

## مطالعه تحلیلی و تجربی فرایند جوش کاری و شکل‌دهی انفجاری صفحات غیر هم‌جنس

حسین بیسادی، غلامحسین لیاقت، ابوالفضل درویزه و حسن مسلمی نائینی

**چکیده:** فرآیند جوش کاری و شکل‌دهی انفجاری دو صفحه نامتجانس که جوش کاری در حالت جامد به همراه تغییر شکل پلاستیکی هم‌زمان می‌باشد مورد بررسی تحلیلی و تجربی قرار گرفته است. مدل تحلیلی ارائه شده با توجه به اصل بقای انرژی و رعایت شرایط تکیه‌گاهی و لحاظ نمودن مقادیر بحرانی ضربه و تغییر شکل تدوین شده است. صفحه‌های نامتجانس با روشی شبیه تحلیل تیرهای مرکب به صفحه متجانس تبدیل و سپس با جایگزین کردن نیروی معادل استاتیکی به جای بارهای دینامیکی حاصل از انفجار، ماکزیمم تغییر شکل ورق و احتمال گسیختگی با توجه به خواص مکانیکی صفحه‌ها پیش‌بینی می‌شود. با طراحی و انجام آزمایش‌های لازم عوامل تعیین‌کننده‌ای نظیر سرعت که برای محاسبه ضربه ضروری می‌باشد معین و جوش‌پذیری صفحات نامتجانس با توجه به پنجره جوش کاری تحقیق و میزان تغییر شکل تجربی با مقدار تحلیلی مقایسه گردیده و تشابه نسبتاً خوبی مشاهده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** جوش کاری، شکل‌دهی، مواد منفجره، صفحه‌های غیر هم‌جنس.

### ۱. مقدمه

استفاده از انرژی اضافی که معمولاً در جوش کاری انفجاری بعد از اتمام عملیات باقی می‌ماند و کم کردن مراحل ساخت مصنوعات که نیاز به هر دو کار شکل‌دهی و جوش کاری دارند، انگیزه ارائه کار حاضر بوده است که با ملاحظه سوابق و تجربیاتی نظیر کنترل تجربی و تحلیلی چروکیدگی [۱]، شبیه‌سازی تغییر شکل لوله‌ها در عملیات جوش کاری انفجاری با نرخ بالا [۲]، معرفی فرایند برش کاری و سوراخ کاری انفجاری [۳]، تحلیل بارگذاری دینامیکی [۴] شکل گرفته است.

در قرن اخیر تلاش‌های بسیار زیادی در زمینه جوش کاری به عمل آمده است. روش‌های تازه‌ای ارائه شده است که با استفاده از آنها،

قطعات بدون آنکه نیاز به ذوب داشته باشند در اکثر موارد حتی با کیفیت خیلی بالاتر از جوش کاری ذوبی، به یکدیگر متصل می‌شوند. این روش‌ها به جوش کاری در فاز جامد موسوم هستند، که از آن جمله می‌توان، جوش کاری سرد (Cold Welding)، جوش کاری اصطکاکی (Friction Welding)، جوش کاری التراسونیک (Ultrasonic Welding)، جوش کاری نفوذی (Diffusion Welding) و جوش کاری انفجاری (Explosive Welding) را نام برد. در این روش‌ها به‌خاطر اینکه قطعات ذوب نمی‌شوند، تغییرات متالورژیکی کم‌تری در آنها به‌وجود می‌آید. از مزیت مهم روش جوش کاری انفجاری اینست که جوش کاری فلزات غیر هم‌جنس مانند تیتانیوم به فولاد، آلومینیوم به مس و... که به‌وسیله روش‌های دیگر مشکل و گاهی غیر ممکن است را با این روش به سهولت می‌توان انجام داد.

درک جوش کاری انفجاری به مسائل مرتبط بسیاری از جمله مواد منفجره، تأثیر مواد منفجره بر سطح فلزی که با آنها در تماسند، رفتار فلزات در سرعت بالا تحت اثر ضربه و... بستگی دارد. پوشش‌دهی انفجاری یکی از فرآیندهای اصلی در صنعت پوشش‌دهی فلزات است.

تولید صفحات مرکب برای استفاده در مخازن تحت فشار، مخازن شیمیایی و نیز صفحه لوله‌ها (tube plates) در مبدل‌های حرارتی و انجام می‌گیرد. این موارد کاربرد زیادی در صنایع دارند از آنجا که

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۱۱/۱۹ واصل، و پس از بازنگری‌های لازم، در تاریخ ۱۳۸۴/۲/۱۷ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر حسین بیسادی، استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران،  
[Bisadi@iust.ac.ir](mailto:Bisadi@iust.ac.ir)  
دکتر غلامحسین لیاقت، استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

دکتر ابوالفضل درویزه، استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان  
دکتر حسن مسلمی نائینی، دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

جنس همگن شده و مانند مصالح مهندسی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا نظیر تیرهای مرکب با استفاده از تغییر سطح مقطع با نسبت سفتی خمشی دو صفحه، سطح معادل محاسبه شکل ۱ و صفحه همگن یک جنس شده حاصل می‌شود سپس تحلیل‌ها و روابط مربوطه ارائه می‌گردد.

$$D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}$$

صلبیت خمشی<sup>۱</sup> (سفتی خمشی) ورق از رابطه:

به دست می‌آید [۱۱]. این مقدار به اندازه  $\frac{1}{1-\nu^2}$  یعنی حدود ده درصد از سفتی خمشی تیر بیش‌تر است.  $H$  ضخامت صفحه می‌باشد.

$\nu$  نسبت یا ضریب پواسون، برای تفکیک دو صفحه از زیرنویس ۱ و ۲ استفاده شده،

$D'$  نسبت سفتی خمشی صفحه پایه به صفحه پرنده:

$$D' = \frac{E_2 H_2^3 (1-\nu_1^2)}{E_1 H_1^3 (1-\nu_2^2)}$$

$I_e$  ممان اینرسی سطح معادل:

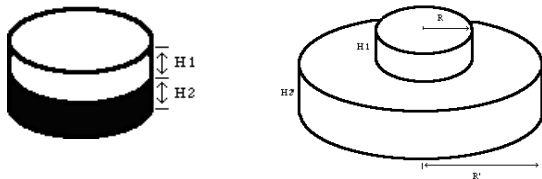
$$I_e = \frac{1}{12} D' H_2^3 + D' H_2 \left( \bar{Z} - \frac{H_2}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} H_1^3 + H_1 \left( \frac{H_1}{2} + H_2 - \bar{Z} \right)^2$$

$\bar{Z}$  فاصله تار خنثی از دورترین تار در قسمت کششی.

$D_e$  سفتی خمشی معادل:

$$D_e = \frac{E_1 I_e}{(1-\nu^2)} \quad (1)$$

$R'$  شعاع صفحه معادل صفحه اصلی تبدیل شده و  $R$  شعاع اولیه دو صفحه:  $R' = D'R$



شکل ۱. صفحه دایره‌ای دو جنسی و معادل یک جنسی آن

روابط گشتاورها و نیروها برای واحد طول صفحه نوشته می‌شوند و ارتباط آن با روابط تنش به شکل ذیل خواهند بود.  $H$  ضخامت کل و برابر جمع ضخامت‌های دو جنس مختلف می‌باشد.

$$\sigma_x = \frac{12M_x Z}{H^3}, \quad \sigma_y = \frac{12M_y Z}{H^3}, \quad \tau_{xy} = \frac{12M_{xy} Z}{H^3} \quad (2)$$

$Z$  مقدار متغیری است که فاصله هر تار را از تار خنثی نشان می‌دهد.

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  تنش برشی و تنش‌های نرمال در مختصات کارتزین.

به‌عنوان مثال استفاده از فولاد یا تیتانیوم به تنهایی در مخازن از لحاظ مقاومت و خواص مکانیکی و هزینه مقرون به‌صرفه نمی‌باشد، لذا پوششی از تیتانیوم بر روی صفحات فولادی به‌وسیله جوش کاری انفجاری قرار داده می‌شود که در ساخت مخازن کاربرد بسیار فراوانی دارد [5,6,7].

شکل‌دهی با استفاده از نیروهای دینامیکی در مقایسه با نیروهای استاتیکی مزایای قابل توجهی دارد. صرفه اقتصادی، امکان انجام عملیاتی که دستگاه‌های متداول قادر به انجام آن نیستند (انحنائی با قطر دوازده متر توسط مهندسين روسی)، ساخت نمونه یا محصولات با تعداد کم و... از جمله این مزایا هستند. می‌توان ویژگی‌های فرآیند شکل‌دهی انفجاری را به قرار زیر دسته‌بندی نمود:

۱- نرخ کرنش بالا

۲- بارگذاری آنی

۳- تغییر شکل پلاستیکی بزرگ

تحلیل دقیق فرآیند مستلزم در نظرگیری توأم هر سه مقوله فوق می‌باشد و این امری بسیار دشوار می‌باشد.

محققین تغییر شکل سریع غشاهای الاستیک-ویسکو پلاستیک نازک و کاملاً انعطاف‌پذیر را مورد ملاحظه قرار داده‌اند. اغلب محققان، بالاخص آن‌هایی که مساله را از دیدگاه نظری مورد مطالعه قرار می‌دهند توجه خود را معطوف به غشاهای مدور ساخته‌اند. شکل‌دهی آزاد ورق‌ها عملیات پیچیده‌ای است. شکل نهایی ورق به متغیرهای متعددی بستگی دارد:

ارتفاع هیدرواستاتیک (فاصله سطح آب تا ماده منفجره در انفجارهای زیر آب)، فاصله استقرار خرج، نوع و مقدار ماده منفجره، انعکاس موج شوک از دیواره‌های مخزن شکل‌دهی، شکل ماده منفجره، نوع محیط واسط و... [۸ و ۹]. فقط یک کار تجربی در خصوص هم‌زمانی عملیات جوش‌کاری و شکل‌دهی با دیدگاه میکروسکوپی موجود می‌باشد [10]. انجام این کار با ارائه تحلیل مکانیکی تحقیق جدیدی می‌باشد که هدف این مقاله است.

## ۲. روش تحلیل

روش تقریبی ارائه شده برای پیش‌بینی تغییر شکل و گسیختگی صفحات نامتجانس کار سخت، تحت اثر بارهای دینامیکی حاصل از انفجار با دو فرض زیر شکل می‌گیرد.

الف: رفتار صفحه‌ها در رابطه با تنش، کرنش تابع قانون توانی می‌باشد.

ب: تغییر شکل صفحه در امتداد قائم از تابع شکلی مشخصی تبعیت می‌نماید.

### ۱-۲. سفتی خمشی صفحه دو لایه غیر هم‌جنس

صفحه‌های دو جنسی کاربری فراوانی در صنایع مختلف دارند که برای ساده شدن تحلیل‌های مهندسی به روش زیر تبدیل به یک

<sup>۱</sup> Flexural Rigidity

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است می بایست مقدار بیشتری از جنس صفحه ضعیف تر به جای فلز قوی تر به کار رود تا همان نتیجه حاصل شود.

با استفاده از معادله (۶) انحناء شعاعی و مماسی (محیطی) دو قسمت ورق همگن شده جداگانه محاسبه می شود.

$$\left\{ \begin{aligned} (\kappa_r)_1 &= \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = \frac{2w_0}{R^2}, (\kappa_r)_2 = \frac{\partial^2 w}{\partial w^2} = \frac{2w_0}{R^2} = \frac{2w_0}{(DR)^2} \\ (\kappa_\theta)_1 &= \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{2w_0}{R^2}, (\kappa_\theta)_2 = \frac{2w_0}{R^2} = \frac{2w_0}{(DR)^2} \end{aligned} \right.$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_m + \varepsilon_{rb} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + z \kappa_r$$

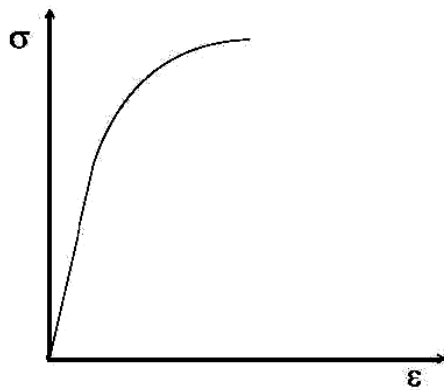
$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta b} = z \kappa_\theta \quad (7)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 = \frac{2w_0^2}{R^4} r^2$$

$\kappa_r, \kappa_\theta$  انحناء صفحه در جهت های مماسی (محیطی) و شعاعی و زیر نویس های ۱ و ۲ مشخص کننده صفحه پرنده و مینا می باشند. وقتی که جابجائی در صفحه قابل صرف نظر کردن می باشد به ترتیب کرنش غشائی شعاعی-کرنش خمشی شعاعی و کرنش خمشی محیطی می باشند.  $z$  مختصه عرضی (در امتداد قائم) می باشد.

فرض دوم: برای منظور کردن کرنش سختی (کار سختی) صفحه، رابطه تنش-کرنش مطابق شکل ۳ تابع قانون توانی زیر می باشد:

$$\sigma = \sigma_u \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)^n = \sigma_u \varepsilon^n \quad (8)$$



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش

$\sigma_u = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u^n}$  یک ثابت است و  $\varepsilon_u, \sigma_u$  تنش و کرنش نهایی کششی می باشند.

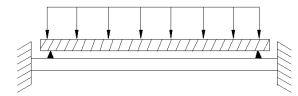
$M_x, M_y, M_{xy}$  گشتاورهای خمشی و پیچشی در واحد طول در مختصات کارتزین.

همان طور که ملاحظه می شود، تنش ها به ضخامت ورق ها بستگی دارند که به منظور رعایت آن ها و عدم تأثیر در محل سطح خنثی تغییر در بعد دیگر انجام شده است. واضح است که در این حالت مینا وسط ضخامت ورق نبوده بلکه مرکز شکل معادل به وجود آمده مبنای اندازه گیری خواهد بود و فاصله  $z$  که در امتداد ضخامت صفحه می باشد از آن جا تعیین می شود.

## ۲-۲. تحلیل شبه استاتیکی صفحه دایره ای با تکیه گاه گیردار

در توجیه و بررسی اتصال و شکل پذیری صفحه های نامتجانس از تشابه موجود فی مابین صفحه ها و تیرها استفاده شده و با روشی شبیه تحلیل تیرهای مرکب، صفحه نامتجانس تبدیل به یک صفحه معادل متجانس و با تبدیل بار ضربه ای به یک بار استاتیکی در مرکز صفحه روابط لازم ضمن به کارگیری روش انرژی استخراج گردیده است.

با استفاده از قالب، پشت بند قالب، پیچ ها و روپند قالب، تکیه گاه گیردار طراحی و به کار گرفته شده است (شکل ۲).



شکل ۲. تکیه گاه گیردار

اگر جرم صفحه اول (پرنده)  $m_1$  و جرم صفحه دوم (مینا)  $m_2$  باشد، جرم صفحه مرکب

$$m = m_1 + m_2 \quad (3)$$

با توجه به اصل بقای اندازه حرکت داریم [12,13,14]:

$$v_0 = \frac{I}{m} \quad (4)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{I^2}{2m} \quad (5)$$

$v_0$  سرعت اولیه ضربه،  $m$  جرم صفحه،  $E_k$  انرژی جنبشی حاصل از ضربه  $I$  به صفحه.

فرض اول: پروفیل جابجائی در امتداد قائم صفحه دایره ای در اثر ضربه ورودی تا حد گسیختگی اولیه (گسیختگی کششی) با استفاده از رابطه ذیل به دست آید [14]:

$$w = w_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$w$  جابجائی (جابجائی در امتداد قائم نقاط مختلف ورق وقتی صفحه افقی می باشد)،  $w_0$  جابجائی مرکز صفحه.  $r$  مختصه شعاعی متغیر نقاط مختلف صفحه،  $R$  شعاع صفحه.

ناگهانی (ضربه‌ای) تبدیل می‌شود به صفحه‌ای معادل با یک نیروی استاتیکی در مرکز آن، با جاگذاری در معادله آخر و مرتب کردن آن داریم:

$$F_e \delta w_0 = \frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_0}{(n+2)R^{2n}} \left[ \frac{\left(\frac{r}{z}\right)^{n+2} + (H_2 - \bar{z})^{n+2}}{(D)^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] w_0^{n+1} \delta v \quad (15)$$

$$+ \frac{2^{n+1}(2n+1)\pi\sigma_0}{(n+2)R^{2n}} \left[ \frac{H_2}{(D)^{2n-1}} + H_1 \right] w_0^{2n+2} \delta v$$

$$F_e = \frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_0}{(n+2)R^{2n}} \left[ \frac{\left(\frac{r}{z}\right)^{n+2} + (H_2 - \bar{z})^{n+2}}{(D)^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] (w_0)^n \quad (16)$$

$$+ \frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_0}{(n+2)R^{2n}} \left[ \frac{H_2}{(D)^{2n-1}} + H_1 \right] (w_0)^{2n+1}$$

تنها نیروی برشی همان نیروی معادل استاتیکی  $F_e$  می‌باشد، لذا:

$$F_e = F_s = F_U \left( \frac{\Delta}{\Delta_c} \right)^n$$

پس از استفاده از  $w_t = w_0 + \Delta$  و ترکیب با رابطه زیر، خواهیم داشت:

$$\Delta = \left( \frac{F_e}{F_u} \right)^{1/n} \Delta_c \quad (17)$$

$$w_t = w_0 + \left( \frac{F_e}{F_u} \right)^{1/n} \Delta_c$$

$$F_e w_0 = \frac{I^2}{2m} - (n+1)E_s, \sigma_0 = \frac{\sigma_u}{\epsilon_u^n}$$

$$\frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_u}{(n+2)R^{2n}\epsilon_u^n} \times \left[ \frac{\left(\frac{r}{z}\right)^{n+2} + (H_2 - \bar{z})^{n+2}}{(D)^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] (w_0)^{n+1} + \quad (18)$$

$$\frac{2^{n+2}(n+1)\pi\sigma_u}{(n+2)\epsilon_u^n R^{2n}} \left[ \frac{H_2}{(D)^{2n-1}} + H_1 \right] (w_0)^{2(n+1)} =$$

$$\frac{I^2}{2(\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2) \pi R^2} - (n+1)E_s$$

$w_0$  که به وسیله روابط بالا به دست می‌آید جابجائی نیروی معادل استاتیکی صفحه دایره‌ای شکل کار سخت شده تحت اثر بار ضربه‌ای (ناگهانی) گسترده یکنواخت می‌باشد

$$w_t = w_p = w_0 + \Delta \quad (19)$$

$w_p$  جابجائی عرضی مجاز حداکثر که شامل  $\Delta$  در تکیه‌گاه‌ها نیز می‌گردد.

انرژی تلف شده در تغییر شکل برشی تکیه‌گاه:

$$E_s = E_{CS} \left( \frac{F_e}{F_u} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (20)$$

$E_{CS}$  مقدار بحرانی  $E_s$  می‌باشد که باعث شکست صفحه می‌گردد.

$$E_{CS} = F_u \frac{\Delta_c}{n+1} \quad (21)$$

با استفاده از دو فرض فوق گشتاورهای خمشی شعاعی ( $M_r$ ) و محیطی ( $M_\theta$ ) در واحد طول به روش ذیل محاسبه می‌شود [۱۱].

$$M_r = \int \sigma_0 (z k_r)^n z dz \quad (9)$$

$$M_r = D' \int_0^{\bar{z}} \sigma_0 (z k_r)^n z dz + D' \int_0^{H_2 - \bar{z}} \sigma_0 (z k_r)^n z dz$$

$$+ \int_{H_2 - \bar{z}}^{H_1 + H_2 - \bar{z}} \sigma_r (z k_r)^n z dz$$

$$M_r = \frac{2^n \sigma_0 w_0^n}{(n+2)R^{2n}} \left[ \frac{\left(\frac{r}{z}\right)^{n+2}}{D^{2n-1}} + \frac{(H_2 - \bar{z})^{n+2}}{(D)^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] = M_\theta$$

مقدار گشتاور خمشی محیطی نیز شبیه عملیات فوق می‌باشد.

و مشابه آن نیروی غشائی شعاعی در واحد طول ( $N_r$ ) برابر است با:

$$N_r = \int_0^H \sigma_0 (\epsilon_m)^n dz, \quad H = H_1 + H_2$$

$$N_r = 2^n \sigma_0 \left( \frac{w_0}{R} \right)^{2n} \left( \frac{r}{R} \right)^{2n} \left[ \frac{H_2}{(D)^{4n-1}} + H_1 \right] \quad (10)$$

تنش برشی عرضی در تکیه‌گاه برابر مقدار:

$$\tau = \tau_u \left( \frac{\gamma}{\gamma_c} \right)^n \quad (11)$$

و یا نیروی برشی معادل آن:

$$F_s = F_U \left( \frac{\Delta}{\Delta_c} \right)^n \quad (12)$$

نیروی برشی بحرانی،  $F_u$  ( $F_u = 2\pi\sigma_U R \frac{H}{\sqrt{3}}$ ) تنش برش بحرانی و  $\tau_u$  تنش برش

بحرانی و  $F_s$  نیروی برشی عرضی می‌باشند.

$\Delta$  لغزش برشی و  $\Delta_c$  لغزش برشی بحرانی می‌باشند [14].

هنگامی که در تکیه‌گاه شکست برشی به وجود می‌آید، اگر از معیار تسلیم فون میسز استفاده شود مقدار لغزش برشی برابر با:

$$\Delta_c = \frac{\sqrt{3}}{8} \gamma_c H, \quad \Delta = \frac{\sqrt{3}}{8} \gamma H \quad (13)$$

که در آن  $\gamma_c, \gamma$  کرنش برشی و کرنش برشی بحرانی در لغزش برشی داخلی می‌باشند.

تحلیل کار سختی صفحه گیردار که تحت اثر بار ناگهانی با توزیع یکنواخت می‌باشد نیز با همین روش قابل انجام است [13,14].

با استفاده از اصل بقای انرژی، تغییر شکل حاصل از عوامل دینامیکی، معادل تغییر شکل نیروی استاتیکی می‌گردد.

$$F_e \delta w_t = F_s \delta \Delta + 2\pi \delta \int_0^R [M_r k_r + M_\theta k_\theta + N_r \epsilon_m] r dr \quad (14)$$

در حالی که  $F_e = \frac{\delta E_k}{\delta w_t}$  نیروی استاتیکی معادل بوده و

$w_t = \Delta + w_0$  جابجائی عرضی کل که شامل لغزش برشی در تکیه‌گاه نیز می‌باشد. بنابراین مسئله صفحه دایره‌ای گیردار تحت اثر بار

۲-۴. تحلیل شبه استاتیکی صفحه دایره‌ای با تکیه‌گاه آزاد  
 به‌منظور ارضاء شرایط مرزی صفحه روی تکیه‌گاه آزاد شکل ۴ تغییر  
 شکل صفحه را تابع معادله ذیل فرض می‌کنیم و مشابه روش فوق  
 عملیات را انجام می‌دهیم [16].

$$w = \frac{w_0}{2} \left[ 2 - \frac{r}{R} - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (24)$$

$$\left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 = \frac{w_0^2}{4R^2} \left( 1 + \frac{2r}{R} \right)^2$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = -\frac{w_0}{R^2}$$

$$\begin{cases} k_r = -\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = \frac{w_0}{R^2} \\ k_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{1}{r} \left[ \frac{w_0}{2R} \left( 1 + \frac{2r}{R} \right) \right] \end{cases}$$

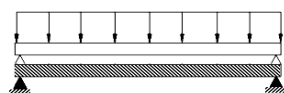
$$\begin{cases} \varepsilon_r = \varepsilon_{rb} = +zk_r = \frac{w_0}{8R^2} \left( 1 + \frac{2r}{R} \right)^2 + \frac{w_0}{R^2} z \\ \varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta b} = zk_\theta = \frac{z}{r} \left[ \frac{w_0}{2R} \left( 1 + \frac{2r}{R} \right) \right] \end{cases}$$

$$M_r = \int \sigma_0 (zk_r)^n dz \quad (25)$$

$$M_r = D \int_0^{\bar{z}} \sigma_0 (zk_r)^n dz + D \int_0^{H_2 - \bar{z}} \sigma_0 (zk_r)^n dz +$$

$$\int_{H_1 + H_2 - \bar{z}}^{H_1 + H_2} \sigma_0 (zk_r)^n dz$$

$$M_r = \frac{\sigma_0 w_0^n}{(n+2)R^{2n}} \left[ \frac{(\bar{z})^{n+2}}{(D)^{2n-1}} + \frac{(H_2 - \bar{z})^{n+2}}{(D)^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right]$$



شکل ۴. تکیه‌گاه آزاد

مقدار گشتاور خمشی محیطی نیز شبیه عملیات فوق به‌دست می‌آید.

$$M_\theta = \int \sigma_\theta z dz$$

$\varepsilon_{of}$  را می‌توان کرنش گسیختگی مؤثر جنس صفحه با تأثیر برش  
 عرضی منظور نمود [13,14].

$$\varepsilon_{of} = 2 \times \left( \frac{w_{of}}{R} \right)^2 \quad (22)$$

$w_{of}$  جابجائی عرضی بحرانی هنگام گسیختگی صفحه که با استفاده  
 از  $\varepsilon_f$  کرنش گسیختگی یک محوری محاسبه خواهد شد.

### ۲-۳. کرنش گسیختگی مؤثر

برای صفحه گیردار دایره‌ای تحت اثر بار گسترده ضربه‌ای، فرض  
 معقول زیر پذیرفته است [15,14]:

$$\varepsilon_z = -(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta), \gamma_{rz} \neq 0, \gamma_{z\theta} = \gamma_{\theta r} = 0$$

مقدار کرنش مؤثر برابر با:

$$\varepsilon_e^2 = \frac{2}{9} \left[ (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{rz}^2 + \gamma_{z\theta}^2 + \gamma_{\theta r}^2) \right]$$

پس از جاگذاری مقادیر فوق:

$$\varepsilon_e^2 = \frac{4}{3} \left[ \varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_r \varepsilon_\theta \right] + \frac{\gamma_{rz}^2}{3}$$

$$\varepsilon_e^2 = 16 \left[ \frac{w_0^4}{3R^8} (r)^8 + \frac{w_0^3}{R^6} (r)^4 + \frac{w_0^2 (\bar{z})^2}{R^4} \right] + \frac{\gamma^2}{3}$$

چون

$$\left( \frac{\gamma}{\gamma_c} \right)^n = \frac{\tau}{\tau_u} = \frac{F_s}{F_u}, F_s = F_e, F_u = 2\pi\sigma_u RH \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\gamma = \gamma_c \times \left( \frac{F_e}{F_u} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\varepsilon_e^2 = 16 \left[ \frac{w_0^4}{3R^8} (r)^8 + \frac{w_0^3}{R^6} (r)^4 + \frac{w_0^2 (\bar{z})^2}{R^4} \right]$$

$$+ \frac{\gamma_c^2}{3} \left[ \frac{\sqrt{3} F_e}{2\pi\sigma_u RH} \right]^{\frac{2}{n}}$$

لازم به ذکر است که اگر به جای  $\bar{z}$  مقدار  $(H - \bar{z})$  را قرار دهیم  
 کرنش مؤثر در ناحیه فشاری به‌دست می‌آید.

اگر کرنش مؤثر برابر کرنش گسیختگی یک محوری جنس صفحه  
 شود، صفحه گسیخته شده و در این صورت مقدار  $w_0 = w_{of}$  خواهد  
 شد.

$$\varepsilon_f^2 = 16 \left[ \frac{w_{of}^4}{3R^8} (r)^8 + \frac{w_{of}^3}{R^6} (r)^4 + \frac{w_{of}^2 (\bar{z})^2}{R^4} \right] \quad (23)$$

$$+ \frac{\gamma_c^2}{3} \left[ \frac{\sqrt{3} F_e}{2\pi\sigma_u RH} \right]^{\frac{2}{n}}$$

قبلاً مقدار  $F_e$  محاسبه شده، لذا با توجه به اینکه  $\sigma_u$  تنش نهائی  
 جنس با استحکام کمتر می‌باشد مقدار  $w_{of}$  به‌عنوان معیاری برای  
 گسیختگی صفحه به‌دست خواهد آمد.

### ۳. آزمایش‌های عملی

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق دو هدف را مورد توجه داشته است. اولی تعیین محدوده جوش‌های قابل قبول برای جنس‌های متفاوت و دومی به دست آوردن سرعت صفحه پرنده که با استفاده از آن تعیین میزان ضربه امکان پذیر گردد.

#### ۳-۱. تجهیزات مورد استفاده

الف) دستگاه موجود در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه تربیت مدرس که همراه با ملحقات قادر است انفجار تا حدود نیم کیلو TNT را تحمل نموده و انواع آزمایش‌های انفجاری (شکل‌دهی، جوش کاری، سوراخ کاری، حکاکی و...) در آن قابل انجام است شکل ۵.

ب) وسایل اندازه‌گیری و برش نظیر خط‌کش فلزی، کولیس، قیچی آهن‌بر، سنگ برش و قیچی معمولی.

ج) اسپلوسکوپ آنالوگ/دیجیتال Hamey با مشخصات Hm 15.7, 150 MHZ

د) وسایل الکتریکی شامل هویه، ولت متر، سیم چین و...



شکل ۵. دستگاه شکل‌دهی و جوش کاری انفجاری

#### ۳-۲. آزمایش‌های انجام شده

با توجه به تسهیلات فراهم شده حدود پنجاه آزمایش با استفاده از سه نوع مواد منفجره دینامیت، TNT،  $C_4$  و به کارگیری صفحه‌های ارزان و فراوان فولاد، آلومینیوم و مس انجام شده، در این آزمایش‌ها دو نوع تکیه‌گاه مورد توجه بوده است:

##### الف) تکیه‌گاه ساده

در این حالت صفحه پایه بدون هیچ‌گونه مهاریه روی قالب و پشت-بند قالب قرار گرفته و صفحه پرنده به همراه سپر حفاظتی مقوائی که مواد منفجره رویش توزیع شده با استفاده از یونولیت برای ایجاد فاصله لازم قرار گرفته و پس از انفجار صفحه مرکبی نظیر شکل (۶-ا) که از اتصال آلومینیوم به مس، بدون هیچ عمل تکمیلی حاصل می‌گردد.

$$M_{\theta} = D' \int_0^{\bar{z}} \sigma_0(zk_{\theta})^n z dz + D' \int_0^{H_2-\bar{z}} \sigma_0(zk_{\theta})^n z dz + \int_{H_1+H_2-\bar{z}}^{H_2-\bar{z}} \sigma_0(zk_{\theta})^n z dz \quad (26)$$

$$M_{\theta} = \frac{\sigma_0 w_0^2 D'}{2(n+2)r^{2n}} \left[ 1 + \frac{2r}{DR} n \left[ \left(\frac{\bar{z}}{r}\right)^{n+2} + (H_2 - \bar{z})^{n+2} + (H_1)^{n+2} \right] \right]$$

و مشابه آن نیروی غشائی شعاعی در واحد طول ( $N_r$ ) محاسبه می‌گردد.

$$N_r = \int_0^H \sigma_0(\epsilon_m)^n dz, \quad H = H_1 + H_2$$

$$N_r = D' \int_0^{H_2} \sigma_0 \left[ \frac{1}{8} \left(\frac{w_0}{D'R}\right)^2 \left(1 + \frac{2r}{D'R}\right)^2 \right]^n dz +$$

$$\int_{H_2-\bar{z}}^{H_1+H_2-\bar{z}} \sigma_0 \left[ \frac{w_0^2}{8R^4} \left(1 + \frac{2r}{R}\right)^2 \right]^n dz$$

$$N_r = \frac{\sigma_0 w_0^{2n}}{2^{3n} R^{2n}} \left(1 + \frac{2r}{R}\right)^{2n} \left[ \frac{H_2}{(D')^{2n-1}} + H_1 \right] \quad (27)$$

بنابراین مشابه حالت قبلی مسئله صفحه دایره‌ای با تکیه‌گاه آزاد تحت اثر بار ناگهانی (ضربه‌ای) تبدیل می‌شود به صفحه‌ای معادل با یک نیروی استاتیکی در مرکز آن، با جاگذاری در معادله آخر و مرتب کردن آن:

$$F_e = \frac{\pi(n+1)\sigma_0}{(n+2)R^{2n}} \left[ \left(\frac{\bar{z}}{D'}\right)^{n+2} + \frac{(H_2 - \bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] \times$$

$$\left[ 1 + \frac{D'}{2(1-2n)} + \frac{(1+n)}{2(1-n)} + \frac{(2n)}{D'(3-2n)} \right] w_0^n +$$

$$\frac{(n+1)\pi\sigma_0}{3 \times 2^{3n+2} R^{2n}} \left\{ \left[ 3 + 2^{n+1}(n+1) \left[ \frac{H_2}{(D')^{2n-1}} + H_1 \right] \right] \right\} (w_0)^{2n+1}$$

$$F_e w_0 = \frac{I^2}{2m} - (n+1)E_s, \quad \sigma_0 = \frac{\sigma_u}{\epsilon_u^n}$$

$$\frac{(n+1)\pi\sigma_u}{(n+2)R^{2n}\epsilon_u^n} \left[ \left(\frac{\bar{z}}{D'}\right)^{n+2} + \frac{(H_2 - \bar{z})^{n+2}}{(D')^{2n-1}} + (H_1)^{n+2} \right] \times$$

$$\left[ 1 + \frac{D'}{2(1-2n)} + \frac{(1+n)}{2(1-n)} + \frac{(2n)}{D'(3-2n)} \right] (w_0)^{n+1}$$

$$+ \frac{(n+1)\pi\sigma_u}{3 \times 2^{3n+2} \epsilon_u^n R^{2n}} \left\{ \left[ 3 + 2^{n+1}(n+1) \left[ \frac{H_2}{(D')^{2n-1}} + H_1 \right] \right] \right\} (w_0)^{2n+1} \quad (28)$$

$$= \frac{I^2}{2(\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2) R^2} - (n+1)$$

مراحل انجام آزمایش به شرح ذیل می باشد:

آماده سازی نمونه ها

اتصال صفحات غیر هم جنس و شکل دهی هم زمان

آزمایش تعیین سرعت و محاسبه ضربه

آزمایش جوش کاری و شکل دهی با قالب و بدون قالب

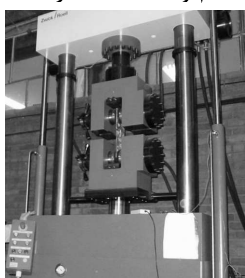
آزمایش تعیین خواص مکانیکی فلزات



شکل ۶-آ. اتصال آلومینیوم به مس در تکیه گاه آزاد

### ۳-۳. آزمایش تعیین خواص مکانیکی صفحه ها

تحلیل صفحه های متصل شده و شکل گرفته در اثر ضربه نیاز به تعیین خواص هر کدام از فلزات مورد استفاده قبل از آزمایش خواهد داشت به همین منظور با استفاده از دستگاه Amsler مدل H A 500 شکل ۷ واقع در آزمایشگاه خستگی دانشگاه علم و صنعت ایران، آزمایش های مربوطه انجام و مشخصات فلزات ثبت شد.



شکل ۷. دستگاه تعیین خواص مکانیکی اجسام

### ۳-۴. نتایج آزمایش ها

آزمایش های انجام شده در سه گروه با قالب (گیردار و آزاد) بدون قالب (جوش کاری و شکل دهی با چروک بیشتر انجام می شود) و تعیین سرعت برنامه ریزی و انجام گردیده است که حاصل تعدادی از آزمایش های عملی انجام شده در دو جدول شماره ۱ و ۲ تدوین شده است.

#### توضیح:

۱- صفحه محافظ یا سپر حفاظتی برای کلیه آزمایش ها مقوای کارتنی به کار گرفته شده.

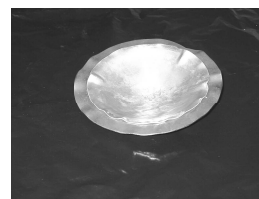
۲- محل نصب چاشنی در تمام آزمایش ها وسط صفحه محافظ بوده است.

۳- ورق های استفاده شده برای منظور جوش کاری و شکل دهی همه گرد بوده اند. صفحات مینا در هر دو تکیه گاه گیردار و ساده دارای قطر ۲۱ سانتی متر و ضخامت متغییر از ۱ تا ۳ سانتی متر بوده و صفحه پرنده در تکیه گاه آزاد همان ۲۱ و در گیردار به دلیل استفاده از روبند قالب برابر ۱۲ تا ۶ سانتی متر بوده است.

۴- دانسیته دینامیت برابر ۱/۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب با تغییر ۰/۵۰ و سرعت انفجار حداقل ۳۰۰۰ متر بر ثانیه و TNT که به صورت پودر مورد استفاده قرار گرفته است، دانسیته یک گرم بر سانتی متر مکعب و سرعت انفجار ۴۸۰۰ متر بر ثانیه می باشد.

### (ب) تکیه گاه با لبه گیردار

دور تا دور لبه صفحه پایه بین دو قطعه روبند و پشت بند قالب قرار گرفته و با هشت عدد پیچ و مهره محکم شده سپس صفحه پرنده که قطر کوچک تری از صفحه پایه دارد به همراه سپر حفاظتی و مواد منفجره با فاصله ایجاد شده توسط یونولیت روی آن قرار گرفته و پس از انفجار دو صفحه به هم متصل و به شکل قالب زیرشان در می آیند، شکل (۶-ب) صفحه مرکب آلومینیومی فولادی بدون هیچ عملیات اضافی تکمیلی نظیر برش کاری را نشان می دهد. صفحه پرنده در هر دو تکیه گاه آزاد و گیر دار بدون هیچ قیدی روی یونولیت و بصورت آزاد روی صفحه مینا قرار می گیرد.



شکل ۶-ب. اتصال آلومینیوم به فولاد با سه چروک در تکیه- گاه گیردار

### (پ) آزمایش تعیین سرعت

برای اندازه گیری سرعت صفحه پرنده به منظور تعیین میزان ضربه در برخورد دو صفحه از روش پین گذاری استفاده و با توجه به اینکه طول پین ها معلوم بوده و زمان تماس صفحه با آن ها نیز توسط اسیلوسکپ اندازه گیری می گردد سرعت صفحه محاسبه می شود. شکل (۶-پ) طریقه قرار گرفتن اجزاء شامل چاشنی، مواد منفجره، صفحه پرنده، پین ها، صفحه پلاستیکی و ارتباط با اسیلوسکپ را نشان می دهد.



شکل ۶-پ. طریقه قرار گرفتن اجزاء در آزمایش تعیین

سرعت

جدول ۱. تدوین آزمایش جوش کاری و شکل دهی انفجاری

ردیف	نوع آزمایش	جنس ورق ها و مشخصات هندسی		نوع ماده منفجره	مقدار ماده منفجره	جرم صفحه پرنده	فاصله قرار mm	ضربه N-S	نتیجه و ملاحظات
		(۱)	(۲)						
۱	گیردار	مس	فولاد	دینامیت	۴۵ گرم	۱۱۲ گرم	۱	۴	به علت کمبود دینامیت شکل دهی انجام شد
۲	گیردار	مس	فولاد	دینامیت	۹۰	۱۱۲	۱	۱۴	اتصال انجام، صفحه پرنده کمی چروک شد
۳	آزاد	فولاد	آلومینیوم	دینامیت	۶۰	۳۵	۱	۱۲	اتصال مناسب انجام شد
۴	آزاد	فولاد	آلومینیوم	دینامیت	۱۳۵	۵۹	۲	۲۱	نا موفق
۵	آزاد	فولاد	آلومینیوم	دینامیت	۱۳۵	۵۹	۲	۲۱	صفحه ها در مرکز گسیخته شد، ورق محافظ مقوایی در جای نصب چاشنی سوراخ بود
۶	آزاد	فولاد	آلومینیوم	TNT	۸	۵۴	۱/۵	۹	فقط شکل دهی انجام و اتصالی بوجود نیامد
۷	آزاد	فولاد	آلومینیوم	TNT	۱۷	۵۴	۲	۱۸	اتصال به شکل موفق انجام شد
۸	گیردار	فولاد	آلومینیوم	TNT	۱۴	۳۰	۱	۱۰	قالب ۹۰ و پرنده همراه پایه به شعاع ۳ جدا شد

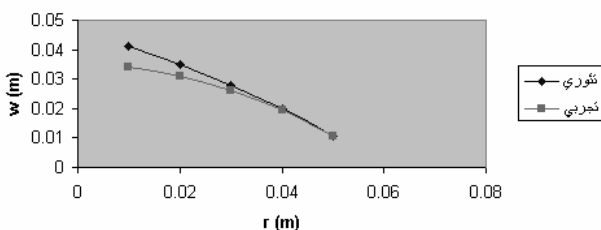
جدول ۲. آزمایش تعیین سرعت صفحه پرنده

ردیف	نوع پین	جنس صفحه جرم صفحه بر حسب گرم	ارتفاع پین ها بر حسب میلی متر					جرم مواد بر حسب گرم	فاصله افقی پین ها بر حسب میلی متر				سرعت بر حسب متر بر ثانیه	ملاحظات
			۱	۲	۳	۴	۵		۲۶۱	۳۶۲	۴۶۳	۵۶۴		
۱	سوزن ته گرد	آلومینیوم - ۳۷	۲۱	۱۸	۱۵	۱۲	۹	۴۱	۱۲	۹	۹	۶۰۰	غیر قابل قبول	
۲	سوزن ته گرد	فولادی - ۱۵۲	۱۵	۱۲	۹	۶	۳	۴۱	۱۲	۹	۹	-	نتیجه غیر قابل قبول	
۳	آلومینیومی بلند	فولادی - ۱۵۲	۱۸	۱۳	۷	۳	-	۴۱	۴۱	۴۱	-	۱۶۰	روش بهینه شده	
۴	آلومینیومی بلند	آلومینیوم - ۹۱	۱۹	۱۱	۸،۵	۴،۵	-	۵۰	۵۰	۵۰	-	-	نا موفق	
۵	آلومینیومی بلند	آلومینیوم - ۹۱	۱۵	۱۱	۷،۵	۲،۵	۱،۵	۴۰	۴۰	۴۰	۴	۴۰۰	مواد در سطح ۱۲۰×۸۰	
۶	آلومینیومی بلند	آلومینیوم - ۴۵	۱۷	۱۵	۲،۵	-	-	۵۰	۲۵	-	-	۳۴۵ تا ۲۰۰	حداقل 125 μs خطا در اندازه گیری	
۷	آلومینیومی بلند متقارن نسبت به مرکز دایره در امتداد یک قطر	فولادی - ۱۵۲ برای تعیین تغییر شکل صفحه	۱۸	۱۶	۱۶	۱،۸	۲۱۰ دینامیت	۴۰ شماره ۱	۴۰	۴۰	۳ تا ۳	۲۸۶	تغییر شکل متقارن، انتهای حرکت پله ایجاد شده، کمی تفاوت در زمان برخورد	
۸	آلومینیومی بلند روی نقاط متقارن نسبت به مرکز دایره در امتداد یک قطر	آلومینیوم - ۵۴ صفحه پایه فولاد به جرم ۱۵۲ گرم	۴۵	۳۲	۳۲	۱۲	۷۵ دینامیت	۴۰ شماره ۱	۴۰	۴۰	۳ تا ۳	۱۶۸ برای تغییر شکل صفحه مرکب	ابتدا دو صفحه بدون قالب بهم متصل شده سپس تغییر شکل داده	



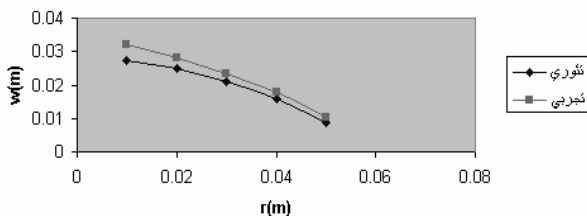
تئوری در مخرج کسر می باشد مقدار را بزرگ می دهد و خطا مشخص می گردد و در مابقی نقاط تطبیق قابل قبولی دارد، منحنی عملی از شعاع چهل به بعد به علت به وجود آمدن تنش فشاری در آن ناحیه چروک را نشان می دهد در حالی که مدل تئوری چروک را به دلیل نوع رابط مرتبط به کرنش پیش بینی نمی نماید. در شکل ۱۰ کرنش در امتداد ضخامت برای صفحه مرکب فولادی آلومینیومی با استفاده از مدل تحلیلی ارائه و با حاصل تجربی مقایسه شده که در ناحیه وسط ورق به دلیل کم بودن مقدار شعاع خطا زیاد و در مابقی نقاط شعاعی مقادیر قابل پذیرشی ارائه گردیده است.

جابجائی نقاط مختلف صفحه مرکب آلومینیومی - فولادی با تکیه گاه ساده در امتداد قائم نسبت به شعاع با ضربه ۲۷ نیوتن - ثانیه



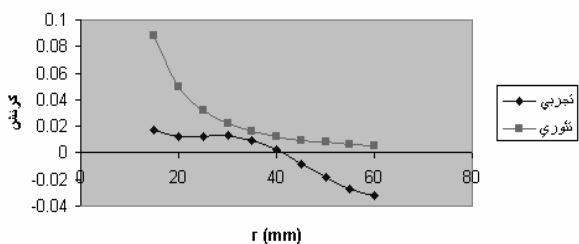
شکل ۸- الف. جابجائی نقاط مختلف صفحه نسبت به شعاع با تکیه گاه ساده

جابجائی نقاط مختلف صفحه مرکب آلومینیومی- فولادی با لبه گیردار در امتداد قائم نسبت به شعاع با ضربه ۳۰ نیوتن - ثانیه



شکل ۸- ب. جابجائی نقاط مختلف صفحه نسبت به شعاع با تکیه گاه گیردار

منحنی کرنش محیطی صفحه مرکب فولادی و آلومینیومی



شکل ۹. مقایسه کرنش های محیطی تجربی و تحلیلی

#### ۴. مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی

مواردی نظیر جابجائی نقاط مختلف صفحه، سرعت صفحه پرنده و کرنش ها را می توان در دو حالت تحلیلی و تجربی مقایسه نمود. سرعت صفحه پرنده با روش قسمت ۲-۳ اندازه گیری شده و در نتیجه سرعت مورد نیاز صفحه پرنده برای جوش کاری و اتصال مناسب دو فلز نرم مثل آلومینیوم و مس در محدوده ی فی مابین ۲۸۰-۳۹۰ و اگر یکی از آن ها سخت باشد محدوده افزایش یافته و از ۳۱۰-۴۶۰ متر بر ثانیه خواهد بود. اگر خواص مکانیکی ثبت شده را در رابطه

$$V_{Pmin} = \left(\frac{\sigma_u}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

که حد اقل سرعت را ارائه می کند قرار دهیم، نتیجه انطباق خوبی مقادیر تجربی دارد،

$V_{pmin}$ : حداقل سرعت مجاز،  $\sigma_u$  استحکام کششی نهایی و  $\rho$ : جرم مخصوص می باشد.

لازم به ذکر است که این رابطه برای هر دو جنس محاسبه می گردد و سرعت بزرگ تر انتخاب و از روی آن با استفاده از رابطه هو گونیوت حداقل فشار برای فلزات غیر هم جنس از رابطه:

$$P = P_f = P_b = \frac{\rho_f V_p V_{sf}}{1 + (\rho_f V_{sf}) (\rho_b V_{sb})}$$

محاسبه می گردد (اندازه گیری عملی فشار با وسایلی نظیر پیزومترها امکان پذیر می باشد). که

$V_{sf}$ : سرعت صوت در صفحه پرنده

$\rho_f$ : چگالی صفحه پرنده

$V_{sf}$ : مقاومت صوتی

$V_p$ : سرعت صفحه پرنده

$V_{sb}$ : سرعت صوت در صفحه مبنا

می باشد.

نکته قابل توجه در این قسمت عدم تفکیک انرژی جوش کاری و شکل دهی می باشد، اگر با در نظر داشتن مطالب فوق و تعیین سرعت از جنبه عملی بررسی نمائیم، تنها انرژی جنبشی موجود حاصل حرکت صفحه پرنده در اثر تأثیر موج انفجار می باشد، در این صورت محاسبه ارتفاع نقطه وسط ورق با استفاده از فرمول ارائه شده هماهنگی قابل قبولی با نتیجه عملی دارد. شکل های (۸-ا و ب) مقایسه فی مابین نتیجه حاصل از فرمول و تجربه را نشان می دهد، ابتدا مقدار  $w_0$  از رابطه های (۱۸) و (۲۸) محاسبه و سپس با استفاده از رابطه های (۶) و (۲۴) منحنی تئوری رسم و با تجربی مقایسه شده است.

در شکل ۹ کرنش محیطی صفحه مرکب فولادی آلومینیومی با استفاده از مدل تحلیلی ارائه و با حاصل تجربی مقایسه شده که در ناحیه وسط ورق به جهت اینکه شعاع کوچک می شود و در معادله

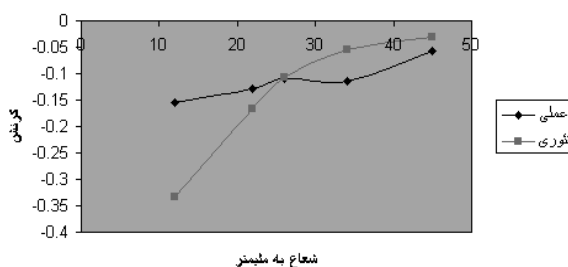
### ۵. بحث پیرامون نتایج

ورق مورد استفاده از صفحه‌های نازک و با جنس‌های متفاوت می‌باشند، برای تعیین حد گسیختگی از سه نوع قالب مخروطی با زوایای ۱۲۰، ۹۰ و ۶۰ درجه استفاده شده است، قالب‌های ۹۰ و ۶۰ درجه به منظور امکان ایجاد کرنش بیش‌تر پیش‌بینی شده ولی عملاً ورق‌های نازک با ضخامت حدود یک میلی‌متر روی قالب‌های ۹۰ و ۶۰ درجه قبل از این‌که جوش مناسب قابل‌قبولی داشته باشند در اثر تغییر شکل زیاد در امتداد قائم گسیخته می‌گردند ولی نتایج به‌دست آمده با قالب ۱۲۰ درجه هماهنگی قابل‌قبولی با نتایج تحلیلی دارد، مقایسه‌ای به‌صورت شکل شماره (۸-الف) برای ضربه مشخص ۲۷ نیوتن ثانیه در تکیه‌گاه گیردار و (۸-ب) با ضربه ۳۵ برای تکیه‌گاه ساده ارائه گردیده است.

در شکل (۱۱-آ و ب) نیز جابجائی نقطه وسط ورق برای هر دو تکیه‌گاه گیردار و ساده در چند نوبت محاسبه و با مقدار تجربی مقایسه شده است. ملاحظه می‌گردد درصد خطا برای هر دو حالت قابل‌قبول می‌باشد؛ البته با توجه به تابع شکلی در نظر گرفته شده برای هر حالت نتیجه برای تکیه‌گاه آزاد بیشتر از مقدار واقعی و تکیه‌گاه گیردار کمتر از آن می‌باشد.

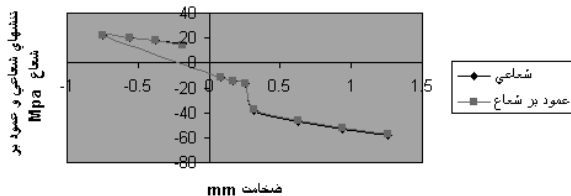
در شکل (۱۲-آ و ب) با استفاده از روش ارائه شده و نتایج حاصل نمودارهای تنش‌های شعاعی و عمود بر امتداد شعاع برای ورق با لبه گیردار و تکیه‌گاه ساده مقایسه شده، در حالت گیردار مقادیر آن‌ها مساوی و در تکیه‌گاه ساده چون از دو جمله‌ای نیوتن برای محاسبه استفاده شده و تا دو جمله اول تقریب زده شده جواب مختصری تفاوت دارد.

کرنش در امتداد ضخامت صفحه مرکب فولادی و آلومینیومی



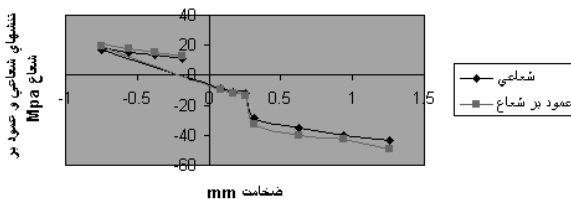
شکل ۱۰. مقایسه کرنش‌های عملی و تحلیلی در امتداد ضخامت

نمودار تنش‌های شعاعی و عمود بر شعاع نسبت به ضخامت در صفحه مرکب آلومینیومی - فولادی با لبه گیر دار



شکل ۱۲-آ. تنش‌های شعاعی و عمود بر شعاع در صفحه با لبه گیردار نسبت به ضخامت

نمودار تنش‌های شعاعی و عمود بر شعاع نسبت به ضخامت در صفحه مرکب آلومینیومی - فولادی با تکیه‌گاه ساده



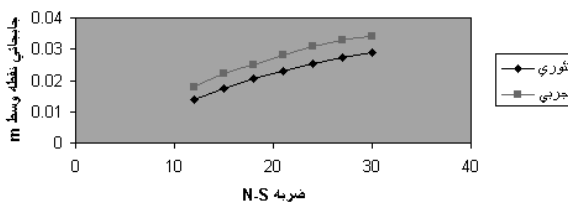
شکل ۱۲-ب. تنش‌های شعاعی و عمود بر شعاع در صفحه با تکیه‌گاه ساده نسبت به ضخامت

### ۶. نتیجه‌گیری

مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله منجر به روابط ضربه و جابجائی در امتداد قائم برای تکیه‌گاه‌های گیردار و ساده شد که مقدار ضربه را به جابجائی نقطه وسط ورق در امتداد قائم مرتبط می‌سازد. با در نظر گرفتن خواص مکانیکی و عوامل هندسی ورق می‌توان حالت بحرانی یعنی گسیختگی صفحه را پیش‌بینی نمود.

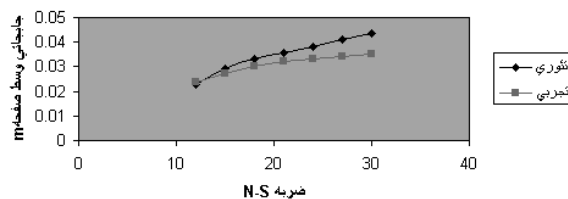
ابتدا پارامترهای اصلی نظیر سرعت و فشار مشخص شده و سپس روابط ضربه و جابجائی در امتداد قائم برای تکیه‌گاه‌های گیردار و ساده معین گردیده که مقدار ضربه را به جابجائی نقطه وسط ورق

نمودار ضربه - جابجائی نقطه وسط صفحه مرکب آلومینیومی- فولادی با لبه گیردار



شکل ۱۱-آ. جابجائی نقطه وسط صفحه مرکب آلومینیومی فولادی نسبت به ضربه با لبه گیردار

نمودار ضربه - جابجائی نقطه وسط صفحه مرکب آلومینیومی- فولادی با تکیه‌گاه ساده



شکل ۱۱-ب. جابجائی نقطه وسط صفحه مرکب آلومینیومی فولادی نسبت به ضربه با تکیه‌گاه آزاد

کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۷۹۳-۱۳۸۱، ۸۰۱.

[10] Raghukandan, "An Experimental Investigation on the Effect of  $h/D$  Ratio on Dynamic Form-Cladding of Domes", Journal of Materials processing technology 63, 1994, pp. 55-59.

[۱۱] رحیمی شعراف غ، تنش در ورق‌ها و پوسته‌ها، نشر دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۷۵.

[12] Wen H. M., Reddy T. Y. and Reid S. R., "Deformation and failure of clamped beams under low speed impact loading", Int. J. Impact Eng., 1995, 16(3), pp. 435-454.

[13] Wen H. M., Reddy T. Y., "A note on the clamped circular plates under impulsive loading," Mech. Struct. & Mach., 1995, 23(3), pp. 331-342.

[14] Wen H. M., "Deformation and tearing of clamped work-hardening beams subjected to impulsive loading", Int. J. Impact Eng., 1996, 18(4), pp. 425-433.

[15] Wen H. M., "Deformation and tearing of clamped circular work-hardening plates under impulsive loading", Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 75, 1998, pp. 67-73.

[16] Teeling-Smith R. G., Nurick G. N., "The deformation and tearing of thin circular plate subjected to impulsive loading", Int. J. Impact Eng., 1991, 11, pp. 77-91.

### پیوست

#### فهرست علائم

$D$  صلبیت خمشی  
 $D_e$  سفتی خمشی معادل  
 $D'$  نسبت سفتی خمشی صفحه پایه به صفحه پرنده  
 $E_k$  انرژی جنبشی  
 $E_S$  انرژی تلف شده در تغییر شکل برشی تکیه گاه،  $E_{CS}$  مقدار بحرانی  
 $F_e$  نیروی استاتیکی معادل  
 $F_s$  نیروی برشی عرضی  
 $F_u$  نیروی برشی بحرانی  
 $H$  ضخامت صفحه  
 $I$  ضربه  
 $I_e$  ممان اینرسی سطح معادل  
 $m$  جرم صفحه مرکب  
 $m_1$  جرم صفحه اول (پرنده)،  $m_2$  جرم صفحه دوم (مبنا)  
 $M_x, M_y, M_{xy}$  گشتاورهای خمشی و پیچشی در واحد طول در مختصات کارتزین  
 $M_\theta, m, r$  گشتاورهای خمشی شعاعی و محیطی در واحد طول  
 $Nr$  نیروی غشائی شعاعی در واحد طول

در امتداد قائم مرتبط می‌سازد. برای تکیه‌گاه ساده اندازه جابجایی در امتداد قائم که با روش ارائه شده پیش‌بینی می‌گردد مقداری از اندازه تجربی بیشتر و برای گیردار مقداری کمتر از تجربی می‌باشد. به‌جز عملیات مربوط به اتصال آلومینیوم و فولاد مابقی عملیات شکل‌دهی و جوش کاری روی جنس‌های مس با آلومینیوم و مس با فولاد با انرژی در حد انرژی لازم برای جوش کاری انجام می‌شود. در بررسی انجام شده مشخص گردیده که تحلیل خمشی بدون اثر تنش برشی برای صفحه‌های نازک جواب قابل‌قبولی خواهد داد. تحلیل ارائه شده به تعداد صفحه‌ها بستگی ندارد و لذا امکان استفاده از آن برای بیشتر از دو صفحه و نیز هندسه غیر دایره‌ای وجود دارد.

### مراجع

[۱] لیاقت غ. و جواب‌ور د، "اثر ورق گیر در کنترل چروکیدگی مخروط و بررسی تحلیلی و تجربی آن در شکل‌دهی انفجاری"، نشریه علمی- پژوهشی امیر کبیر، شماره ۵۲، پاییز ۱۳۸۱.

[2] A. F. Darvizeh, G. H. Liaghat, M. D. Nouri " TWO DIMENSIONAL FE SIMULATION OF HIGH RAYE DEFORMATION OF TUBE IN EXPLOSIVE WELDING PROCESS" IUST. INT.J.NO.1,V.15,2004.

[۳] لیاقت غ. و جواب‌ور د، "بررسی تئوریک و معرفی فرآیند برش کاری و سوراخ‌کاری انفجاری"، ششمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۵۱۵-۱۵۲۲، اردیبهشت ۱۳۷۷.

[۴] بیسادی ح، لیاقت غ، مسلمی نائینی ح، "تحلیل بارگذاری دینامیکی صفحات بانرخ کرنش بالا"، دهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۱، ۲۵-۱۷.

[5] Blazynski T.Z., Explosive Welding, Forming and Compaction, Applied Science, London, 1983.

[6] Crossland B., Explosive Welding Of Metals and its Application, Clarendon Press, Oxford, 1982.

[7] American Society of Welding, Welding Handbook, V.2.

[۸] لیاقت غ، جواب‌ور د، "ارائه مدل تغییر شکل پایدار ورق جهت تحلیل شکل‌دهی انفجار مخروط"، هفتمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، فروردین ۱۳۷۸.

[۹] لیاقت غ، درویزه ا. و دامغانی م، "بررسی مدل سینماتیکی سطوح استوانه ای در فرایند جوش کاری استوانه‌ها"، دهمین

$\gamma_c, \gamma$  کرنش برشی و کرنش برشی بحرانی  
 $\mathcal{E}_{\theta\theta}, \mathcal{E}_{r\theta}, \mathcal{E}_m$  به ترتیب کرنش غشائی شعاعی-کرنش خمشی شعاعی  
 و کرنش خمشی محیطی  
 $\mathcal{E}_u, \sigma_u$  تنش نهایی کششی و کرنش کششی یکنواخت  
 $\tau_u$  تنش برش بحرانی  
 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  تنش برشی و تنش‌های نرمال در مختصات  
 کارتزین  
 $\kappa_r, \kappa_\theta$  انحنا، صفحه در جهت‌های مماسی (محیطی) و شعاعی،  
 اندیس‌های ۱ و ۲ برای صفحه پرنده و مبنا  
 $\rho$  جرم مخصوص  
 $\nu$  نسبت یا ضریب پواسون، برای تفکیک دو صفحه از زیرنویس ۱ و  
 ۲ استفاده شده است.  
 $\Delta$  لغزش برشی و  $\Delta_C$  لغزش برشی بحرانی

$r$  مختصه شعاعی متغییر نقاط مختلف صفحه،  $R$  شعاع صفحه  
 $R$  شعاع اولیه دو صفحه  
 $R'$  شعاع صفحه معادل صفحه اصلی تبدیل شده  
 $v_0$  سرعت اولیه ضربه  
 $v_{pmin}$  حداقل سرعت مجاز صفحه پرنده  
 $w$  جابجائی در امتداد قائم نقاط مختلف ورق وقتی صفحه افقی  
 می‌باشد.  
 $w_0$  جابجائی مرکز صفحه  
 $w_r$  جابجائی عرضی کل که شامل لغزش برشی در تکیه‌گاه نیز می-  
 باشد.  
 $Z$  متغیری است که فاصله هر تار را از تار خنثی در امتداد ضخامت  
 نشان می‌دهد.  
 $\bar{Z}$  فاصله تار خنثی از دورترین تار در قسمت کششی