



## بررسی تجربی و عددی خیز ماکزیمم ورق‌های دایروی آلومینیومی در برابر انفجار در هوا

محسن گودرزی<sup>1</sup>، جمال زمانی<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 19395-1999، zamani@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 03 شهریور 1393  
پذیرش: 03 آبان 1393  
ارائه در سایت: 11 آذر 1393  
کلید واژگان:  
بارگذاری انفجاری  
انفجار در هوا  
ورق دایروی  
روش المان محدود

### چکیده

در این تحقیق، به بررسی تجربی و عددی ماکزیمم خیز ورق‌های دایروی تحت اثر موج شوک حاصل از انفجار پرداخته شده است. موج شوک توسط انفجار یک خرج کروی، که در فاصله‌های مختلف از مرکز قرار می‌گیرد، ایجاد می‌شود. دو سری آزمایش طراحی شده است که در سری اول موج شوک رسیده به سازه، غیر یکنواخت و در سری دوم موج شوک رسیده به سازه یکنواخت است. هدف از طراحی و اجرای آزمایش‌ها، بررسی تأثیر نحوه برخورد موج بر میزان تغییر شکل و استخراج دو مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی میزان خیز ماکزیمم وسط ورق دایروی در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیر یکنواخت است. این دو مدل به صورت تابعی از عدد تخریب نیوریک که تأثیر همه پارامترهای مربوط به ماده منفجره و سازه را خلاصه و بی‌بعد می‌کند، ارائه می‌شوند. برای راستی آزمایش‌های تجربی، به کمک نرم‌افزار المان محدود ال-اس داینا، شبیه‌سازی عددی رفتار ورق در برابر موج انفجار انجام شد و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج بدست آمده با درصد خطای قابل قبولی به نتایج آزمایش‌های تجربی نزدیک است. در نهایت نتایج حاصل با مدل‌های نیمه تجربی محققان دیگر که در این زمینه تحقیق کرده‌اند، مقایسه گردید.

## Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion

Mohsen Goudarzi, Jamal Zamani\*

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.  
\* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 August 2014  
Accepted 25 October 2014  
Available Online 02 December 2014

**Keywords:**  
Blast Loading  
Free Air Explosion  
Circular Plate  
Finite Element Method

### ABSTRACT

In this study, the numerical and experimental investigation of the maximum deflection of circular plates under shock wave from the air blast is discussed. Shock wave will be generated by explosion of a spherical charge at different distances from the center of the plate. Two series of tests were designed, in the first series non-uniform shock wave reached the structure, and the second series of shock waves were uniform. The purpose of design and implementation of experiments was to investigate the effect of waves on the deformation behavior and extract semi-empirical model to predict the maximum deflection of the center of the circular plate subjected to uniform and non-uniform normal shock wave. These two models are presented, as a function of the Nurick damage number that summarize the effects of all parameters of explosive material and structures and make them dimensionless. Then for the experimental verification using finite element software LS-DYNA, the numerical simulation of the behavior of plate under free air explosion was performed and the results were compared with experimental results. Results obtained with acceptable margin of error are close to the experimental results. Finally, the results obtained were compared with semi-empirical models of other scholars who have researched this area.

### 1- مقدمه

بر روی تیرهایی از جنس آلومینیوم آلیاژ T6-6061 انجام دادند. در ادامه جونز [2] این مسأله را به صورت تحلیلی و با استفاده از مدل صلب-کاملاً پلاستیک مورد مطالعه قرار داد. این محققان 3 حالت واماندگی این تیرها را شناسایی و به صورت زیر طبقه‌بندی کردند:  
حالت I- تغییر شکل قابل ملاحظه پلاستیک بدون ایجاد پارگی  
حالت II- پارگی کششی<sup>1</sup> در تکیه‌گاه  
حالت III- پارگی برشی عرضی<sup>2</sup>

بررسی یک سازه پیچیده تحت بارگذاری انفجاری یکی از شیوه‌های تعیین رفتار آن است. در مجامع تحقیقاتی یک المان کوچک از سازه (در این مقاله یک ورق دایروی است) انتخاب می‌شود. بنابراین مشخص شدن رفتار ورق به عنوان پایه اصلی سازه‌های فلزی شکل تحت بارگذاری با نرخ بالا (انفجار) در دو حالت بار یکنواخت و غیریکنواخت قابل تعمیم به کل سازه است.  
اولین محققانی که رفتار دینامیکی سازه را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند، منکس و اوپات [1] بودند که آزمایش‌های خود را در سال 1973

1- Tensile Tearing  
2- Transverse Shear Fail

Please cite this article using:

M. Goudarzi, J. Zamani, Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 219-226, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است، می‌رسد. سپس فشار تا سطح فشار محیط، در زمان  $t_d$  کاهش می‌یابد و در ادامه تا زیر فشار  $P_{so}$  می‌رسد (با به وجود آوردن خلأ جزئی) و در پایان در زمان  $t_d + t_A$  به شرایط محیط پیرامون باز می‌گردد. مقدار  $P_{so}$  معمولاً به عنوان پیک بیش فشار یا بیش فشار موج برخورد<sup>1</sup> مطرح می‌شود. با توجه به پیچیده بودن فرایند تئوری محاسبه فشار حاصل از انفجار و حتی غیر ممکن بودن آن در برخی موارد، غالباً روابط تجربی به کار می‌روند. بر اساس آزمایش‌های جامعی که انجام داده‌اند، کینی و گراهام یک رابطه برای فشار ماکزیمم ارائه داده‌اند (روابط ۲.1) [8]:

$$\frac{P_o}{P_a} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (1)$$

$$Z = \frac{S}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

قابل ذکر است که قدرت تخریب یک موج انفجار توسط ایمپاس حاصل از آن تعیین می‌شود که تابعی از فشار ماکزیمم، مدت زمان فاز مثبت فشار است.

طبق رابطه تجربی گودمن میزان ایمپاس وارد بر واحد سطح بر حسب Pa.s با رابطه (3) محاسبه می‌شود [9]:

$$\frac{I_o}{W^{1/3}} = 6895 \left( \frac{0.06076}{Z} + \frac{0.02770}{Z^2} + \frac{0.002945}{Z^3} \right) \quad (3)$$

### 3- روابط تجربی

در سال 1989 نیوریک [10] یک سری آزمایش بر روی ورق‌های دایروی تحت بارگذاری انفجاری در هوا انجام داد. او یک پارامتر بی بعد تحت عنوان پارامتر تخریب  $\varphi_c$  را با رابطه (4) تعریف کرد:

$$\varphi_c = \frac{I_{tot}}{\pi R t^2 \sqrt{\rho \sigma_y}} \quad (4)$$

که در آن  $I_{tot}$  میزان ایمپاس کل (N.s) است. او همچنین رابطه تجربی (5) را برای میزان تغییر شکل مرکز ورق ارائه داد:

$$\left( \frac{\delta}{t} \right) = 0.425 \varphi_c + 0.227 \quad (5)$$

در همین راستا در سال 2007، راجندران و همکارانش [11] آزمایش‌های مشابهی بر روی ورق‌های دایروی کاملاً گیردار انجام دادند و رابطه را بصورت (6) اصلاح کردند:

$$\left( \frac{\delta}{t} \right) = 0.541 \varphi_c - 0.433 \quad (6)$$

جونز و همکاران نیز با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش رابطه (7) را ارائه نمودند [2]:

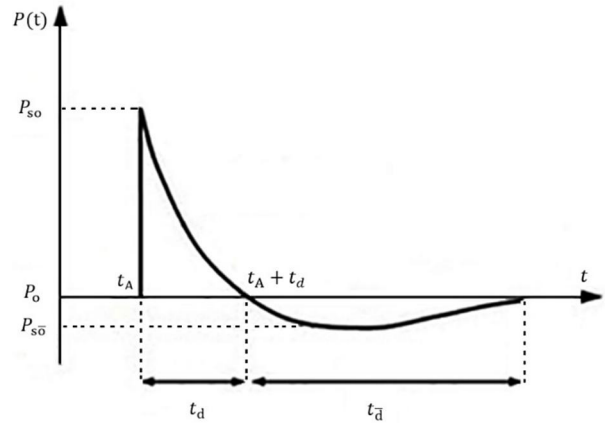
$$\left( \frac{\delta}{t} \right) = \frac{0.817 \varphi_c}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

$$n = 1 + \left( \frac{I^2}{3 \rho^2 t^2 DR \left( \frac{\rho}{3 \sigma_y} \right)^{1/2}} \right)^{1/q} \quad (8)$$

در این رابطه  $D$  و  $q$  ضرایب کوپر سیموند برای فلز مورد نظر هستند.

### 4- طراحی آزمایش‌ها

در طراحی آزمایش‌ها عوامل متعددی قابل بحث و بررسی است:



شکل 1 نمودار فشار زمان موج شوک

تغییر شکل پلاستیک ورق‌های نازک تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. در همین راستا، السن [3] و نیوریک [4] با انجام آزمایش‌های متعدد به تطابق خوبی بین پیش-بینی‌های تئوری و نتایج تجربی دست یافتند. در زمینه ورق دایروی نیوریک و اسمیت اولین افرادی بودند که حالت‌های واماندگی را برای ورق‌های دایروی شناسایی و گزارش کردند. آنها همچنین در آزمایش‌های خود پارگی موضعی در مرز ورق را مشاهده و آن را حالت II<sup>+</sup> نامیدند.

زمانی و همکاران در سال 2011 به بررسی اثر نرخ کرنش در رفتار ورق دایروی کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری زیر آب روی دو ورق آلومینیوم و فولاد پرداختند و همچنین میزان حد واماندگی دینامیکی به استاتیکی را برای دو آلیاژ پر کاربرد بیان کردند [5].

آنها همچنین با بررسی رفتار پلاستیک صفحات مربعی استیل و آلومینیوم هنگام مواجهه با موج بلاست، با کنترل عواملی همچون مقدار ماده منفجره، فاصله قرارگیری آن و هندسه صفحات، ایمپاس موج اصابتی را اندازه‌گیری نموده‌اند [6].

در غالب تحلیل‌های صورت گرفته اثر نرخ کرنش با استفاده از مدل کوپر-سیموندز [7] وارد محاسبات می‌شود. یکی از مشکلات موجود در هنگام استفاده از مدل کوپر-سیموندز، یافتن ضرایب مناسب برای جنس سازه است. با توجه به این که ضرایب مربوط به فولاد موجود می‌باشد و در تحقیقات مختلف کاربردی بودن آنها به اثبات رسیده است، بیشتر محققان آزمایش‌های خود را بر روی آلیاژهای مختلف فولاد انجام داده‌اند. در غالب مراجع موجود برای کلیه آلیاژهای آلومینیوم تنها یک جفت ضریب معرفی شده است (4) و با توجه به تنوع رفتار آلیاژهای مختلف آلومینیوم مسلماً این امر باعث ورود خطا در پیش‌بینی میزان خیز نهایی ورق می‌شود.

در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی به بررسی تأثیر موج شوک یکنواخت بر میزان خیز ورق دایروی پرداخته شود. در ادامه مدل رگرسیون برای پیش‌بینی میزان خیز ورق‌های دایروی کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیر یکنواخت ارائه شده است.

### 2- انفجار در هوا

انفجار پدیده آنی است که از رها شدن مقدار زیادی انرژی در مدت زمان بسیار اندک ایجاد می‌شود. شکل 1 یک پروفیل معمول فشار موج انفجار را نشان می‌دهد. در زمان رسیدن  $t_A$ ، با دنبال کردن انفجار، فشار در آن زمان به طور ناگهانی تا پیکی برابر بیش فشار،  $P_{so}$ ، که بیشتر از فشار محیط،  $P_o$ ،

1- Incident Peak Overpressure

#### 1-4- نوع بارگذاری

محققان پیشین در مطالعات خود به این نکته خطیر دست یافته‌اند که در مورد ورق‌های تحت بارگذاری حاصل از موج انفجار در هوا، موج شوکی که با عبور از محیط واسط به سازه ورق می‌رسد، می‌تواند یکنواخت یا غیر یکنواخت باشد. در حالت یکنواخت، جبهه موجی که به نقاط مختلف می‌رسد، دارای مشخصات یکسان است و در واقع قدرت موج شوک در هنگام رسیدن به ورق در همه شعاع‌ها از مرکز ورق ثابت است. اما هنگامی که موج غیریکنواخت است، قدرت موج شوک در وسط ورق بیشتر است و با افزایش شعاع از مرکز ورق، قدرت موج شوک کاهش می‌یابد. در هر دو مورد انتشار موج شوک به صورت کروی بوده است اما با دور شدن موج شوک از ماده منفجره، جبهه کروی انتشار موج، بزرگتر و به حالت یکنواخت نزدیک‌تر می‌شود. یک فاصله بحرانی توسط محققان تعریف شده است که به ازای فواصل بزرگتر از این فاصله بحرانی، موج شوکی که به ورق می‌رسد به حالت یکنواخت رسیده و به ازای فواصل کوچکتر از این فاصله بحرانی، موج شوک هنوز در حالت غیر یکنواخت و متمرکز قرار دارد. این فاصله بحرانی سه برابر شعاع ورق است. در واقع رفتار دینامیکی ورق در حالت موج شوک یکنواخت و غیر یکنواخت در مورد چگونگی تغییر شکل با یکدیگر متفاوت‌اند.

#### 2-4- نوع شرایط مرزی

در این آزمایش‌ها مقرر شد که از نوع شرایط مرزی کاملاً گیردار استفاده شود و این انتخاب به دو دلیل عمده انجام شده است. نخست برای مقایسه با نتایج محققان دیگر، دوم به علت این که این ورق یک المان از کل سازه می‌باشد و در حالت واقع این المان به صورت "کاملاً گیردار" است.

#### 3-4- هندسه و جنس ورق

از آنجا که در دیگر تحقیقات انجام شده آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشکده مکانیک خواجه نصیرالدین طوسی ورق‌هایی از جنس آلایزهای فولاد و با هندسه مربعی انجام شده بود [6,5] بنابراین مقرر شد که جنس از نوع آلایز آلومینیوم دارای خصوصیات بیان شده در جداول 2 و 4 و به صورت ورق دایروی استفاده شود.

به منظور بررسی رفتار ورق‌های نازک در حالت موج شوک غیر یکنواخت، 10 تست انجام گرفت (جدول 1). ورق مورد آزمایش با شعاع 8/5 سانتی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر و فاصله بحرانی 25/5 سانتی‌متر است. جنس نمونه‌های مورد آزمایش آلومینیوم 1050 می‌باشد (جدول 2). برای مطالعه بر روی رفتار ورق‌های نازک دایروی در حالت موج شوک یکنواخت، 9 تست طراحی شدند (جدول 3).

جدول 1 سری اول آزمایش (موج غیر یکنواخت)

شماره تست	وزن خرج (kg)	شعاع ورق (cm)	ضخامت (mm)	S (m)	Z (m/kg <sup>1/3</sup> )	$\varphi_c$
1	0/03	8/5	3	0/2	0/584	8/20
2	0/03	8/5	3	0/1	0/292	26/71
3	0/05	8/5	3	0/12	0/295	30/96
4	0/06	8/5	3	0/12	0/278	36/79
5	0/07	8/5	3	0/12	0/264	42/70
6	0/07	8/5	3	0/2	0/440	17/12
7	0/07	8/5	3	0/15	0/330	28/21
8	0/075	8/5	3	0/15	0/323	30/10
9	0/09	8/5	3	0/15	0/304	35/74
10	0/115	8/5	3	0/15	0/280	45/162

جدول 2 خواص آلومینیوم 1050

ازدیاد طول	$\rho$ (kgm <sup>-3</sup> )	$\nu$	E (GPa)	$\sigma_y$ (GPa)	$\sigma_u$ (GPa)
10%	2710	0/33	69	0/103	0/110

جدول 3 سری دوم آزمایش (موج یکنواخت)

شماره تست	وزن خرج (kg)	شعاع ورق (cm)	ضخامت (mm)	S (m)	Z (m/kg <sup>1/3</sup> )	$\varphi_c$
11	0/051	8/5	2	0/3	0/735	32/6
12	0/088	8/5	2	0/3	0/612	51/46
13	0/061	8/5	2	0/35	0/807	30/22
14	0/081	8/5	2	0/4	0/839	31/41
15	0/091	8/5	2	0/4	0/807	34/52
16	0/097	8/5	2	0/4	0/790	36/35
17	0/124	8/5	2	0/4	0/728	44/45
18	0/081	8/5	2	0/5	1/049	23/4
19	0/101	8/5	2	0/5	0/974	27/42

جدول 4 خواص آلومینیوم 1100

ازدیاد طول	$\rho$ (kgm <sup>-3</sup> )	$\nu$	E (GPa)	$\sigma_y$ (GPa)	$\sigma_u$ (GPa)
20%	2710	0/33	69	0/25	0/75

فاصله ماده منفجره از سازه در همه آنها بیشتر از مقدار بحرانی 25/5 سانتی‌متر می‌باشد و جنس نمونه‌های این سری آلومینیوم 1100 است (جدول 4).

#### 5- تجهیزات آزمایش

ورق‌های مورد آزمایش در ابعاد به قطر 240 میلی‌متر مطابق شکل ماشین‌کاری شدند. برای فراهم کردن شرایط کاملاً گیردار به عنوان شرط مرزی جای 12 پیچ M16 نیز بر روی ورق‌ها تعبیه شد. همچنین برای بدست آوردن میزان کرنش در نمونه‌ها و رسم پروفیل عرضی ورق‌ها پس از بارگذاری تک تک نمونه‌ها مطابق شکل 2 علامت‌گذاری شدند.

#### 5-1- ماده منفجره

برای ایجاد بارگذاری انفجاری از ماده منفجره C4 استفاده گردید. این ماده منفجره، با وزن TNT معادل 1/34، نرم و شکل پذیر است. برای انجام تست‌ها ابتدا ماده منفجره به کمک ترازوی الکترونیکی و با دقت 0/1 گرم در مقادیر مورد نظر جدا گردید. سپس به کمک دست به صورت کروی در آورده شد و بر روی محور تقارن ورق‌های دایروی با فاصله‌های مختلف نصب گردید. برای تحریک ماده منفجره از چاشنی شماره 8 و یک سوئیچ معمولی استفاده شد.

#### 5-2- قید طراحی شده برای آزمایش‌ها

آزمایش‌ها با استفاده از یک فیکسچر ساده و در محوطه باز صورت پذیرفت. همان گونه که در شکل 3 آشکار است، برای ایجاد شرایط مرزی مسأله (کاملاً گیردار)، نمونه‌ها با کمک یک حلقه فولادی با ضخامت 20 میلی‌متر با لبه‌های تیز به عنوان قاب نگه‌دارنده و 12 عدد پیچ M16 ثابت شدند.

#### 5-3- اندازه‌گیری نمونه‌ها

میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از تست انفجار، توسط دستگاه CMM اندازه‌گیری گردید (شکل 4). از هر نمونه حدود شصت نقطه در

## 6- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی این آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار ال اس-داینا<sup>2</sup> و به روش کان وپ<sup>3</sup> انجام گرفته است. فرمول یا کد کان وپ برای انفجار آزاد برای مواد منفجره مختلف توسط رندرز-پرسون و بنیستر در سال 1997 برای بررسی پاسخ وسایل نقلیه به انفجار مین‌های زمینی استخراج شده است [12]. همان‌طور که در زیر مشاهده می‌شود، فشار ایجاد شده توسط موج بلست پیش‌بینی شده است. در این فرمول از وزن معادل TNT استفاده می‌شود، یعنی اینکه در صورت استفاده از ماده منفجره‌ای غیر از TNT باید ماده با یک ضریب که از آزمایش‌های تجربی بدست می‌آید به مقدار معادل TNT تبدیل شده و در این فرمول استفاده شود (ابطه 9).

$$P(\tau) = P_r \cos^2 \theta + P_i (1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta) \quad (9)$$

که در آن  $\theta$  زاویه برخورد است که توسط خط مماس بر جبهه موج و سطح برخورد تعیین می‌شود،  $P_r$  فشار بازتابش شده و  $P_i$  فشار برخورد است. این معادله موج بلست می‌تواند در دو مورد استفاده شود: انفجار در هوای آزاد با خرج کروی و انفجار در سطح زمین با خرج نیم کره‌ای. در این مدل، وزن معادل TNT ماده منفجره، مختصات فضایی نقطه شروع انفجار و نوع بلست (کروی یا به صورت نیم کره) ورودی‌های مورد نیاز هستند [13].

در این روش، از آنجا که نیازی به مدل‌سازی هوا و ماده منفجره نیست، از المان‌های تماسی استفاده نمی‌شود. برای شبیه‌سازی نیازمند ورودی‌های زیر می‌باشد:

- جرم معادل TNT

- نوع موج بلاست (صفحه‌ای و کروی)

- مکان ماده منفجره در فضا

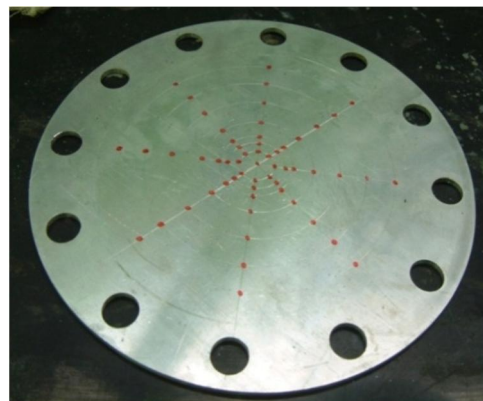
- مشخصات سطح برای انتخاب نوع فشار اعمالی

با اطلاعات کسب شده، کان وپ فشار مناسب را برای نوع سطح انتخاب شده، محاسبه می‌کند. این روش از لحاظ هزینه محاسباتی نسبت به روش لاگرانژی-اویلری انتخابی دارای هزینه کمتری است. لازم به ذکر است که بعد از بازتاب شدن موج بلاست از سازه، زمانی که موج‌ها برهم نهی می‌کنند، تمرکز انرژی صورت می‌گیرد که این روش توانایی محاسبه تغییرات بعد از عبور موج شوک را ندارد.

در این روش دیگر نیاز به مدل‌سازی هوای اطراف سازه نیست. بنابراین از قسمت‌های مدل‌سازی هوا و خرج در شبیه‌سازی به روش لاگرانژی-اویلری انتخابی صرف‌نظر می‌شود.

برای شبیه‌سازی به روش کان وپ در نرم‌افزار ال اس-داینا می‌توان از یک مورد از دو نوع کلیدواژه تعریف شده برای این روش استفاده کرد. نوع اول کلید واژه LB4 است. این کلید واژه بارگذاری بلست را بر روی سازه مورد نظر انجام می‌دهد درحالی‌که فاز منفی موج بلست در بارگذاری در نظر گرفته نمی‌شود. نوع دوم کلید واژه LBE5 می‌باشد که برخلاف نوع اول فاز منفی موج بلست را نیز بر اساس معادله فریدلندر<sup>6</sup> به فرمول کان وپ اضافه می‌کند. این یعنی اینکه کلید واژه دوم بهبود یافته نوع اول است و در نتیجه کاربرد بیشتری در شبیه‌سازی‌ها دارد. در این تحقیق ورق به صورت پوسته<sup>7</sup> شبیه‌سازی شده است. بهترین نوع المان‌بندی برای ورق‌های دایروی، المان‌های شعاعی است. اما چون در وسط ورق المان‌ها بصورت نوک تیز و غیر

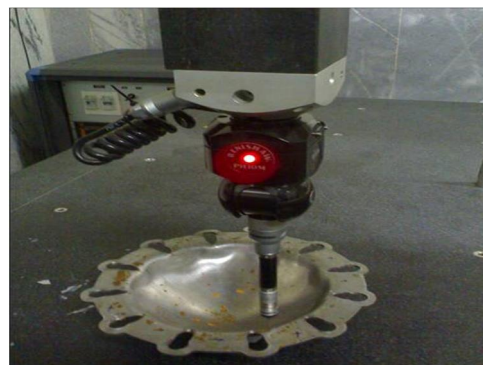
شعاع‌های مختلف خوانده شد. تعیین دقیق پروفیل تغییر شکل ورق با توجه به وجود اندکی اعوجاج در قطعات پس از تست انفجار یک از مسائل پیشرو در فرایند اندازه‌گیری بود. برای اندازه‌گیری میزان خیز در شعاع‌های مختلف نیاز به تعیین یک سطح مرجع وجود داشت. برای تعریف سطح مرجع از بالاترین سطح ورق (قسمتی که به کمک فشار پیچ‌های تکیه‌گاه درون قید بدون تغییر شکل باقی مانده بود) هفت نقطه خوانده شد. نقاط خوانده شده توسط حسگر دستگاه CMM در یک فایل با پسوند IGES ذخیره شده و به نرم‌افزار سالید ورک<sup>1</sup> منتقل گردید. در محیط این نرم‌افزار از هفت نقطه خوانده شده، بهترین صفحه ممکن عبور داده شده تا مختصات صفحه مرجع بدست آید. با تعیین مختصات تمامی نقاط خوانده شده توسط حسگر دستگاه در محیط نرم‌افزار، فاصله عمودی تک تک این نقاط از صفحه مرجع محاسبه شد.



شکل 2 علامت‌گذاری ورق‌ها برای سهولت در اندازه‌گیری مقادیر کرنش و تعیین پروفیل شکل نهایی ورق



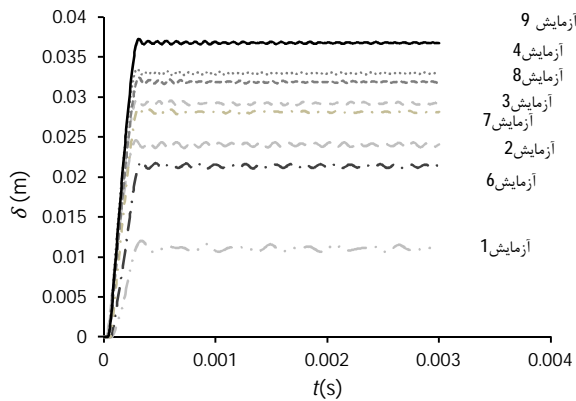
شکل 3 فیکسچر و تنظیمات به کار رفته



شکل 4 حسگر دستگاه CMM در حال داده‌برداری از نمونه‌ها پس از بارگذاری

1- Solid Work

2- LS-Dyna  
3- ConWep  
4- LOAD\_BLAST  
5- LOAD\_BLAST\_ENHANCED  
6- Friedlander equation  
7- Shell



شکل 7 نمودار میزان تغییرات خیز مرکز ورق تحت موج شوک غیریکنواخت

جدول 5 نتایج آزمایش‌های موج شوک غیریکنواخت

درصد خطا	حالت تغییر شکل	نتیج شبیه‌سازی (mm)	نتایج تجربی (mm)	$\varphi_c$	
-5/86	I	12/01	12/758	8/20	1
-4/87	I	24/59	25/85	26/71	2
-7/80	I	29/76	32/281	30/96	3
12/29	I	33/51	29/84	36/79	4
-	III	-	-	42/70	5
27/95	I	21/98	17/178	17/12	6
8/97	I	28/66	26/95	28/21	7
7/18	I	32/41	30/237	30/10	8
11/19	I	35/27	31/718	35/74	9
-	II	-	-	45/162	10

جدول 6 نتایج آزمایش‌های موج شوک یکنواخت

شماره تست	$\varphi_c$	نتایج تجربی (mm)	نتایج شبیه‌سازی (mm)	حالت تغییر شکل	درصد خطا
11	32/6	34/43	32/22	I	-6/41
12	51/46	-	-	II	-
13	30/22	29/9	30/43	I	1/77
14	31/41	31/3	29/11	I	-6/99
15	34/52	38/7	34/73	I	-7/67
16	36/35	-	-	II	-
17	44/45	-	-	II	-
18	23/4	23/4	23/79	I	-1/64
19	27/42	28/5	28/17	I	1/17

هنگامی که تنها تغییر شکل در سازه مشاهده می‌شود و واماندگی رخ نمی‌دهد، تغییر شکل نیز یکنواخت بوده و نواحی مختلف ورق نسبتاً به میزان یکسانی انرژی کرنشی پلاستیک ذخیره می‌نمایند. جدول 6 میزان خیز ماکزیمم مرکز ورق در آزمایش‌های موج شوک یکنواخت را نشان می‌دهد. در شکل 8 میزان تغییرات خیز مرکز ورق در شبیه‌سازی را برای موج شوک یکنواخت نشان داده شده است.

### 8- بحث و بررسی نتایج

در غالب نمونه‌ها حالت واماندگی مشاهده شد. در تست‌های موج شوک یکنواخت شکل نهایی ورق به صورت یک گنبد یکنواخت است در صورتی که در حالت موج شوک غیریکنواخت یک گنبد کوچکتر دیگر در روی گنبد اولیه به وجود آمده است.

قابل حل است، بنابراین از المان‌های مربعی استفاده می‌شود. تطبیق بین المان‌های دایروی و مربعی توسط خود نرم‌افزار انجام می‌شود که بهترین نوع المان‌بندی را در نظر می‌گیرد. تعداد المان‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی 588 المان می‌باشد. شرایط مرزی کاملاً گیردار برای لبه ورق در نظر گرفته شده است.

### 6-1- مدل مادی

مدل مادی اختصاص داده شده به ورق برای بررسی رفتار ماده پلاستیک-کینماتیک<sup>1</sup> است. این مدل مادی، برای بیان ارتباط بین تنش و کرنش در کامپوزیت‌ها، پلاستیک‌ها و فلزات در محیط نرم‌افزار ال اس-داینا کاربرد دارد. ضرایب این مدل مادی در جدول‌های 2 و 4 بیان شد. در شکل‌های 5 و 6 نحوه المان‌بندی ورق و تغییر شکل نهایی نشان داده شده است.

### 7- نتایج

#### 7-1- حالت موج غیریکنواخت

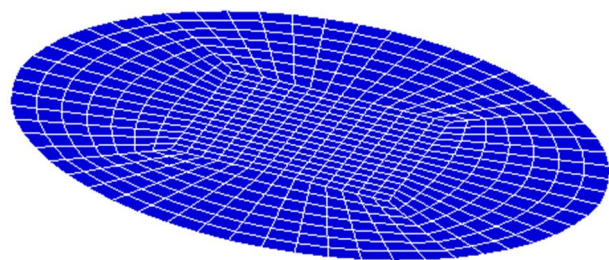
نتایج تست‌ها در حالت موج غیریکنواخت نشان می‌دهد که هنگامی که نمونه تنها دچار تغییر شکل شده است و در آن واماندگی رخ نداده است، میزان تغییر شکل قسمت‌های مرکزی ورق خیلی بیشتر از نواحی نزدیک تکیه‌گاه است. در واقع قدرت موج شوک رسیده به سازه در مرکز آن بیشتر از قدرت موج شوک رسیده به سازه در نواحی دورتر از مرکز است. در نتیجه میزان انرژی کرنشی بیشتری به صورت متمرکز در مرکز ورق ذخیره گشته و تغییر شکل مرکز ورق بیشتر می‌شود.

جدول 5 میزان خیز ماکزیمم مرکز ورق در آزمایش‌های موج شوک غیریکنواخت را نشان می‌دهد.

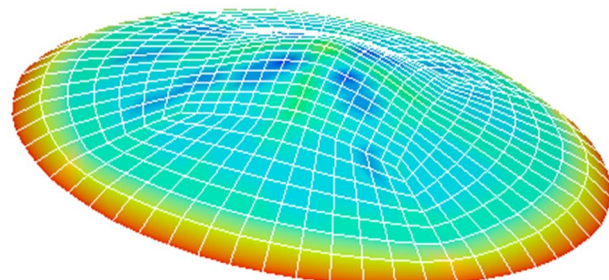
در شکل 7 میزان تغییرات خیز مرکز ورق در شبیه‌سازی را برای موج شوک غیر یکنواخت نشان داده شده است.

#### 7-2- حالت موج یکنواخت

در حالتی که فاصله ماده منفجره با مرکز سازه بیشتر از فاصله بحرانی باشد، موج شوک یکنواخت ایجاد می‌شود.

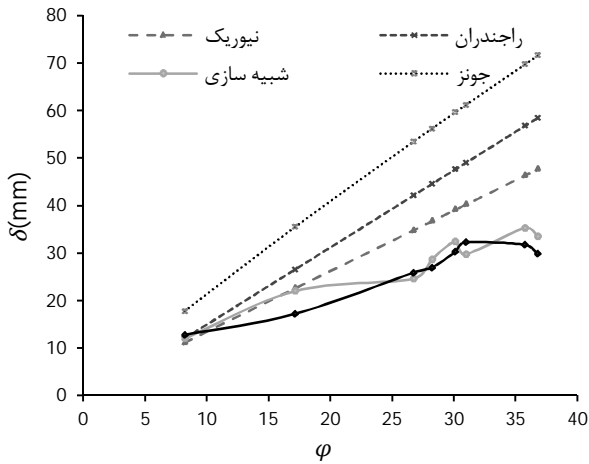


شکل 5 المان بندی ورق دایروی

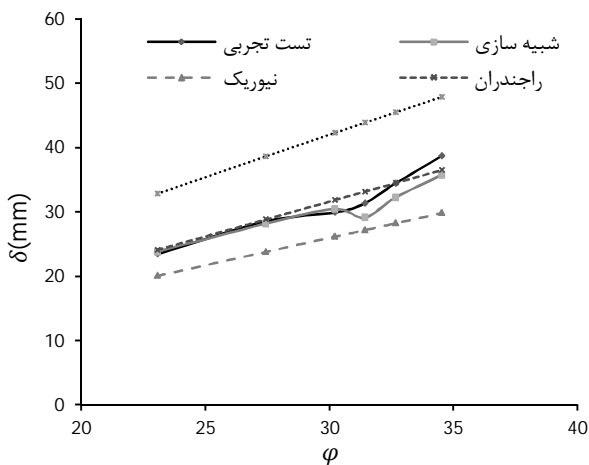


شکل 6 تغییر شکل نهایی ورق

1- Plastic\_Kinematic



شکل 12 نمودار جابه جایی برحسب  $\phi_c$  برای موج غیریکنواخت



شکل 13 نمودار جابه جایی برحسب  $\phi_c$  برای موج یکنواخت

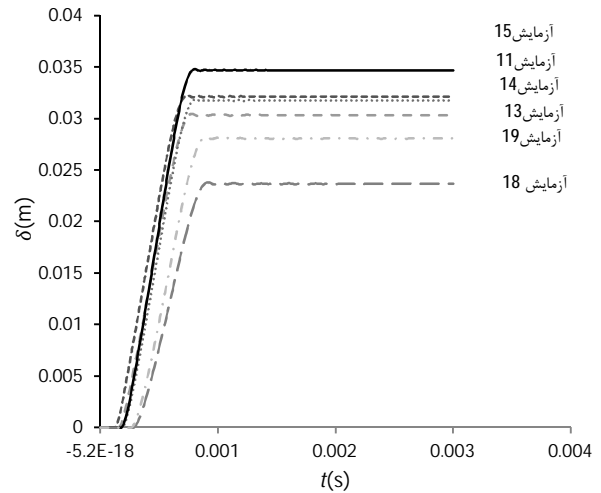
در چهار مورد از تست‌ها حالت واماندگی II و در یک مورد حالت واماندگی III اتفاق افتاده است (شکل‌های 9 و 10).

### 8-1- بررسی تأثیر یکنواخت و غیر یکنواختی موج شوک

با بررسی میزان خیز ماکزیمم در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیر یکنواخت مشخص شد که به ازای  $\phi_c$  های برابر میزان خیز ورق تحت اثر موج شوک یکنواخت بیشتر می‌باشد. در شکل 11 نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است.

همان‌گونه که در نمودار شکل‌های 12 و 13 مشخص است میزان پیش‌بینی با رابطه جونز بسیار زیاد است که به خاطر ضرایب کوپر-سیموند آلومینیوم در معادله می‌باشد ( $D=6500 \text{ Sec}^{-1}$ ,  $q = 4$ ) که برای این آلیاژ دارای خطا می‌باشد و در پیش‌بینی خیز ماکزیمم تأثیر بالایی دارد. مقدار خیز پیش‌بینی شده در رابطه نیوریک و راجندران نسبت به جونز قابل قبول‌تر است اما با این وجود مقدار پیش‌بینی آنها نیز با نتایج حاصل از تست‌های تجربی دارای اختلاف است.

میزان اختلاف قابل ملاحظه بین پیش‌بینی‌های تئوری و روابط تئوری موجود، نویسندگان را متقاعد کرد که رابطه جدیدی برای پیش‌بینی خیز ماکزیمم ورق‌های دایروی کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری پیشنهاد دهند. بر اساس آزمایش‌های انجام شده و با استفاده از رگرسیون خطی و عدد تخریب نیوریک، میزان خیز ماکزیمم برای حالت موج شوک غیر یکنواخت به صورت رابطه (10) می‌باشد:



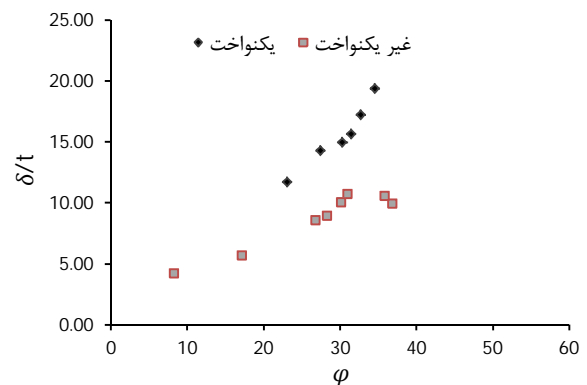
شکل 8 نمودار میزان تغییرات خیز مرکز ورق تحت موج شوک یکنواخت



شکل 9 حالت واماندگی II (پارگی کامل از تکیه‌گاه)



شکل 10 حالت واماندگی III (تغییر شکل پلاستیک با پارگی موضعی در مرکز ورق)



شکل 11 تأثیر یکنواخت یا غیر یکنواخت بودن موج شوک

### 9- نتیجه‌گیری

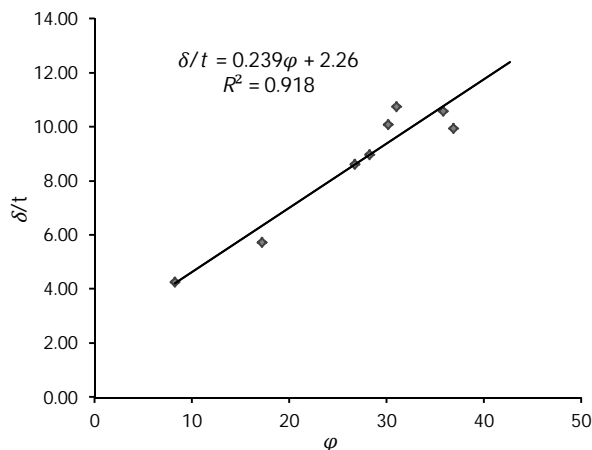
در این مقاله به بررسی تأثیر نحوه برخورد موج بر میزان تغییر شکل و استخراج دو مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی میزان خیز ماکزیمم وسط ورق دایروی در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیر یکنواخت پرداخته شد. این دو مدل به صورت تابعی از عدد تخریب نیوریک که تأثیر همه پارامترهای مربوط به ماده منفجره و سازه را خلاصه و بی بعد می‌کند، ارائه شد. به کمک نرم‌افزار المان محدود ال اس-داینما، شبیه‌سازی عددی رفتار ورق در برابر موج انفجار انجام شد و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده با درصد خطای قابل قبولی به نتایج آزمایش‌های تجربی نزدیک است. تأثیر نوع موج برخوردی نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد در حالت موج شوک یکنواخت میزان تغییر شکل بیشتر می‌باشد.

### 10- فهرست علائم

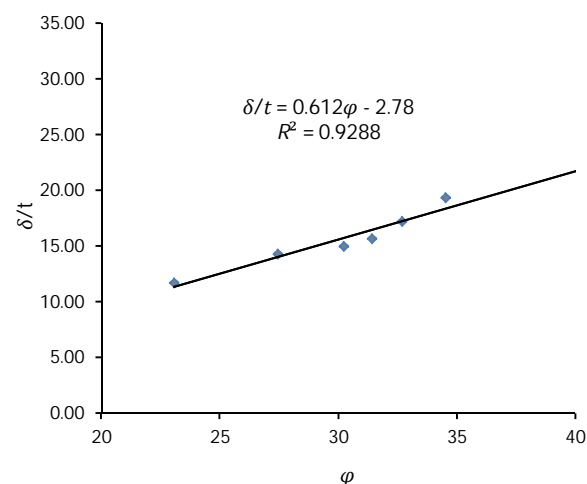
$E$	مدول الاستیسیته (GPa)
$I_o$	ایمپالس واحد سطح (Pa.s)
$I_{tot}$	ایمپالس کل (N.s)
$P_{so}$	بیش فشار (Pa)
$P_o$	فشار محیط (Pa)
$S$	فاصله نقطه انفجار تا ورق (m)
$t$	ضخامت ورق (mm)
$t_d$	زمان فاز مثبت (ms)
$t_{\bar{d}}$	زمان فاز منفی (ms)
$W$	وزن خرج (kg)
$Z$	وزن مقیاس شده ( $m/kg^{1/3}$ )
$\delta$	خیز ماکزیمم (mm)
$\nu$	ضریب پواسون
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\sigma_y$	تنش تسلیم (GPa)
$\varphi_c$	عدد تخریب نیوریک

### 11- مراجع

- [1] S. Menkes, H. Opat, Broken beams, *Experimental Mechanics*, Vol. 13, No. 11, pp. 480-486, 1973.
- [2] N. Jones, *Structural impact*. Cambridge University Press, 2011.
- [3] M. Olson, Efficient modelling of blast loaded stiffened plate and cylindrical shell structures, *Computers & Structures*, Vol. 40, No. 5, pp. 1139-1149, 1991.
- [4] R. Teeling-Smith, G. Nurick, The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 7,91-7, 1991.
- [5] J. Zamani, H. Shariati, A. Gamsari, A. Sheykhi, Effect of strain rate on the circular plate under dynamic loading by introducing a dynamic rather than static failure, *Journal of Energetic Materials*, Vol. 10, No. 2, 2011. (in persian)
- [6] J. zamani, K. Safari, Khalili, A theoretical and empirical analysis of the plastic square plates under explosive loading uniformly, *Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Vol. 14th, 2006. (in persian)
- [7] G. R. Cowper, P. S. Symonds, *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*, DTIC Document, BROWN UNIV PROVIDENCE RI, pp. 24-30, 1957.
- [8] G. F. Kinney, K. J. Graham, Explosive shocks in air, *Berlin and New York, Springer-Verlag*, p. 282, Vol. 1, 1985.
- [9] H. Goodman, *Compiled free-air blast data on bare spherical pentolite*, DTIC Document, pp. 1960.
- [10] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: experimental studies, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 171-186, 1989.



شکل 14 مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی خیز ورق در حالت موج غیریکنواخت



شکل 15 مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی خیز ورق در حالت موج یکنواخت

$$\left(\frac{\delta}{t}\right) = 0.239\varphi_c + 2.26 \quad (10)$$

قابل ذکر است که میزان مجذور باقیمانده<sup>1</sup> این مدل رگرسیون که نشانگر توانایی آن در پیش‌بینی خیز مدل می‌باشد برابر 91/8 درصد است (شکل 14).

میزان خیز ماکزیمم برای حالت موج شوک یکنواخت به صورت رابطه (11) می‌باشد:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right) = 0.612\varphi_c - 2.78 \quad (11)$$

میزان مجذور باقی‌مانده این مدل رگرسیون برابر 92/88 درصد است (شکل 15).

### 8-3- محدوده به کار گیری روابط تجربی

در روابط ارائه شده میزان خیز ورق با استفاده از پارامتر بی بعد  $\varphi_c$  بیان شده است. با توجه به رابطه (4) این پارامتر متأثر از عوامل زیر است: موج انفجار؛ که محدوده یکنواخت و غیر یکنواخت بودن آن باید در نظر گرفته شود.

هندسه و ضخامت ورق؛ علاوه بر دایروی بودن ورق، باید محدوده جداره نازک بودن سازه در نظر گرفته شود.

جنس ورق؛ در صورت رعایت ایزوتوپ بودن، هیچ محدودیتی ندارد.

[13] K. Williams, F. Fillion-Gourdeau, Numerical simulation of light armored vehicle occupant vulnerability to anti-vehicle mine blast. 7th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, MI, 2002.

[11] R. Rajendran, J. Paik, J. Lee, Of underwater explosion experiments on plane plates, *Experimental Techniques*, Vol. 31, No. 1, pp. 18-24, 2007.

[12] D. W. Hyde, *User's Guide for Microcomputer Programs ConWep and FunPro, Applications of TM 5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"*: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1988.