



مطالعه تجربی پاسخ ورق‌های دایروی ایزوتروپ به بارگذاری حاصل از انفجار زیر آب، ایجاد شده توسط شاک تیوب مخروطی

مهران حشمتی¹، جمال زمانی^{2*}، علی مظفری³

1- دانشجوی دوره دکترای تخصصی، مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشیار، مهندسی سازه‌های هوافضایی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، 19395-1999، zamani@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 فروردین 1395

پذیرش: 02 تیر 1395

ارائه در سایت: 02 مرداد 1395

کلید واژگان:

شاک تیوب

انفجار زیر آب

موج شوک

تغییر شکل ورق فلزی

چکیده

امروزه به منظور کاهش هزینه و افزایش ایمنی، استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی همچون شاک تیوب مخروطی برای بررسی پدیده انفجار زیر آب و اثرات آن بر روی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش و به منظور بررسی اثر جنس ورق‌های فلزی ایزوتروپ، از شاک تیوب طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی استفاده شده است. منبع ایجاد شاک در شاک تیوب مورد استفاده ماده منفجره است، نکته مثبت در استفاده از این تیوب‌ها، برخورداری از فشار بسیار زیاد توسط خرج انفجاری کوچک می‌باشد. برای بررسی اثر جنس و هندسه ورق فلزی مورد استفاده، 3 جنس به همراه 4 ضخامت متفاوت در آزمایش‌های تجربی در نظر گرفته شده است. رفتار ورق با مشخص بودن میزان فشار حاصل از ماده منفجره بکار گرفته شده و همچنین میزان تغییر فرم ورق قابل اندازه گیری است.

از نتایج حاصل شده از آزمایش تجربی، به منظور ارائه یک رابطه نیمه تجربی از رفتار ورق تحت بارگذاری انفجار با محیط واسط آب بهره گرفته شده است. در پایان با ترکیب نتایج تجربی و تئوری، اثر تغییر جنس و ضخامت، به صورت مجزا بررسی شده و با افزودن پارامتر وزن خرج معادلاتی برای پیش‌بینی تغییر شکل این ورق‌های فلزی ارائه گردیده است.

Experimental study of isotropic circular plates' responded to underwater explosive loading, created by the conic shock tube

Mehran Heshmati¹, Jamal Zamani^{1*}, Ali Mozaffari²

1- Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Aerospace Structures, 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 04 April 2016

Accepted 22 June 2016

Available Online 23 July 2016

Keywords:

Shock Tube

Under Water Explosion

Shock Wave

Deformation of metal sheet

ABSTRACT

Nowadays, in order to reduce costs and increase safety, utilizing test devices like conic shock tube has been popularized to investigate the explosion under-water phenomenon and its impact on constructions. A shock tube is designed, manufactured and utilized in the mechanic of explosion laboratory of mechanic faculty of K.N. Toosi University of Technology to study the effect of isotropic metal plates' material in this research. The source which creates the shock in the utilized shock tube is explosive material and the positive point is that in such tube a high pressure can be produced with a tiny explosive charge. In order to investigate the effect of the material and the geometry of the utilized metal plate, three materials with two different thicknesses are considered in the experimental tests. The behavior of the plate can be measured when the amount of the pressure produced by the explosive charge and the amount of plate's transformation is specified. From the results of the experimental tests, in order to give a semi experimental relation, the behavior of plate under explosion load with water interface is utilized. Finally, with the combination of experimental and theoretical results, the effect of material and thickness change are studied separately and with increase in weight parameter of the load, equations are given to predict the transformation of the metal plates.

1- مقدمه

مطالعه بر روی پدیده‌های فیزیکی به طور معمول در سه حوزه‌ی آزمایش‌های

تجربی، حل تحلیلی و حل عددی صورت می‌پذیرد. در مطالعه‌ی پدیده‌ی

انفجار زیر آب و اثرات آن بر سازه‌های شناور، به علت پیچیدگی معادلات

پدیده انفجار زیر آب به دلیل کاربرد گسترده‌اش در بحث شکل‌دهی فلزات و

طراحی سازه‌های شناور در آب، مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است.

Please cite this article using:

M Heshmati, J. Zamani, A. Mozaffari, Experimental study of isotropic circular plates' responded to underwater explosive loading, created by the conic shock tube, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 241-250, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

هندسه مخروطی تیوب شوک برای ارائه یک بخش با زاویه رأس مخروط از گسترش شعاعی میدان ناشی از انفجار یک کره کوچک انفجاری در آب آزاد، طراحی شده است.

اسپینوسا در سال 2006 تحقیقاتی را در جهت گسترش تیوب‌های شوک انفجار زیر آب به انجام رساند. در مکانیزم شاک تیوب ساخته‌شده توسط این محقق، با استفاده از ضربه‌ای که به صفحه‌ی متحرک وارد شده، موج شوکی در محفظه مخروطی پر از آب گسترش داده می‌شود و اثرات آن بر روی ورق‌های فلزی مورد بررسی قرار می‌گیرد [11]. تکالور و همکارانش [12] در سال 2007 با استفاده از شاک تیوب دیافراگمی رفتار مکانیکی و شکست کامپوزیت‌های کربنی را بر اثر موج انفجار مورد مطالعه قرار داد. نخستین شاک تیوب مخروطی که با استفاده از خرج انفجاری موج شوک را ایجاد می‌نماید، توسط کومیز و همکارش ساخته شده است. کومیز نام تفنگ شوک⁴ را برای این دستگاه برگزید. نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان داد که به کمک یک خرج کوچک می‌توان موج شوکی را ایجاد نمود که در حالت آزاد برای ایجاد آن به جرمی چند هزار برابری نیاز است [13]. لی بلانک و همکارانش در سال‌های 2010 تا 2013 با استفاده از همین نوع شاک تیوب خواص کامپوزیت‌های مختلفی را در برابر موج شوک مورد بررسی قرار دادند. آنها ضریبی را تحت عنوان ضریب تقویت تئوری معرفی نموده و اعلام نموده که بین مقدار واقعی با مقدار تئوری تفاوتی فاحش وجود دارد [15, 14, 1]. زمانی و همکاران اثر هندسه‌ی شاک تیوب را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در ابتدا اثر زاویه و سپس طول شاک تیوب انفجاری را بررسی کرده و سپس با تغییر وزن ماده‌ی منفجره اثر آن را بر حداکثر فشار تولیدی مورد ارزیابی قرار دادند. در پایان به اصلاح ضریب تقویت تئوری پرداخته و رابطه‌ای را برای محاسبه جرم معادل ارائه نمودند [16].

در این مقاله در ابتدا به شرح و توصیف آزمایش‌های تجربی صورت پذیرفته در این زمینه اشاره می‌گردد. برای بررسی اثر بارگذاری انفجاری بر روی ورق‌های فلزی از شاک تیوب انفجاری استفاده گردیده است. هندسه شاک تیوب با توجه به نتایج کار پژوهشی صورت گرفته در این زمینه انتخاب گردیده است. برای بررسی اثر جنس بر روی شکل پذیری ورق‌های دایروی، از جنس آلومینیوم، مس و فولاد استفاده شده است. یکی دیگر از پارامترهای دخیل در میزان تغییر شکل ورق‌ها، ضخامت می‌باشد. با در نظر گرفتن چند ضخامت برای هر جنس، این اثر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان این نتایج با انجام آزمایشات در وزن‌های متفاوت ترکیب شده تا رابطه‌ای برای تغییر شکل ورق‌ها، با توجه به وزن ماده منفجره‌ی مورد استفاده ارائه گردد.

2- شاک تیوب مخروطی

اگر دیواره شاک تیوب صلب فرض شود و میدان فشار گسترش یافته را محدود کند، آنگاه می‌توان کره‌ی اصلی انفجاری را با یک بخش مخروطی کوچک در رأس مخروط جایگزین کرد. شکل 1 این مفهوم را توضیح می‌دهد. اگر امواج شوک تولید شده توسط تیوب شوک مخروطی با امواجی که از ماده منفجره مشابه در فضای آزاد تولید شده مقایسه شود، نتایجی حاصل خواهد شد. یکی از این نتایج عبارت است از این‌که موج فشاری تولید شده در شاک تیوب مخروطی بسیار بزرگتر از حالت محیط آزاد خواهد بود. این افزایش فشار به هندسه مخروط وابسته است.

یک فاکتور تقویت⁵ تئوری برای تیوب شوک مخروطی را می‌توان توسط

حاکم و هندسه‌ی سازه‌های مورد بررسی، استفاده از حل تحلیلی ممکن نمی‌باشد. از این‌رو تحقیقات در این زمینه در دو حوزه‌ی آزمایش‌های تجربی و حل عددی صورت می‌پذیرد. به دلیل پیچیدگی شرایط حاکم بر مسئله، پیش‌نیاز استفاده از حل عددی، انجام آزمایش‌های تجربی می‌باشد.

در حوزه انجام آزمایش‌های تجربی، وجود نیاز به شرایط و امکانات خاص (حوضچه انفجار با دیواره‌های بدون بازگشت)، هزینه‌ی هنگفت و خطرات ناشی از انفجار در فضای آزاد از موانع پیش رو در این زمینه می‌باشد. استفاده از شاک تیوب راه حل منطقی برای این محدودیت خواهد بود. شاک تیوب مزیت‌هایی را از جهت قابل تکرار بودن و کنترل پذیر بودن امواج جلویی صفحه‌ای و پارامترها فراهم می‌سازد [1].

از جمله کارهای بنیادین در زمینه‌ی تغییر فرم ورق‌های تحت انفجار توسط نوریک و همکاران [2-4]، انجام شده است و آن‌ها با بررسی آزمون‌های تجربی انجام‌شده‌ی پیشین و بررسی رفتار ورق در انفجار زیر آب، مدل‌هایی را برای پیش‌بینی تغییر شکل ماندگار در ورق یک طرف هوا و ورق دو طرف آب، در انفجار زیر آب ارائه نموده‌اند. آن‌ها همچنین حد تغییر شکل الاستیک و سرعت تغییر شکل ورق را مورد بحث و بررسی قرار دادند. جونز [5] نیز از دیگر کسانی است که در این زمینه پژوهش‌های فراوانی انجام داده و نتیجه این تحقیقات ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی نسبت میزان جابجایی مرکز به ضخامت ورق‌های دایروی و مستطیلی می‌باشد. برهانگ و همکاران [6] در سال 2005 تأثیر انفجار زیر آب بر روی صفحات آلومینیومی را به‌صورت تجربی و عددی مطالعه کرده‌اند. محققان زیادی در زمینه ارائه فاکتور شوک بر اساس انرژی که بتواند بارگذاری وارده بر سازه در انفجار زیر آب را توصیف نماید، فعالیت کرده‌اند. یکی از این محققان یالو [7] است که سعی کرده است فاکتور جدیدی ارائه دهد. در ارائه فاکتورهای قبلی مشخصه‌های کروی جبهه موج شوک و مکان نسبی بین دتوئیشن و سازه در نظر گرفته نشده بود. راجندران [8]، در کار تحقیقاتی در سال 2009 مدل‌سازی دیگری برای صفحات ساده در معرض بار اولیه یکنواخت غیرتماسی با استفاده از نرم‌افزار انسیس/ال اس داینا¹ انجام داده است. برای پاسخ الاستیک نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد درحالی‌که تغییر شکل غیرالاستیک پیش‌بینی‌شده به دلیل پدیده بارگذاری مجدد، نصف مقداری است که در آزمون‌های تجربی مشاهده شده است.

به دلیل آنکه ابزار انجام آزمایش‌ها در این پژوهش شاک تیوب می‌باشد، لازم است تحقیقاتی که در این زمینه صورت پذیرفته است نیز بررسی گردد. تیوب‌های شوک به 3 دسته اصلی تقسیم می‌شوند.

1- تیوب دیافراگمی: در ساده‌ترین شکل خود شامل یک سطح مقطع

دایروی یکنواخت است که این استوانه با یک دیافراگم به دو بخش محرک و متحرک تقسیم شده است. زمانی که دیافراگم به‌طور ناگهانی از بین برود یک موج شوک در تیوب ایجاد می‌گردد [9].

2- شاک تیوب تفنگ گازی²

از یک قسمت تفنگ گاز و یک تیوب مخروطی تشکیل شده است. مواد ناریه باعث به وجود آمدن فشار بالا و حرکت آبی صفحه پران³ شده که ایجاد ایمپالس در محیط آب در قسمت مخروطی را سبب می‌شود [10].

3- تیوب شوک مخروطی انفجاری

¹ ANSYS/LS-DYNA

² Gas gun

³ Flyer plate

⁴ Shock gun

⁵ Amplification factor

2-1-3- پاسخ پلاستیک ورق

انرژی جذب شده در طی تغییر شکل پلاستیک دینامیکی با مربع انحنای ایجاد شده در ورق متناسب است. ورق‌ها بین شکل کروی و مخروطی در طی انفجار زیر آب دفرمه می‌شوند. جذب انرژی برای تغییر شکل با استفاده از عمق تحذب، با حاصل ضرب تنش تسلیم ماده در ضخامت و افزایش در سطح به دست می‌آید.

3-1-3- پیش بینی انحراف ورق

پیش‌بینی‌های تئوری بسیاری برای انحنای ورق‌ها تحت بارهای ایمپالسی وجود دارد. جانسون یک خط راهنما برای ارزیابی رفتار فلزات در ارتباط با بارگذاری ضربه‌ای با استفاده از عدد بی‌بعد α_j (رابطه (6)) پیشنهاد داده است.

$$\alpha_j = \frac{\rho_p V^2}{\sigma_d} \quad (6)$$

که V سرعت ورق، ρ_p چگالی ماده ورق و σ_d تنش آسیب می‌باشد. عدد آسیب جانسون تنها زمانی قابل پیش‌بینی است که ورق‌ها ابعاد مشابه داشته باشند. عدد جانسون می‌تواند با ترم ایمپالس به صورت رابطه (7) نوشته شود.

$$\alpha_j = \frac{I_{tot}}{A^2 t^2 \rho_p \sigma_d} \quad (7)$$

که I_{tot} ایمپالس مجموع، σ_d تنش آسیب و A سطحی از ورق است که ایمپالس به آن وارد می‌شود. برای راحتی σ_d همان σ_y در نظر گرفته می‌شود. پارامتر آسیب اصلاح شده Φ ، توسط نوریک [2] تعریف شده که ابعاد ورق و پارامترهای بارگذاری را شامل می‌شود. برای ورق‌های دایروی این پارامتر به شکل رابطه (8) خواهد بود. با استفاده از پارامتر آسیب نسبت تغییر شکل ورق‌های دایروی به ضخامت آن‌ها به صورت رابطه (9) خواهد بود.

$$\Phi_c = \frac{I_{tot}}{\pi R t^2 (\rho_p \sigma_y)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

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

که δ جابجایی مرکز ورق و t ضخامت ورق می‌باشد. برای انفجار زیر آب ایمپالس بر واحد سطح تغییر شکل، یک رابطه خطی با ضخامت اصلی ورق از خود نشان می‌دهد. همچنین ایمپالس مورد نیاز برای پارگی به صورت خطی با ضخامت اصلی ورق افزایش می‌یابد. راجندران [20] برپایه آزمایش‌های تجربی خود این رابطه را به صورت معادله (10) تصحیح نمود.

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.541 \Phi_c + 0.433 \quad (10)$$

رابطه (10) برای اثر بارگذاری مجدد، برای عمق انفجار کمتر از دوبرابر فاصله از مرکز خرج، ورق‌ها انحنای کمتری خواهد داشت. پیش‌بینی‌های جونز [5] برای نسبت میزان جابجایی مرکز به ضخامت به صورت رابطه (11) بیان شده است:

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

برای ورق‌های دایروی، با نظر گرفتن تاثیرات نرخ کرنش رابطه 11 به صورت معادله (12) اصلاح می‌شود [21]:

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

که n به شکل رابطه (13) بیان می‌شود.

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

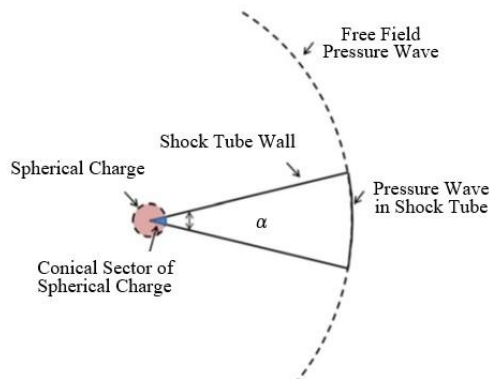


Fig. 1 Amplifying the explosive charge in a conic shock tube [1]

شکل 1 تقویت ماده منفجره در یک شاک تیوب مخروطی [2]

نسبت حجم کره مواد منفجره به حجم بخش کوچک مخروطی از یک ماده منفجره به دست آورد، این نسبت معادل ضریب تقویت نامیده می‌شود که عبارت است از نسبت وزن خرج کروی محیط آزاد به جرم قطاع قرارگرفته در شاک تیوب که خرج کروی در محیط آزاد همان فشاری را ایجاد می‌نماید که این قطاع خرج، همان فشار را در شاک تیوب ایجاد می‌کند. ضریب تقویت تئوری در رابطه (1) ارائه گردیده است [17].

$$AF = \frac{1}{\sin^2 \frac{\alpha}{4}} \quad (1)$$

نتایج تجربی نشان می‌دهد که همواره ضریب تقویت واقعی به مقدار قابل توجهی از ضریب تئوری کوچک‌تر می‌باشد. بررسی نتایج تجربی و شبیه‌سازی، به اصلاح ضریب تقویت تئوری انجامیده و با افزودن ضریب تصحیحی به آن، ضریب تقویت واقعی (رابطه 2) را برای محاسبه فشار ایجاد شده، ارائه می‌نماید. این رابطه برای یافتن جرم معادل استفاده می‌شود [16].

$$AF_{real} = 0.2 \frac{1}{\sin^2 \frac{\alpha}{4}} \quad (2)$$

3- معادلات حاکم

3-1- معادلات حاکم بر آزمایش تجربی

3-1-1- روابط تجربی انفجار زیر آب

حداکثر فشار موج اولیه نیز با واحد MPa توسط کول و اسویسداک به صورت رابطه (3) ارائه شده است [19,18]:

$$P_{max} = K_1 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{S} \right)^{A_1} \quad (3)$$

K_1 و A_1 ثابت‌های تجربی هستند که برای مقادیر آنها به ترتیب 52.16 و 1.16 می‌باشد.

کول همچنین مقدار ایمپالس بر واحد سطح (I) را با واحد کیلوپاسکال در ثانیه به صورت رابطه (4) تعریف می‌نماید.

$$I = K_3 \cdot W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{S} \right)^{A_3} \quad (4)$$

K_3 و A_3 ثابت‌های تجربی هستند که برای مقادیر آنها به ترتیب 5.76 و 0.891 می‌باشد.

قوانین مقیاس‌گذاری در انفجار به تعریف پارامترهای بی‌بعدی منجر می‌شود که اثرات فشار توسط آنها مقیاس خواهند شد:

$$Z = \frac{S}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$



Fig. 3 The real view of the explosive shock tube

شکل 3 نمای واقعی شاک تیوب انفجاری



Fig. 4 The utilized capsule and charge for the explosive charge

شکل 4 کپسول و چاشنی مورد استفاده برای خرج انفجاری

جدول 1 خواص مکانیکی ورق‌های فلزی استفاده شده در آزمایش‌ها

Table 1 Mechanical properties of the used metal plates in the experiments

ردیف	جنس	سطح مقطع (mm ²)	استحکام Proof 0.2% Offset R _t (MPa)	استحکام نهایی R _m (MPa)	ازدیاد طول نسبی % A50	چگالی kg/m ³
1	Cu	12.05	140	156	44.5	8890
2	Al	12.06	139	175	4	2720
3	St12	10.46	198	320	46	7872



Fig. 5 Circular copper plate before the loading

شکل 5 ورق مسی دایروی پیش از بارگذاری

می‌دهد. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی در جدول 4 ارائه گردیده است. پس از انفجار، مواد منفجره، به کمک چاشنی به گازهای پرفشار تبدیل می‌گردند. به دلیل بسته بودن محیط، این گازها درون شاک تیوب محصور گشته و سبب افزایش فشار درون شاک تیوب می‌گردند. این فشار در مقایسه با فشار حاصل از موج شوک قابل صرف‌نظر کردن است. اما در ورق‌ها با ضخامت خیلی کم، همین فشار اندک، تغییر شکلی را سبب خواهد شد. در مورد اثر فشار حاصل از گازهای انفجار در قسمت بعد بحث و بررسی انجام خواهد گرفت. بررسی انتشار موج شوک نشان می‌دهد که امواج شوک در فاصله کوتاهی به موج تخت تبدیل می‌گردند

در این قسمت در ابتدا عوامل مؤثر بر تغییر شکل به صورت مجزا مورد بحث قرار می‌گیرند؛ سپس با ترکیب این فاکتورها به جستجوی رابطه‌ای برای پیش‌بینی انحراف ورق‌ها پرداخته می‌شود.

که D و q پارامترهای ماده هستند ($D = 40$ و $q = 5$ برای فولاد).

4- آزمایش‌های تجربی

1-4- هندسه شاک تیوب

برای انجام آزمایش‌های تجربی از یک شاک تیوب انفجاری با طول 3.105 متر استفاده گردیده است. این شاک تیوب، مخروطی و با زاویه داخلی 3.2 درجه می‌باشد. نمای شماتیک شاک تیوب در شکل 2 به تصویر کشیده شده است. داخل مخروط تیوب کاملاً با آب پر شده و یک سنسور اندازه‌گیری فشار در فاصله‌ی 0.5 متری از ورق فلزی قرار گرفته است. برای ساخت تیوب به دلیل وجود محدودیت‌های ساخت طول تیوب به قطعات کوچکتر تبدیل شده و این قطعات به درون یکدیگر جاذبه می‌شوند. یک نمای کلی از شاک تیوب و پایه نگه دارنده‌ی آن در شکل 3 قابل مشاهده است.

2-4- خرج انفجاری مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌های تجربی 3 وزن برای خرج انفجاری در نظر گرفته شده است. خرج‌های انفجاری با وزن معادل 0.5، 1، 1.5 گرم تیانی درون کپسول‌هایی با پوسته آلومینیومی پر شده‌اند. چاشنی در انتهای این کپسول به وسیله چسب مخصوص محکم گردیده است. کپسول و چاشنی مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل 4 ارائه گردیده است.

3-4- مشخصات ورق‌ها

در انجام آزمایش‌ها از 3 جنس ورق فلزی استفاده گردیده است. با در نظر گرفتن این 3 جنس می‌توان رابطه‌ای برای اثر بارگذاری بار انفجاری در تیوب‌های شوک بر میزان تغییر شکل ایجاد شده را ارائه نمود. مس، آلومینیوم و فولاد جنس‌هایی هستند که برای آزمایشات انتخاب شده‌اند. مشخصات مکانیکی هر جنس، حاصل از آزمایش کشش، در جدول 1 ارائه گردیده است. فاکتور دیگری که در پاسخ ورق‌های فلزی تأثیر گذار بوده، ضخامت ورق‌ها می‌باشد. برای ورق‌های مسی و آلومینیومی 4 ضخامت 0.5، 1، 1.5، 2 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای ورق‌های فولادی نیز 3 ضخامت 0.5، 1، 2 میلی‌متر آماده گردیده است. شکل 5 نمایی از یک ورق مسی را پیش از بارگذاری نشان می‌دهد. آزمایش‌های طراحی شده برای انجام در جدول 2 مشخص گردیده است. تعداد کل آزمایش‌های انجام پذیرفته در این زمینه 33 آزمایش می‌باشد.

5- بحث و بررسی نتایج

به دلیل آنکه هدف نهایی بررسی تغییر شکل ورق‌های فلزی تحت اثر بار انفجاری و ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی آن بوده است، آزمایش‌ها به شکلی طراحی گردیده که پارگی رخ ندهد. نتایج نشان می‌دهد که به غیر از یک مورد (شکل 6)، در سایر آزمایش‌ها شکست رخ نداده است. شکل‌های 7 و 8 برخی از ورق‌های فلزی را پس از بارگذاری نشان

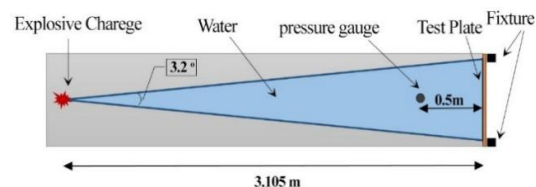


Fig. 2 Schematic view of the explosive shock tube

شکل 2 نمای شماتیک شاک تیوب انفجاری

با ضخیم شدن ورق از یک جایی به بعد دیگر نمی‌تواند سبب تغییر شکل اولیه ورق فلزی گردد.

جدول 3 مشخصات فولاد به کار رفته در بدنه شاک تیوب [5, 15]

Table 3 Mechanical properties of the steel, used in the body of the shock tube [5, 15]

7850	چگالی (kg/m^3)	خواص مکانیکی
350	تنش تسلیم (MPa)	
210	مدول یانگ (MPa)	
0.3	ضریب پواسون	
28%	درصد ازدیاد طول	



Fig. 6 Ripping 0.5 millimeter aluminum plate during loading 1.5 gram T.N.T

شکل 6 پاره شدن ورق آلومینیومی با ضخامت 0.5 میلی‌متر در بارگذاری 1.5 گرم TNT



Fig. 7 Deflection of 0.5 mm copper plate during loading 1 gram T.N.T
شکل 7 تغییر شکل ورق مسی با ضخامت 0.5 میلی‌متر تحت بارگذاری بار انفجاری حاصل از 1 گرم TNT



Fig. 8 Deflection of 1.5 mm steel plate during loading 1.5 gram T.N.T
شکل 8 تغییر شکل ورق فولادی با ضخامت 1.5 میلی‌متر تحت بارگذاری بار انفجاری حاصل از 1.5 گرم TNT

1-5- اثر تغییر وزن ماده منفجره

شکل‌های 9 تا 12 اثر تغییر وزن ماده منفجره را در نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت‌های مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهد. همان‌طور که قابل انتظار است؛ با افزایش وزن ماده منفجره میزان بارگذاری بر روی ورق افزایش یافته و در نتیجه مقدار تغییر شکل بیشینه مرکز ورق افزایش خواهد یافت. بررسی بیشتر روند نمودارها به این نتیجه انجامیده که با افزایش ضخامت ورق، شکل نمودار تغییر شکل عوض شده و از حالت 2 مرحله‌ای بودن در ضخامت‌های کم به حالت تک مرحله‌ای در ضخامت‌های زیاد می‌رسد. در توضیح این پدیده همان‌طور که در قسمت قبل ذکر گردید، باید به سراغ اثر فشار ایجاد شده توسط گازهای حاصل از انفجار رفت. این گازهای حاصل به سرعت منبسط شده و به دلیل بسته بودن فضای انفجار سبب ایجاد فشاری در تمام فضای داخلی شاک تیوب می‌گردند. این فشار در مقایسه با فشار حاصل از موج شوک خیلی کم بوده و قابل صرف نظر کردن است اما در ورق‌های خیلی نازک مانند 0.5 و 1 میلی‌متری این فشار کم سبب ایجاد تغییر شکل ابتدایی قبل از رسیدن موج شوک می‌گردد. همچنین بررسی شکل 9 نشان می‌دهد که با افزایش خرج انفجاری میزان تغییر شکل اولیه ایجاد شده افزایش می‌یابد. علت این پدیده با میزان حجم گاز تولیدی توسط ماده منفجره با وزن‌های متفاوت توجیه می‌گردد. مقایسه شکل‌های 9 و 10 نشان می‌دهد که هرچه ضخامت کمتر باشد، تغییر شکل ایجاد شده سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

این بدان معنا است که با افزایش ضخامت باید انبساط این گاز تا نقطه‌ای ادامه یابد که این ضخامت در برابر فشار ایجاد شده توسط آن افزایش حجم تسلیم گردد. شکل 11 و شکل 12 به وضوح نشان می‌دهند که افزایش بیشتر ضخامت، سبب شده فشار اندک ایجاد شده توسط گازهای حاصل، دیگر قادر به ایجاد تغییر شکل اولیه در ورق فلزی نباشد.

2-5- اثر تغییر ضخامت

همان‌طور که قابل انتظار است با افزایش ضخامت، مقاومت ورق در برابر بارگذاری افزایش یافته و در نتیجه میزان تغییر شکل نیز به صورت کلی کاهش می‌یابد. نمودارهای شکل‌های 13 تا 15 به بررسی اثر پارامتر ضخامت بر روی نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی در طول زمان می‌پردازد. بررسی این نمودارها نکته‌ای بحث برانگیز را نشان داده که دور از انتظار می‌باشد. تغییر شکل نهایی حاصل از بارگذاری در یک وزن مشخص از یک ماده منفجره در ضخامت‌های 1 و 1.5 میلی‌متر خیلی به یکدیگر نزدیک هستند؛ در حالی که انتظار می‌رفت مقدار تغییر شکل ضخامت 1 میلی‌متر اختلاف خیلی بیشتری با ضخامت 1.5 میلی‌متر داشته باشد.

در توجیه این پدیده نیز باید به سراغ فشار اولیه ایجاد شده توسط افزایش حجم گازهای حاصل از انفجار رفت. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش ضخامت، تغییر شکل اولیه در فاصله زمانی طولانی‌تری آغاز گردیده و

جدول 2 آزمون‌های طراحی و اجرا شده

Table 2 Designed and performed tests

ردیف	جنس ورق	ضخامت ورق (mm)	میزان ماده منفجره (gf)	تعداد آزمایش‌ها
1	مس	4 ضخامت	3 وزن (1.5, 1, 0.5)	12
2	آلومینیوم	4 ضخامت	3 وزن (1.5, 1, 0.5)	12
3	فولاد	3 ضخامت	3 وزن (1.5, 1, 0.5)	9
تعداد کل آزمایش‌ها				
33				

جدول 4 نتایج آزمایش‌های تجربی

Table 4 The results of experimental tests

شماره آزمایش	میزان ماده منفجره (gr)	جنس ورق	ضخامت ورق (mm)	Z	I Pa.s	تغییر شکل ماندگار مرکز ورق (تجربی)	Φ
1	0.5	Cu	0.5	38.11	2295.1	24	871.78
2	1		0.5	30.25	3820	30.6	1451.01
3	1.5		0.5	26.43	5282.8	34.73	2006.65
4	0.5		1	38.11	2295.1	16.92	217.95
5	1		1	30.25	3820	26.68	362.75
6	1.5		1	26.43	5282.8	30.29	501.66
7	0.5		1.5	38.11	2295.1	15.27	96.86
8	1		1.5	30.25	3820	23.61	161.22
9	1.5		1.5	26.43	5282.8	29.02	222.96
10	0.5		2	38.11	2295.1	9.32	54.49
11	1		2	30.25	3820	17.61	90.69
12	1.5		2	26.43	5282.8	23.92	125.42
13	0.5		0.5	38.11	2295.1	15.7	1582.62
14	1		0.5	30.25	3820	23.75	2634.13
15	1.5		0.5	26.43	5282.8	fail	3642.82
16	0.5	Al	1	38.11	2295.1	13.22	395.65
17	1		1	30.25	3820	19.66	658.53
18	1.5		1	26.43	5282.8	25.33	910.71
19	0.5		1.5	38.11	2295.1	9.94	175.85
20	1		1.5	30.25	3820	18.79	292.68
21	1.5		1.5	26.43	5282.8	21.54	404.76
22	0.5		2	38.11	2295.1	7.27	98.91
23	1		2	30.25	3820	12.91	164.63
24	1.5		2	26.43	5282.8	16.81	227.68
25	0.5		0.5	38.11	2295.1	12.8	779.46
26	1		0.5	30.25	3820	22.26	1297.34
27	1.5		0.5	26.43	5282.8	25.44	1794.13
28	0.5	St12	1	38.11	2295.1	9.05	194.86
29	1		1	30.25	3820	16.03	324.34
30	1.5		1	26.43	5282.8	18.34	448.53
31	0.5		1.5	38.11	2295.1	7.02	86.61
32	1		1.5	30.25	3820	12.11	144.15
33	1.5		1.5	26.43	5282.8	17.24	199.35

تغییر شکل در یک بارگذاری ثابت کاهش خواهد یافت که افزایش مقاومت فلز در تسلیم شدن، سبب این کاهش می‌گردد. البته لازم به ذکر است که تغییر شکل در بارگذاری با نرخ‌های بالا اندکی متفاوت می‌باشد. در بارگذاری با نرخ بالا پدیده‌ای به نام کرنش سختی ایجاد شده و سبب افزایش مقاومت تسلیم می‌گردد. شکل‌های 16 و 17 به بررسی همین موضوع می‌پردازند. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که تغییر شکل ورق فولادی به دلیل بالاتر بودن تنش تسلیم نسبت به 2 جنس دیگر کمتر است. در مورد 2 جنس آلومینیوم و مس که تنش تسلیم آنها به یکدیگر نزدیک بوده؛ باید اشاره

نزدیک بودن تغییر شکل دو ضخامت 1 و 1.5 میلی‌متر نیز به همین دلیل است. این فشار اولیه زمانی که نتوانسته باعث تغییر شکل اولیه ورق فلزی شود؛ به فشار موج شوک افزوده شده و در نتیجه بارگذاری با فشار بیشتری بر روی ورق فلزی اتفاق می‌افتد. بارگذاری با فشار بالاتر، تغییر شکل بالاتری را در بر خواهد داشت تا آنجا که تغییر شکل ضخامت 1.5 به ضخامت 1 خیلی نزدیک می‌گردد.

3-5- تغییر جنس ورق

یک قاعده کلی بیان می‌دارد که با افزایش مقاومت تسلیم یک فلز، میزان

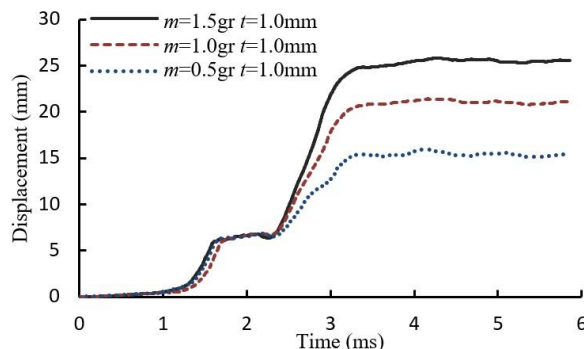


Fig. 10 Diagram of the deflection of the circular copper plate's center with 1 mm thickness under the loading of explosive charges with different weights

شکل 10 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت 1 میلی‌متر تحت اثر بارگذاری وزن‌های متفاوت ماده منفجره

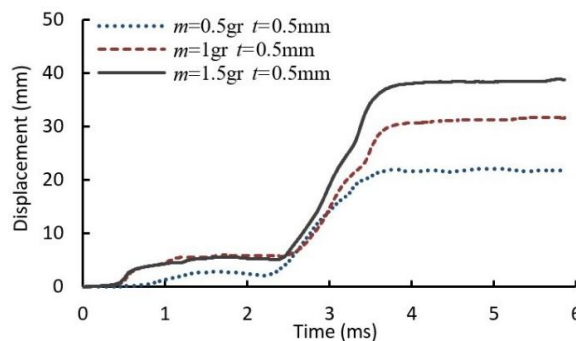


Fig. 9 Diagram of the deflection of the circular copper plate's center with 0.5 mm thickness under the loading of explosive charges with different weights

شکل 9 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت 0.5 میلی‌متر تحت اثر بارگذاری وزن‌های متفاوت ماده منفجره

بیشینه تغییر شکل مرکز ورق فلزی در آزمایش‌های تجربی با جنس‌های مختلف می‌پردازند.

در این نمودارها ضخامت ورق ثابت در نظر گرفته شده و اثر پارامتر وزن، همزمان با اثر تغییر جنس در بیشینه تغییر شکل ماندگار مرکز ورق بررسی می‌گردد. در شکل‌های 21 تا 23 نیز بیشینه تغییر شکل تجربی ماندگار مرکز ورق دایروی در ضخامت‌های مختلف و جنس‌های متفاوت به صورت هم زمان در یک نمودار ارائه گردیده است.

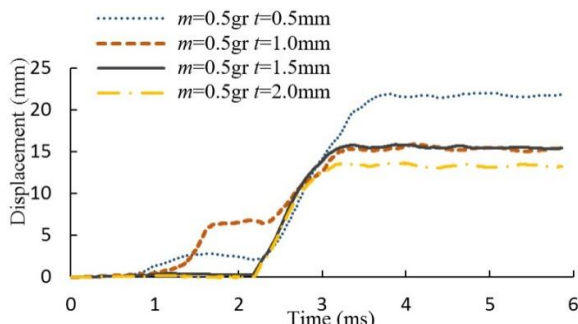


Fig. 14 Diagram of deflection of circular copper plate's center with different thicknesses under the 0.5 gram T.N.T loading

شکل 14 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت‌های متفاوت، تحت اثر بارگذاری 0.5 گرم TNT

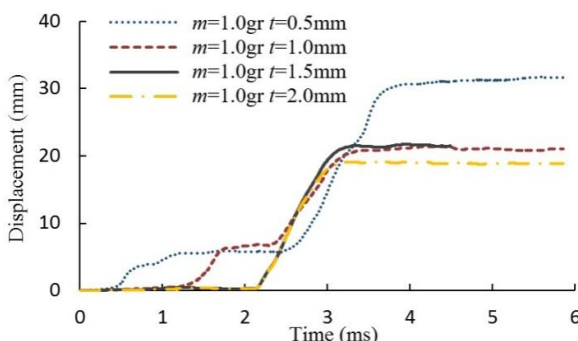


Fig. 15 Diagram of deflection of circular copper plate's center with different thicknesses under the 1 gram T.N.T loading

شکل 15 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت‌های متفاوت، تحت اثر بارگذاری 1 گرم TNT

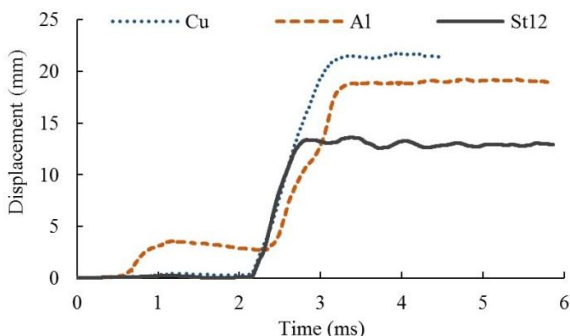


Fig. 16 Diagram of deflection of circular plate's center with different materials and the 1.5 millimeter thickness under the 1 gram T.N.T loading

شکل 16 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی با ضخامت 1.5 میلی‌متر، با جنس‌های مختلف تحت بارگذاری بار انفجاری 1 گرم TNT

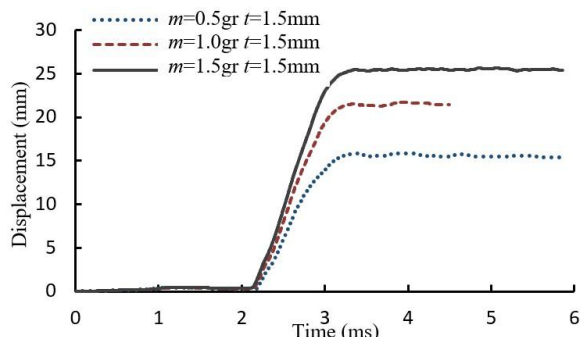


Fig. 11 Diagram of the deflection of the circular copper plate's center with 1.5 mm thickness under the loading of explosive charges with different weights

شکل 11 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت 1.5 میلی‌متر تحت اثر بارگذاری وزن‌های متفاوت ماده منفجره

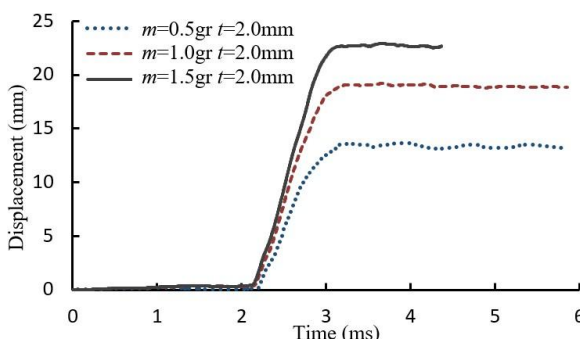


Fig. 12 Diagram of the deflection of the circular copper plate's center with 2 mm thickness under the loading of explosive charges with different weights

شکل 12 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت 2 میلی‌متر تحت اثر بارگذاری وزن‌های متفاوت ماده منفجره

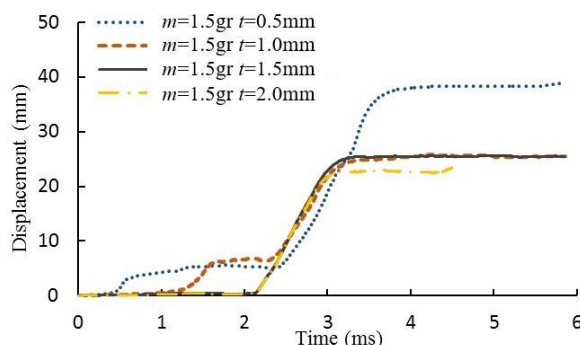


Fig. 13 Diagram of deflection of circular copper plate's center with different thicknesses under the 1.5 gram T.N.T loading

شکل 13 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی مسی با ضخامت‌های متفاوت، تحت اثر بارگذاری 1.5 گرم TNT

داشت که به دلیل کرنش سختی متفاوت، مقدار تنش تسلیم دینامیکی این دو جنس متفاوت خواهد بود. این تنش تسلیم دینامیکی برای آلومینیوم بیشتر از مس خواهد بود. نکته‌ی دیگری که در این نمودارها نهفته است، در تغییر شکل اولیه ورق‌ها می‌باشد. در رابطه با فولاد، این تغییر شکل اولیه به دلیل بالا بودن مقاومت تسلیم دیده نمی‌شود. اما در رابطه با 2 جنس دیگر، این تغییر شکل اولیه قابل مشاهده است. شکل‌های 18 تا 20 به مقایسه

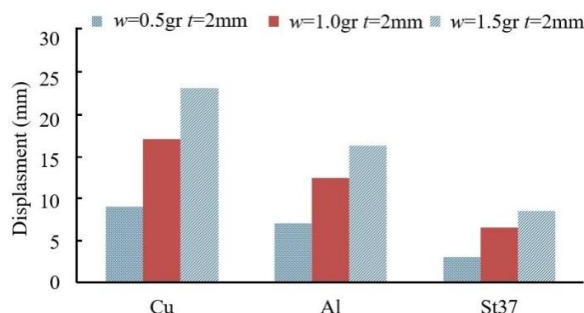


Fig. 20 Maximum experimental deflection of circular plate's with 2mm thickness by different explosive charges in different materials
 شکل 20 حداکثر تغییر شکل تجربی مرکز ورق دایروی با ضخامت 2 میلی‌متر برای خرج‌های انفجاری مختلف در جنس‌های متفاوت

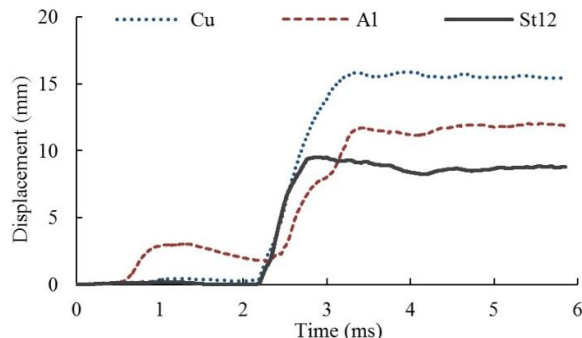


Fig. 17 Diagram of deflection of circular plate's center with different materials and the 1.5 mm thickness under the 0.5 gram T.N.T loading
 شکل 17 نمودار تغییر شکل مرکز ورق دایروی با ضخامت 1.5 میلی‌متر، با جنس‌های مختلف تحت بارگذاری بار انفجاری 0.5 گرم TNT

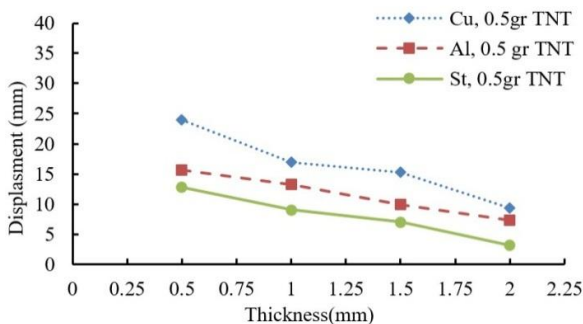


Fig. 21 Maximum experimental deflection of circular plate's center with different thickness and materials under the loading of 0.5 gram explosive charges
 شکل 21 حداکثر تغییر شکل تجربی مرکز ورق دایروی تحت اثر بارگذاری خرج انفجاری 0.5 گرمی در ضخامت‌ها و جنس‌های متفاوت

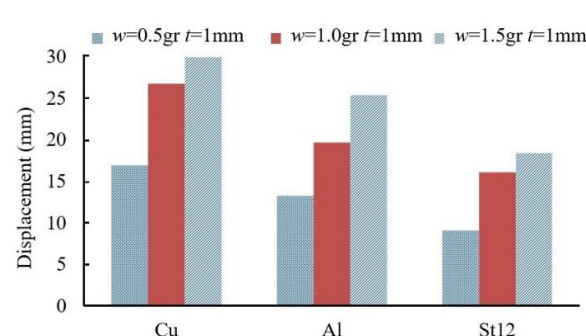


Fig. 18 Maximum experimental deflection of circular plate's with 1mm thickness by different explosive charges in different materials
 شکل 18 حداکثر تغییر شکل تجربی مرکز ورق دایروی با ضخامت 1 میلی‌متر برای خرج‌های انفجاری مختلف در جنس‌های متفاوت

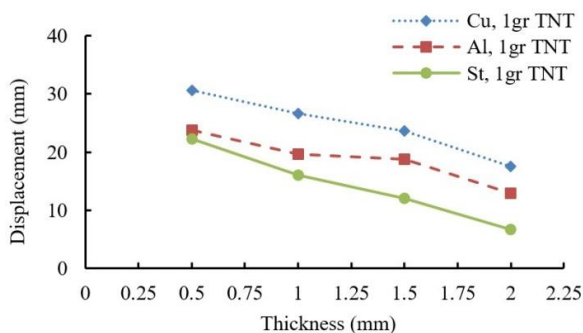


Fig. 22 The maximum experimental deflection of the center of plate under the loading of 1 gram explosive charge for different thicknesses and materials
 شکل 22 حداکثر تغییر شکل تجربی مرکز ورق دایروی تحت اثر بارگذاری خرج انفجاری 1 گرمی در ضخامت‌ها و جنس‌های متفاوت

تغییر شکل‌های بدست آمده برای ورق‌های مسی در آزمایش‌های تجربی و شبیه سازی رسم گردیده است. برای ورق‌های با جنس آلومینیوم و فولاد نمودار مشابهی رسم گردیده است. این نمودارها برای آلومینیوم و فولاد به ترتیب در شکل‌های 25 و 26 به تصویر در آمده‌اند و با میانبایی از میان نقاط این نمودارها، روابط (14) تا (16) به ترتیب برای پیش‌بینی پارامتر بی‌بعد نسبت تغییر شکل به ضخامت ورق‌های مسی، آلومینیومی و فولادی حاصل گردیده است.

این نمودارها نیز نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت تغییر شکل ماندگار در ورق‌ها کاهش یافته است. شیب این کاهش نیز در تغییر ضخامت از 1 به 1.5 کمتر از شیب در تغییر ضخامت از 0.5 به 1 و از 1.5 به دو می‌باشد. همچنین تغییر شکل ماندگار در ورق مسی از ورق آلومینیومی و ورق آلومینیومی از ورق فولادی بیشتر است. برای پیش‌بینی حداکثر تغییر شکل مرکز ورق دایروی از پارامتر آسیب اصلاح شده استفاده می‌گردد. این پارامتر بی‌بعد رابطه مستقیمی با پارامتر بی‌بعد نسبت تغییر شکل به ضخامت ورق دارد. یافتن معادله خطی این رابطه، در پیش‌بینی انحراف ناشی از مقدار مشخصی از ماده منفجره قابل استفاده خواهد بود. شکل 24 با استفاده از

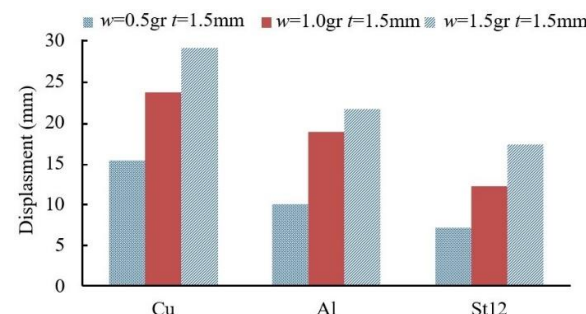


Fig. 19 Maximum experimental deflection of circular plate's with 1.5mm thickness by different explosive charges in different materials
 شکل 19 حداکثر تغییر شکل تجربی مرکز ورق دایروی با ضخامت 1.5 میلی‌متر برای خرج‌های انفجاری مختلف در جنس‌های متفاوت

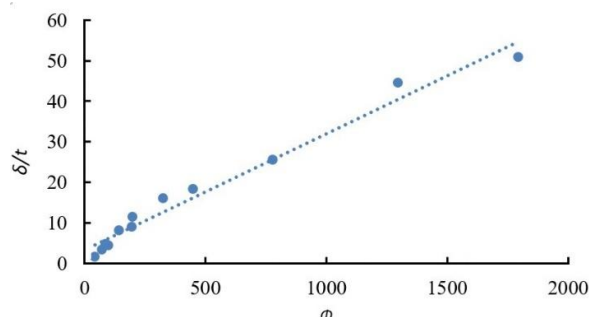


Fig. 26 Changing the ratio of the Deflection to the thickness as an equation of non-dimensional number Φ for the steel plate

شکل 26 تغییر نسبت تغییر شکل به ضخامت به عنوان تابعی از عدد بی بعد Φ برای ورق فولادی

تغییر می‌نماید.

- با عبور ضخامت ورق از یک میلی‌متر، تغییر شکل اولیه مشاهده شده در ورق‌های نازک‌تر کاهش یافته و در ضخامت‌های بالاتر محو می‌گردد. بررسی‌های بیشتر نشان داد که این تغییر شکل اولیه پیش از رسیدن موج شوک ناشی از فشار هیدرواستاتیکی ایجاد شده توسط انبساط محصولات انفجاری می‌باشد.

- با افزایش ضخامت ورق، انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل افزایش یافته که اگر این انرژی ثابت باشد، آنگاه تغییر شکل مشاهده شده کاهش می‌یابد.

- بر خلاف نتیجه‌ی بیان شده در مورد قبل، تغییر ضخامت از 1 میلی‌متر به 1.5 میلی‌متر دارای تغییر شکل‌های نزدیک به هم بوده که دلیل آن به طور کامل مورد بحث قرار گرفت.

- با وجود آن‌که تنش تسلیم استاتیکی دو فلز مس و آلومینیوم به کار گرفته شده در این پژوهش به هم نزدیک می‌باشد، اما به دلیل چگالی و تنش تسلیم دینامیکی متفاوت، تغییر شکل ورق مسی بیشتر است. - حداکثر تغییر شکل مرکز ورق با استفاده از پارامتر بی بعد آسیب اصلاح شده قابل پیش‌بینی است و روابط (14)، (15) و (16) در این زمینه ارائه گردیده‌اند.

7- فهرست علائم

AF	ضریب تقویت تئوری
AF_{real}	ضریب تقویت حقیقی
D	سرعت انفجار
E	مدول یانگ
E_0	انرژی داخلی بر واحد حجم مخصوص مرجع
$f(\varepsilon)$	پارامتر حساسیت به نرخ کرنش
I	ایمپالس بر واحد سطح (پاسکال در ثانیه)
I_{tot}	مجموع ایمپالس وارد بر ورق فلزی (نیوتن در ثانیه)
P	فشار
P_m	پیک فشار
S	فاصله از مرکز خرج
S_i	ضرایب مربوط به شیب منحنی $v_s - v_p$
t	ضخامت ورق
V	حجم
V_0	حجم نسبی اولیه

$$\left(\frac{\delta}{t}\right) = 0.0335\Phi_c + 9.7378 \quad (14)$$

$$\left(\frac{\delta}{t}\right) = 0.0166\Phi_c + 5.8291 \quad (15)$$

$$\left(\frac{\delta}{t}\right) = 0.0286\Phi_c + 3.4181 \quad (16)$$

6- نتیجه‌گیری

با تغییر ضخامت، حداکثر تغییر شکل ورق فلزی به صورت خطی

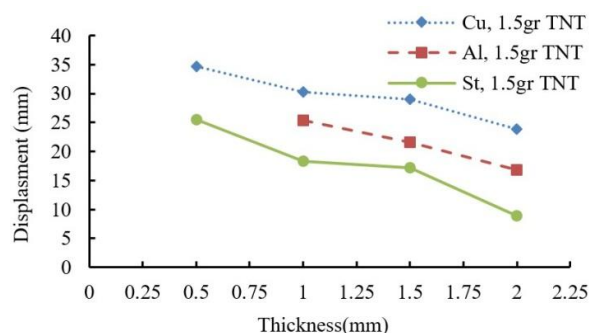


Fig. 23 The maximum experimental deflection of the center of plate under the loading of 1.5 gram explosive charge for different thicknesses and materials

شکل 23 حداکثر تغییر شکل تجربی مرکز ورق دایروی تحت اثر بارگذاری خرج انفجاری 1.5 گرمی در ضخامت‌ها و جنس‌های متفاوت

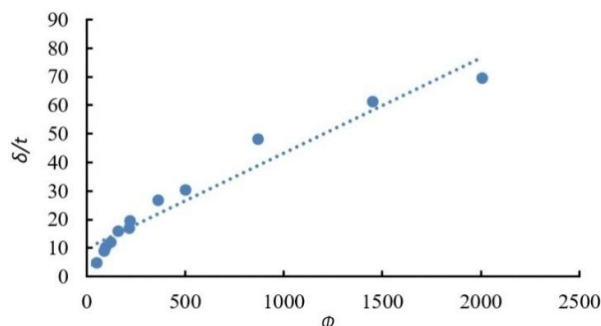


Fig. 24 Changing the ratio of the deformation to the thickness as an equation of non-dimensional number Φ for the copper plate

شکل 24 تغییر نسبت تغییر شکل به ضخامت به عنوان تابعی از عدد بی بعد Φ برای ورق مسی

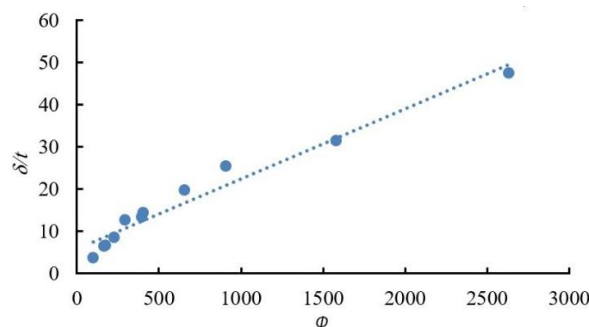


Fig. 25 Changing the ratio of the deflection to the thickness as an equation of non-dimensional number Φ for the aluminum plate

شکل 25 تغییر نسبت تغییر شکل به ضخامت به عنوان تابعی از عدد بی بعد Φ برای ورق آلومینیومی

- [8] R. Rajendran, Numerical simulation of response of plane plates subjected to uniform primary shock loading of non-contact underwater explosion, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 4, pp. 1000-1007, 2009.
- [9] K. Bhaskaran, P. Roth, The shock tube as wave reactor for kinetic studies and material systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, No. 2, pp. 151-192, 2002.
- [10] F. Latourte, X. Wei, Z. D. Feinberg, A. de Vaucorbeil, P. Tran, G. B. Olson, H. D. Espinosa, Design and identification of high performance steel alloys for structures subjected to underwater impulsive loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 13, pp. 1573-1587, 2012.
- [11] H. Espinosa, S. Lee, N. Moldovan, A novel fluid structure interaction experiment to investigate deformation of structural elements subjected to impulsive loading, *Experimental Mechanics*, Vol. 46, No. 6, pp. 805-824, 2006.
- [12] S. A. Tekalur, K. Shivakumar, A. Shukla, Mechanical behavior and damage evolution in E-glass vinyl ester and carbon composites subjected to static and blast loads, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 57-65, 2008.
- [13] A. Coombs, C. Thornhill, An underwater explosive shock gun, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 29, No. 02, pp. 373-383, 1967.
- [14] J. LeBlanc, N. Gardner, A. Shukla, Effect of polyurea coatings on the response of curved E-glass/vinyl ester composite panels to underwater explosive loading, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 44, No. 1, pp. 565-574, 2013.
- [15] J. LeBlanc, A. Shukla, Dynamic response of curved composite panels to underwater explosive loading: experimental and computational comparisons, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 11, pp. 3072-3081, 2011.
- [16] M. Heshmati, J. Zamani, A Numerical Study of the Effects of Geometrical Parameters on the Performance and Maximum Pressure of Undex Conical Shock Tube to Provide Equivalent Mass Equation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 321-328, 2015 (In Persian فارسی)
- [17] L. B. Poche, J. F. Zalesak, *Development of a Water-Filled Conical Shock Tube for Shock Testing of Small Sonar Transducers by Simulation of the Test Conditions for the Heavyweight Test of MIL-S-901D (NAVY)*, DTIC Document, pp. 1-25, 1992.
- [18] M. M. Swisdak Jr, *Explosion Effects and Properties. Part II. Explosion Effects in Water*, DTIC Document, pp. 25-29, 1978.
- [19] R. H. Cole, R. Weller, *Underwater explosions*, pp. 10-35: Physics Today, Princeton University Press, 1948
- [20] R. Rajendran, K. Narashimhan, Performance evaluation of HSLA steel subjected to underwater explosion, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 10, No. 1, pp. 66-74, 2001.
- [21] S. M. Bagheri, J. ZamaniAshni, Evaluation of radial expansion behavior of thick-walled cylinder under internal explosive loading with numerical analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 251-259, 2015. (in Persian فارسی)

W وزن ماده‌ی منفجره

Z عدد بی بعد برای مقیاس بندی انفجار

علامه یونانی

α زاویه راس مخروط شاک تیوب

γ ضریب گرمای ویژه

ξ نرخ کرنش

ρ_p چگالی ورق

σ_Y استحکام تسلیم استاتیکی

σ_{Yd} استحکام تسلیم دینامیکی

ϑ ضریب پواسون

ϕ پارامتر آسیب اصلاح شده

8- منابع

- [1] J. LeBlanc, A. Shukla, Response of E-glass/vinyl ester composite panels to underwater explosive loading: Effects of laminate modifications, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 10, pp. 796-803, 2011.
- [2] 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.
- [3] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part i: Theoretical considerations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 159-170, 1989.
- [4] M. Olson, G. Nurick, J. Fagnan, Deformation and rupture of blast loaded square plates—predictions and experiments, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 279-291, 1993.
- [5] N. Jones, *Structural Impact*, pp. 304-309, University of Liverpool: Cambridge university press, 2011.
- [6] C. Hung, P. Hsu, J. Hwang-Fuu, Elastic shock response of an air-backed plate to underwater explosion, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 151-168, 2005.
- [7] X.-l. Yao, J. Guo, L.-h. Feng, A.-m. Zhang, Comparability research on impulsive response of double stiffened cylindrical shells subjected to underwater explosion, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 5, pp. 754-762, 2009.