ترتیب انجام شوند.

قطعه روی درپوش انتهایی ثابت و درپوش انتهایی بسته شود. آنگاه شیر خروجی هوا بسته و شیر فشارسنج باز شود. سپس شیرهای دوم و سوم گشوده شود. برای ورود گاز شیر اول باز و سپس شیر دوم و سوم مجدداً بسته می‌شوند. برای جلوگیری از ضربه خوردن فشارسنج، شیر آن بسته می‌شود. به دلیل مسایل ایمنی فاصله لازم باید رعایت شود.

برای شروع انفجار کلید بسته می‌شود. پس از انفجار شیر فشارسنج و سپس شیر خروجی هوا و درپوش انتهایی گشوده می‌شود. اکنون می‌توان قطعه تغییر شکل یافته را از محل خارج کرد.

### ۲-۶- اهداف آزمایش

هدف از انجام این سری آزمایش‌ها و بررسیهای تجربی تعیین اثر پارامترهای مهم فرایند، نظیر نسبت درصد هیدروژن در مخلوط گاز، ضخامت ورق، شرایط مرزی و جنس ورق بر کرنش محیطی، کرنش ضخامتی و خیز است. ورق بر روی دهانه قالب قرار می‌گیرد. موج فشاری

محدوده ۵۰٪ تا ۷۰٪ هیدروژن، بیشترین کرنش ضخامتی رخ می‌دهد. نکته قابل ذکر این است که بیشترین کرنش ضخامتی همیشه در مرکز ورق واقع نمی‌شود بلکه با افزایش خیز مرکز ورق، بیشینه کرنش به سمت دایره‌ای به شعاع ۱۰ میلی‌متر جابه‌جا می‌شود. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که در ناحیه‌ای که قطعه به قالب برخورد نکرده، کرنش ضخامتی یکسان است و در ناحیه تماس قطعه با قالب، بر اثر اصطکاک، نوسان در کرنش ضخامتی وجود دارد. (نمودارهای ۱ تا ۴).

### ۶-۳-۲- آزمایشهای مرحله دوم

فشار مخلوط گاز ۵ بار، ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و زاویه رأس مخروط ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این آزمایشها با تغییر نسبت  $H_p$  از ۳۰ تا ۸۰٪ انجام شد. بیشترین تغییر مکان مرکز ورق در محدوده ۵۰ تا ۷۵٪ هیدروژن و بیشینه آن در ۵۴٪ هیدروژن رخ می‌دهد. همچنین بیشترین میزان تغییر ضخامت مرکز در ۵۰٪ هیدروژن است.

با بررسی المان‌های روی قطعات می‌توان دریافت که المانهای روی دایره داخلی، در امتداد محیطی تحت کشش و المانهای روی دایره بیرونی، در امتداد محیطی تحت فشار قرار دارند. همچنین با استفاده از این آزمایش می‌توان دریافت که بیشترین کرنش محیطی و نیز بیشترین کرنش ضخامتی در ۵۰٪ هیدروژن رخ می‌دهد.

### ۶-۳-۳- آزمایشهای مرحله سوم

فشار مخلوط گاز ۳ بار، ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و زاویه رأس مخروط ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این آزمایشها با تغییر نسبت  $H_p$  از ۴۰ تا ۸۰٪ انجام شد. با استفاده از نتایج آزمایش می‌توان گفت که افزایش درصد هیدروژن، با افزایش تغییر مکان مرکز ورق همراه نیست. بیشترین

که در بخش بعدی بدان پرداخته می‌شود،  $\ln(D/D_0)$ ، کرنش محیطی و  $L_n(T/T_0)$  کرنش در جهت ضخامت ورق است.  $D_0$  و  $D$  به ترتیب معرف قطر برای هر یک از دوایر متحدالمرکز، قبل و بعد از تغییر شکل است.  $T_0$  و  $T$  ضخامت ورق در محل تقاطع دوایر متحدالمرکز قبل و بعد از تغییر شکل است. با استفاده از نتایج آزمایش می‌توان گفت که روند افزایش درصد هیدروژن با افزایش تغییر مکان مرکز ورق همراه نیست.

بیشترین تغییر مکانهای مرکز ورق بین ۵۰ تا ۷۰٪ هیدروژن اتفاق می‌افتد و بیشینه تغییر مکان در ۶۸٪ هیدروژن یعنی همان شرایط استوکیومتری است. هر چه جابه‌جایی مرکز صفحه بیشتر می‌شود، نوسان تغییرات ضخامت نسبت به شعاع دایره نیز بیشتر می‌شود.

بیشترین تغییر ضخامت مرکز در ۷۰٪ هیدروژن است. ولی بیشترین تغییر ضخامت ورق در شعاع ۱۰ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. با بررسی اثر کرنش محیطی نسبت به درصد هیدروژن ملاحظه می‌شود که برای برخی المانها، کرنش محیطی برابر صفر می‌شود و این بدان علت است که طول المانها در امتداد محیطی بدون تغییر باقی می‌ماند. موقعیت اینگونه المانها با تغییر درصد هیدروژن جابه‌جا می‌شود. به‌ازای هیدروژن ۶۲/۵٪ ملاحظه می‌شود که این المانها کمترین فاصله را نسبت به مرکز ورق دارند و به‌ازای هیدروژن ۲۵٪ موقعیت این المانها در مرکز بیشترین فاصله را دارد. بررسی نتایج مربوط به کرنش محیطی، نشان می‌دهد که المانهای واقع بر دایره داخلی در امتداد محیطی، تحت کشش و المانهای واقع بر دایره بیرونی در امتداد محیطی تحت فشار قرار می‌گیرند.

شعاع دوایر داخلی و بیرونی با درصد هیدروژن تغییر می‌کند. همچنین در بررسی کرنش ضخامتی نسبت به شعاع برای درصدهای مختلف هیدروژن ملاحظه می‌شود که در



آزمایش می‌توان دریافت که بیشترین کرنش محیطی و نیز بیشترین کرنش ضخامتی در ۶۰٪ هیدروژن روی می‌دهد.

### ۶-۳-۵- آزمایشهای مرحله پنجم

فشار مخلوط گاز ۳ بار و زاویه رأس مخروط ۱۲۰ درجه در نظر گرفته شد. این آزمایشها با تغییر نسبت  $H_2$  از ۳۰ تا ۸۰٪ انجام شد. با استفاده از نتایج آزمایش می‌توان گفت که افزایش درصد هیدروژن با افزایش تغییر مکان مرکز ورق همراه نیست. بیشترین تغییر مکان مرکز ورق در محدوده ۴۰ تا ۷۰٪ هیدروژن و بیشینه آن در ۵۰٪ هیدروژن رخ می‌دهد. همچنین بیشترین میزان تغییر ضخامت مرکز در ۴۰٪ هیدروژن است. با بررسی المان‌های روی قطعات می‌توان دریافت که برای برخی المانها کرنش محیطی صفر می‌شود و این بدان علت است که طول المانها در امتداد محیطی بدون تغییر باقی می‌ماند. موقعیت اینگونه المانها با تغییر درصد هیدروژن جابه‌جا می‌شود. به‌ازای هیدروژن ۵۰٪ می‌بینیم که این المانها کمترین فاصله را نسبت به مرکز ورق دارند و به‌ازای هیدروژن ۳۳٪ موقعیت این المانها نسبت به مرکز بیشترین فاصله را پیدا کرده است. همچنین با استفاده از این آزمایش می‌توان دریافت که بیشترین کرنش محیطی و نیز بیشترین کرنش ضخامتی در ۶۰٪ هیدروژن رخ می‌دهد.

### ۶-۳-۶- آزمایشهای مرحله ششم

آزمایش با ورق آهن در شرایط مخلوط گاز فشار  $H_2$  ۲/۱ بار، فشار  $O_2$  ۰/۹ بار، ۱ میلی‌متر  $T$  و زاویه مخروط ۹۰ درجه و تغییر فشار هوا ۶-۰/۵ بار در نظر گرفته شد. افزایش فشار هوا باعث کم شدن شدت فشار و در نتیجه کاهش تغییر شکل شد.

### ۶-۳-۷- آزمایشهای مرحله هفتم

آزمایش با ورق آهن در شرایط مخلوط گاز فشار  $H_2$  ۳ بار، فشار  $O_2$  ۱ بار، ۱ میلی‌متر  $T$  و زاویه قالب ۹۰ درجه و

تغییر مکان مرکز ورق در ۷۰٪ هیدروژن رخ می‌دهد که همان شرایط استوکیومتری است.

بیشترین تغییر ضخامت مرکز در ۷۰٪ هیدروژن است. با بررسی المان‌های روی قطعات می‌توان دریافت که برای برخی المانها کرنش محیطی صفر می‌شود و این به این علت است که طول المانها در امتداد محیطی بدون تغییر باقی می‌ماند. موقعیت اینگونه المانها با تغییر درصد هیدروژن جابه‌جا می‌شود. به‌ازای هیدروژن ۷۰٪ می‌بینیم که این المانها کمترین فاصله را نسبت به مرکز ورق دارند و به‌ازای هیدروژن ۸۰٪ موقعیت این المانها نسبت به مرکز، بیشترین فاصله را پیدا کرده است. همچنین با استفاده از این آزمایش می‌توان دریافت که بیشترین کرنش محیطی و نیز بیشترین کرنش ضخامتی در ۷۰٪ هیدروژن رخ می‌دهد.

### ۶-۳-۴- آزمایشهای مرحله چهارم

فشار مخلوط گاز ۶ بار و ۵ بار و زاویه مخروط ۶۰ درجه در نظر گرفته شد. این آزمایشها با تغییر نسبت  $H_2$  از ۵۰ تا ۷۰٪ انجام شد. در ناحیه تماس قطعه با قالب، نوسان در تغییر ضخامت وجود دارد. در فاصله  $30 < R < 60$  تغییرات کاهش ضخامت کم و متناسب با افزایش فشار است در حالی که در فاصله  $0 < R < 30$  با افزایش فشار افزایش تغییر ضخامت چشمگیر است. با استفاده از نتایج آزمایش می‌توان گفت که بیشترین میزان تغییر ضخامت مرکز در ۶۰٪ هیدروژن است.

با بررسی المان‌های روی قطعات می‌توان دریافت که برای برخی المانها کرنش محیطی صفر می‌شود و این بدان علت است که طول المانها در امتداد محیطی بدون تغییر باقی می‌ماند. موقعیت اینگونه المانها با تغییر درصد هیدروژن جابه‌جا می‌شود. به‌ازای هیدروژن ۶۰٪ می‌بینیم که این المانها کمترین فاصله را نسبت به مرکز ورق دارند و به‌ازای هیدروژن ۵۰٪ موقعیت این المانها در مرکز بیشترین فاصله را پیدا کرده است. همچنین با استفاده از این

نتایج و بحث مربوط به این آزمایشها به طور مفصل تر در بخش بعدی ارائه شده است.

#### ۶-۴-۳- آزمایشهای مرحله سوم

تعدادی از آزمایشها با ورق آلومینیم با شرایط  $H_p=70\%$ ،  $1/6$  میلیمتر  $T_1$  و فشار ۴-۲/۵ بار انجام شد. نمونه‌های ساخته شده در این آزمون شکل گنبدی یکنواخت‌تری نسبت به نمونه‌های آهنی دارد. همچنین تغییرات ضخامت نسبت به شعاع دایره در آلومینوم شدت کمتری نسبت به قطعات قبلی دارد. دلیل این امر نرم بودن آلومینوم است. با بررسی المان‌ها روی قطعات می‌توان دریافت که تمام المانهای واقع بر سطح ورق در امتداد محیطی تحت کشش هستند. بیشترین کرنش محیطی برابر  $0/125$  و به‌ازای  $2/5$  بار است. همچنین هم‌زمان با افزایش کرنش ضخامتی مرکز صفحه، نوسان تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به شعاع دایره بیشتر می‌شود.

#### ۷- نمودارها و بحث

نمودارهای ۱ تا ۴ در بخش آزمایشهای مربوط به شکلدهی با قالب بررسی شد. نمودار ۴ کرنش ضخامتی را نسبت به شعاع برای درصدهای مختلف هیدروژن نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در محدوده  $0/50$  تا  $0/70$  هیدروژن بیشترین کرنش ضخامتی ایجاد می‌شود. نکته قابل ذکر این است که بیشترین کرنش ضخامتی همیشه در مرکز ورق واقع نمی‌شود بلکه با افزایش جابه‌جایی مرکز ورق، بیشینه کرنش به سمت دایره‌ای به شعاع  $10$  میلیمتر جابه‌جا می‌شود. از مقایسه نمودارهای  $0/75$ ،  $0/88/5$ ،  $0/37/5$  و  $0/25$  مشخص می‌شود که در ناحیه‌ای که قطعه به قالب برخورد نکرده، کرنش ضخامتی یکسان است و در ناحیه تماس قطعه با قالب، بر اثر اصطکاک، نوسان در کرنش ضخامتی دیده می‌شود.

با تغییر فشار هوا ۹-۱ بار انجام شد. بر اساس این آزمایش با افزایش هوا تا حدود ۴ بار تغییر شکل، افزایش پیدا می‌کند. در حالی که در فشار ۳-۱ بار تغییر مکان یکسان است و در فشار ۷ بار افت شدیدی در تغییر شکل ملاحظه می‌شود.

#### ۶-۴-۶- شکلدهی بدون قالب (آزاد)

تمامی آزمایشهای بدون قالب بر روی ورقهای فولادی نرم و آلومینیمی انجام شد. برای یکی از آزمایشها قطر اولیه ورق  $16$  سانتیمتر و ضخامت آن  $1$  میلیمتر و برای آزمایشهای دیگر قطر خارجی  $21$  سانتیمتر و ضخامتهای متفاوتی در نظر گرفته شد.

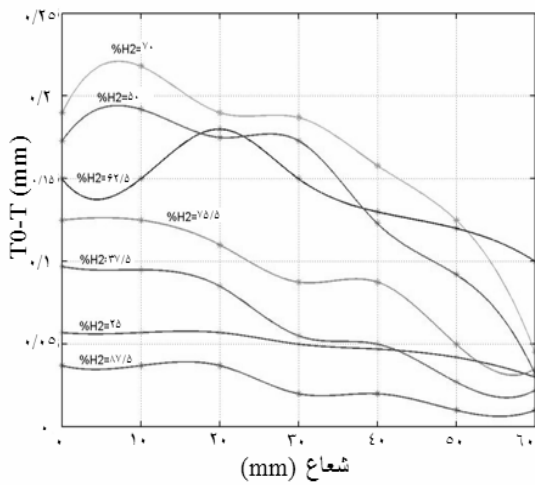
#### ۶-۴-۱- آزمایشهای مرحله اول

آزمایشها با ورق آهن نرم در شرایط فشار  $2/5$  بار،  $0/7$  میلیمتر  $T$  انجام شد. در این آزمایشها درصد هیدروژن از  $20$  تا  $90\%$  تغییر می‌کرد. بیشترین تغییر خیز مرکز ورق در  $80\%$  هیدروژن رخ می‌دهد. با بررسی المان‌های روی قطعات می‌توان دریافت که برای برخی المانها کرنش محیطی صفر می‌شود و این بدان علت است که طول المانها در امتداد محیطی بدون تغییر باقی می‌ماند. موقعیت اینگونه المانها با تغییر درصد هیدروژن زیاد جابه‌جا نمی‌شود. به‌ازای هیدروژن  $70\%$  بیشترین کرنش محیطی رخ می‌دهد. به‌خلاف شکلدهی با قالب، نرخ تغییرات کرنش محیطی در شعاع، با افزایش فشار تقریباً ثابت باقی می‌ماند و تقریباً تمامی المانهای واقع بر سطح ورق در امتداد محیطی تحت کشش هستند.

#### ۶-۴-۲- آزمایشهای مرحله دوم

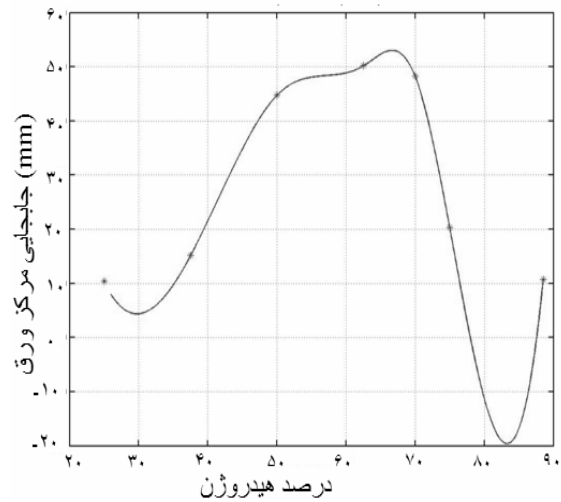
تعدادی از آزمایشها با ورق آهن نرم در شرایط  $H_p=70\%$ ،  $0/7$  میلیمتر  $T_1$  و فشار ۲-۱ بار انجام شد. همچنین تعدادی از آزمایشها با ورق آهن نرم در شرایط  $H_p=70\%$ ،  $1/35$  میلیمتر  $T_1$  و فشار ۴-۲/۵ بار و دسته‌ای دیگر از آزمایشها با ورق آهن نرم در شرایط  $H_p=70\%$ ،  $1/6$  میلیمتر  $T_1$  و فشار ۶-۲/۵ بار انجام شد.

۴-۱۰ فولاد نرم  $T_0=1\text{ mm}$ ,  $a=90^\circ$ ,  $P=90\text{ bar}$



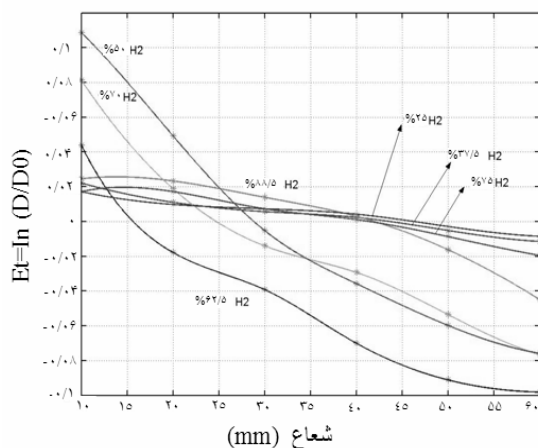
نمودار ۳ تغییرات ضخامت به شعاع برای درصدهای مختلف هیدروژن

۴-۹ فولاد نرم  $T_0=1\text{ mm}$ ,  $a=90^\circ$ ,  $P=4\text{ bar}$



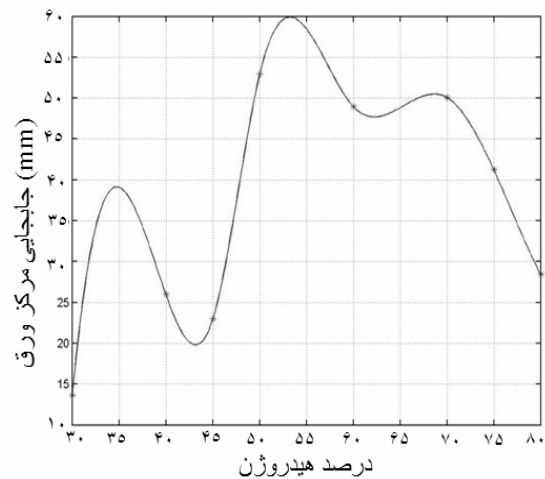
نمودار ۱ تغییرات خیز مرکز ورق نسبت به درصد هیدروژن

۴-۱۱ فولاد نرم  $T_0=1\text{ mm}$ ,  $a=90^\circ$ ,  $P=4\text{ bar}$



نمودار ۴ تغییرات کرنش ضخامتی به شعاع برای درصدهای مختلف هیدروژن

۴-۱۲ فولاد نرم  $T_0=1\text{ mm}$ ,  $a=90^\circ$ ,  $P=5\text{ bar}$

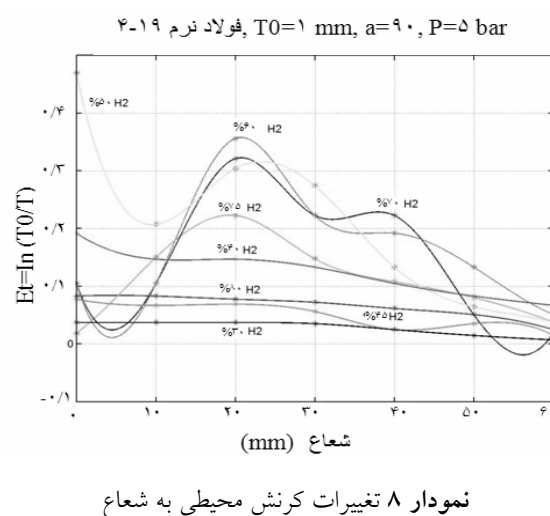
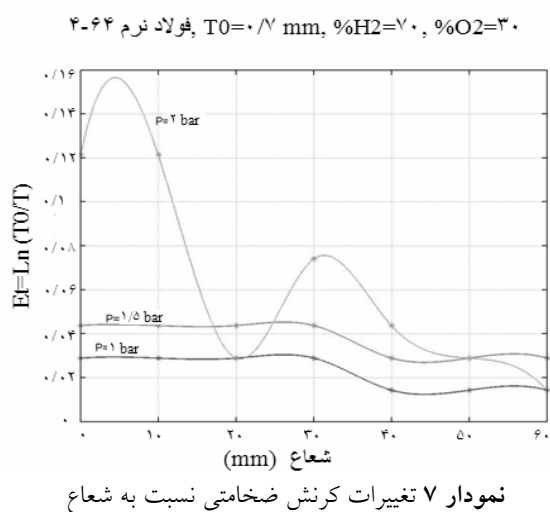


نمودار ۲ تغییرات خیز مرکز ورق نسبت به درصد هیدروژن

در فشار حدود ۱ بار مقادیر کرنش محیطی برای نقاط مختلف چندان قابل ملاحظه نیست، در حالی که در فشار ۲ بار، کرنش محیطی در مرکز ورق بیش از ۳ برابر افزایش یافته است. بر اساس مشاهده نوع پارگی بعضی از قطعات در ناحیه مرکزی، می توان نتیجه گرفت که عامل بروز آن در اغلب موارد، افزایش کرنش محیطی و رسیدن آن به حد بحرانی است.

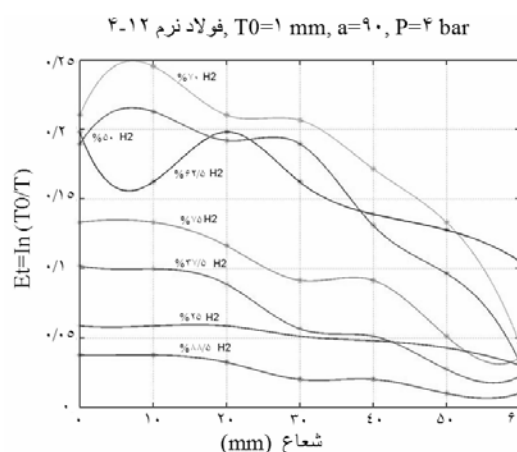
نمودار ۵ کرنش محیطی بر حسب فاصله از مرکز ورق را، برای سه فشار مختلف نشان می دهد. از مقایسه این منحنیها ملاحظه می شود که با افزایش فشار، کرنش محیطی در مرکز ورق و در سایر نقاط، به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

در نمودار ۷ تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به شعاع برای شکلدهی با قالب ۹۰ درجه بر حسب درصدهای مختلف گاز هیدروژن ارائه شده است. همچنین در نمودار ۸ تغییرات کرنش محیطی برای شکلدهی با قالب ۹۰ درجه برای چهار درصد مختلف گاز هیدروژن مشاهده می‌شود.



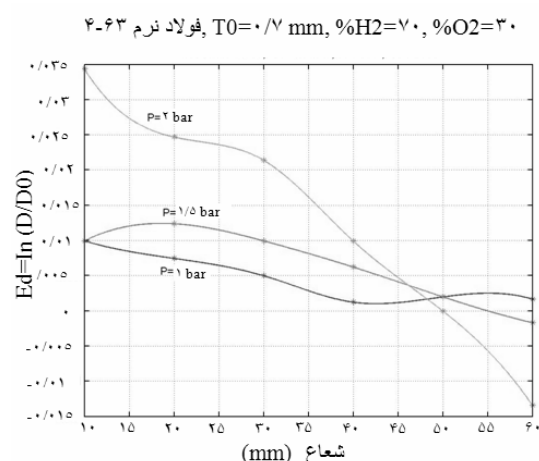
### ۸- نتیجه گیری

الف) نتایج آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که روش انفجار مخلوط گاز برای شکلدهی ورقهای فلزی به‌عنوان یک روش صنعتی می‌تواند توسعه یابد.



نمودار ۵ تغییرات کرنش محیطی به شعاع

توزیع کرنش محیطی می‌تواند نشانگر این مطلب باشد که توزیع فشار حاصل از انفجار بر ورق، یکنواخت نیست و این غیریکنواختی در توزیع فشار با افزایش فشار واضح‌تر می‌شود. در نمودار ۶ تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به شعاع برای سه فشار مختلف ترسیم شده است. در فشار حدود ۱ بار بیشینه کرنش ضخامتی مربوط به مرکز ورق و برابر ۳٪ است. تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به شعاع برای  $R < 30$  ثابت باقی می‌ماند و وضعیت مشابهی نیز برای فشار ۱/۵ بار مشاهده می‌شود، با این تفاوت که برای فشار ۱/۵ بار برای  $R < 30$  کرنش ضخامتی حدود ۴/۵٪ است.



نمودار ۶ تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به شعاع

## ۹- منابع

- [۱] پاشایی، علی اصغر؛ «شکلدهی ورقه‌های فلزی به روش انفجار مخلوط گازها»؛ پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان؛ ۱۳۸۱.
- [۲] درویزه، ابوالفضل؛ علی طاولی، مجید؛ پاشایی، علی اصغر؛ «شکلدهی مخروطی ورقه‌های فلزی به روش انفجار مخلوط گازها بدون استفاده از قالب»؛ مجموعه مقالات یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک؛ ۱۳۸۲ (۱۳۴۲ - ۱۳۴۵)؛ مشهد، ایران.
- [۳] درویزه، ابوالفضل؛ علی طاولی، مجید؛ پاشایی، علی اصغر؛ «شکلدهی آزاد ورقه‌های فلزی به روش انفجار مخلوط گازها»؛ مجموعه مقالات ششمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید؛ ۱۳۸۲؛ تهران، ایران.
- [۴] درویزه، ابوالفضل؛ علی طاولی، مجید؛ پاشایی، علی اصغر «طراحی و ساخت سامانه‌ای جهت شکلدهی ورقه‌های فلزی به روش انفجار مخلوط گازها»؛ مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک؛ ۱۳۸۳؛ تهران، ایران.
- [۵] جوادپور حسن؛ «آنالیز شکلدهی دینامیکی ورق دایره‌ای به مخروط»؛ پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه گیلان.
- [۶] جمعی، مهدی؛ «تراکم پودر فلزات به کمک شوک انفجاری»؛ پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه گیلان.
- [۷] سکاکی، کاظم؛ «ارائه مدل الکترومکانیکی برای فرایند (EDC) در شکلدهی پودرهای فلزی»؛ پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه گیلان.
- ب) تولید موفق مخروطهایی با زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به صورت مطلوبی انجام شد. این مخروطها در مقایسه با روشهای تحقیقاتی گزارش شده [۱۲] تولید مخروط، انفجار با تی. ان. تی. یا موارد مشابه، از کیفیت ظاهری بهتری برخوردار است: برگشت‌پذیری بسیار کم، نبود چروکیدگی<sup>۲</sup>، شیب ضخامتی مناسب. به نظر می‌رسد کنترل پدیده چروکیدگی در این روش به خوبی امکان‌پذیر است.
- پ) نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که پدیده ذوب موضعی برای ورقهای آلومینیومی در فشارهای بالا، با توجه به گرمای شدید ایجاد شده بر اثر انفجار مخلوط گازها بروز می‌کند که البته با کاهش فشار، این پدیده قابل پیشگیری است. در ضمن کارایی این روش برای فلزهای با استحکام و نقطه ذوب بالا از نتایج تجربی به دست آمده قابل استنتاج است. توانایی این روش در تغییر شکلهای بزرگ و پیچیده به واسطه اعمال دما و فشار بالا که توأما انجام می‌شود و در نتیجه سبب انبساط و افزایش ظرفیت جذب انرژی قطعه در حین تغییر شکل پلاستیک می‌شود، یکی از امتیازهای ویژه این روش نسبت به روشهای استفاده از خرجهایی نظیر C<sub>4</sub> یا تی. ان. تی. محسوب می‌شود.
- ت) نمودارهای کرنش محیطی نشان می‌دهد که نمونه‌ها، از مرکز به سمت محیط دایره، تحت کشش و فشار هستند، هر چه تغییر مکان مرکز نمونه بیشتر باشد، ناحیه تحت فشار کوچکتر و ناحیه تحت کشش بزرگتر می‌شود.
- ث) در مقایسه با روشهای متداول، نمودارهای تغییر ضخامت، شیب ضخامتی مناسب و یکنواختی را نشان می‌دهد.
- ج) نتایج برخی آزمایشها نشان می‌دهد که رطوبت پسماند در داخل سیلندر، باعث کاهش جریان اغتشاش در انفجار و در نتیجه کاهش ضربه می‌شود.

1. Springback  
2. Wrinkling

- [11] Poyton, W. A.; "Explosive Gas Forming" Univ. of Manchester, October 1967.
- [12] Vielle P. and Bertolet, M., Compt. Rend. 93, 18 (1881).
- [13] Mallard, E. and Le Chatelier, H. *ibid*, 93, 145, (1881).
- [14] "High velocity forming of metals", ASTME, Prentice – Hall, New Jersey, 1964.
- [15] Becker, R., Z. Physik, 8, 321, (1922). Z. Elektrochem, 42: 457, (1936).
- [۸] درویزه، ابوالفضل؛ علی طاوولی، مجید؛ رضاییان، فرشید؛ «شکلدهی لوله‌های چین‌دار با استفاده از تکنیک چکش آبی Water Hammer Forming (WHF)»؛ هشتمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران؛ دانشگاه صنعتی اصفهان؛ مهر ۱۳۸۳.
- [۹] احمدزاده ریشهری، غلامرضا؛ «طراحی ژنتیکی شبکه‌های عصبی از نوع GMDH برای مدل‌سازی فرایندهای انفجاری»؛ پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه گیلان.
- [۱۰] نادری، غلامعلی؛ «بررسی تغییر شکل دینامیکی ورقهای مستطیل شکل در جوشکاری انفجاری به روش اجزاء محدود»؛ پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه گیلان.