



## Experimental Investigation of the Effect of Change in Geometric Parameters of Shock Tube on the Intensity of Shock Wave

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Zamani J.\*<sup>1</sup> PhD,  
Hosseinzadeh R.<sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Zamani J, Hosseinzadeh R. Experimental Investigation of the Effect of Change in Geometric Parameters of Shock Tube on the Intensity of Shock Wave. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(3):637-647.

### ABSTRACT

Determining the behavior of structures under high-speed loading at different applications is very important. One of the most important equipment in this field is a shock tube that can simulate the mentioned objects above in a laboratory environment. The aim of this paper is to investigate the effect of the geometrical parameters of the shock tube on the impulse of the shock wave generated. In this study, the effect of change in outlet diameter with the nozzle and the variation in the length of the driver and driven sections on the wave created in the decrease and increase shock intensity has been investigated. In this regard, the functional components of the 3-inch gas-driven shock tube were investigated on the dynamic deformation of aluminum sheets. Based on the results, the length of the driver is not effective on the peak of the generated wave pressure. However, the driven length effects on the deformation of the sheet, in this way that the shorter the driven length is, the higher the dome height will be. The effect of concentrating the shock wave on the sheet is visible in the samples in which the nozzle is embedded. This demonstrates that a more centralized dynamic load has led to deform the sheet. Also, at high pressures compared with lower pressures, the nozzle effect is better in concentrating the shock wave from the explosion in the shock tube.

**Keywords** Shock Tube; Dynamic Loading; Aluminum Sheets; Dome Height; Numerical Simulation

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

ex.forminglab@kntu.ac.ir

#### Article History

Received: May 28, 2018

Accepted: June 12, 2019

ePublished: March 01, 2020

### CITATION LINKS

[1] Explosive driven shock tubes [2] Explosive-driven shock waves in argon [3] Oxy-acetylene driven laboratory scale shock tubes for studying blast wave effects [4] Design of a double diaphragm shock tube for fluid disintegration studies [5] A new shock tube facility for tunnel safety [6] Expansion tube operation with thin secondary diaphragm [7] A theoretical and experimental study of shock-tube flows [8] Numerical and experimental investigation of a supersonic flow field around solid fuel on an inclined flat plate [9] Physics of IED blast shock tube simulations for mTBI research [10] An investigation of high-speed forming of circular plates in a liquid shock tube [11] Development of a shock loading simulation facility [12] Blast loading of epoxy panels using a shock tube [13] Use of a shock tube to determine the bi-axial yield of an aluminum alloy under high rates [14] Shock tube design for high intensity blast waves for laboratory testing of armor and combat materiel [15] Performance of a shock tube facility for impact response of structures [16] Fundamentals of aerodynamics [17] Blast and ballistic loading of structures [18] ABAQUS theory manual [19] Measurements and simulations on the (dynamic) properties of aluminium alloy AA6060

## بررسی تجربی اثر تغییر پارامترهای هندسی لوله شوک بر میزان شدت موج انفجار

جمال زمانی\* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

رامیار حسین زاده MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

مشخص بودن رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری با نرخ بالا در کاربردهای متفاوت بسیار تعیین کننده است. یکی از تجهیزاتی که دارای اهمیت فوق العاده‌ای در این زمینه بوده لوله شوک است که امکان شبیه سازی موارد یاد شده را در محیط آزمایشگاهی فراهم می‌سازد. هدف این مقاله بررسی تاثیر پارامترهای هندسی لوله شوک بر ضربه حاصل از موج شوک ایجاد شده از آن است که در این رابطه با تغییر قطر خروجی آن با نازل و تغییرات طول ناحیه محرک و متحرک به بررسی این تغییرات بر موج ایجاد شده در کاهش و افزایش شدت شوک پرداخته شده است. در این راستا مولفه‌های عملکردی لوله شوک محرک گازی ۳ اینچی روی تغییر فرم دینامیکی ورق‌های آلومینیومی بررسی شد. براساس نتایج به دست آمده طول محرک بر پیک فشار موج ایجاد شده موثر نبوده ولی طول متحرک بر تغییر فرم ورق موثر است، به این نحو که هرچه طول متحرک کمتر باشد ارتفاع گنبد بیشتر خواهد بود. اثر متمرکز شدن موج برخوردی به ورق در نمونه‌هایی که نازل در آنها تعبیه شده قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که بار دینامیکی متمرکزتری باعث تغییر فرم ورق شده است. همچنین در فشارهای بالا در مقایسه با فشارهای پایین تر اثر نازل در متمرکز نمودن موج شوک حاصل از انفجار در لوله شوک بهتر است.

**کلیدواژه‌ها:** لوله شوک، بارگذاری دینامیکی، ورق آلومینیوم، ارتفاع گنبد، شبیه سازی عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۷

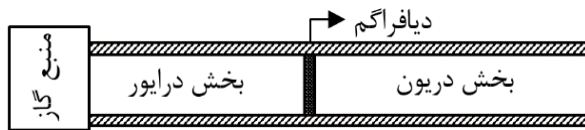
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۲

\* نویسنده مسئول: ex.forminglab@kntu.ac.ir

### ۱- مقدمه

مشخص بودن رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری با نرخ بالا در کاربردهای متفاوت (سطحی، زیرسطحی، هوایی و فضایی) بسیار تعیین کننده است. حملات هوایی، وجود سازه‌های حساس و همچنین ابداع وسایل حمل و نقل با سرعت بالا از جمله اتومبیل، قطار و هواپیما و لزوم گسترش صنعت بسته بندی ابزار خاص و حساس به ضربه، همه و همه مهندسين را بر آن داشته است تا با حساسیت خاصی به مطالعه بحث ضربه و انفجار بپردازند. یکی از تجهیزاتی که دارای اهمیت فوق العاده‌ای در این زمینه است، لوله شوک است که امکان شبیه سازی موارد یاد شده را در محیط آزمایشگاهی فراهم می‌سازد. لوله شوک یا شبیه ساز موج انفجار، ابزاری با قابلیت تولید شوک با تکرارپذیری بالا است که به دو ناحیه اصلی محرک و متحرک تقسیم می‌شود که افزایش فشار گاز در ناحیه محرک باعث حذف المان غشا (که دو ناحیه را از هم جدا می‌کند) شده و اختلاف سطح فشار گاز بین دو ناحیه، باعث تولید موج شوک می‌شود. این افزایش

فشار به طرق مختلفی از جمله انفجار [1, 2]، احتراق [3] یا مخزن گاز پرفشار [4, 5] تامین می‌شود. یکی از رایج ترین انواع لوله شوک، لوله شوک محرک گازی است که شماتیکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ اجزای اصلی لوله شوک محرک گازی

دامنه کاربرد لوله شوک بسیار گسترده است که از آن جمله می‌توان به بررسی جریانات گازی [6]، مدل سازی و بررسی لایه مرزی بر نمونه‌های فیزیکی [7]، الگوی احتراق ترکیبات گازی و سوخت جامد [8] و کاربردهای پزشکی و نظامی از جمله بررسی آسیب مغزی ناشی از انفجار [9] و ساخت زره و تجهیزات محافظتی برای کاهش این اثرات اشاره کرد. یکی از این کاربردهای استفاده از لوله شوک برای آزمایش ورق در امواج شوک با ماخ بالا (ایجاد و شبیه سازی شرایط نزدیک به انفجار) است. با توجه به اینکه لوله‌های شوک بهترین دستگاه برای تعیین میزان مقاومت سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی در محیط آزمایشگاهی هستند، از این رو با داشتن یک لوله شوک با قابلیت تغییر سطح فشار برخورد موج به سازه، امکان بررسی کلیه سازه‌های دریایی، هوایی و فضایی در برابر امواج شوک دینامیکی مهیا می‌شود. کارهای بسیار جدیدی در این حوزه در حال انجام است که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است.

کاسینگ و اسکایوس [10] یک لوله شوک مایع را به منظور شکل دهی ورق‌های دایره‌ای طراحی کردند. لوله شوک طراحی شده به صورت عمودی بوده که دارای طول کلی ۴/۵m است. جنس لوله از فولاد ضدزنگ بوده و قطر خارجی آن ۱۰۶mm و قطر داخلی آن ۵۶mm است که سطح داخلی آن توسط فرآیند هونینگ صاف و یکنواخت شده است. فشار در قسمت متحرک حدود ۵۰mbar است. در انتها و در قسمت آزمایش لوله شوک ورق‌های مسی به طور کامل مهار شده و تحت بارگذاری ضربه‌ای این سامانه قرار گرفتند. ایشان با بررسی اثر ضخامت بر نرخ کرنش در مرکز دیسک بعد از شکل دهی، نشان دادند با کاهش ضخامت، میزان نرخ کرنش در شکل دهی تحت امواج شوک یکسان در مرکز ورق افزایش می‌یابد.

گاردنر و همکاران [11] در صدد بهبود و توسعه امکانات بارگذاری شوک برای شبیه سازی اثرات انفجار بر ساختار مواد برآمدند. این تجهیزات شامل تونل‌های شوک رایج است که از نظر ساختاری اصلاحاتی روی آنها انجام شده است. تونل شوک مورد استفاده ایشان شامل یک بخش محرک به طول ۳m و قطر ۱۵cm، بخش غشا و یک بخش متحرک به طول ۸/۲۳m و قطر ۱۵cm و نگه دارنده نمونه بتنی در بخش آزمایش است. ایشان با استفاده از این لوله شوک توانستند امواج شوک معادل با انفجار TNT با چرم و فواصل مختلف را تولید کنند.

۳ اینچی انتها بسته بوده که گاز نیتروژن به داخل محفظه مربوطه تزریق می‌شود. برای این منظور از یک کپسول فشار قوی استفاده شده که به وسیله رگلاتور فشار خروجی تنظیم و توسط شیر کنترلی به داخل محفظه محرک هدایت می‌شود. جزئیات لوله شوک یادشده در شکل ۲ قابل مشاهده است. این لوله شوک سردکار با محدوده نسبت فشار ۱۰۰bar در دامنه حرارتی ۰-۱۰۰°C در نسبت‌های فشار بالا، توانایی تولید موج شوک با پیک بیش فشار و سرعت‌های مختلف از چند صد کیلوپاسکال تا چند مگاپاسکال و از دو تا پنج ماخ را دارد.

محل برای مهار کامل ورق‌های آلومینیومی در قسمت انتهای لوله شوک در ناحیه متحرک تعبیه شده است. در این راستا موج انفجار صفحه‌ای در داخل لوله همزمان با انفجار غشای شکل‌گرفته و با انتشار در طول لوله به سمت نمونه جاسازی شده در طرف دیگر انتهای لوله هدایت می‌شود. قطعه مورد آزمایش در نتیجه انرژی ضربه انتقالی ناشی از موج انفجار برخوردی تغییر فرم خواهد داد. همچنین به منظور مقایسه با نتایج تجربی مدل المان محدود روی لوله شوک معرفی شده به منظور شبیه‌سازی فرآیند تغییر فرم با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس- حل صریح بسط داده خواهد شد.

## ۲- مبانی لوله شوک برای شبیه‌سازی موج انفجار

لوله شوک ابزاری با قابلیت ایجاد زمان خیز کوتاه بین سطوح فشار است که می‌توان سطح فشار را از چند کیلوپاسکال تا فشارهای بالاتر در حد چند مگاپاسکال کنترل کرد. لوله شوک به دو ناحیه اصلی محرک و متحرک تقسیم می‌شود که افزایش فشار گاز در ناحیه محرک باعث حذف المان غشا شده و اختلاف سطح فشار گاز بین دو ناحیه باعث تولید موج شوک می‌شود. نمودار ۱ که از نتایج تحلیلی به دست آمده، شرایط اولیه و ثانویه لوله شوک به ترتیب بعد از ترکیدن و حذف غشا در زمان ۲ms را برای درک بهتر این موضوع نشان می‌دهند.

در چیدمان اولیه، لوله توسط یک غشا به دو ناحیه تقسیم می‌شود. ناحیه محرک شامل گاز با فشار بالای  $p_4$  و ناحیه متحرک با فشار پایین تر  $p_1$  است. گازها می‌توانند از جنس‌های مختلف با وزن مولکولی  $M$ ، نسبت گرمای ویژه  $\gamma$  و دمای  $T$  متفاوت باشند که تمام این عوامل بر سرعت صوت در آن گاز تاثیر می‌گذارند. بعد از پاره شدن غشا، سه ناپیوستگی زیر ایجاد می‌شود که در نمودار ۱ نشان داده شده است:

- موج شوک نرمال در حال انتشار در ناحیه متحرک با سرعت  $V_s$ ؛

- سطح تماس بین گازهای محرک و متحرک در حال حرکت با سرعت  $u_p$  در پشت موج شوک؛

- موج انبساطی- ترقیقی در حال انتشار در بخش محرک [16].

با استفاده از معادلات پیوستگی جرم، مومنوم و انرژی برای موج شوک نرمال می‌توان قدرت موج شوک یعنی  $\frac{p_2}{p_1}$  را محاسبه نمود [16]:

پانکو و همکاران [12] به بررسی پروژه تحقیقاتی ناسا در خصوص بارگذاری انفجاری روی پتل‌های اپوکسی پرداختند. برای این منظور ایشان پاسخ مکانیکی نرخ کرنش بالای صفحات پلیمری نازک را با استفاده از لوله شوک اصلاح شده مورد مطالعه قرار دادند. لوله شوک مورد نظر شامل سیستم‌های تشخیصی برای ثبت پالس موج‌های برخوردی و انعکاسی است. علاوه بر این مدل‌های المان محدود برای معتبرسازی نتایج و فهم پاسخ صفحه در برابر بارگذاری انفجاری توسعه داده شده است.

جانسون و همکاران [13] روش جدیدی را برای استخراج نرخ کرنش دو محوری بر پایه خصوصیات مکانیکی مواد متجانس نازک (ورق آلیاژ آلومینیوم) با استفاده از لوله شوک را تعمیم دادند. ایشان از ابزار لوله شوک برای آزمایش پاسخ تنش-کرنش چند محوری روی ورق آلومینیوم در محدوده نرخ کرنش  $10^5-250 \times 10^5$  مورد استفاده قرار داد.

کورتنی و همکاران [14] لوله شوکی را برای تولید امواج انفجار با شدت بالا برای آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی روی زره و تجهیزات نظامی طراحی کرده‌اند. هدف ایشان افزایش پیک فشار در دسترس از ۱ تا حدود ۵MPa به منظور شبیه‌سازی نزدیک تر به منابع انفجار و توسعه و آزمایش تجهیزات زرهی بوده است. برای این منظور برای افزایش پیک فشار انفجار تولیدشده در لوله شوک با محرک اکیسی استیلن مورد استفاده قرار گرفت.

آندروتی و همکاران [15] به بررسی لوله شوک برای پاسخ سازه‌ها پرداخت و یک راهنما برای طراحی موثر و بهینه لوله شوک برای کاربردهای مهندسی ارائه کردند. هدف اصلی از ارائه لوله شوک توسط ایشان ارزیابی صفحه‌های دایره‌ای روی خاک تحت بارگذاری انفجاری و موج شوک بوده است. لوله شوک ارائه شده دو غشا با مقطع مربعی با قطر داخلی ۴۸mm بوده و از گاز هلیوم برای محرک و هوا برای متحرک استفاده شده است.

همان طور که اشاره شد لوله شوک ابزاری برای شبیه‌سازی موج شوک حاصل از انفجار در محیطی امن و در مقیاس آزمایشگاهی است تا بتوان آزمایش مربوط به ضربه و بارگذاری با نرخ کرنش بالا با کمترین هزینه و ایمن انجام داد. هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای هندسی لوله شوک بر ضربه حاصل از موج شوک ایجادشده از آن است که در این رابطه با تغییر قطر خروجی لوله شوک به صورت مخروط و تغییرات طول ناحیه محرک و متحرک به بررسی این تغییرات بر موج ایجادشده در کاهش و افزایش شدت شوک پرداخته خواهد شد. برای شناخت ماهیت و نحوه عملکرد لوله شوک اصلاح شده، آزمایش تغییر فرم ورق ایزوتروپ از جنس آلومینیوم و شبیه‌سازی عددی برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، به عنوان اهداف جانبی این تحقیق در نظر گرفته شده است.

برای انجام آزمایش تجربی تغییر فرم ورق از لوله شوک KNTU استفاده شده است. این لوله شوک از نوع محرک گازی سردکار

در نتیجه عدد ماخ موج شوک برابر خواهد بود با:

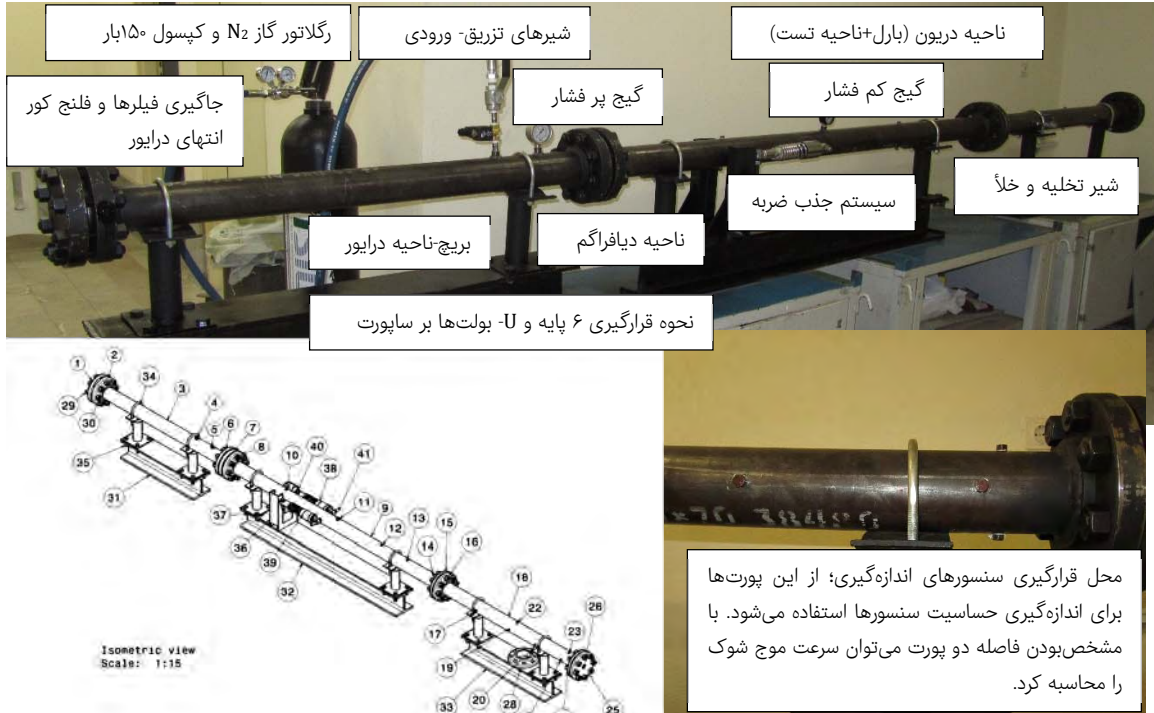
$$M_s = \frac{V_s}{a_1} \quad (۳)$$

که مقدار  $a_1$  سرعت صوت در گاز متحرک است که از معادله  $\sqrt{\gamma RT}$  برای گاز ایده آل محاسبه می‌شود. اندیس ۱ به معنای شرایط بالادستی و اندیس ۲ شرایط پایین‌دستی موج شوک را نشان می‌دهند.

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} \left( 1 - \frac{(\gamma_4 - 1) \left( \frac{a_1}{a_4} \right) \left( \frac{p_2 - 1}{p_1} \right)^{\frac{-2\gamma_4}{(\gamma_4 - 1)}}}{\sqrt{2\gamma_1(2\gamma_1 + (\gamma_1 + 1) \left( \frac{p_2 - 1}{p_1} \right))}} \right) \quad (۱)$$

حال با در دست داشتن قدرت موج شوک می‌توان سرعت آن را نیز محاسبه نمود:

$$V_s = a_1 \sqrt{\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) + 1} \quad (۲)$$



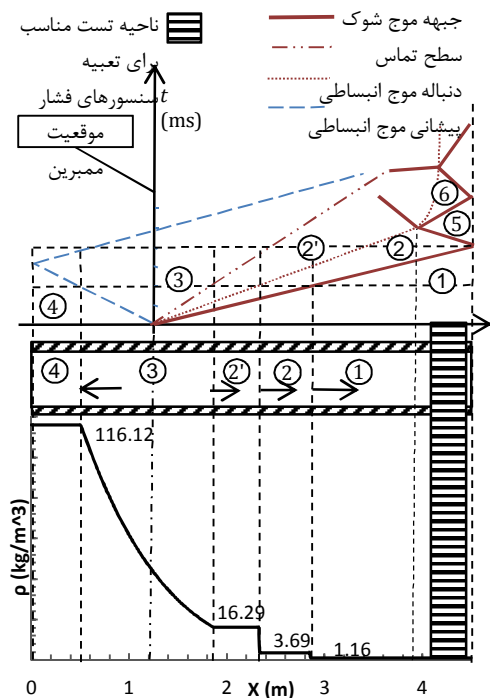
شکل ۲ اجزای تشکیل‌دهنده لوله شوک محرک گازی انتها بسته ۳ اینچی

### ۲-۱- معادلسازی شوک با وزن معادل ماده منفجره

همان طور که اشاره شد، گاز فشار بالا و فشار پایین توسط غشا از هم تفکیک می‌شوند که با پاره شدن غشا در اثر فشار گاز محرک، سطح تماسی بین گاز محرک و متحرک ایجاد می‌شود. موج شوک نرمال یک‌بعدی از این ناپیوستگی فشار ایجاد شده و در بخش متحرک با عدد ماخ  $M_s$  انتشار می‌یابد. با استفاده از تئوری موج شوک یک‌بعدی تقریب قابل قبولی از خواص موج شوک و شرایط جریان به دست می‌آید. طبق این تئوری مجموع فشار  $P_0$  جریان پشت موج شوک برابر است با [17]:

$$P_0 = P_2 \left( 1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_s^2 \right)^{\frac{\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \quad (۴)$$

از طرف دیگر انفجار ماده منفجره قوی، فشار محلی بالایی ایجاد می‌کند. اختلال ناگهانی فشار به صورت موج شوک کروی گسترش می‌یابد. جبهه موج انفجار دارای پیک فشاری با دنباله منفی است، این در حالی است که موج شوک ایجاد شده در لوله شوک به صورت فشار مرحله‌ای با دوره زمانی مشخص است. با وجود اختلاف نمودار فشار دو موج شوک ایجاد شده، می‌توان از پیک فشار لوله شوک در مواردی که زمان خیز خیلی طولانی نباشد برای شبیه‌سازی موج انفجار استفاده کرد [17].

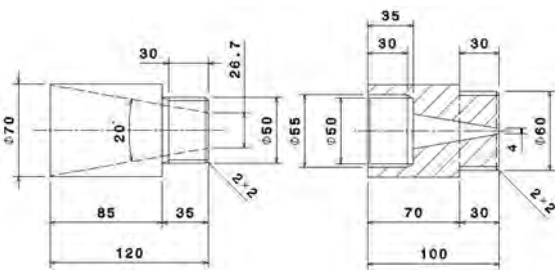


نمودار ۱ تغییرات چگالی در طول لوله شوک و زمان در نسبت فشار  $P_4/P_1 = 100$  و در زمان  $t = 2ms$

از حد این شیب امکان ساخت و ماشینکاری آن به دلیل افزایش طول مته مورد نیاز، وجود ندارد. با این حال با انجام تحقیقات میدانی، نازلی با مخروط داخلی با زاویه رأس ۲۰ درجه برای این منظور در نظر گرفته شد.



شکل ۳) فیلرهای لوله شوک برای تغییر طول موثر محرک



شکل ۴) مشخصات ابعادی نازلها و نحوه اتصال بخشهای مختلف به هم

برای بررسی اثر قطرهای مختلف نازل بر آزمایش تغییر فرم ورق سه نمونه قطعه با قطر نهایی ۴، ۱۲ و ۲۲mm ساخته شد (شکل ۴). با ساخت این چهار قطعه امکان انجام آزمایش با پنج قطر مختلف ۴، ۱۲، ۲۲، ۳۲ و ۷۰ میلی‌متر وجود دارد. این نازل با پیچ‌نمودن دو قطعه با مخروط داخلی (یا به تنهایی) و جاسازی در داخل لوله شوک موقعیت‌دهی شده که برای اجتناب از گیرکردن نازل داخل لوله شوک، جزء سومی طراحی شده که با پیچ‌شدن به نازل، نازل به کمک آن بیرون کشیده می‌شود. شکل ۵ نحوه قرارگیری نازل در قسمت انتهایی لوله شوک را نشان می‌دهد. چیدمانی از دستگاه برای آزمایش دینامیکی ورق آلومینیوم در ضخامت‌های مختلف در نظر گرفته شد (شکل ۵). بعد از انفجار غشا، موج شوک ایجاد شده با برخورد به ورق انتهایی باعث تغییر فرم دینامیکی آن می‌شود (قسمت ساخت حذف شد).



شکل ۵) موقعیت‌دهی ورق برای بررسی تغییر فرم ورق با نرخ کرنش بالا

بر این اساس می‌توان با استفاده از پیک فشار موج شوک ایجاد شده در لوله شوک وزن معادل ماده منفجره در فاصله مشخص از موقعیت غشا را تعیین کرد. برای این منظور با جایگذاری فشار شوک برخوردی  $P_2$  در واحد کیلوپاسکال در روابط (۵) مقدار مقیاس شده وزن معادل ماده منفجره که برابر  $z = \frac{s}{w^3}$  است، محاسبه کرد (w جرم معادل ماده منفجره و s فاصله از نقطه شروع انفجار است که در اینجا برابر با طول متحرک در نظر گرفته می‌شود).

$$P_2 = 101.325 + \frac{1407.2}{z} + \frac{554}{z^2} - \frac{35.7}{z^3} \quad 0.05 \leq z < 0.3$$

$$P_2 = 101.325 + \frac{619.4}{z} - \frac{32.6}{z^2} + \frac{213.2}{z^3} \quad 0.3 \leq z < 1$$

$$P_2 = 101.325 + \frac{66.2}{z} + \frac{405}{z^2} + \frac{328.8}{z^3} \quad 1 \leq z < 10 \quad (5)$$

### ۳- نحوه انجام آزمایش تجربی

اولین موضوع در راستای بررسی تاثیر پارامترهای هندسی لوله شوک بر قدرت موج شوک حاصل از انفجار غشا، تغییر در طول ناحیه متحرک است که با توجه به شکل ۲ ناحیه متحرک متشکل از دو بخش بارل و ناحیه آزمایش به طول مجموع ۳/۴m است. از این رو با حذف ناحیه آزمایش می‌توان طول موثر لوله شوک را در ناحیه متحرک کاهش داد و طول آن را به ۲m کاهش داد. برای تحقق این موضوع، ورق‌های آلومینیومی، یک بار در انتهای ناحیه آزمایش و یک بار در انتهای بارل موقعیت‌دهی شده‌اند. نتایج خیز تغییر فرم دینامیکی ورق در بخش نتایج درج شده‌اند.

در گام بعدی در لوله شوک ساخته شده، به منظور کاهش طول محرک که حدود ۱/۲ متر است و برای تغییر حجم گاز محرک برای قابل کنترل بودن حالت رفتاری موج شوک از فیلر یا پرکننده استفاده شد. برای ساخت فیلر از پلی‌اتیلن به علت ارزان قیمت بودن و جلوگیری از آسیب و خراش بر سطح هونینگ شده لوله خریداری شد. این فیلر شامل چهار قطعه به طول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری است که توسط پیچ M12 که روی فلنج کلاس ۶۰۰ در ناحیه محرک جوش شده، وصل می‌شوند. برای تطابق با قطر داخلی لوله و رسیدن به قطر ۶۹ میلی‌متر (۵/۰ میلی‌متر لقی برای انطباق عبوری و جلوگیری از گیرکردن آن در طول‌های بلند) روی آن ماشینکاری انجام گرفته و در قطعات مورد نظر برش داده شده و بعد از پیشانی‌تراشی در هر دو طرف تا عمق ۴ سانتی‌متری سوراخکاری و سپس قلاویزنی انجام گرفت. شکل ۳ اجزای ساخته شده برای این منظور را نشان می‌دهد.

گام سوم کاهش قطر خروجی لوله در انتهای ناحیه متحرک است که برای این منظور نازل‌هایی برای الحاق در قسمت انتهایی لوله طراحی و ساخته شد. مشخصات ابعادی و هندسی نازلها و نحوه انطباق بخش‌های مختلف با جزئیات در شکل ۴ نشان داده شده است. در این طراحی به علت تاثیرات نامطلوب شیب نازل بر ایجاد لایه مرزی اغتشاشی و خفگی بیش از حد موج شوک بایستی زاویه رأس مخروط تا حد امکان کوچک باشد. اما از طرفی با کاهش بیش



## ۴- شبیه سازی عددی تغییر فرم ورق

این بخش شامل توضیحاتی در مورد شبیه سازی عددی تغییر فرم ورق آلومینیومی تحت بارگذاری موج انفجار حاصل از پاره شدن غشا در لوله شوک برای مقایسه با نتایج تجربی حاصل از آزمایش تجربی است. در این راستا مدل المان محدود روی لوله شوک معرفی شده به منظور شبیه سازی فرآیند تغییر فرم با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس- حل صریح بسط داده شد. از آنالیز صریح برای شبیه سازی مساله غیرخطی با نرخ کرنش بالا، تغییر فرم بزرگ و دوره زمانی خیلی کوتاه استفاده شده است.

طراحی مدل با استفاده از فرضیات زیر انجام شده است:

- از برخورد مجدد موج انعکاسی در لوله شوک صرف نظر شده است.
- توزیع فشار روی نمونه یکنواخت در نظر گرفته شده، چراکه موج انفجار پیش از برخورد با قطعه، پیشانی موج صفحه ای شده است.
- تعریف بارگذاری با استفاده از وزن معادل ماده منفجره TNT انجام شده است.
- هیچ خزشی در هر زمان بین سطح تماس قالب و قطعه کار رخ نمی دهد. لبه قطعه کار کاملاً گیردار بوده و هیچ گونه جابجایی ندارد. رویکرد آنالیز دینامیکی صریح بر پایه پیاده سازی قاعده یکپارچه سازی صریح با استفاده از ماتریس های جرمی قطری یا توده المان استوار است. معادله حرکت برای جسم با استفاده از قاعده یکپارچه سازی اختلاف مرکزی صریح یکپارچه شده است [18].

## ۴-۱- مدل سازی ماده

خواص مکانیکی و حرارتی ورق و غشا مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. انتخاب مدل مادی مناسب برای شبیه سازی رفتار پلاستیک سازه تحت بارهای دینامیکی با نرخ بالا بسیار اهمیت دارد. از این رو در این تحقیق از مدل جانسون- کوک استفاده شده است. مدل جانسون- کوک تنش جریان را به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما مطابق رابطه (۶) بیان می کند:

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] (1 - T^*)^m$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (6)$$

در این رابطه  $\sigma$  تنش جریان،  $\varepsilon_p^n$  کرنش پلاستیک،  $\dot{\varepsilon}_p$  نرخ کرنش پلاستیک نرمالیزه،  $T$  دما،  $T_{melt}$  دمای ذوب ماده و  $T_{room}$  دمای محیط است. ضرایب  $A, B, n, m$  و  $C$  ثوابت ماده هستند که از نتایج آزمایش کشش و آزمایش های استاندارد در نرخ کرنش های بالا استخراج می شوند. برای تعیین این ضرایب برای شبیه سازی عددی تغییر فرم ورق آلومینیومی در آزمایش تجربی از مرجع [19] استفاده شده است. مقدار این ضرایب در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱) خواص مکانیکی و حرارتی ورق های مورد آزمایش

خواص	$\rho$ (g/cc)	$S_f$ (Mpa)	$S_y$ (Mpa)	$\nu$	$E$ (Gpa)	$C$ (J/g-K)
Al 6060	۲/۷۰	۱۱۰	۱۰۳	۰/۳۳	۶۹	۰/۹
Mylar MD	۱/۳۹	۲۰	-	۰/۳۸	۴۹۰	۱/۱۷

جدول ۲) ضرایب معادله جانسون- کوک برای شبیه سازی تغییر فرم ورق آلومینیوم [19]

A (Mpa)	B (Mpa)	n	C	m
۷۰/۲۸	۳۰۲/۵	۰/۴۶	۰/۰۰۰۱	۰/۷۰

## ۴-۲- بارگذاری

برای این منظور (بر اساس مطالب ارائه شده در بخش ۱-۲) می توان انفجار در لوله شوک را با تقریب قابل قبولی به انفجار کیلوگرم مشخصی از ماده منفجره TNT در فاصله معین (در اینجا طول متحرک) تعمیم داد. به همین دلیل برای محاسبه این مقادیر از شبیه سازی تحلیلی انجام شده توسط برنامه متلب استفاده شده است. مقادیر وزن معادل ماده منفجره با انفجار غشا در لوله شوک در نسبت های مختلف فشار محرک به متحرک محاسبه شده است (جدول ۳). در آزمایش تجربی از گیج های فشار برای اندازه گیری فشار اولیه در دو ناحیه محرک و متحرک استفاده شده است. با توجه به اینکه گیج های فشار، فشار نسبی را اندازه گیری می کنند، توجه به دو نکته ضروری است: اولین مورد اینکه چون ناحیه متحرک به کمپروسر یا پمپ خلأ متصل نیست، بنابراین فشار در ناحیه متحرک با فشار هوای محیط برابر است؛ از این رو فشار در ناحیه متحرک با فشار هوای تهران که به دلیل ارتفاع مشخص از سطح دریا کمتر از یک اتمسفر است، برابر خواهد بود و این مقدار برابر ۸۸kPa است. دومین موضوع که باید به آن توجه داشت مقدار فشار در ناحیه محرک است که چنانچه اشاره شد، مقدار اندازه گیری شده توسط گیج (معادل انگلیسی؟) فشار بایستی با فشار محیط (فشار هوا در تهران) جمع شود. به این ترتیب با وارد کردن داده های تجربی اندازه گیری شده در برنامه تحلیلی می توان وزن معادل ماده منفجره را محاسبه نمود (جدول ۳).

جدول ۳) نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی برای تعیین وزن معادل ماده منفجره

W (Kg)	z	$M_s$	$P_2$ (kPa)	$P_1$ (kPa)	$P_4$ (kPa)
۰/۷۰	۳/۷۱	۱/۲۹	۱۵۰/۰۵	۸۸	۲۸۸
۱/۳۹	۲/۹۶	۱/۳۹	۱۸۲/۷۲	۸۸	۴۱۶
۲/۰۱	۲/۶۲	۱/۴۶	۲۰۴/۲۳	۸۸	۵۳۸
۳/۶۹	۲/۱۴	۱/۶۲	۲۵۴/۹۵	۸۸	۹۱۸
۴/۲۹	۲/۰۳	۱/۶۷	۲۷۱/۳۴	۸۸	۱۰۷۳
۶/۰۹	۱/۸۱	۱/۸۰	۳۱۷/۶۶	۸۸	۱۶۱۴
۷/۵۳	۱/۶۸	۱/۸۹	۳۵۲/۴۷	۸۸	۲۱۳۸
۹/۹۶	۱/۵۳	۲/۰۳	۴۰۷/۷۳	۸۸	۳۲۲۸
۱۰/۲۹	۱/۵۲	۲/۰۵	۴۱۵/۱۴	۸۸	۳۴۰۲

## ۴-۳- تایید مدل برای تحلیل

به منظور اعتبارسنجی شبیه سازی عددی آزمایش تغییر فرم ورق و بررسی صحت تحلیل انجام گرفته برای معادل سازی انفجار در لوله شوک با انفجار ماده منفجره TNT و همچنین تعیین اندازه مش مطلوب یک نمونه از شبیه سازی های انجام شده با نتایج تجربی مقایسه خواهد شد. برای نمونه آزمایش ۶ را در نظر بگیرید. در این آزمایش ورق آلومینیومی به ضخامت ۰/۷mm در قسمت انتهای

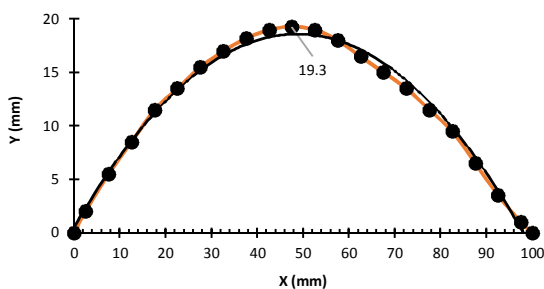
این مقادیر با میزان خیز ماکزیمم گنبد شکل گرفته از آزمایش تجربی که برابر  $h_{max} = 13/7 \text{ mm}$  است، مقایسه شده و درصد انحراف برای هر مورد محاسبه شده است. مجموعه نتایج به دست آمده همراه با تعداد نود و المان برای هر شبیه سازی در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴، میزان خیز ماکزیمم حاصل از شبیه سازی عددی مقدار  $14/14 \text{ mm}$  برای بیشترین تعداد المان را نشان می دهد که درصد انحراف از نتیجه تجربی برابر  $2/8\%$  است. همچنین با دقت در جدول ۴ مشاهده می شود که بعد از اندازه دانه  $0/001$  میزان خیز به دست آمده چندان تغییری نداشته، بنابراین برای کاهش زمان محاسبات از اندازه دانه  $0/001$  برای بقیه شبیه سازی ها استفاده شده است.

جدول ۴) مقایسه دقت شبیه سازی عددی تغییر فرم ورق با مقایسه خیز ماکزیمم مقدار تجربی با نتایج عددی به دست آمده در اندازه دانه های مختلف

اندازه دانه	تعداد نود	تعداد المان	$h_{max}$ (mm)	درصد خطا
0/005	364	192	9/83	28/2
0/004	553	320	10/76	21/4
0/003	913	546	11/98	12/5
0/002	1861	1150	13/08	4/5
0/0015	3301	2080	13/50	1/7
0/001	7321	4700	13/91	1/5
0/0005	28915	18918	14/13	2/8
0/0003	80676	53186	14/14	2/8

### ۵- نتایج

نمودارهای ۲ تا ۴، آزمایش دینامیکی تغییر فرم ورق آلومینیوم به ضخامت  $0/12 \text{ mm}$  با قراردادن یک لایه ورق میلار را نشان می دهند. در این آزمایش ها شرایط ثابت نگه داشته شده و خیز ماکزیمم ورق در هر سه نمونه تقریباً برابر است. این موضوع نشان دهنده تکرارپذیری بالای لوله شوک در ایجاد سطوح فشار مشخص است. در این نمودارها انحراف ناحیه مرکزی ورق بیشتر از سایر نقاط است که این موضوع نشان دهنده اثر شکم دادن (Bulging) ورق در تغییر فرم ورق در اثر موج شوک ایجاد شده در لوله شوک است. نکته مهم این است که در نسبت های فشار پایین جبهه شوک ایجاد نمی شود، پس عاملی که باعث تغییر فرم ورق شده، جبهه سطح تماس گاز محرک است.

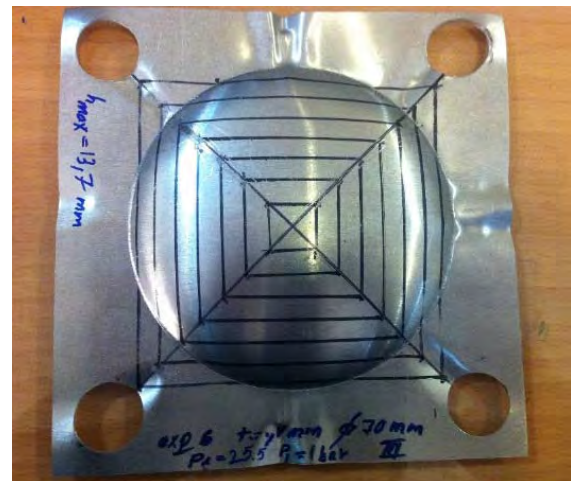


نمودار ۲) تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت  $0/12 \text{ mm}$  و فشار اولیه محرک  $4/5 \text{ bar}$  بدون فیلتر در آزمایش ۳۰

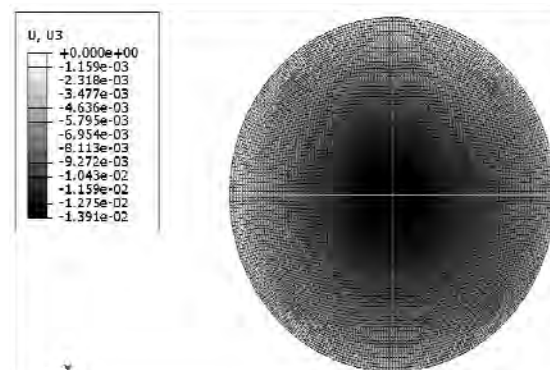
ناحیه آزمایش متصل به بارل که در مجموع ناحیه متحرک به طول  $3/4 \text{ m}$  را تشکیل می دهند، تعبیه شده است.

در آزمایش ۶ از سه لایه ورق میلار به ضخامت  $0/1 \text{ mm}$  به عنوان غشا استفاده شده که در هنگام انفجار گنج فشار، فشاری برابر  $25/5 \text{ bar}$  را نشان می دهد. در نتیجه با اضافه کردن فشار محیط، فشار اولیه محرک در لحظه انفجار معادل  $26/08 \text{ bar} = 0/5 + 25/58$  و به این ترتیب نسبت فشار محرک به متحرک برابر  $P_4/P_1 = 29/64$  خواهد بود که با مراجعه به جدول ۳ و روش میان یابی وزن معادل ماده منفجره TNT برابر  $8/5 \text{ kg}$  خواهد بود. میزان خیز ماکزیمم گنبد شکل گرفته برابر  $h_{max} = 13/7 \text{ mm}$  است که در شکل ۶ نشان داده شده است.

به منظور تعیین اندازه دانه مطلوب شبیه سازی عددی در اندازه دانه های  $0/005$ ،  $0/004$ ،  $0/003$ ،  $0/002$ ،  $0/0015$ ،  $0/001$  و  $0/0003$  با توجه به معلوماتی که در بخش های قبلی توضیح داده شد، انجام شد. به این منظور مقدار خیز ماکزیمم یا ارتفاع حداکثری تغییر فرم ورق آلومینیومی برای اندازه دانه های مختلف را به دست آورده که کانتورهای ارتفاع گنبد در راستای Z برای ورق به ضخامت  $0/7$  میلی متر و وزن TNT معادل  $8/5$  کیلوگرم در فاصله  $3/4$  متری از ناحیه انفجار غشا را می توانید در شکل ۷ مشاهده کنید.



شکل ۶) آزمایش ۶

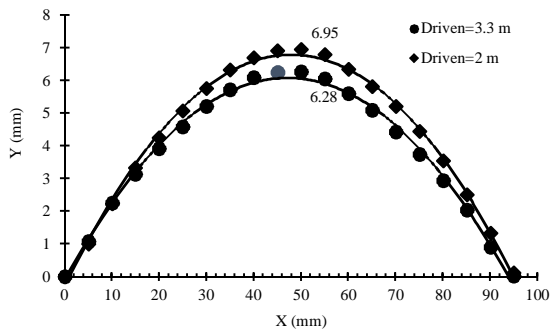


شکل ۷) کانتور ارتفاع گنبد در راستای Z برای ورق به ضخامت  $0/7 \text{ mm}$  و وزن TNT معادل  $8/5 \text{ kg}$  در فاصله  $3/4 \text{ m}$  از ناحیه انفجار غشا در اندازه دانه  $0/001$

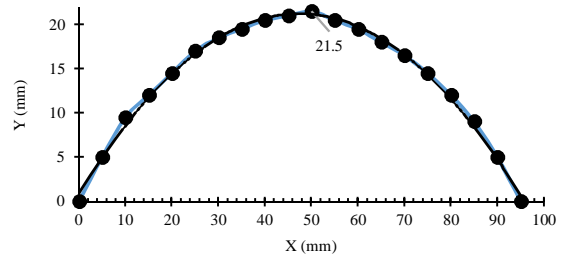
می توان نشان داد که در خیزهای برابر، انرژی تغییر فرم ورق برابر است. در تغییر شکل استاتیکی انرژی تغییر شکل، انرژی پتانسیل گاز پرفشار در محفظه محرک لوله شوک و در تغییر شکل دینامیکی انرژی تغییر شکل، انرژی جنبشی موج شوک در حال پیشروی در متحرک لوله شوک است. نکته ای که در هنگام مقایسه این دو حالت باید به آن توجه کرد، اتلاف انرژی در حین پیشروی موج شوک است. بنابراین می توان بیان کرد که در فشار محرک  $P_4$  برابر، تغییر فرم ورق در حالت استاتیکی بیشتر از حالت دینامیکی در اثر موج شوک است. البته ماهیت تغییر فرم ورق در این دو حالت کاملاً متفاوت است. در خیز برابر در حالت استاتیکی برای مثال ورق تحت فشار گاز  $4\text{bar}$  در مدت زمان ۲ تا ۳ دقیقه قرار دارد ولی در حالت دینامیکی در فشار انفجار  $4/5\text{bar}$  ورق مایلر، پیک بیش فشار موج برابر ۲ بار با سرعت  $1/8\text{ m/s}$  به ورق آلومینیومی برخورد می کند و تغییر فرم ورق در عرض یک یا چند میلی ثانیه اتفاق می افتد.

تغییرات خیز دو آزمایش ۳۷ و ۳۹ برای ورق آلومینیوم به ضخامت  $0/8\text{ mm}$  در نمودار ۶ نشان داده شده است. با توجه به نمودار مقایسه ای که در نمودار ۶ نشان داده شده، الگوی تغییر شکل ورق در هر دو آزمایش مشابه بوده و فقط آزمایش ۳۹ به سمت بالا کشیده شده است. در این دو آزمایش نسبت فشار (محرک بر متحرک) ثابت است. در آزمایش ۳۷ ورق در انتهای ناحیه آزمایش و در آزمایش ۳۹ ورق در انتهای بارل بسته شده که از نظر موقعیت اختلاف  $1/3\text{ m}$  متری با هم دارند و مقدار خیز ماکزیمم در آزمایش ۳۹ بیشتر از آزمایش ۳۷ است که این موضوع به علت بالاتر بودن پیک بیش فشار موج در فاصله نزدیک تر است.

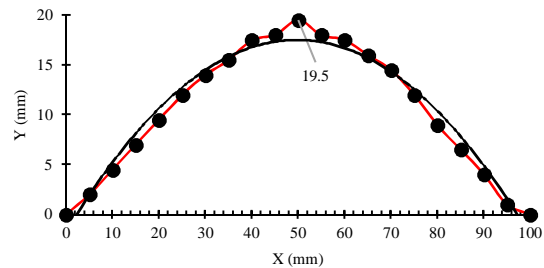
نمودار نتایج تجربی تغییرات تغییر فرم سه آزمایش ۱، ۲ و ۴ به منظور بررسی تاثیر نازل مخروطی شکل بر میزان ارتفاع گنبد با ضخامت یکسان  $0/7\text{ mm}$  تحت بار دینامیکی حاصل از فشار محرک یکسان  $1/5\text{ bar}$  قبل از انفجار دیافراگم به ترتیب در نمودار ۷ نشان داده شده است. قطر خارجی نازل در این آزمایش ها به ترتیب برابر ۴، ۳۲ و  $70\text{ mm}$  میلی متر است. نمودار ۷ نشان می دهد که ارتفاع گنبد در نازل  $4\text{ mm}$  حتی کمتر از  $1\text{ m}$  میلی متر بوده و با یک نسبت مشخص با افزایش قطر خارجی نازل افزایش می یابد، به گونه ای که در نازل  $70\text{ mm}$  به بیشترین حد خود  $0/8\text{ mm}$  می رسد.



نمودار ۶) مقایسه تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت  $0/8\text{ mm}$  در دو طول متحرک مختلف



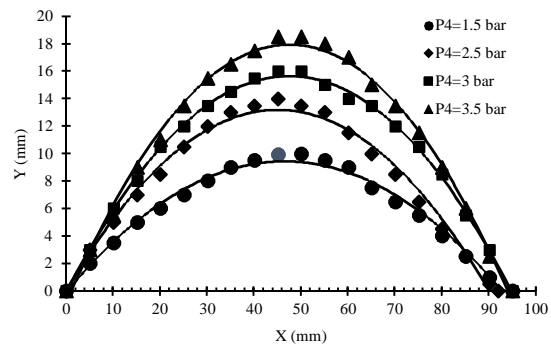
نمودار ۳) تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت  $0/12\text{ mm}$  و فشار اولیه محرک  $1/2\text{ bar}$  با قرارگیری فیلر به طول  $20\text{ cm}$  در آزمایش ۳۱



نمودار ۴) تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت  $0/12\text{ mm}$  و فشار اولیه محرک  $1/2\text{ bar}$  با قرارگیری فیلر به طول  $40\text{ cm}$  در آزمایش ۲۹

همچنین در نمودارهای ۲ تا ۴، اثر تغییر طول محرک بر خیز ورق بررسی شده که نتایج تجربی نشان می دهند که در طول محرک های مختلف ( $0/8$ ،  $1$  و  $1/2\text{ m}$ ) خیز ورق مستقل از طول فیلر است و تنها عاملی که روی خیز ورق موثر است، نسبت فشار محرک و متحرک است. در آزمایش ۳۱ با کاهش سرعت تزریق گاز فشار انفجار غشا به  $0/1\text{ bar}$  افزایش یافت.

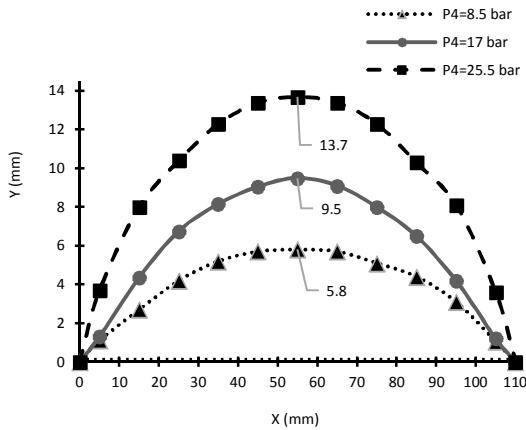
آزمایش های ۳۲ تا ۳۵، آزمایش استاتیکی انجام شده بر ورق  $0/12\text{ mm}$  میلی متری در فشارهای به ترتیب  $1/5$ ،  $2/5$ ،  $3$  و  $3/5\text{ bar}$  هستند. مقایسه خیز ورق این چهار آزمایش در نمودار ۵ نشان داده می شود. اولین موضوع در این نوع تغییر فرم عدم مشاهده اثر برآمدگی در ناحیه مرکزی ورق است. خیز ماکزیمم به ترتیب افزایش فشار گاز  $10$ ،  $14$ ،  $16$  و  $18/5\text{ mm}$  میلی متر است. آزمایش ۳۵ ( $1/5\text{ bar}$ ) در فشار  $3/5\text{ bar}$  بسیار نزدیک به خیز آزمایش های مشابه مثلاً در آزمایش ۲۴، ۲۹ و  $30\text{ bar}$  فشار پارگی  $4/5\text{ bar}$  و مقدار خیز  $19/3\text{ mm}$  میلی متر است.



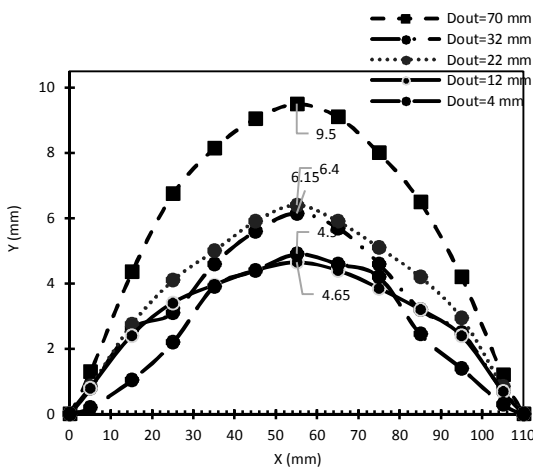
نمودار ۵) مقایسه تغییر فرم استاتیکی ورق به ضخامت  $0/12\text{ mm}$  در فشارهای مختلف



جایگذاری فیلر استفاده شده و در هر پنج نمونه فشار انفجار دیافراگم ۱۷ بار و طول متحرک ۳/۴ متری است. قطر انتهای نازل به ترتیب برابر ۷۰، ۳۲، ۴، ۲۲ و ۱۲ میلی‌متر است. نمودار مقایسه‌ای از تغییرات خیز ورق این پنج آزمایش در نمودار ۹ قابل مشاهده است.



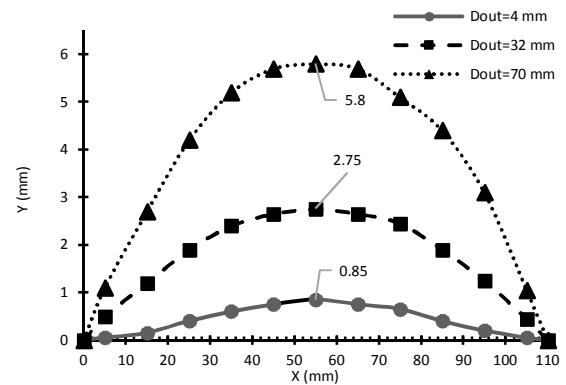
نمودار ۸) مقایسه تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت ۷mm در فشار اولیه محرک مختلف



نمودار ۹) مقایسه تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت ۷mm در فشار اولیه محرک ۱۷bar با نازل‌های مختلف

اولین موضوعی که از این نمودارها استخراج می‌شود، این است که اثر متمرکز شدن موج برخوردی به ورق در هر چهار نمونه که نازل در آنها تعبیه شده، قابل مشاهده است. به این حالت که میزان تغییر فرم ورق در مرکز ورق در مقایسه با کناره‌های ورق در مقایسه با تغییرات ارتفاع گنبد در آزمایش ۵ (بدون نازل) بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که بار دینامیکی متمرکزتری باعث تغییر فرم ورق در چهار نمونه آزمایشی دیگر شده است. در نتیجه در فشارهای بالا در مقایسه با فشارهای پایین‌تر که در سه نمونه آزمایش قبلی به آن اشاره شد، نازل در متمرکز نمودن موج شوک حاصل از انفجار در لوله‌شوگ بهتر عمل می‌کند.

دومین موضوعی که از دو نمودار مقایسه‌ای ۷ و ۹ قابل استنتاج است، غیرخطی بودن کاهش خیز ورق در اثر پدیده خفگی است.



نمودار ۷) مقایسه تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت ۷mm در فشار اولیه محرک ۸/۵bar با نازل‌های مختلف

قبل از پرداختن به این موضوع اگر نگاه دقیق‌تری به نمودارهای خیز ورق در سه نمونه شود، متوجه خواهید شد که گنبد شکل گرفته در آزمایش ۱ با نازل با سوراخ انتهایی کوچک‌تر، در مرکز برآمدگی بیشتری نسبت به لبه‌ها دارد که در دو نمونه دیگر مشاهده نمی‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل متمرکز شدن موج شوک باشد. همان طور که اشاره شد نازل‌ها در فشار پایین انفجار دیافراگم ایмпالس موج برخوردی به ورق را تضعیف می‌کنند، این پدیده در دینامیک گازها تحت عنوان خفگی (Choking) شناخته می‌شود. به این معنا که جریان در گلوگاه نازل و جریان بالادست گلوگاه فریز می‌شود. به محض اینکه جریان در گلوگاه سونیک بشود، اختلالات نمی‌تواند روی جریان بالادست گلوگاه اثر گذاشته و از این رو فشار خروجی به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. این وضعیت، زمانی که دبی جریان ثابت باقی مانده و در نتیجه فشار خروجی کاهش می‌یابد، خفگی جریان نامیده می‌شود.

حال با مقایسه سه آزمایش ۴، ۵ و ۶ به بررسی تاثیر فشار محرک بر ورق‌های آلومینیومی به ضخامت ۷mm بر خیز ورق تحت بارگذاری دینامیکی پرداخته خواهد شد. فشار انفجار دیافراگم در این سه آزمایش به ترتیب برابر ۸/۵، ۱۷ و ۲۵/۵ بار است. نمودار مقایسه‌ای این سه آزمایش در نمودار ۸ قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار، میزان ارتفاع گنبد ورق با نسبت مشخص افزایش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن پروژه لوله‌شوگ برای شبیه‌سازی انفجار و بررسی تاثیر بارگذاری با نرخ کرنش بالا بر نمونه‌ها است. همان طور که در فصل قبل بیان شد، برای مثال در آزمایش ۶ ایмпالس اعمالی به ورق حاصل از موج شوک ناشی از انفجار دیافراگم در فشار بالای ۲۵/۵ بار معادل انفجار ۸/۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۳/۴ متری (طول متحرک) است. این موضوع نشان می‌دهد که این لوله‌شوگ در شبیه‌سازی اثر موج بلاست بر تغییر فرم ورق ایزوتروپ آلومینیوم به‌طور موفقیت‌آمیزی عمل کرده است.

در پنج آزمایش ۵، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۶ اثر مخروط برای تقویت موج شوک در فشارهای بالاتر از سه آزمایش قبلی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پنج آزمایش از ورق‌های با ضخامت یکسان ۷mm بدون

گنبد بدون نازل بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که بار دینامیکی متمرکزتری باعث تغییر فرم ورق شده است. همچنین در فشارهای بالا در مقایسه با فشارهای پایین‌تر، اثر نازل در متمرکز نمودن موج شوک حاصل از انفجار در لوله شوک بهتر است. این موضوع نشان‌دهنده تخفیف اثر خفگی در فشارهای بالاتر موج شوک است. همچنین در قطرهای مشخصی اثر خفگی ثابت باقی مانده و در این بازه نازل با قطر کوچک‌تر با متمرکز کردن بیشتر موج شوک میزان تغییر فرم ورق بیشتری را نتیجه خواهد داد. پس از این بازه اثر خفگی به صورت پله‌ای افزایش داشته و موج شوک را تضعیف می‌کند.

- تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.  
**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.  
**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.  
**سهم نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.  
**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

#### فهرست علائم

$a$	سرعت صوت در سیال ( $\text{ms}^{-1}$ )
$C$	ظرفیت گرمای ویژه ( $\text{J/g}\cdot\text{K}$ )
$E$	مدول الاستیسیته (Gpa)
$h_{max}$	خیز ماکزیمم (mm)
$M$	سرعت (ماخ)
$p$	فشار (kPa; bar)
$R$	ثابت جهانی گاز ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )
$S_f$	استحکام کششی نهایی (Mpa)
$S_y$	استحکام تسلیم (Mpa)
$t$	زمان (ms)
$T$	دمای سیال (K)
$V_s$	سرعت جبهه شوک ( $\text{ms}^{-1}$ )
$x$	موقعیت مکانی موج (m)

#### علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\gamma$	نسبت گرمای ویژه ( $C_p/C_v$ )
$\nu$	ضریب پواسن

#### زیرنویس‌ها

1	ناحیه متحرک قبل از پاره شدن دیافراگم
2	ناحیه تحت تاثیر موج شوک
2'	سطح تماس گاز محرک و متحرک
3	ناحیه تحت تاثیر موج انبساطی
4	ناحیه محرک قبل از پاره شدن دیافراگم
5	ناحیه تحت تاثیر موج شوک انعکاسی
$s$	موج شوک برخوردی
$R$	شوک انعکاسی

#### منابع

- 1- Duff RE, Blackwell AN. Explosive driven shock tubes. Review of Scientific Instruments. 1966;37(5):579-586.
- 2- Davis WC, Salyer TR, Jackson SI, Aslam TD. Explosive-

همان طور که مشاهده می‌شود، نسبت خیز ماکزیمم در دو قطر مختلف ۴ و ۷۰mm در فشار محرک ۸/۵bar برابر ۶/۸ و در فشار محرک ۱۷bar برابر ۱/۹ است. این موضوع نشان‌دهنده تخفیف اثر خفگی در فشارهای بالاتر موج شوک است. اگر از نوسانات ناشی از پاره شدن غیرهمگن مایلار در دیافراگم صرف نظر شود، دو نازل با خروجی ۴ و ۲ میلی‌متری و دو نازل با قطر خروجی ۲۲ و ۳۲ میلی‌متر خیز ماکزیمم نزدیک به همی دارند. همچنین در هر دو مورد نازل با قطر کمتر (یعنی ۴ و ۲ میلی‌متر) خیز بیشتری از خود نشان می‌دهند. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که در قطرهای مشخصی اثر خفگی ثابت است و در بازه‌ای که اثر خفگی ثابت باقی می‌ماند، نازل با قطر کوچک‌تر با متمرکز کردن بیشتر موج شوک میزان تغییر فرم ورق بیشتری را نتیجه خواهد داد. پس از این بازه اثر خفگی به صورت پله‌ای افزایش داشته و موج شوک را تضعیف می‌کند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تجربی به بررسی مولفه‌های عملکردی لوله شوک محرک گازی ۳ اینچی انتها بسته، روی تغییر فرم استاتیکی و دینامیکی ورق‌های ایزوتروپ آلومینیوم پرداخته شد. همچنین تاثیرات پارامترهای هندسی لوله شوک روی ایمپالس موج شوک حاصل از انفجار دیافراگم در لوله شوک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش فشار، ارتفاع گنبد ورق با نسبت مشخص افزایش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن پروژه لوله شوک برای شبیه‌سازی انفجار و بررسی تاثیر بارگذاری با نرخ کرنش بالا روی نمونه‌ها است. دومین مشاهده اثر شکم‌دادن در نمونه‌های تغییر فرم دینامیکی ورق آلومینیوم است، این در حالی است که شکم‌دادن ورق در نمونه‌های تغییر فرم با فشار استاتیکی گاز مشاهده نمی‌شود، از این رو میزان خیز ماکزیمم در نمونه‌های دینامیکی ۲ تا ۷ میلی‌متر بیشتر از نمونه‌های تغییر فرم استاتیکی قبل از پارگی و تسلیم ورق آلومینیوم است. افزایش خیز ورق در نمونه‌های استاتیکی تنها متاثر از افزایش فشار گاز در ناحیه محرک است ولی در نمونه‌های دینامیکی به نسبت فشار محرک به متحرک و کاهش طول متحرک لوله شوک بستگی دارد و همچنین خیز ورق در دو حالت استاتیکی و دینامیکی در صورت برابری انرژی پتانسیل گاز در حالت استاتیکی و انرژی حمل شده توسط موج شوک در تغییر فرم دینامیکی برابر است. طول متحرک بر تغییر فرم ورق موثر است، به این نحوه که هرچه طول متحرک کمتر باشد، میزان خیز ماکزیمم بیشتر خواهد بود ولی این تاثیر زیاد نیست. طول فیلر بر فشار انفجار دیافراگم و پیک فشار موج ایجاد شده موثر نیست که در نتیجه می‌توان بیان کرد که طول محرک بر خیز ورق تحت بار دینامیکی بی‌اثر است. اثر متمرکز شدن موج برخوردی به ورق در نمونه‌هایی که نازل در آنها تعبیه شده، قابل مشاهده است. به این حالت که میزان تغییر فرم ورق در مرکز نسبت به کناره‌های ورق در مقایسه با تغییرات ارتفاع

- International Journal of Impact Engineering. 1998;21(9):801-816.
- 11- Gardner KD, John AG, Lu FK. Development of a shock loading simulation facility. Shock. 2005;1000(2):3.
- 12- Pankow M, Waas AM, Bednarczyk B. Blast loading of epoxy panels using a shock tube [Report]. Washington, D.C: NASA; 2010 Dec. Report NO: NASA/TM-2010-216941, E-17545. Contract NO.: WBS 698259.02.07.03.
- 13- Justusson B, Pankow M, Heinrich C, Rudolph M, Waas AM. Use of a shock tube to determine the bi-axial yield of an aluminum alloy under high rates. International Journal of Impact Engineering. 2013;58:55-65.
- 14- Courtney E, Courtney A, Courtney M. Shock tube design for high intensity blast waves for laboratory testing of armor and combat materiel. Defence Technology. 2014;10(2):245-250.
- 15- Andreotti R, Colombo M, Guardone A, Martinelli P, Riganti G, Di Prisco M. Performance of a shock tube facility for impact response of structures. International Journal of Non-Linear Mechanics. 2015;72:53-66.
- 16- Anderson Jr JD. Fundamentals of aerodynamics. New York: McGraw-Hill; 2003. p. 912.
- 17- Smith PD, Hetherington JG. Blast and ballistic loading of structures. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1994.
- 18- Sorensen HK. ABAQUS theory manual. Version 6.2 [Software]. 2001 [Unknown cited]. Available from: Not Found
- 19- Beusink M. Measurements and simulations on the (dynamic) properties of aluminium alloy AA6060 [Dissertation]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology; 2011.
- driven shock waves in argon. The 13<sup>th</sup> International Detonation Symposium, 2006 July 23-28, Norfolk, Virginia. Arlington: Office of Naval Research; 2006. pp. 1035-1044.
- 3- Courtney AC, Andrusiv LP, Courtney MW. Oxy-acetylene driven laboratory scale shock tubes for studying blast wave effects. Review of Scientific Instruments. 2012;83(4):045111.
- 4- Stotz I, Lamanna G, Hettrich H, Weigand B, Steelant J. Design of a double diaphragm shock tube for fluid disintegration studies. Review of Scientific Instruments. 2008;79(12):125106.
- 5- Colombo M, Di Prisco M, Martinelli P. A new shock tube facility for tunnel safety. Experimental Mechanics. 2011;51(7):1143-1154.
- 6- Furukawa T, Aochi T, Sasoh A. Expansion tube operation with thin secondary diaphragm. AIAA Journal. 2007;45(1):214-217.
- 7- Glass II, Patterson GN. A theoretical and experimental study of shock-tube flows. Journal of the Aeronautical Sciences. 1955;22(2):73-100.
- 8- Hsu UK. Numerical and experimental investigation of a supersonic flow field around solid fuel on an inclined flat plate. Modelling and Simulation in Engineering. 2009;2009:4.
- 9- Mediavilla Varas J, Philippens M, Meijer SR, Van Den Berg AC, Sibma PC, Van Bree JL, et al. Physics of IED blast shock tube simulations for mTBI research. Frontiers in Neurology. 2011;2:58.
- 10- Kosing OE, Skews BW. An investigation of high-speed forming of circular plates in a liquid shock tube.