



## مطالعه‌ی تجربی و عددی اثر موج انفجار حاصل از ماده منفجره بر روی ورق‌های آلومینیومی

شهرام یاره‌یی<sup>۱\*</sup>، مجید گنجی<sup>۲</sup>

۱- مری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد سقز، سقز، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، کرج، ایران

\* yareei@iausaghez.ac.ir

### چکیده

انفجار یک واکنش شیمیایی سریع در ماده است، که ماده‌ای اولیه را به گاز تبدیل می‌کند. فرآیند انفجار به دو بخش کلی شروع انفجار و فرآیند برهم‌کنش میان محصولات گازی و محیط اطراف تقسیم می‌شود. شناخت رفتار الاستیک-پلاستیک و پیش‌بینی فشار پارگی صفحات دایروی مورد استفاده در لوله شاک‌ها و ارتباط آن با پارامترهای هندسی ورق‌های دایروی لازم است. بنابراین از لوله شاک در تحلیل و ایجاد موج شاک و شبیه‌سازی بار انفجاری روی صفحات استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از آزمایشات تجربی و مدل‌سازی المان محدود، به بررسی اثر موج انفجار ناشی از ماده منفجره بر روی ورق‌های آلومینیومی پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها از نرم افزار هیدرود اتوداین انسیس استفاده خواهد شد. همچنین به منظور انجام آزمایش تجربی، لوله شاک با ابعاد مشخص برای بررسی اثر انفجار مواد منفجره بر روی ورق‌های هدف طراحی و ساخته شد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸

پذیرش: ۱ تیر ۱۳۹۸

ارائه در سایت: ۱۵ شهریور ۱۳۹۸

### کلیدواژگان

انفجار

لوله شاک

طراحی و ساخت

شبیه سازی المان محدود

انسیس اتوداین

مدلسازی اویلری - لاگرانژی

## Experimental and Numerical Investigation of Explosive Wave blasting on the Aluminum Plate

Shahram Yareeiee<sup>1\*</sup>, Majid Ganji<sup>2</sup>

1- Young Research and Elite club, Saghez Branch, Saghez, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

\*, Saghez, Iran, yareei@iausaghez.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 21 May 2019

Accepted : 22 June 2019

Available Online : 6

September 2019

Keywords

Explosion

Shock Tube

Design and Fabricated

Finite Element Simulation

Ansys Autodyn

Lagrangian- Eulerian Modeling

### ABSTRACT

Explosion is fast chemical reaction that alters primary explosive material to gas. Explosion process include two general part of starting explosion and interaction between environment and explosion products. Study of plate performance and investigation elastic - plastic behavior and plate rupture is essential to determine relation of those with plate geometric parameter. Shock tube is used for modeling and simulation of loading explosion. In this paper, Experimental and FEM modeling are used to Investigation of Explosive Wave blasting on the Aluminum Plate. Simulation is done by ANSYS Autodyn software. Shock tube was designed and fabricated in order to experimental study.

## ۱- مقدمه

انفجار یک واکنش شیمیایی سریع در ماده است، که در دما و فشار بسیار بالا ماده‌ای اولیه را به یک گاز تبدیل و مقادیر زیادی گرما ایجاد می‌کند. فرآیند انفجار به دو بخش کلی شروع انفجار و فرآیند برهم‌کنش میان محصولات گازی و محیط اطراف تقسیم می‌شود. در حین شروع فرآیند انفجار، در ماده‌ی منفجره یک موج انفجاری ایجاد و منتشر می‌شود. پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد انفجاری یک ماده‌ی منفجره، فشار انفجاری چاپمن-ژوگت (C-J)، دمای انفجار و سرعت انفجار هستند. [۱،۲،۳] به دلیل خطراتی که در انفجارهای واقعی رخ می‌دهد از لوله شاک‌ها برای شبیه‌سازی موج انفجاری در مقیاس کوچکتر و آزمایشگاهی استفاده می‌نمایند. لوله شاک وسیله‌ای آزمایشگاهی است که برای ایجاد موج شاک و مطالعه تاثیر آن بر روی اهداف متنوع به کار می‌رود. موج شاک یک اغتشاش پیش رونده می‌باشد و هنگامی بوجود می‌آید که موج در یک محیط مایع، گاز و یا پلاسما (به صورت کلی در یک محیط سیال) با سرعتی سریعتر از سرعت صوت حرکت کند. همچنین لوله‌های شاک می‌توانند برای مطالعه جریان آیرودینامیک، تحت بازه‌های متنوع دما و فشار، مورد استفاده قرار گیرند. در جدیدترین مطالعات با استفاده از این وسیله، تاثیر موج انفجار بر روی نمونه‌های بیولوژیکی در پزشکی بررسی شده است. اولین مطالعات با استفاده از لوله شاک فشاری در سال ۱۸۹۹ توسط دانشمند فرانسوی آقای پاول ویل منتشر شد، اما این دستگاه تا دهه ۱۹۴۰ به اسم لوله شاک شناخته نمی‌شد [۴]. در دهه ۱۹۴۰ علاقه به مطالعه جریان حرکت سریع گازها بر اجسام با استفاده از لوله شاک بشدت افزایش یافت. در سال ۱۹۶۶ داف و بلکول لوله شاک انفجاری که موج شاک را در اثر انفجار مواد منفجره بوجود می‌آورد، معرفی کردند [۵]. در لوله شاک از صفحات دایروی به منظور جداسازی محفظه‌های فشار قوی و فشار ضعیف استفاده می‌شود. صفحات دایروی پاره شونده، در صنایع مختلف، کاربردهای گوناگونی دارند. کاربرد به‌عنوان شیر سریع‌العمل در تونل‌های موج شاک یکی از این موارد می‌باشد. هنگامی که فشار پشت صفحه‌ی دایروی به حد پارگی برسد، با پاره شدن دیسک مسیر جریان پرفشار به داخل محفظه‌ی کم فشار باز می‌شود. از جمله کاربردهای این صفحات می‌توان به کاربرد در دستگاه شبیه‌ساز موج انفجار و کاربرد در شیرهای کنترل فشار اشاره نمود. در یک گزارش وانگ و شامامی در سال ۱۹۶۸ به بررسی کمانش صفحات دایروی فلزی که دورتادور محیط آن گیردار شده بود، بر اساس دو تئوری افزایشی و تئوری کرنش کل

در پلاستیسیته پرداختند. آنها ورق را به صورت ماده‌ای که ظرفیت کرنش سختی داشته و در جهت ضخامت ناهمسانگرد است فرض کردند. نتایج آنها به این صورت بود که طبق تئوری افزایشی، کرنش در قطب افزایش می‌یابد تا زمانی که فشار به مقدار ماکزیمم خود یعنی فشار ناپایداری برسد و سپس فشار کاهش می‌یابد، درحالی‌که تئوری کرنش کل نتایج کاملی را در این راستا ارائه نمی‌دهد [۶]. در سال ۱۹۸۱ و ۱۹۸۴ ایلاهی، پارمار و ملور به بررسی برآمدگی هیدرواستاتیک صفحات دایروی آلومینیومی و برنجی نرم با استفاده از تئوری ناپایداری برای صفحات دایروی بدون شیار پرداختند. یک روش عددی برای حل روابط حاکم بر تغییر شکل پلاستیک صفحات دایروی فلزی مدور ارائه نمودند. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل عددی و تجربی مشاهده نمودند که ارتباط مناسبی برای روابط فشار، کرنش و هندسه بین این نتایج وجود دارد [۷،۸]. همچنین در بخش طراحی و مهندسی انجمن علمی شیمی در هند برای صفحات دایروی، به کمک نرم‌افزار المان محدود ANSYS امکان طراحی دیسک‌هایی که در اثر تنش‌های کششی دچار شکست می‌شوند بررسی شد. مدل سازی به صورت عددی و با توجه به مقارن بودن صفحات دایروی انجام شد. با مقایسه‌ی این نتایج و نتایج بدست آمده از روابط تجربی خطای قابل توجهی در حدود ۱۰۰ اتمسفر بین فشار پارگی عددی و تجربی مشاهده شد [۹]. در سال ۲۰۰۷، آقای سهراب کاظم اهوازی و دارن رادرفورد، شکست دینامیک صفحات دایروی گیردار تحت شوک زیرآب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها حالت‌های تغییر شکل و شکست را بوسیله عکس‌های فوق سریع به نمایش گذاشتند و در سه مدل فشار پایین، افزایش فشار و فشار بالا تغییر شکل و شکست را بررسی کردند. در مدل اول صفحات متحمل خمش و کشش بدون پارگی بودند. مدل دوم شکست‌های گلبرگی ابتدا شروع شد و با افزایش فشار ضربه‌ای شکست صفحات به صورت پارگی در اطراف تکیه‌گاه خود را نشان داد. در مدل سوم شکست برشی اتفاق افتاد که شامل پارگی دور تا دور تکیه‌گاه گیردار بود [۱۰]. در سال ۱۳۹۳ زمانی و گودرزی، به بررسی تجربی و عددی ماکزیمم خیز ورق دایروی تحت اثر موج شاک حاصل از انفجار پرداختند. با طراحی دو آزمایش که در یکی از آنها موج شاک رسیده به ورق، غیریکنواخت و در دیگری یکنواخت است، به بررسی تاثیر نحوه برخورد موج بر میزان تغییر شکل پرداختند. در دو حالت مذکور دو مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی بیشینه خیز مرکز ورق استخراج کردند. در حالت موج شاک یکنواخت و اماوندگی رخ نداده و تغییر شکل ورق و انرژی کرنشی پلاستیک ذخیره شده در کل

ورق یکسان و یکنواخت بود. در حالت موج شک غیریکنواخت نمونه تنها دچار تغییر شکل شد و در آن واماندگی رخ نداد و میزان تغییر شکل قسمت‌های مرکزی ورق خیلی بیشتر از نواحی نزدیک به تکیه‌گاه است. همچنین از نرم افزار المان محدود برای پیش بینی رفتار ورق در برابر موج شک استفاده کردند [۱۱]. فرسون و همکاران تحقیقاتی جامع در زمینه تغییر شکل مرکز ورق دایروی گیردار تحت فشار عمود بر ورق برای مرکز ملی استاندارد هوانوردی و دپارتمان دریایی ارائه کردند. از ورق‌هایی با آلیاژهای مختلف آلومینیوم با ضخامت‌های متفاوت برای حصول نمودارهای خیز مرکز ورق نسبت به فشار استفاده کردند. هدف ارائه‌ی رابطه‌ی ای جهت محاسبه‌ی ضخامت ورق کف بدنه بود که باید در برابر فشارهای ضربه‌ای از طرف سیال مقاوم باشد [۱۲]. برم برگ در سال ۱۹۵۶ خمش غیرخطی یک صفحه‌ی دایروی تحت فشار هیدرواستاتیک را برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف از جمله گیردار، ساده و پین شده مورد بررسی قرار داد. تأثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی تغییر شکل و تنش خمشی به‌وسیله‌ی روش‌های رایج و عملیات پیچیده‌ی ریاضی مانند تئوری لایه مرزی، آشفتگی، سری پاور و روش تقریبی از نکات حائز اهمیت مطالعاتشان است. در پایان با مقایسه‌ی دقت حل‌های مختلف برای ارزیابی نتایج از روش المان محدود استفاده کرد [۱۳]. واحدی گرده و توحیدی در سال ۱۳۹۴، یک تحلیل خمشی برای صفحات دایروی با نگره‌ی تغییر شکل بزرگ ارائه کردند. هنگامی که نقاط میانی ورق علاوه بر جابجایی عمودی، جابجایی افقی نیز داشته باشند، رفتار غیر هندسی آشکار می‌گردد. برای تحلیل رفتار غیر هندسی از معادلات فون کارمن استفاده کردند که با روش تقریبی حل شد. نوآوری آنها استفاده از تابعی چندجمله‌ای برای تغییر شکل ورق است که برای صفحات دایروی با بارگذاری‌های مختلف با سرعت همگرایی بالا کاربردی است. با مقایسه نتایج بدست آمده مشاهده شد که راهکار پیشنهادی آنها از کارایی بیشتر برخوردار است [۱۴]. بابایی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵، به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی تحت بارگذاری انفجاری با سامانه‌ی پاندول بالستیک پرداختند. آن‌ها تأثیر خواص مکانیکی ماده بر روی میزان تغییر شکل ورق را مورد بررسی و آزمایش‌هایی بر روی ورق با جنس و ضخامت‌های متفاوت اعم از مسی، فولادی و آلومینیومی انجام دادند. شبیه‌سازی‌های لازم را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام دادند و به منظور ارزیابی مدل از آزمایش تجربی استفاده نمودند. با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده

## ۲- الگو سازی نظری و تجربی

### ۲-۱- فرآیند انفجار

پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد انفجاری یک ماده‌ی منفجره، فشار انفجاری چاپمن-ژوگت (C-J)، دمای انفجار و سرعت انفجار هستند. هنگام تکمیل فرآیند شروع انفجار، برهم‌کنش میان گازها با محیط اطراف اتفاق می‌افتد. محصولات گازی دارای فشار و دمای بالا، با ایجاد یک موج فشاری، به سمت خارج گسترش می‌یابند. در این دمای بالا محصولات گازی روان در نظر گرفته می‌شوند در نتیجه برای مدل‌سازی انفجار نیروهای ویسکوز در نظر گرفته نمی‌شوند. در محیط آبی، تراکم لحظه‌ای محیط آبی، گاز پالس فشاری بیرون می‌دهد که با سرعتی سه برابر بیشتر از سرعت صوت در آب منتشر می‌شود [۱۶]. این سرعت بالا به سرعت کاهش یافته و در فاصله‌ای به اندازه‌ی پنج برابر شعاع خرج به مقدار تنها ۲۰٪ بیشتر از سرعت صوت می‌رسد. پس از آن در فاصله‌ی تقریباً ۲۰ برابر شعاع خرج به سرعت صوت کاهش یافته و در این سرعت ثابت انتشار می‌یابد. حباب گازی با سرعتی به مراتب کم‌تر از پالس فشاری منبسط می‌شود. در انفجار در هوا، موج ضربه‌ای<sup>۱</sup> با فصل مشترک گاز-هوا حرکت می‌کند. معادله‌ی حالت<sup>۲</sup> ماده‌ی منفجره که انرژی، فشار و حجم را به هم

ورق یکسان و یکنواخت بود. در حالت موج شک غیریکنواخت نمونه تنها دچار تغییر شکل شد و در آن واماندگی رخ نداد و میزان تغییر شکل قسمت‌های مرکزی ورق خیلی بیشتر از نواحی نزدیک به تکیه‌گاه است. همچنین از نرم افزار المان محدود برای پیش بینی رفتار ورق در برابر موج شک استفاده کردند [۱۱]. فرسون و همکاران تحقیقاتی جامع در زمینه تغییر شکل مرکز ورق دایروی گیردار تحت فشار عمود بر ورق برای مرکز ملی استاندارد هوانوردی و دپارتمان دریایی ارائه کردند. از ورق‌هایی با آلیاژهای مختلف آلومینیوم با ضخامت‌های متفاوت برای حصول نمودارهای خیز مرکز ورق نسبت به فشار استفاده کردند. هدف ارائه‌ی رابطه‌ی ای جهت محاسبه‌ی ضخامت ورق کف بدنه بود که باید در برابر فشارهای ضربه‌ای از طرف سیال مقاوم باشد [۱۲]. برم برگ در سال ۱۹۵۶ خمش غیرخطی یک صفحه‌ی دایروی تحت فشار هیدرواستاتیک را برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف از جمله گیردار، ساده و پین شده مورد بررسی قرار داد. تأثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی تغییر شکل و تنش خمشی به‌وسیله‌ی روش‌های رایج و عملیات پیچیده‌ی ریاضی مانند تئوری لایه مرزی، آشفتگی، سری پاور و روش تقریبی از نکات حائز اهمیت مطالعاتشان است. در پایان با مقایسه‌ی دقت حل‌های مختلف برای ارزیابی نتایج از روش المان محدود استفاده کرد [۱۳]. واحدی گرده و توحیدی در سال ۱۳۹۴، یک تحلیل خمشی برای صفحات دایروی با نگره‌ی تغییر شکل بزرگ ارائه کردند. هنگامی که نقاط میانی ورق علاوه بر جابجایی عمودی، جابجایی افقی نیز داشته باشند، رفتار غیر هندسی آشکار می‌گردد. برای تحلیل رفتار غیر هندسی از معادلات فون کارمن استفاده کردند که با روش تقریبی حل شد. نوآوری آنها استفاده از تابعی چندجمله‌ای برای تغییر شکل ورق است که برای صفحات دایروی با بارگذاری‌های مختلف با سرعت همگرایی بالا کاربردی است. با مقایسه نتایج بدست آمده مشاهده شد که راهکار پیشنهادی آنها از کارایی بیشتر برخوردار است [۱۴]. بابایی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵، به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی تحت بارگذاری انفجاری با سامانه‌ی پاندول بالستیک پرداختند. آن‌ها تأثیر خواص مکانیکی ماده بر روی میزان تغییر شکل ورق را مورد بررسی و آزمایش‌هایی بر روی ورق با جنس و ضخامت‌های متفاوت اعم از مسی، فولادی و آلومینیومی انجام دادند. شبیه‌سازی‌های لازم را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام دادند و به منظور ارزیابی مدل از آزمایش تجربی استفاده نمودند. با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده

<sup>2</sup> Equation of State

<sup>1</sup> shock wave

رابطه‌ی (۱) بیانگر این معادله است [۱۷].  
 ربط می‌دهد برای مدل‌سازی عددی فرآیند شروع انفجار حیاتی است. متداول‌ترین معادله حالت مورد استفاده برای توصیف وضعیت محصولات انفجاری جونز-ویلیکنز-لی (JWL) است. رابطه‌ی (۱) بیانگر این معادله است [۱۷].

رابطه‌ی (۱) بیانگر این معادله است [۱۷].  
 ربط می‌دهد برای مدل‌سازی عددی فرآیند شروع انفجار حیاتی است. متداول‌ترین معادله حالت مورد استفاده برای توصیف وضعیت محصولات انفجاری جونز-ویلیکنز-لی (JWL) است. رابطه‌ی (۱) بیانگر این معادله است [۱۷].

$$p_{JWL}(V, U_{in}) = A \left(1 - \frac{Q}{R_1 V}\right) e^{(-R_1 V)} + B \left(1 - \frac{Q}{R_2 V}\right) e^{(-R_2 V)} + \frac{Q}{V} E_{in} \quad (1)$$

که در آن  $A, B, R_1, R_2$  و  $Q$  ثابت هستند،  $p_{JWL}$  فشار است،  $V$  حجم نسبی در مقایسه با حجم اولیه‌ی ماده‌ی منفجره و  $U_{in}$  انرژی درونی در واحد حجم است.

### ۲-۲- انتشار موج ضربه‌ای

به دلیل تفاوت در خواص آب و هوا و نحوه‌ی واکنش محصولات گازی منفجره با محیط اطراف در پدیده‌ی انتشار موج اختلاف چشم‌گیری میان محیط هوا و آب وجود دارد. خواص فیزیکی مهم و موثر در پدیده‌ی انفجار محیط انتشار، سرعت صوت، چگالی، تراکم‌پذیری<sup>۲</sup>، دما و فشار محیطی<sup>۳</sup> هستند. درحالی که هوا تراکم‌پذیر است، آب تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. آب و هوا به عنوان سیالات روان در نظر گرفته می‌شود. روابط میان پارامترهای موج ضربه‌ای و مقدار خرج و فاصله‌ی توقف<sup>۴</sup> برای انفجار در هوا و آب هر دو با آزمایشاتی به صورت تجربی فرموله و تایید شده‌اند.

### ۳-۲- انفجار در هوا

موج ضربه‌ای افزایشی لحظه‌ای و کاهش‌ی نامی دارد [۱۸]. پارامترهای مورد توجه برای فرآیند آسیب، اضافه فشار بیشینه، مدت زمان و ضربه نسبت به فاصله هستند. از فاز منفی موج انفجار معمولاً<sup>۴</sup> صرف‌نظر می‌شود. هرچه اضافه فشار در جبهه‌ی ضربه بیشتر باشد، سرعت موج ضربه‌ای بیشتر خواهد بود. با پیشروی موج انفجاری به سمت خارج، فشار در جبهه‌ی ضربه کاهش یافته و سرعت به تناسب آن کم می‌شود. در فواصل طولانی، هنگامی که اضافه فشار به ۷ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد،

$$p(t) = P_0 + P_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_d}\right) e^{-\frac{\alpha t}{t_d}}\right] \quad (2)$$

که در آن  $P_0$  فشار محیطی،  $t$  زمان لحظه‌ای،  $t_d$  ماندگاری مثبت پالس فشاری و  $\alpha$  پارامتر شکل موج است که به  $P_m$  اضافه فشار بیشینه موج ضربه‌ای بستگی دارد. پارامتر شکل موج  $\alpha$  به عنوان پارامتری قابل تنظیم در نظر گرفته می‌شود که به نحوی انتخاب می‌شود که روابط اضافه فشار - زمان مقادیر مناسبی از ضربه‌ی انفجار را فراهم نمایند. برای انفجارهای شیمیایی، اضافه فشار بیشینه با رابطه‌ی (۳) بیان می‌شود [۱۹].

$$t_a = \frac{1}{c_a} \int_{r_e}^r \left[ \frac{1}{1 + \frac{6P_m}{7P_0}} \right]^{1/2} dr \quad (3)$$

ماندگاری پالس ضربه  $t_d$  برای انفجار شیمیایی بر حسب میلی - ثانیه مطابق رابطه‌ی (۴) است [۱۹].

$$\frac{t_d}{W^{1/3}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{s'}{0.54}\right)^{10}\right]}{\left[1 + \left(\frac{s'}{0.02}\right)^3\right] \left[1 + \left(\frac{s'}{0.74}\right)^6\right] \sqrt{1 + \left(\frac{s'}{6.9}\right)^2}} \quad (4)$$

سرعت موج شاک مطابق رابطه‌ی (۵) است [۲۰].

$$c_{sa} = c_a \left(1 + \frac{6P_m}{P_0}\right)^{1/2} \quad (5)$$

که در آن  $c_a$  سرعت صوت در محیط است.  $c_p$  سرعت ذره (یا سرعت باد بیشینه پشت جبهه) مطابق رابطه‌ی (۶) بدست می‌آید [۲۰].

$$c_p = \frac{5P_m}{7P_0} \frac{c_a}{\left(1 + \frac{6P_m}{7P_0}\right)^{1/2}} \quad (6)$$

<sup>3</sup> Ambient Pressure

<sup>4</sup> stand off

<sup>1</sup> Jones-Wilkins-Lee

<sup>2</sup> Compressibility

به صورت تقریبی با رابطه‌ی (۱۲) برابر است [۲۲].

$$I_p/I = P_{pm}/P_p \quad (12)$$

برای یک ضربه‌ی ضعیف،  $P_m \ll P_0$ . اضافه فشار بیشینه‌ی صفحه دو برابر فشار برخوردی بیشینه است پس ضربه‌ی رسیده به صفحه دو برابر ضربه‌ی برخوردی است. برای شبیه‌سازی ضربه‌ی جانبی یکنواخت روی سطح صفحه برای مطالعه‌ی واکنش انفجاری ورق‌ها، با احتساب استفاده از حداقل مقدار از ماده‌ی منفجره، به دلیل ملاحظات ایمنی و اقتصادی به نوعی از آزمایش‌ها می‌انجامد. فشار پله‌ای،  $P_m$  مطابق رابطه‌ی (۱۳) به عنوان تابعی از ضربه‌ی مجموع صفحه  $I_{tp}$  سطح در معرض موج صفحه  $A$  و زمان سوختن  $\tau$  به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۲۳].

$$P_m = \frac{I_{tp}}{A\tau} \quad (13)$$

برای شبیه‌سازی امواج انفجاری با فشار بیشینه‌ی لازم روی صفحه و ضربه‌ی صفحه‌ای، لوله‌های شاک<sup>۲</sup> ساخته می‌شوند. جبهه‌های موج ضربه‌ای کروی که توسط فرآیند شروع انفجار مستقیم ایجاد می‌شوند به یک سیر تکاملی پیچیده‌ی فضا-زمانی برای توزیع فشار روی یک صفحه‌ی صاف می‌انجامند، که نتیجه‌اش پیش‌بینی ضعیف برای تغییر شکل ورق است [۲۴]. بر خلاف آن، جبهه‌های تخت موج ضربه‌ای که توسط لوله‌ی شاک ایجاد می‌شوند امکان مدل‌سازی دقیق را فراهم می‌کنند.

#### ۲-۵- تغییر شکل پلاستیک

انحراف مرکزی صفحات تغییر شکل پلاستیک یافته به عنوان نشانه‌ی اندازه‌ی صدمه ناشی از انفجار در نظر گرفته می‌شود. جانسون برای ارزیابی رفتار فلزات تحت بارگذاری ضربه‌ای، از یک عدد بدون بعد مطابق رابطه‌ی (۱۴) استفاده کرد [۲۵].

$$\alpha_j = \frac{\rho_p V^2}{\sigma_d} \quad (14)$$

که در آن،  $V$  سرعت ضربه،  $\rho_p$  چگالی ماده‌ی سازنده صفحه و

چگالی  $\rho$ ، هوای پشت جبهه‌ی ضربه مطابق رابطه‌ی (۷) با چگالی محیط  $\rho_0$  ارتباط دارد [۲۰].

$$\rho/\rho_0 = \frac{7 + 6P_m/P_0}{7 + P_m/P_0} \quad (7)$$

فشار دینامیک  $q$  بیانگر انرژی جنبشی بر حسب واحد حجم هوایی است که بلافاصله پشت جبهه‌ی ضربه قرار می‌گیرد. رابطه‌ی (۸) فشار دینامیک را بیان می‌کند [۲۰].

$$q = \frac{5}{2} \frac{P_m^2}{7P_0 + P_m} \quad (8)$$

اضافه فشار بیشینه  $P_m$  بر حسب مگا پاسکال مطابق رابطه‌ی (۹) است [۲۱].

$$P_m = 1 \cdot 13 S'^{(-2 \cdot 1)} \\ 1 \leq S' \leq 10 \quad (9)$$

$$P_m = 0 \cdot 183 S'^{(-1 \cdot 16)} \\ 10 \leq S' \leq 200$$

$S$  در آن بر حسب  $m$  است. ضربه‌ی موج ضربه‌ای  $I$  بر حسب  $Ns/m^2$  در رابطه‌ی (۱۰) آمده است [۲۱].

$$I = 203 S'^{(-0 \cdot 91)} \\ 1 \leq S' \leq 10 \quad (10)$$

$$I = 335 S'^{(-1 \cdot 06)} \\ 10 \leq S' \leq 200$$

#### ۲-۴- بر همکنش سیال - صفحه

زمانی که یک موج انفجاری در هوا به یک صفحه می‌رسد و با زاویه‌ی صفر به آن برخورد می‌کند، به صورت عمودی منعکس می‌شود. اضافه فشار بیشینه روی صفحه (که به صورت فشار بازتابی شناخته می‌شود)،  $P_{pm}$  از رابطه‌ی رانکین هوگونیوت<sup>۱</sup> برای گاز ایده‌آل مطابق رابطه‌ی (۱۱) بدست می‌آید [۲۲].

$$P_{pm} = \frac{2P_m(7P_0 + 4P_m)}{7P_0 + P_m} \quad (11)$$

نسبت ضربه‌ی صفحه به واحد سطح (که به صورت ضربه‌ی بازتابی شناخته می‌شود)،  $I_p$ ، به ضربه‌ی برخوردی به واحد سطح

<sup>2</sup> Shock Tube

<sup>1</sup> Rankine Hugoniot

$\sigma_d$  تنش آسیب زنده است که برابر تنش تسلیم<sup>۱</sup>  $\sigma_Y$  ماده‌ی سازنده‌ی صفحه در نظر گرفته می‌شود. عدد آسیب جانسون<sup>۲</sup> تنها زمانی قابل بکار بردن است که صفحات دارای ابعاد مشابهی باشند. می‌توان عدد آسیب را بر حسب ضربه مطابق رابطه‌ی (۱۵) نوشت [۲۶].

$$\alpha_j = \frac{I_{tp}^2}{A^2 t^2 \rho_p \sigma_Y} \quad (15)$$

که در آن  $t$  ضخامت ورق است. پارامتر آسیب اصلاح شده  $\Phi$  توسط نوریک و مارتین برای ورق دایره‌ای مطابق رابطه‌ی (۱۶) - الف) و برای ورق‌های مستطیلی طبق رابطه‌ی (۱۶) - ب) ارائه شده است که ابعاد صفحه و بارگذاری را در بر می‌گیرد [۲۶، ۲۷].

$$\Phi_c = \frac{I_{pt}}{\pi R t^2 (\rho_p \sigma_Y)^{1/2}} \quad (16 \text{ الف})$$

$$\Phi_r = \frac{I_{pt}}{2 t^2 (4 a b \rho_p \sigma_Y)^{1/2}} \quad (16 \text{ ب})$$

### ۳- مبانی اجزا محدود

پیشرفت کدهای امروزی همراه با تنوع بیشتر در مدل‌های ماده، معادلات حالت و قابلیت‌هایی نظیر مش‌سازی مجدد و تعریف انواع المان‌ها، سطوح تماس و همچنین افزایش سرعت حل، توان مدل‌سازی، تحلیل و پردازش نتایج را بالا برده است. روش‌های متفاوتی در حل روش عددی اجزا محدود از قبیل روش‌های حل معادلات حاکم، روش‌های مش‌بندی اوپلری، لاگرانژی و اوپلری - لاگرانژی دلخواه<sup>۳</sup>، روش‌های حل ضمنی<sup>۴</sup> و صریح<sup>۵</sup> امروزه مورد استفاده است. اکثر مسائل ضربه با سرعت بالا را می‌توان به کمک کدهای انتشار موج، که اغلب به آنها هیدروکد<sup>۶</sup> گفته می‌شود، مدل نمود. هیدروکدهای پیشرفته پاسخ مواد را به دو بخش حجمی<sup>۷</sup> و اتساعی<sup>۸</sup> تقسیم می‌کنند. نوعاً در کدهای اجزا محدود<sup>۹</sup> و تفاضل محدود<sup>۱۰</sup> فرمولاسیون نموی الاستیک - پلاستیک برای توصیف پاسخ برشی و معیار تسلیم ون-مایرز برای توصیف شروع تسلیم بکار می‌رود. برای شبیه‌سازی موفق

پدیده‌های ضربه لازم است مش‌بندی مناسب و مدل ماده متناسب با مشاهدات تجربی و داده‌های مناسب در محدوده کرنش واقعی برای مدل ماده در دست باشد. معادلات حاکم بر اجسام جامد تحت بارهای شامل معادلات بقا جرم، بقا اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای، بقا انرژی، روابط مشخصه شامل پاسخ حجمی و اتساعی، معیار شکست و رفتار پس از شکست است. معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای فوق را به راحتی می‌توان نوشت، اما حل آنها مشکل است. این معادلات برای تعداد محدودی از مسائل به شکل کلاسیک قابل حل است، اما به سختی می‌توان یک حل کلی برای معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای ارائه داد. بنابراین حل آنها به روش‌های عددی ضرورت یافته است. دو روش مهم مورد استفاده در کدهای ایجاد شده برای مطالعه انتشار موج و ضربه روش‌های اجزا محدود و تفاضل محدود می‌باشد. با توجه به اینکه روش اجزا محدود در هندسه‌های نامنظم می‌تواند بکار رود و علاوه نوع و اندازه مش‌های آن در یک جسم می‌تواند متنوع باشد، در این مقاله استفاده می‌شود. همچنین از روش مش‌بندی اوپلری - لاگرانژی برای حل عددی روش اجزا محدود استفاده می‌شود.

### ۳-۱- مدل‌سازی موج انفجاری

مباحث نظری لازم برای مدل نمودن لوله‌ی شاک و شبیه‌سازی انفجار موج توضیح داده شد. در این قسمت به مدل‌سازی لاگرانژی لوله شاک و مدل‌سازی اوپلری هوا و ماده منفجره پراخته می‌شود. هدف از ارائه‌ی این قسمت تحلیل اثر پیشروی موج شاک بر روی بدنه لوله شاک و مقایسه آن با نتایج و مشاهدات تجربی و همچنین نحوه پیشروی موج انفجار در هوا است. در مدل‌سازی مذکور هوا، ماده‌ی منفجره، جنس ماده لوله شاک و ورق هدف باید لحاظ شود. بدین منظور از C4 به عنوان ماده منفجره، از فولاد ST37 برای ماده لوله شاک و از Al 6061 T6 - برای ورق هدف استفاده می‌شود. شرایط اولیه‌ای که برای هوا به عنوان پرکننده‌ی اوپلری مدل در نظر گرفته می‌شود، طبق

<sup>6</sup> Hydrocode

<sup>7</sup> Volumetric

<sup>8</sup> Deviatoric

<sup>9</sup> Finite Element (FE)

<sup>10</sup> Finite Difference (FD)

<sup>1</sup> Yield Stress

<sup>2</sup> Johnson's Damage Number

<sup>3</sup> Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

<sup>4</sup> Implicit

<sup>5</sup> Explicit



جدول ۳ نوع اتصالات اجزا در نرم افزار

	Air	Head tube	Shock tube	Target
Air	Yes	No	No	No
Head tube	No	Yes	Yes (Pinned)	No
Shock tube	No	Yes (Pinned)	Yes	Yes (Pinned)
Target	No	No	Yes (Pinned)	Yes

در ماژول اندرکنش<sup>۱</sup>، با تعریف اندرکنش‌های لاگرانژ-لاگرانژ و لاگرانژ-اویلر مطابق جدول (۴) و انتخاب اندازه فضای خالی<sup>۲</sup> به اندازه یک دهم کوچکترین المان تنظیمات مدل‌سازی به اتمام می‌رسد. در ماژول انفجار، نقطه و زمان شروع انفجار مطابق جدول (۵) تعریف می‌گردد.

جدول ۴ اندرکنش‌های لاگرانژی-لاگرانژی

	I Min	I Max	J Min	J Max	Headtube	Shocktube	Target
Headtube	1	21	1	80	Yes	Yes	Yes
Shocktube	1	721	1	25	Yes	Yes	Yes
Target	1	5	1	102	Yes	Yes	Yes

جدول ۵ مختصات نقطه شروع انفجار

X Coordinate	Y Coordinate	Initiation time	Range of Influence
7.00E+01	0.00E+00	0.00E+00	Unrestricted

#### ۴- طراحی و ساخت لوله شاک انفجاری و آزمایشات تجربی

پس از انجام شبیه‌سازی لوله شاک انفجاری توسط نرم‌افزار انسیس اتوداین با هدف رسیدن به جبهه موج نسبتاً تخت و یکنواخت و هم‌چنین در نظر گرفتن سطح مقطع مورد نظر برای صفحه دایروی شکل به ابعاد مناسب لوله‌شاک بدست آمد. قطر داخلی لوله شاک که همان قطر سطح مقطع آزاد ورق‌های آلومینیومی هدف در معرض بار انفجاری نیز می‌باشد، برابر ۱۵۵ میلی‌متر است. با بررسی جنس‌های مختلف تجاری و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته با نرم افزار، به دلیل طراحی لوله برای تست‌های از ۰ تا ۱۰۰ گرم ماده منفجره و کاهش میزان هزینه‌های تراشکاری و هم‌چنین اطمینان از تحمل مکانیکی، ضخامت مناسب ۲۴ میلی‌متر انتخاب شد. ابعاد نهایی لوله شاک پس

جدول (۱) می‌باشد. مقادیر مطلوب شرایط مرزی برای لوله‌ی شاک و ورق هدف در جدول (۲) آمده است. واحدهای اندازه‌گیری بر اساس SI می‌باشد.

جدول ۱ شرایط اولیه تعریف شده برای هوا به عنوان پرکننده اویلری

Name	Material	Density	Internal Energy	Shell Thickness	X Velocity	Y Velocity
initial	AIR	1.23E-03	2.08E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

جدول ۲ شرایط مرزی تعریف شده در مدل

TYPE	Coordinate System	Preferred Material	TYPE	Coordinate System	Constant X-Velocity	Constant Y-Velocity
Flow out (Euler)	0	ALL-EQUAL	General 2D Velocity	0	0.00000E+00	0.00000E+00

با توجه به کارهای پیشین شرایط اولیه هوا به عنوان ماده پرکننده و همچنین شرایط مرزی مناسب برای لوله و ورق تعیین شد. ادامه‌ی شبیه‌سازی در سه حالت کلی بررسی خواهد شد. پارامترهایی از قبیل فاصله‌ی ورق‌های هدف و تعداد لایه‌های بکار رفته و همچنین نحوه‌ی اتصال و شرایط تکیه‌گاهی در هرکدام از این حالت‌ها متفاوت است. شکل (۱) بیانگر نمای کلی از رسم اجزا در اتوداین می‌باشد که نقاط اتصالی مطابق جدول (۳) تعریف می‌گردند.

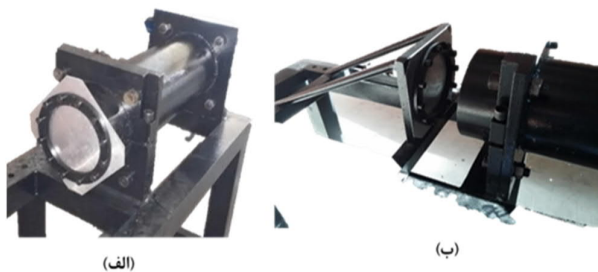


شکل ۱ تصویری از اجزا در شبیه‌سازی نرم افزاری

<sup>2</sup> Gap Size

<sup>1</sup> Interaction

لوله شاک از جمله دیسک ابتدایی لوله شاک و بدنه لوله شاک نیز با توجه به ماده‌ی مرتبط از نوع لاگرانژی ترسیم می‌گردند. حالت دوم مربوط به آزمایش‌های شماره ۶ و ۷ است. در این آزمایش‌ها متغیر مورد بررسی تعداد لایه‌ی ورق‌های آلومینیومی است. در این آزمایش‌ها، به ترتیب ۲ و ۳ لایه ورق هدف در دهانه لوله شاک مشابه وضعیت دسته قبلی نصب می‌شود. مقدار خرج در آن‌ها ثابت و برابر  $4/5$  گرم است. حالت سوم آزمایش‌های شماره ۸ تا ۱۱ را شامل می‌شود. در این آزمایش‌ها یک لایه ورق با ضخامت ۱ میلی‌متری با فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از دهانه لوله شاک انفجاری و بر روی صفحه‌گیر متحرک طبق شکل (۳ - ب) قرار می‌گیرد. وزن خرج‌های متفاوت از  $1/3$  تا  $7/5$  گرم بر روی آن تست می‌شود تا تاثیر فاصله گرفتن از دهانه لوله شاک و افت فشار محسوس حاصل از آن و تغییرات خیز ورق مشاهده و بررسی شود.



شکل ۳ قرارگیری ورق هدف در آزمایش‌های الف) دسته اول و دوم (ب) دسته سوم

##### ۵- نتایج

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، آزمایش‌های تجربی در این مقاله در سه دسته کلی انجام شد. در هر دسته پارامتری مشخص بررسی و نتایج تغییر آن پارامتر بر روی ورق‌های هدف تحت بارگذاری انفجاری مطالعه شد. در تمام تست‌های تجربی صورت گرفته در این مقاله ورق هدف از جنس آلومینیوم-T6-Al6061 می‌باشد. همچنین این آزمایش‌ها در هیدروکد اتوداین نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده‌اند. مقدار خیز به وجود آمده در ورق‌های هدف در آزمایش تجربی با استفاده از گیج‌هایی که در محل قرارگیری ورق تعبیه شده‌اند، محاسبه می‌شود.

از تراشکاری سطح داخلی، خارجی، سطوح ابتدا و انتها به قطر داخلی ۱۵۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۰۳ میلی‌متر و طول لوله ۷۲۰ میلی‌متر رسید. طراحی نهایی لوله شاک در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲ تصویر نهایی لوله شاک

در این مقاله تاثیرات موج انفجاری بر روی ورق هدف و بررسی نتایج این بارگذاری بر روی آن، مثل خیز مرکز ورق و نحوه تغییر شکل آن با متغیرهای مختلف مانند وزن خرج مواد منفجره، فاصله صفحات از دهانه لوله شاک و تعداد لایه‌های ورق هدف در آزمون‌های تجربی بررسی می‌شود. ابعاد ورق‌های هدف مطابق با دهانه لوله شاک می‌باشد. به این منظور از ورق آلومینیومی با آلیاژ T6-6061 و ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. نمونه‌ای از ورق تهیه شده برای اطمینان و صحت آلیاژ مورد استفاده، در مرکز پژوهش متالورژی رازی تحت تست کشش قرار گرفت. ورق‌های هدف را در اندازه‌های ۲۲۰ در ۲۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. آزمون‌های تجربی در سه دسته‌ی قرارگیری ورق‌های هدف بدون فاصله و مستقیماً بر روی دهانه لوله شاک، استفاده از ورق‌های چندلایه هدف بدون فاصله و مستقیماً بر روی دهانه لوله شاک و قرارگیری هدف با فاصله متغیر از دهانه لوله شاک و نصب آن‌ها بر روی صفحه‌گیر متحرک قابل تنظیم انجام می‌شوند. حالت اول شامل تست‌های شماره ۱ تا ۵ می‌شود. در این تست‌ها ورق هدف آلومینیومی با ضخامت ۱ میلی‌متر از جنس آلیاژ T6-6061 مستقیماً بر روی دهانه لوله شاک از جنس فولاد ST37 بدون فاصله طبق شکل (۳ - الف) بسته می‌شود. در مدل‌سازی اجزا محدود، محیط از نوع اولیری با ماده هوا است و ماده منفجره اولیری در مختصات مطلوب تعبیه می‌شود. اجزا



## ۵-۱- آزمایش‌های سری اول

این دسته آزمایش‌های شماره یک تا پنج را شامل می‌شود. هدف از آزمایش‌های این دسته بررسی تاثیر موج انفجار بر روی ورق‌های آلومینیومی است. ضخامت ورق یک میلی‌متر و گستره تغییر مقدار ماده منفجره، از ۰/۶ گرم تا وزن خرج ۷/۵ گرمی است.

در آزمایش شماره یک، هدف بدست آوردن قدرت انفجار چاشنی الکتریکی و معادل‌سازی آن با ماده منفجره C4 است. با انجام آزمایش مشاهده شد که اثرات بارگذاری انفجاری ناشی از انفجار چاشنی الکتریکی به تنهایی باعث خیز بسیار کم در ورق هدف می‌شود. مطابق شکل (۴ - الف) پس از طی زمان ۰/۴ میلی ثانیه ماکزیمم فشار جبهه موج به ورق هدف می‌رسد و پس از آن بصورت نمایی تا حدود ۱/۵ میلی ثانیه بارگذاری ناشی از موج انفجار پایان می‌رسد. مقدار خیز محاسبه شده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مطابق جدول ۶ می‌باشد.

## جدول ۶ میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره یک و شبیه-

سازی آن		
خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۴/۱	۳/۵۵	۱۳/۴۱

در آزمایش شماره دو، ورق موردنظر با مشخصات ورق آزمایش یک، تحت بار حاصل از انفجار ۱/۳ گرم ماده انفجاری C4 قرار می‌گیرد. در این آزمایش خیز مرکزی ورق بیشتر از مقدار آن در شکل آزمایش شماره یک گزارش شد. نمودار فشار - زمان آن در شکل (۴ - ب) مشاهده می‌شود. مطابق شکل پس از طی زمان ۰/۶ میلی ثانیه ماکزیمم فشار جبهه موج یعنی فشاری در حدود ۱۸۰۰ کیلوپاسکال به ورق هدف می‌رسد و پس از آن بصورت نمایی تا حدود ۱/۵ میلی ثانیه بارگذاری ناشی از موج انفجار پایان می‌رسد. مقادیر خیز ثبت شده از دو آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در جدول ۷ آمده است.

## جدول ۷ میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره دو و شبیه-

سازی آن		
خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۱۵	۱۳/۳	۱۱/۳۳

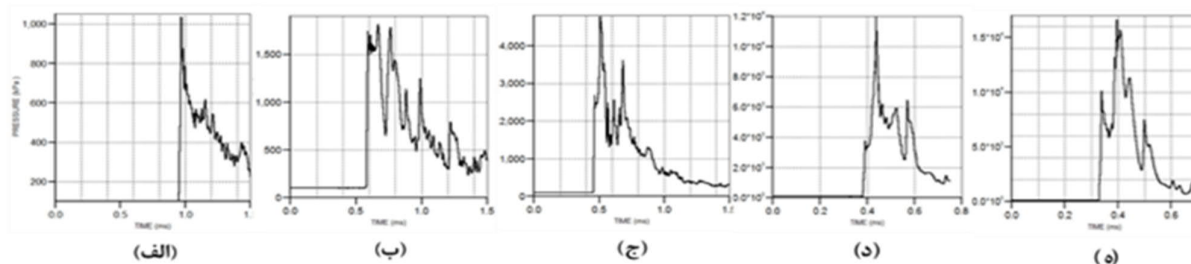
در آزمایش شماره سه، تاثیر بار حاصل از انفجار ۲/۵ گرم ماده انفجاری C4 بر روی ورق با مشخصات قبلی بررسی می‌شود. انفجار در این آزمایش باعث به وجود خیز قابل وضوح بر روی ورق هدف می‌شود. در شکل (۴ - ج) نمودار فشار زمان مربوط به این آزمایش مشاهده می‌شود. پس از طی زمان ۰/۵ میلی ثانیه ماکزیمم فشار جبهه موج که فشاری در حدود ۵ مگا پاسکال است، به ورق هدف می‌رسد و پس از آن بصورت نمایی طی حدود ۱/۵ میلی ثانیه بارگذاری ناشی از موج انفجار به صفر می‌رسد. قابل توجه است که با بالا رفتن مقدار ماده منفجره در هر آزمایش نسبت به قبل، زمان رسیدن به ماکزیمم فشار کاهش یافته که مطابق با فرمول‌های تحلیلی انتشار موج در هواست. برای این نمونه زمان رسیدن به ماکزیمم فشار تقریباً ۴/۵ میلی ثانیه است. نتایج دو آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در جدول ۸ آمده است.

## جدول ۸ میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره سه و شبیه-

سازی آن		
خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۲۴	۲۲/۶	۵/۸۳

در آزمایش شماره چهار مقدار ماده منفجره C4 به ۴/۵ گرم افزایش پیدا می‌کند. در این آزمایش علاوه بر خیز زیاد، در مرکز ورق پارگی و شکاف به وجود می‌آید. نمودار فشار زمان مطابق شکل (۴ - د) است. از آن جایی که ورق دچار پارگی شده است، خیر مرکز ورق را با استفاده از گیج‌های تعبیه شده نمی‌توان محاسبه نمود و تنها می‌توان پارگی ورق را گزارش کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون تجربی با هم مطابقت دارند. در آزمایش شماره پنج مقدار ماده منفجره به ۷/۵ گرم افزایش می‌یابد. در این آزمایش پس از انفجار، پارگی کامل ورق رخ داد. پارگی از محل تکیه‌گاه دچار پارگی شد به نحوی که تکه‌های از

ورق جدا شد. در شکل (۴-۵) نمودار فشار زمان مربوط به این آزمایش مشاهده می‌شود.

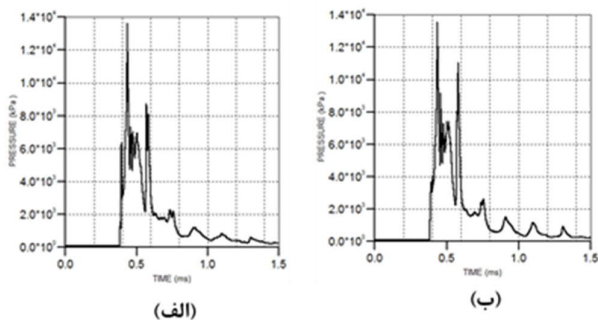


شکل ۴ نمودار فشار - زمان آزمایش‌های شماره الف (ب ۱ ج ۲ د ۳ ه ۴) ۵

می‌کند و به سه عدد افزایش پیدا می‌کند. نمودار فشار زمان حاصل از آزمایش مطابق شکل (۵-ب) می‌باشد. در جدول ۱۰ مقدار خیز اندازه‌گیری شده از آزمون تجربی و شبیه‌سازی ثبت شده است.

جدول ۱۰ میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره هفت و شبیه‌سازی آن

خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۱۴	۱۱/۵	۱۷/۸۵



شکل ۵ نمودار فشار - زمان آزمایش‌های شماره الف (ب ۶) ۷

### ۳-۵- آزمایش‌های سری سوم

این دسته شامل آزمایش‌های شماره هشت تا یازده می‌شود. در این آزمون‌ها یک لایه ورق با ضخامت ۱ میلی‌متری با فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از دهانه لوله شاک انفجاری و بر روی صفحه‌گیر متحرک قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه‌ی تاثیر میزان فاصله‌ی ورق از دهانه لوله شاک و افت فشار محسوس حاصل از آن و نیز تغییرات خیز ورق وزن خرج‌های متفاوت از ۱/۳ تا ۷/۵ گرم بر روی آن تست خواهد شد. آزمایش شماره هشت، شامل یک لایه ورق یک میلی‌متری از جنس آلومینیوم T6-6061 در فاصله

### ۲-۵- آزمایش‌های سری دوم

در این دسته، آزمایش‌های شماره شش و هفت انجام می‌شود. متغیری که در این دسته آزمایش‌ها بررسی می‌شود تعداد لایه‌های ورق آلومینیومی است. مقدار خرج در این آزمایش‌ها ثابت و برابر ۴/۵ گرم است. همچنین ورق‌های هدف بدون فاصله از دهانه لوله شاک نصب می‌شوند. آزمایش شماره شش شامل دو لایه ورق با ضخامت یک میلی‌متر از جنس آلومینیوم T6-6061 می‌باشد. برای شبیه‌سازی ورق‌های چندلایه در نرم‌افزار فاصله بین لایه‌ها ۲ برابر فاصله خالی بین المان‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مقدار در نرم‌افزار به میزان ۰/۱ اندازه کوچکترین المان است که در این مقاله برابر ۰/۰۵ میلی‌متر محاسبه شد. در شکل (۵-الف) نمودار فشار زمان این آزمایش نشان داده شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقدار خیز تجربی و شبیه‌سازی در جدول ۹ آمده است. مقدار ماده‌ی منفجره در این آزمایش با آزمایش شماره چهار برابر است، در آزمایش شماره چهار ورق با یک لایه دچار پارگی شد اما در این آزمایش با اضافه کردن یک لایه ورق پارگی مشاهده نشد.

جدول ۹ میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره شش و شبیه‌سازی آن

خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۲۰/۵	۱۷/۸	۱۳/۱۷

در آزمایش شماره هفت، با ثابت گرفتن مقدار ماده‌ی منفجره و نحوه‌ی قرارگیری صفحات هدف، تعداد لایه‌های ورق تغییر

خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۱۲	۱۴/۸	۱۸/۹۱

آزمایش شماره نه با افزایش مقدار ماده‌ی منفجره به ۴/۵ گرم انجام شد. نمودار فشار زمان این آزمون مطابق شکل (۶-ج) است. مقادیر خیز ثبت شده در جدول ۱۳ آمده است.

**جدول ۱۳** میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره ده و شبیه-سازی آن

خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۱۹	۲۱/۸	۱۲/۸۴

در آزمایش پایانی مقدار ماده‌ی منفجره به اندازه‌ی ۷/۵ گرم افزایش می‌یابد. نمودار فشار زمان این آزمون در شکل (۶-د) آمده است. در آزمایش تجربی ورق دچار خیزی به اندازه‌ی ۲۶/۲ میلی‌متر می‌شود و این در حالی است که در شبیه‌سازی آزمایش ورق دچار پارگی می‌شود.

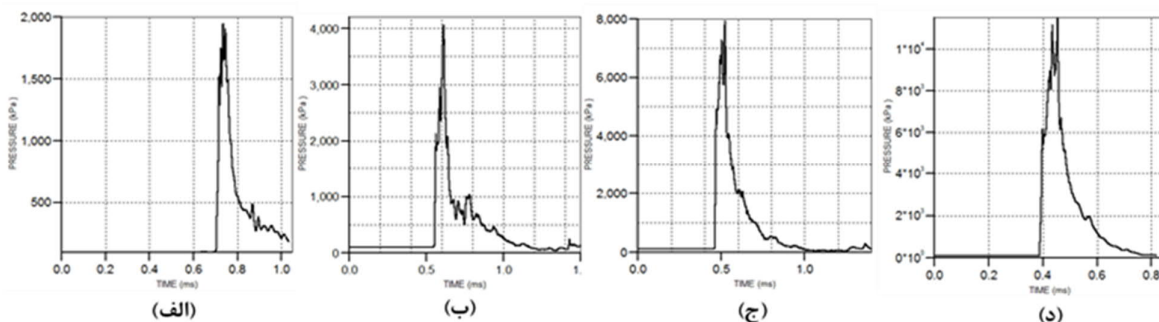
۱۰۰ میلی‌متری از دهانه لوله شاک، تحت بار حاصل از انفجار ۱/۳ گرم ماده انفجاری C4 می‌شود. نمودار فشار زمان این آزمون مطابق شکل (۶-الف) است. مقدار خیز در دو آزمون تجربی و شبیه‌سازی شده با استفاده از گیج‌های تعبیه شده محاسبه شد که در جدول ۱۱ آمده است.

**جدول ۱۱** میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره هشت و شبیه‌سازی آن

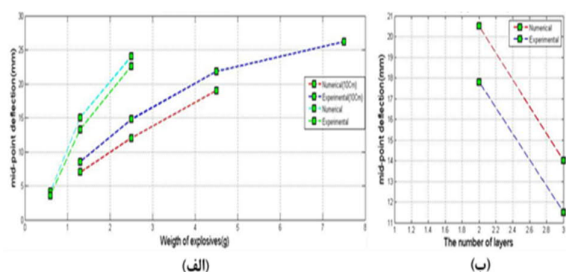
خیز عددی (mm)	خیز تجربی (mm)	درصد خطا
۷	۸/۵	۱۷/۶۵

در آزمایش شماره نه، تنها متغیر آزمون مقدار ماده‌ی منفجره است که به ۲/۵ گرم افزایش پیدا می‌کند. نمودار فشار زمان آن مطابق شکل (۶-ب) است. مقادیر خیز ثبت شده در جدول ۱۲ آمده است.

**جدول ۱۲** میزان خیز ثبت شده از آزمایش تجربی شماره نه و شبیه-سازی آن



شکل ۶ نمودار فشار - زمان آزمایش‌های شماره الف (ب ۸، ج ۹، د ۱۰، ه ۱۱)



شکل ۷ نمودار الف) مقدار خیز با خرج در دسته‌های اول و سوم ب) مقدار خیز با تعداد لایه در دسته دوم

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از طراحی و ساخت لوله شاک، بارگذاری انفجاری داخل لوله شاک بر روی ورق‌های آلومینیومی گیردار

نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها را به طور کلی می‌توان در دو نمودار زیر خلاصه نمود. نمودار شکل (۷-الف) بیانگر نتایج حاصل از آزمایش‌های دسته اول و سوم است. همانگونه که مشاهده می‌شود در آزمایش شبیه‌سازی شده شماره ۱۱ به دلیل پارگی که در ورق اتفاق افتاد، عددی به عنوان خیز در آن ثبت نشده است. نمودار شکل (۷-ب) بیانگر نتایج آزمایش‌های شماره ۶ و ۷ که متغیر اصلی آن تعداد لایه‌های ورق هدف می‌باشد، است.

- تکلایه و چندلایه انجام شد. آزمایش‌های تجربی با استفاده از نرم افزار Autodyn شبیه‌سازی شد که دقت و کارایی بالای نرم افزارهای اجزا محدود در شبیه‌سازی چنین آزمایش‌هایی را نتیجه داد. این آزمایش‌ها شامل بارگذاری انفجاری بر روی صفحات هدف با وزن خرج‌های متفاوت و حالات مختلفی از جمله بدون فاصله از دهانه لوله شاک و با فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از دهانه انجام شد. با بررسی تاثیرات موج انفجار به وجود آمده در داخل لوله شاک، افزایش ۱۰ برابری بیشینه فشار در دهانه لوله شاک و هم‌چنین جبهه موج تخت و وارد آوردن فشار یکنواخت به ورق هدف را شامل شد. با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی آن‌ها در نرم افزار اتودین، اختلاف نتایج ثبت شده ۵ تا ۱۵ درصد است. این مقدار اختلاف بیانگر دقت بالا و مطلوب تست‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته است.
- ۷- مراجع**
- [1] 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).
- [12] B. A. E. McPherson, W. Ramberg, S. Levy, A. E. McPherson, W. Ramberg, and S. Levy, Normal-pressure tests of circular plates with clamped edges, No. 744, 1942.
- [13] E. Bromberg, Non-linear bending of a circular plate under normal pressure, *Commun. Pure Appl. Math.*, vol. 9, no. 4, pp. 633-659, 1956.
- [14] S. Vahedi garde and R. Zia Tohidi, Bending analysis of narrow circular plate by large deformable, 7<sup>th</sup> Mechanical Engineering Students conference, Tehran, 2014.
- [15] H. Babaei, A. Darvizeh, M. Alitavoli, and T. M. Mostofi, Experimental and Analytical Investigation into Plastic Deformation of Circular Plates Subjected to Hydrodynam Loading, vol. 15, no. 2, pp. 305-312, 2015.
- [16] S. Keil. Introduction to underwater explosion research. Portsmouth, Virginia: UERD, Norfolk Naval Shipyard; 1956.
- [17] Alia A, Souli M. High explosive simulation using multimaterial formulations, *Applied Thermal Engineering* 2006; 26:1032 – 42.
- [18] K. D. Gardner, A. G. John, and F. K. Lu, Development of a Shock Loading Simulation Facility, shock, vol. 1000, no. 2, p. 3, 2005.
- [19] Kinnery GF, Graham KJ. Explosive shocks in air. Berlin: Springer Verlag; 1985.
- [20] Glasstone S, Dolan PJ. Effects of nuclear weapons. Washington, DC: US Department of Defence and the Energy Research & Development Administration; 1977
- [21] Alonso FD, Ferradas EG, Perez SJF, Gimeno JR, Alonso JM. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substances, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2006; 19(6):724-8.
- [22] Luccioni B, Ambrosini D. Blast load assessment using hydrocodes.: Larreteguy A, editor. *Mechanica Computational*, vol. XXIV; 2005. p. 329-44. Buenos Aires, Argentina.
- [23] Yuen SCY, Nurick GN. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates, Part I: subjected to uniform blast load, *International Journal of Impact Engineering* 2005; 31(1):55-83.
- [24] Stoffel M, Schmidt R, Weichert D. Shock wave-loaded plates, *International Journal of Solids and Structures* 2001; 38(42-43):7659-80.
- [25] Johnson W. Impact strength of materials. London: Edward Arnold; 1972.
- [26] Nurick GN. An empirical solution for predicting the maximum central deflection of impulsively loaded plates, International conference on mechanical properties of materials at high rates of strain. Oxford: Institute of Physics Society; 1989. p. 457-63. No.12, Session: 9.
- [1] Keshawarz MH, Pouretdal HR. An empirical method for predicting detonation pressure of CHNOFCl explosives. *Thermochimica Acta* 2004; 414:203-8.
- [2] Keshawarz MH, Nazari HR. A simple method to assess detonation temperature without using any experimental data and computer code. *Journal of Hazardous Materials* 2006; 133(1-3):129-34.
- [3] Keshawarz MH. Detonation velocity of pure and mixed CHNO explosives at maximum nominal density. *Journal of Hazardous Materials* 2007; 141(3):536-9.
- [4] Henshall, BD. Some aspects of the use of shock tubes in aerodynamic research. Aeronautical Research Council Reports and Memoranda. R&M No. 3044, London, Her Majesty's Stationery Office, 1957.
- [5] Duff, RE, Blackwell AN. Explosive driven shock tubes. *Review of Scientific Instruments* 37(5):579-586
- [6] N. M. Wang and M. R. Shammamy, On the plastic bulging of a circular diaphragm by hydrostatic pressure, *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 17, no. 1, pp. 43-61, 1969.
- [7] M. F. Ilahi, A. Parmar, and P. B. Mellor, Hydrostatic bulging of a circular aluminium diaphragm, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 23, no. 4, pp. 221-227, 1981.
- [8] M. F. Ilahi and T. K. Paul, Hydrostatic bulging of a circular soft brass diaphragm, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 27, no. 5, pp. 275-280, 1985.
- [9] D. V. R. Murty, Finite Element Analysis of Rupture Disc, *Sci. EL, Des. Eng. Div. Indian Inst. Chem. Technol. India, Tarnaka*, 2006.
- [10] S. Kazemahvazi, D. Radford, V. Deshpande, and N. Fleck, Dynamic failure of clamped circular plates subjected to an underwater shock, *J. Mech. Mater. Struct*, vol. 2, no. 10, 2007.

- [27] Teeling-Smith RG, Nurick GN. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering* 1991; 11(1):77-91.