

# بررسی تجربی شکل‌دهی صفحات فولادی مدور به روش تغییر شکل انفجاری

مهدی ظهور<sup>۱</sup> و محمد رضوانی<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۲۲)

## چکیده

هدف از این تحقیق مطالعه و اندازه‌گیری تغییر شکل صفحات فولادی مدور به روش شکل‌دهی انفجاری برای مقاوم سازی دریچه‌های مدور در برابر بارگذاری‌های انفجاری است. برای مطالعه در این تحقیق، از یک سری روابط تئوریک و تجربی استفاده شده است. بدین منظور، آزمایش‌هایی روی صفحات فولادی St37 مدور انجام شده و تغییر شکل قطعه اندازه‌گیری گردیده است. از ماده منفجره C-4 با جرم‌های متفاوت در فواصل مختلف استفاده شد. نهایتاً، نمودارهای مربوط به این تغییر شکل ترسیم شده و نتایج تجربی به دست آمده با نتایج تئوری سایر محققان مقایسه شده است. از مقایسه نتایج، معادله راجندران به‌عنوان بهترین گزینه معرفی شده است. با توجه به درصد خطای پایین و صرف‌نظر کردن از آن، نتایج تجربی به دست آمده مورد تأیید قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر شکل، فولاد St37، موج شوک، فاصله ماده منفجره، تغییر مکان

## Experimental Study of Explosive Forming of Circular Steel Plates

M. Zohoor and M. Rezvani

Mech. Eng. Dep't.

K. N. Toosi Univ. of Tech.

( Received: 26 Oct. 2009; Accepted: 13 July 2011 )

### ABSTRACT

The aim of this research was to measure and study the deformation of circular steel plates (St37) in explosive forming operation for increasing the strength of circular shutters in manufacturing processes. Thus, some tests on circular steel plates (St37) were performed and the maximum deformation and its profiles produced by exploding of different masses of C-4 in various distances, were measured. The experimental results have been compared with the results calculated by our theoretical methods. The Rajendran formula was found the best option among the existing theoretical methods for calculating maximum displacement of the material in deformation process. Finally, it was found that the percentage of error between experimental and theoretical results was negligible.

**Keywords:** Deformation, Steel-St37, Shockwave, Explosive Stand-off, Displacement

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): mzohoor@kntu.ac.ir & mehdizohoor@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: mohammad\_rezvani\_429@yahoo.com

پیچیدگی پدیده انفجار زیر آب و اثرات پدیده‌های مختلف نظیر موج شوک، حباب، کاویتاسیون، اثر بارگذاری مجدد موج انفجار، نرخ کرنش بالا، هندسه غیرخطی، حل تئوری را بسیار دشوار و پرهزینه می‌کند. بنابراین روش‌های حل تئوری به صورت تقریبی برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است [۳]. تقریب موج صفحه‌ای میندین و بلیچ [۴] و نیز تقریب‌های گیبز [۵-۶] مدل‌هایی هستند که در این زمینه بیشتر استفاده می‌شوند.

وقتی که ماده منفجره در زیر آب منفجر می‌شود، انرژی انفجار به انرژی موج شوک و انرژی جنبشی محصولات انفجار تبدیل می‌گردد. از طرفی، گرمای آزاد شده نیز باعث تبخیر آب می‌شود. در نتیجه حباب‌های گاز ایجاد می‌شوند. با انبساط اولین حباب، یک موج شوک در آب منتشر می‌شود که انرژی زیادی دارد و به تعبیری ۵۰ درصد انرژی تغییر شکل را فراهم می‌کند [۷]. حداکثر فشار موج از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$P_m = 52.16 \left( \frac{W^{1/3}}{S} \right)^{1.13}, \quad (1)$$

$$\theta = 96.5 (W^{1/3}) \left( \frac{W^{1/3}}{S} \right)^{-0.22}. \quad (2)$$

که در آن،  $P_m$  فشار موج بر حسب مگا پاسکال،  $\theta$  زمان بر حسب میکروتانیه،  $W$  میزان جرم مواد منفجره بر حسب کیلوگرم و  $S$  فاصله مواد منفجره تا صفحه بر حسب متر می‌باشد.

مؤثر بودن موج شوک بستگی به بازه زمانی انتگرال‌گیری از فشار دارد. در زیر دو رابطه برای نیروی ضربه‌ای (ایمپالس) آورده شده است. رابطه دوم نتیجه انتگرال‌گیری تا زمان  $t = 6.7\theta$  می‌باشد [۹]:

$$I = \int_0^t P(t) dt, \quad (3)$$

$$I = 5760 (W^{1/3}) \left( \frac{W^{1/3}}{S} \right)^{0.891}. \quad (4)$$

### فهرست علائم

واحد‌ها	اصطلاحات	علائم
Mpa	فشار ماکزیمم	$P_m$
$\mu s$	زمان	$\theta$
$N.S/m^2$	نیروی ضربه‌ای	$I$
Kg	جرم ماده منفجره	$W$
M	فاصله مواد منفجره تا صفحه	$S$
$\mu s$	دوره تناوب حباب	$T$
M	شعاع حباب	$R_{max}$
M	عمق آب	$Z$
-	فاکتور شوک	SF
M	فاصله خرج و شعاع صفحه	R
MPa	تنش تسلیم صفحه	$\sigma_y$
-	پارامتر تخریب	$\phi_c$
$Kg/m^3$	چگالی صفحه	$\rho$
M	پارامترهای ماده	D,q,n
-	ضریب ثابت	K
-	ضریب ثابت	J
m	ضخامت	t
m	تغییر شکل	$\delta$

### ۱- مقدمه

مطالعه روش تغییر شکل در قطعات مدور، گامی مهم در نحوه بارگذاری انفجاری برای تولید این قطعات می‌باشد. آنالیز سازه‌هایی که شامل تغییر شکل بزرگ، نرخ کرنش بالا، هندسه و ماده غیرخطی و تداخل سیال و سازه هستند، پیچیدگی زیادی دارد [۱]. در زمینه انفجار با واسطه آب، از زمان جنگ جهانی دوم تاکنون تحقیقات زیادی توسط دانشمندان صورت گرفته است. در سال ۱۸۵۹ میلادی، بسنت<sup>۱</sup> برای اولین بار، از بین رفتن یک حباب خالی در سیال را مورد بررسی قرار داد [۲]. بعدها تحقیقات توسط سایر دانشمندان با توجه به تراکم‌پذیری و تراکم‌ناپذیری سیال پیرامون حباب ادامه یافت.

در مقالات خود به معرفی فن‌آوری شکل‌دهی انفجاری بدون قالب پیشرفته برای تولید قطعات دکوری جدار نازک، مخازن کروی و مخازن تحت فشار با فلزات مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها با آنالیز داده‌ها و تحقیقات تجربی، یک روش کنترل تولید قطعات کروی شکل را به دست آورده‌اند. ماینورس<sup>۶</sup> و زنگ<sup>۷</sup> [۱۸] در مقاله خود نتایج بازنگری تمام فعالیت‌های مربوط به زمینه شکل‌دهی انفجاری را ارائه داده‌اند. راجندران<sup>۹</sup> و ناراسیمهان<sup>۸</sup> [۸] در مقاله خود، رفتار صفحات فلزی که در معرض انفجار زیر آب قرار می‌گیرند را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها اثر متقابل موج شوک حاصل از انفجار را بر روی تغییر شکل قطعه بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که شدت انفجار تعیین‌کننده این است که صفحه تغییر شکل الاستیک بدهد، تسلیم شود، تغییر شکل پلاستیک بدهد و یا اینکه بشکند. کارتون<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۹]، نتایج کار خود را در ارتباط با ایجاد تکنولوژی شکل‌دهی انفجاری برای ورق‌ها و صفحه‌های فلزی از جنس آلیاژهای نیکل، تیتانیوم و آلومینیوم به چاپ رسانده‌اند. نیشیاما<sup>۱۲</sup> و اینو<sup>۱۳</sup> [۲۰] در مقاله خود، مکانیزم انتقال انرژی و به‌کارگیری آن در شکل‌دهی با فرآیند هیدرواسپارک و شکل‌دهی انفجاری را بیان کرده‌اند. در روش‌هایی تغییر شکل با سرعت بالا که شامل تغییر شکل انفجاری می‌شوند، به دلیل عدم تماس مستقیم قطعه با قالب، قطعه‌کار دارای دقت ابعادی بالایی نخواهد بود [۲۱].

## ۲- معرفی روابط تحلیلی و تجربی

با توجه به روابط زیر و خصوصیات مکانیکی و هندسی صفحات، محاسبات تئوری و تجربی انجام شد و نتایج به‌صورت چند نمودار رسم گردید. برای محاسبه نیروی ضربه

که در آن،  $W$  جرم معادل TNT بوده و  $I$  نیروی ضربه‌ای<sup>۱</sup> بر حسب  $(\text{Pa Sec.}) \text{ N.S/m}^2$  می‌باشد.

اگر  $W$  میزان جرم مواد منفجره و  $Z$ ، عمق آب باشد، دوره تناوب و حداکثر شعاع حباب از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$T = KW^{\frac{1}{3}} Z^{-\frac{5}{6}}, \quad (5)$$

$$R_{\max} = J(W/Z)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

که در آن،  $K$  و  $J$  ضرایب ثابتی هستند و بستگی به نوع ماده منفجره دارند. مثلاً برای TNT مقدار  $K$  برابر ۴/۲۵ و  $J$  برابر ۱۳/۱ می‌باشد [۱۱]. عمق آب بر میزان حداکثر شعاع و دوره تناوب حباب مؤثر است. با افزایش عمق آب، حداکثر شعاع و دوره تناوب نوسان حباب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان جرم ماده منفجره، حداکثر شعاع و دوره تناوب نوسان حباب افزایش می‌یابد [۱۲].

ویجایاتنگا<sup>۲</sup> و وب<sup>۳</sup> [۱۳]، یک برنامه رایانه‌ای المان محدود ایجاد نمودند. سپس، این نرم‌افزار را برای شبیه‌سازی فرآیند تولید یک قطعه فنجانی چهارگوش از جنس برنج به‌روش کشش عمیق انفجاری زیر آب به‌کار بردند. سرانجام، نتایج المان محدود را با نتایج تجربی مقایسه کردند. موسوی و همکاران [۱۴]، گزارشی از شبیه‌سازی فرآیند تغییر شکل انفجاری آزاد برای تولید یک بلنک مدور آلومینیومی ارائه داده‌اند. در این شبیه‌سازی، برای مدل کردن رفتار انفجاری، از معادله حالت «JWL» استفاده شده است. مدل آن‌ها با نتایج تجربی ارزیابی گردیده و نشان داده است که معادلات جانسون کوک و زریلی آرم استرانگ قادر هستند که شکل نهایی بلنک را به‌خوبی تخمین بزنند. جانسون<sup>۴</sup> و همکاران [۱۵]، نتایج یک سری عملیات تجربی شکل‌دهی انفجاری از جمله فرآیند انفجاری زیر آب برای تغییر شکل بلنک‌های فولاد نرم مدور بسته شده با گیره را در مقاله خود ارائه داده‌اند. تانگ<sup>۵</sup> و همکاران [۱۶] و فنگمن<sup>۶</sup> و همکاران [۱۷].

6- Fengman  
7- Mynors  
8- Zhang  
9- Rajendrana  
10- Narasimhan  
11- Carton  
12- Nishiyama  
13- Inoue

1- Impulse  
2- Wijayathunga  
3- Webb  
4- Johnson  
5- Tong

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.817 \frac{\phi_c}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

و  $n$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$n = 1 + \left( \frac{I^2}{3\rho_p^2 t^2 DR} \left( \frac{\rho_p}{3\sigma_y} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (13)$$

که در آن،  $D$  و  $q$  پارامترهای ماده هستند که برای فولاد عبارتند از:  $D = 40$  و  $q = 5$ .

### ۳- شرح آزمایش و نتایج

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، از استخر بتونی به طول ۲/۹۰ متر، به عرض ۱/۹۰ متر و به عمق ۲/۲۰ متر استفاده شد. ماده منفجره C-4 به شکل نقطه‌ای (کروی) به کار رفت. صفحاتی مدور از جنس فولاد معمولی (St37) با ضخامت تقریبی ۲/۸ میلی‌متر و قطر ۲۴۰ میلی‌متر استفاده شد. با انجام آزمایش کشش، میزان تنش تسلیم برابر ۲۹۶ MPa به دست آمد. خواص مکانیکی فولاد مورد آزمایش به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول (۱): خواص مکانیکی فولاد مورد آزمایش.

شماره	خواص	مقدار
۱	مدول الاستیسیته (MPa)	$2/1 \times 10^{+5}$
۲	ضریب پواسون	۰/۳
۳	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۷۸۰۰
۴	مدول مماسی (MPa)	۱۷۰۰
۵	تنش تسلیم استاتیک (MPa)	۲۹۶
۶	تنش کششی نهایی (MPa)	۴۳۲
۷	کرنش شکست	۰/۳۴

صفحات به قطر ۱۷۰ میلی‌متر در معرض انفجار واقع شدند. به‌منظور گیردار کردن صفحات، از یک رینگ به قطر داخلی ۱۷۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۴۰ میلی‌متر استفاده شد. در ابتدا، چاشنی استاندارد No.8 به کار گرفته شد. در شکل‌های ۱-۲، استخر و نحوه قرارگیری ماده منفجره نمایش داده شده است.

از رابطه (۷) که توسط کل [۹] پیشنهاد شده، استفاده شده است:

$$I(\text{Pa} \cdot \text{Sec}) = 5760 (W^{1/3}) \left( \frac{W^{1/3}}{S} \right)^{0.891}. \quad (7)$$

برای پیش‌بینی میزان تغییر شکل نهایی در مرکز ورق از روش‌هایی زیر استفاده شد:

### روش اول - رابطه تئوری نیوریک<sup>[۱۲]</sup>:

در این روش ابتدا یک پارامتر تحت عنوان پارامتر تخریب ( $\phi_c$ ) تعریف می‌شود. برای ورق‌های دایروی این پارامتر عبارت است از:

$$\phi_c = \frac{I_{Tot}}{\pi R t^2 \sqrt{\rho \sigma_y}}. \quad (8)$$

برای تغییر شکل‌های بزرگ، مقدار خیز در مرکز ورق توسط شیخی کوهسار و همکارانش به صورت زیر ارائه شده است [۱۱]:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.425\phi_c + 0.227. \quad (9)$$

### روش دوم - رابطه تجربی راجندران و همکاران [۸]:

در این روش راجندران و همکارانش با انجام آزمایش‌هایی و با در نظر گرفتن اثر بارگذاری مجدد، رابطه نیوریک را اصلاح کردند:

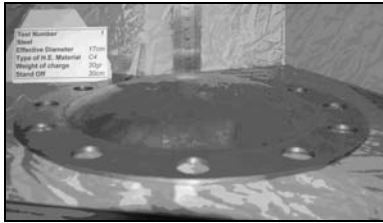
$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.541\phi_c - 0.433. \quad (10)$$

### روش سوم: رابطه تحلیلی جونز [۸]:

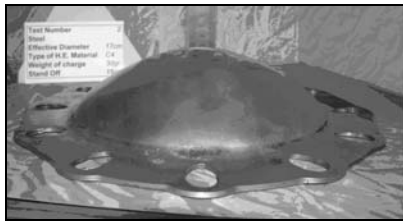
برای نسبت تغییر شکل به ضخامت، پیش‌بینی‌های تحلیلی زیر توسط جونز انجام شده است:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.817\phi_c. \quad (11)$$

رابطه اخیر مربوط به صفحات دایروی می‌باشد. با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش، معادله مذکور به صورت زیر اصلاح شده است:



شکل (۳): نتیجه آزمایش اول و اثر قرارگیری ۳۰ گرم ماده منفجره C-4 در فاصله ۳۰ cm از صفحه.



شکل (۴): نتیجه آزمایش دوم و اثر قرارگیری ۳۰ گرم ماده منفجره C-4 در فاصله ۱۵ cm از صفحه.



شکل (۵): نتیجه آزمایش سوم و اثر قرارگیری ۳۰ گرم ماده منفجره C-4 در فاصله ۱۰ cm از صفحه.

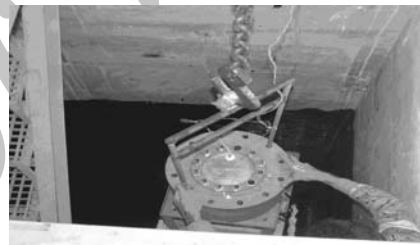


شکل (۶): نتیجه آزمایش چهارم و اثر قرارگیری ۱۵ گرم ماده منفجره C-4 در فاصله ۱۰ cm از صفحه.



شکل (۷): نتیجه آزمایش پنجم و اثر قرارگیری ۲۰ گرم ماده منفجره C-4 در فاصله ۵ cm از صفحه.

هر صفحه توسط ۱۲ عدد پیچ M17 به فیکسچر بسته شد. به طوری که روی صفحه، ستونی از آب و پشت آن - که در واقع داخل قالب می‌باشد - هوا قرار گرفت. به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به دیواره استخر توسط موج شوک، با استفاده از سیستم لوله‌کشی در محیط کف استخر، هوا با فشار ۴ بار وارد آب شد. در هنگام آزمایش، حباب‌های هوا به طور یکنواخت از مجاور دیواره‌های استخر به سمت سطح آب بالا می‌آمدند. مواد منفجره، با وزن ۳۰ گرم در فواصل ۳۰ سانتیمتری، ۱۵ سانتیمتری و ۱۰ سانتیمتری صفحه قرار داده شدند. ماده منفجره، با وزن ۱۵ گرم در فاصله ۱۰ سانتیمتری صفحه قرار داده شد. در آخرین آزمایش، ماده منفجره، با وزن ۲۰ گرم در فاصله ۵ سانتیمتری صفحه قرار داده شد.



شکل (۱): نمایی از استخر، فیکسچر و چیدمان ماده منفجره.



شکل (۲): نحوه قرارگیری ماده منفجره و تثبیت آن.

شکل ۳، تغییر شکل پلاستیک در صفحه‌ای که ۳۰ گرم ماده منفجره در فاصله ۳۰ سانتیمتری آن منفجر شده است را نشان می‌دهد. شکل‌های ۴-۷ آرایش‌های متفاوتی از جرم شارژ و فاصله را نشان می‌دهند. هم‌چنین در شکل ۷ دیده می‌شود که آرایش آزمایش سبب پارگی صفحه از لبه‌ها شده است.

**جدول (۲):** نتایج آزمایش انفجار زیر آب.

شماره آزمایش	نوع صفحه فولادی	جرم ماده منفجره (W) بر حسب گرم	فاصله ماده منفجره تا ورق (R) بر حسب سانتیمتر	فاکتور SF (0/45*W^0.5/R) شوک	حداکثر تغییر مکان ماده در جهت حفره قالب (محور Y) (cm)	مود شکست
۱	St37	۳۰	۳۰	۰/۲۶	۲/۰۳۹	I
۲	St37	۳۰	۱۵	۰/۵۲	۴/۱۷۷	I
۳	St37	۳۰	۱۰	۰/۷۸	۵/۹۵۵	I
۴	St37	۱۵	۱۰	۰/۵۵	۴/۲۱۰	I
۵	St37	۲۰	۵	۱/۲۷	*	II

حالت I: تغییر فرم پلاستیک

حالت II: پارگی در اثر تنش برشی در تکیه‌گاه‌ها

\* تغییر فرم پلاستیک غیر قابل اندازه‌گیری بود

**جدول (۳):** نتایج آزمایش و محاسبات انجام شده.

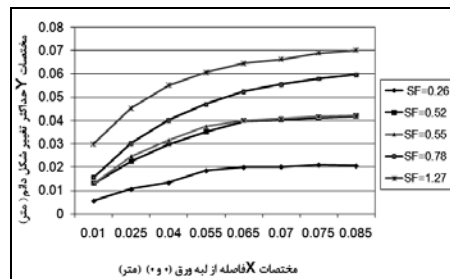
شماره آزمایش	پارامتر تخریب $\Phi$	آزمایش $\delta/t$	روش نیوریک $\delta/t$	روش راجندران $\delta/t$	روش جونز ۱ $\delta/t$	روش جونز ۲ $\delta/t$
۱	۱۶/۲۶	۷/۸۴	۷/۱۴	۸/۳۶	۱۱/۷۶	۱۳/۲۹
۲	۲۷/۹۶	۱۶/۸۴	۱۲/۱۱	۱۴/۶۹	۱۹/۷۰	۲۲/۸۴
۳	۳۰/۱۶	۱۷/۷۷	۱۳/۰۴	۱۵/۸۸	۲۱/۱۷	۲۴/۶۴
۴	۴۳/۲۸	۲۸/۳۶	۱۸/۶۲	۲۲/۸۹	۲۹/۷۸	۳۵/۳۶

**جدول (۴):** درصد خطای روش‌های مختلف نسبت به نتایج تجربی.

شماره آزمایش	خطای روش نیوریک %	خطای روش راجندران %	خطای روش جونز ۱ %	خطای روش جونز ۲ %
۱	۸/۹۸	۶/۶۶	۴۹/۹۱	۶۹/۴۱
۲	۲۸/۰۹	۱۲/۷۵	۱۷/۰۰	۳۵/۶۵
۳	۲۶/۶۰	۱۰/۶۲	۱۹/۱۲	۳۸/۶۵
۴	۳۴/۳۳	۱۸/۹۶	۵/۰۲	۲۴/۶۹

برای بیان میزان قدرت تخریب موج یک ماده منفجره، از فاکتور شوک<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. این فاکتور توسط رابطه (۱۴) بیان می‌شود که در سیستم SI این فاکتور در ۰/۴۵ ضرب می‌شود. در این رابطه، W جرم شارژ و R فاصله خرج تا هدف می‌باشد [۹].

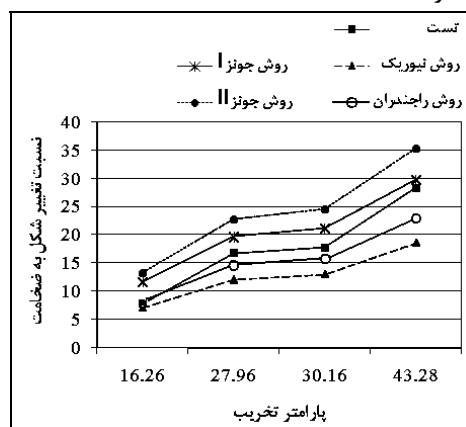
$$SF = \frac{0.45W^{1/2}}{R} \quad (14)$$



**شکل (۸):** تغییر مکان نقاط  $P(x, y)$  روی صفحه

نسبت به لبه ورق.

در شکل ۸، مقایسه کیفی نتایج آزمایش نشان داده شده است. در جدول ۲، نتایج آزمایش با واسطه آب، به همراه فاکتور شوک، فاصله خرج گذاری و حداکثر تغییر شکل صفحات نوشته شده است.



**شکل (۹):** مقایسه نتایج آزمایش با روابط موجود.

## ۴- بحث

می‌شود. رابطه تقریبی اول جونز نتایج بهتری نسبت به رابطه دوم جونز پیش‌بینی کرده است. دلیل این امر، در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در رابطه دوم جونز می‌باشد. دو پارامتر، یعنی فاصله ماده منفجره تا صفحه مدور و میزان ماده منفجره در هر مرتبه تغییر داده شده و با توجه به تغییرات انجام شده در آزمایش‌ها، میزان فاکتورهای شوک متفاوتی به دست آمد.

در جدول ۴ درصد خطای روش‌هایی مختلف نسبت به آزمایش‌ها نشان داده شده است. بنابراین با توجه به مقایسه انجام شده، می‌توان از رابطه ارائه شده توسط راجندران با توجه به میزان خطای کم آن استفاده کرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، مطالعه و اندازه‌گیری تغییر شکل صفحات فولادی مدور به روش شکل‌دهی انفجاری بوده است. لذا، از یک سری روابط تئوری و تجربی استفاده گردید و آزمایش‌هایی روی صفحات فولادی ST37 مدور انجام شد. سپس، تغییر شکل به وجود آمده در قطعات، اندازه‌گیری گردید. سرانجام، نمودارهای مربوط به این تغییر شکل ترسیم شد و نتایج تجربی به دست آمده با نتایج تئوری سایر محققان مقایسه شد. از مطالعات و بررسی‌های تجربی و تئوری در این مقاله، به‌طور خلاصه، می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد:

- ۱- برای اعتبار سنجی نتایج عملی در این تحقیق، نتایج تجربی به دست آمده با نتایج تئوری پژوهش‌گران دیگر (نمودار شکل ۹)، مقایسه گردید و با توجه به اختلاف بسیار کم بین آن‌ها، آزمایش‌های انجام شده مورد تأیید قرار گرفت.
- ۲- از مقایسه جواب‌های تجربی با نتایج تئوری سایر محققان، چنین برداشت شد که نتایج معادله راجندران، کم‌ترین خطا را داشته و مناسب‌ترین رابطه ریاضی برای به دست آوردن تغییر شکل می‌باشد. بنابراین، به جای انجام عملیات و آزمایش‌های تجربی برای پیدا کردن راه‌کارهای مختلف و دانش فنی با صرف زمان و هزینه زیاد، پیشنهاد می‌شود، از تئوری راجندران استفاده شود و

از نتایج تغییر شکل در جدول ۲ و شکل ۸ مشخص می‌شود که صفحه‌های مورد نظر بسیار نرم بوده‌اند و پارگی ناشی از انجام آزمایش پنجم از لبه ورق صورت گرفته است. آزمایش‌های سختی‌سنجی نیز انجام شد. میزان سختی ۱۵۴ ویکرز (HV) بوده است. سختی قطعه، قبل و بعد از آزمایش تغییر نکرده است. تقارن موجود در شکل قطعات به دلیل شرایط تکیه‌گاهی مناسب و دقت انجام آزمایش می‌باشد.

با توجه به شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاکتور شوک، میزان جابه‌جایی نیز بیشتر شده است. در ضمن فاکتور شوک ۱/۲۷ که تنش برشی بیشتر ایجاد نموده، باعث پارگی ورق در لبه‌ها شده است.

محاسبات نیروی ضربه از طریق تئوری و تجربی با استفاده از معادله (۷) انجام گرفته و بعد از محاسبه پارامتر تخریب و خیز، نتایج در جدول ۳ نوشته شده است. نتایج روش‌هایی جونز، راجندران و نیوریک بر حسب مقدار خیز در مرکز ورق ( $\delta/t$ ) و پارامتر تخریب ( $\phi_c$ ) مرتب شده و با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، مقایسه گردیده و درصد خطای هر کدام از روش‌ها نیز مشخص شده است.

با استفاده از جدول ۳ نمودار شکل ۹ رسم شده است. این شکل نشان‌دهنده نسبت تغییر شکل به ضخامت بر حسب پارامتر بدون بعد  $\phi$  می‌باشد.

در شکل ۹ تغییر شکل نسبت به ضخامت در مقابل پارامتر تخریب برای تمام داده‌های به دست آمده از طریق عملی و تئوری رسم شده است. روش راجندران نسبت به سایر روش‌هایی تئوری جواب مناسب‌تری را ارائه داده است.

با توجه به جدول ۳ و شکل ۹، چون رابطه دوم جونز شامل اثرات نرخ کرنش نمی‌باشد، بنابراین نتایج آن دقیق نیست. با توجه به فرمول استفاده شده برای محاسبه نیروی ضربه، این خطا متغیر بوده ولی خطای حداکثر ۷۰ درصد مشاهده می‌شود. رابطه نیوریک شامل اثرات بارگذاری مجدد نمی‌باشد. حداکثر خطای مشاهده شده ۳۴ درصد است. رابطه راجندران اثرات بارگذاری مجدد را نیز در بر دارد و در مقایسه با آزمایش، حداکثر خطای ۱۹ درصد مشاهده

12. Ghamsari, A.K., Zamani, J., Hadavi, Sheikhi Kohsar, A., and Moetamed Alshariati, H., "Plastic Response of Thin Plates under High Strain Rate Loading", Conf. Manufacturing Eng., Tehran, Iran, 2007.
13. Wijayathunga, V.N. and Webb, D.C., "Experimental Evaluation and Finite Element Simulation of Explosive Forming of a Square Cup from a Brass Plate Assisted by a Lead Plug", J. Mat. Processing Tech., Vol. 172, No. 1, pp. 139-145, 2006.
14. Akbari Mousavi, S.A.A., Riahi, M., and Hagh Parast, A., "Experimental and Numerical Analyses of Explosive Free Forming", J. Mat. Processing Tech. (The 3rd Int. Conf. on Advanced Forming and Die Manufacturing Tech.), Vol's. 187-188, pp. 512-516, 2007.
15. Johnson, W., Poynton, A., Singh. H., and Travis, F.W., "Experiments in the Underwater Explosive Stretch Forming of Clamped Circular Blanks", Int. J. Mech. Sci., Vol. 8, No. 4, pp. 237-270, 1966.
16. Tong, Z., Li, Z., Cheng, B., and Zhang, R., "Precision Control of Explosive Forming for Metallic Decorating Sphere", J. Mat. Processing Tech., Vol. 203, No's. 1-3, pp. 449-453, 2008.
17. Fengman, H., Zheng, T., Ning, W., and Zhiyong, H., "Explosive Forming of Thin-wall Semi-spherical Parts", Mat. Letters, Vol. 45, No. 2, pp. 133-137, 2000.
18. Mynors, D.J. and Zhang, B., "Applications and Capabilities of Explosive Forming", J. Mat. Processing Tech., Vol's. 125-126, pp. 1-25, 2002.
19. Carton, E.P., Stuiyinga, M., and Verbeek, H.J., "Explosive Forming of Aerospace Components", CP845, Shock Compression of Condensed Matter, 2005.
20. Nishiyama, U. and Inoue, T., "A Study of the Utilization of Generated Energies in Hydro-Spark Forming and Explosive Forming and Explosive Forming", Int. J. Mech. Sci., Vol. 10, No. 6, pp. 479-486, 1968.
21. Daehn, G.S., "High Velocity Metal Forming", ASM Handbook, Vol. 14B, pp. 405-418, 2006.

۳- در انفجار با واسطه آب باید اثرات بارگذاری مجدد را لحاظ کرد. همچنین چون بارگذاری به صورت آبی و با نرخ کرنش بالا می‌باشد، اثر نرخ کرنش باید مد نظر قرار گیرد.

#### مراجع

1. Ramajeyathilagam, K. and Vendhan, C.P., "Deformation and Rupture of Thin Rectangular Plates Subjected to Underwater Shock", Int. J. Impact Eng., Vol. 30, No. 6, pp. 699-719, 2004.
2. Besant, W.H., "Hydrostatics and Hydromechanics", G. Bell, London, 1859.
3. Jiang, J. and Olson, M.D., "Non-linear Transient Analysis of Submerged Circular Plates Subjected to Underwater Explosions", Computer Methods in Applied Mech. and Eng., Vol. 134, No's. 1-2, pp. 163-179, 1995.
4. Mindlin, R.D. and Bleich, H.H., "Response of an Elastic Cylindrical Shell to a Transverse Step Shock Wave", J. Appl. Mech., Vol. 20, No. 3, pp. 189-195, 1953.
5. Geers, T.L., "Residual Potential and Approximate Methods for Three Dimensional Fluid-Structure Interaction Problems", J. Acoustical Society of America, Vol. 49, No. 5B, pp. 1505-1510, 1971.
6. Geers, T.L., "Doubly Asymptotic Approximations for Transient Motion of Submerged Structures", J. Acoustical Society of America, Vol. 64, No. 5, pp. 1500-1508, 1978.
7. Ezra, A.A., "Principles and Practice of Explosive Metalworking", Univ. of Denver, Colorado, 1973.
8. Rajendrana, R. and Narasimhan, K., "Deformation and Fracture Behavior of Plate Specimens Subjected to Underwater Explosion-A Review", Int. J. Impact Eng., Vol. 32, No. 12, pp. 1945-1963, 2006.
9. Cole, R.H., "Underwater Explosion", Dover, New York, 1965.
10. Sucasca, M., "Test Methods for Explosives", Marine Research and Special Technologies, Zagreb, Croatia, 1995.
11. Sheikhi Kohsar, A., Dalayeli, H., Ghamsari, A., Moetamed Alshariati, H.M., and Tavangar, S., "Numerical and Experimental Analysis of Circular Plates Subjected to Underwater Explosion Loading", Beijing Inst. of Tech., pp. 684-691, 2007