# Archive of SID



ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):637-647

# 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.\*1 *PhD,* Hosseinzadeh R.1 *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. A B S T R A C T

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] Oxyacetylene 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

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۶۳۸ جمال زمانی و رامیار حسینزاده ــــ

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

#### جمال زمانی<sup>\*</sup> PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران **رامیار حسینزاده MSc** 

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

### چکیدہ

مشخصبودن رفتار سازهها تحت بارگذاری با نرخ بالا در کاربردهای متفاوت بسیار تعیینکننده است. یکی از تجهیزاتی که دارای اهمیت فوقالعادهای در این زمینه بوده لوله شوک است که امکان شبیهسازی موارد یاد شده را در محیط آزمایشگاهی فراهم میسازد. هدف این مقاله بررسی تاثیر پارامترهای هندسی لولهشوک 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 لولهشوک محرک گازی ۳اینچی 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 متمرکزشدن موج برخوردی به ورق در نمونههایی که نازل در آنها تعبيه شده قابل مشاهده است. اين موضوع نشان مىدهد كه بار ديناميكى 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.

کلیدواژهها: لوله شوک، بارگذاری دینامیکی، ورق آلومینیوم، ارتفاع گنبد، شبیهسازی عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۲ \*نویسنده مسئول: ex.forminglab@kntu.ac.ir

#### ۱- مقدمه

مشخصبودن 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 حملونقل با سرعت بالا از جمله اتومبیل، قطار و هواپیما و لزوم گسترش صنعت بستهبندی ابزار خاص و حساس به ضربه، همه و همه مهندسین را بر آن داشته است تا با حساسیت خاصی به مطالعه بحث ضربه و انفجار بپردازند. یکی از تجهیزاتی که دارای اهمیت فوقالعادهای در این زمینه است، لولهشوک است که امکان شیهسازی موارد یادشده را در محیط آزمایشگاهی فراهم میسازد. 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 می کند) شده و اختلاف سطح فشار گاز بین دو ناحیه، باعث تولید موج شوک می شود. این افزایش

فشار به طرق مختلفی از جمله انفجار<sup>[1, 1]</sup>، احتراق<sup>[3]</sup> یا مخزن گاز پرفشار<sup>[5, 4]</sup> تامین میشود. یکی از رایجترین انواع لولهشوک، لولهشوک محرک گازی است که شماتیکی از اجزای اصلی تشکیلدهنده آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

1	0	ר ר	ديافراگم 🕂
	·}.		
	ک ک	بخش درايور	بخش دريون

**شکل ۱)** اجزای اصلی لولهشوک محرک گازی

دامنه کاربرد لوله شوک بسیار گسترده است که از آن جمله می توان به بررسی جریانات گازی<sup>[6]</sup>، مدل سازی و بررسی لایه مرزی بر نمونه های فیزیکی<sup>[7]</sup>، الگوی احتراق ترکیبات گازی و سوخت جامد<sup>[8]</sup> و کاربردهای پزشکی و نظامی از جمله بررسی آسیب مغزی ناشی از انفجار<sup>[9]</sup> 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 لوله های 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 می شود. کارهای بسیار جدیدی در این حوزه در حال

کاسینگ و *اسکیوس*<sup>[10]</sup> یک لولهشوک مایع را بهمنظور شکلدهی ورقهای دایرهای طراحی کردند. لولهشوک طراحیشده بهصورت عمودی بوده که دارای طول کلی ۴/۵۳ است. جنس لوله از فولاد ضدزنگ بوده و قطر خارجی آن ۱۰۶۳mm و قطر داخلی آن ۵۳m۳ است که سطح داخلی آن توسط فرآیند هونینگ صاف و یکنواخت شده است. فشار در قسمت متحرک حدود ombarه است. در انتها و در قسمت آزمایش لولهشوک ورقهای مسی بهطور کامل مهار شده و تحت بارگذاری ضربهای این سامانه قرار گرفتند. ایشان با بررسی اثر ضخامت بر نرخ کرنش در مرکز دیسک بعد از شکلدهی، نشان دادند با کاهش ضخامت، میزان نرخ کرنش در شکلدهی تحت امواج شوک یکسان در مرکز ورق افزایش مییابد.

گاردنر و همکاران<sup>[11]</sup> در صدد بهبود و توسعه امکانات بارگذاری شوک برای شبیه سازی اثرات انفجار بر ساختار مواد برآمدند. این تجهیزات شامل تونل های شوک رایج است که از نظر ساختاری اصلاحاتی روی آنها انجام شده است. تونل شوک مورد استفاده ایشان شامل یک بخش محرک به طول ۳۳ و قطر ۱۵cm، بخش غشا و یک بخش متحرک به طول ۸/۳۳ 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 جِرم و فواصل مختلف را تولید کنند.

*پانکو* و همکاران<sup>[21]</sup> به بررسی پروژه تحقیقاتی ناسا در خصوص بارگذاری انفجاری روی پنلهای اپوکسی پرداختند. برای این منظور ایشان پاسخ مکانیکی نرخ کرنش بالای صفحات پلیمری نازک را با استفاده از لولهشوک اصلاحشده مورد مطالعه قرار دادند. لولهشوک 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<sup>[13]</sup> روش جدیدی را برای استخراج نرخ کرنش دو محوری بر پایه خصوصیات مکانیکی مواد متجانس نازک (ورق آلیاژ آلومینیوم) با استفاده از لولهشوک را تعمیم دادند. ایشان از ابزار لولهشوک برای آزمایش پاسخ تنش-کرنش چند محوری روی ورق آلومینیوم در محدوده نرخ کرنش ۲۰۵۰-۸۵۰ مورد استفاده قرار داد.

کورتنی و همکاران<sup>[14]</sup> لولهشوکی را برای تولید امواج انفجار با شدت بالا برای آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی روی زره و تجهیزات نظامی طراحی کرده اند. هدف ایشان افزایش پیک فشار در دسترس از ۱ تا حدود oMPa به منظور شبیه سازی 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 اکسی استیلن مورد استفاده قرار گرفت.

*آندروتی* و همکاران<sup>[15]</sup> به بررسی لولهشوک برای پاسخ سازهها پرداخت و یک راهنما برای طراحی موثر و بهینه لولهشوک برای کاربردهای مهندسی ارایه کردند. هدف اصلی از ارایه لولهشوک توسط ایشان ارزیابی صفحههای دایرهای روی خاک تحت بارگذاری انفجاری و موج شوک بوده است. لولهشوک ارایهشده دو غشا با مقطع مربعی با قطر داخلی ۸۱mm بوده و از گاز هلیوم برای محرک و هوا برای متحرک استفاده شده است.

همان طور که اشاره شد لوله شوک ابزاری برای شبیه سازی 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 شبیه سازی عددی برای صحت سنجی نتایج به دست آمده، به عنوان اهداف جانبی این تحقیق در نظر گرفته شده است.

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

## - بررسی تجربی اثر تغییر پارامترهای هندسی لوله شوک بر میزان شدت موج انفجار ۶۳۹

۳اینچی انتها بسته بوده که گاز نیتروژن به داخل محفّظه مربوطه تزریق میشود. برای این منظور از یک کپسول فشار قوی استفاده شده که بهوسیله رگلاتور فشار خروجی تنظیم و توسط شیر کنترلی به داخل محفظه محرک هدایت میشود. جزییات لولهشوک یادشده در شکل ۲ قابل مشاهده است. این لولهشوک سردکار با محدوده نسبت فشار ۲۰۰۵ در دامنه حرارتی ۲۰۰۰-۰۰ 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.

محلی برای مهار کامل ورقهای آلومینیومی در قسمت انتهای لولهشوک 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 جاسازیشده 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 بهمنظور مقایسه با نتایج تجربی مدل المان محدود روی لولهشوک معرفیشده بهمنظور شبیهسازی فرآیند تغییر فرم با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس- حل صریح بسط داده خواهد شد.

# ۲- مبانی لولهشوک 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 بهترتیب بعد از ترکیدن و حذف غشا در زمان ۲ms را برای درک بهتر این موضوع نشان می دهند.

در چیدمان اولیه، لوله توسط یک غشا به دو ناحیه تقسیم می شود. ناحیه محرک شامل گاز با فشار بالای  $p_4$  و ناحیه متحرک با فشار پایین تر  $p_1$  است. گازها می توانند از جنس های 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 می گذارند. بعد از پارهشدن غشا، سه ناپیوستگی زیر ایجاد می شود که در نمودار ۱ نشان داده شده است:

- موج شوک نرمال در حال انتشار در ناحیه متحرک با سرعت Vs؛ - سطح تماس بین گازهای محرک و متحرک در حال حرکت با سرعت µp در پشت موج شوک؛

- موج انبساطی- ترقیقی در حال انتشار در بخش محرک<sup>[16]</sup>. با استفاده از معادلات پیوستگی جرم، مومنتوم و انرژی برای موج شوک نرمال می توان قدرت موج شوک یعنی <sup>2</sup>2 را محاسبه نمود<sup>[16]</sup>:

۶۴۰ جمال زمانی و رامیار حسینزاده ـ

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

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

$$V_{s} = a_{1} \sqrt{\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \left(\frac{p_{2}}{p_{1}} - 1\right) + 1}$$
 (Y)

در نتیجه عدد ماخ موج شوک برابر خواهد بود با:  $M_{S} = rac{V_{S}}{a_{1}}$ (۳) a همقدار a سرعت صوت در گاز متحرک است که از معادله a  $\sqrt{\gamma RT}$  برای گاز ایده آل محاسبه میشود. اندیس ۱ به معنای شرایط بالادستی و اندیس ۲ شرایط پاییندستی موج شوک را نشان می-دهند.



شکل ۲) اجزای تشکیلدهنده لوله شوک محرک گازی انتها بسته ۱۳ینچی



**نمودار ۱)** تغییرات چگالی در طول لولهشوک و زمان در نسبت فشار P4/P1 = ۱۰۰ و در زمان t =۲ms

# و کر رادی منتخب ہے میں مہندسی مکانیک مدرس

www.SID.ir

# ۲-۲- 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 پارهشدن 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 بهدست میآید. طبق این تئوری مجموع فشار P جریان پشت موج شوک برابر است با[17]:

$$P_0 = P_2 \left( 1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_S^2 \right)^{\frac{\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \tag{(4)}$$

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

بر این اساس میتوان با استفاده از پیک فشار موج شوک ایجادشده در لولهشوک وزن معادل ماده منفجره در فاصله مشخص از موقعیت غشا را تعیین کرد. برای این منظور با جایگذاری فشار شوک برخوردی P2 در واحد کیلوپاسکال در روابط (۵) مقدار مقیاسشده وزن معادل ماده منفجره که برابر  $\frac{s}{w^3}$  = z است، محاسبه کرد (*w* جرم معادل ماده منفجره و *s* فاصله از نقطه شروع انفجار است که

 $\begin{aligned} &P_2 = 101.325 + \frac{1407.2}{z} + \frac{554}{z^2} - \frac{35.7}{z^3} \ 0.05 \le z < 0.3 \\ &P_2 = 101.325 + \frac{619.4}{z} - \frac{32.6}{z^2} + \frac{213.2}{z^3} \ 0.3 \le z < 1 \\ &P_2 = 101.325 + \frac{66.2}{z} + \frac{405}{z^2} + \frac{328.8}{z^3} \ 1 \le z < \\ &P_2 = 101.325 + \frac{66.2}{z} + \frac{405}{z^2} + \frac{328.8}{z^3} \ 1 \le z < \end{aligned}$ 

# ۳- نحوه انجام آزمایش تجربی

اولین موضوع در راستای بررسی تاثیر پارامترهای هندسی لولهشوک 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 ۳/۴۳ است. از این رو با حذف ناحیه آزمایش میتوان طول موثر لولهشوک را در ناحیه متحرک کاهش داد و طول آن را به ۲۳ 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 لولهشوک ساختهشده، بهمنظور کاهش طول محرک که حدود ۲/۱متر 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 پلی اتیلن به علت ارزان قیمت بودن و جلوگیری از آسیب و خراش بر سطح هونینگ شده لوله خریداری شد. این فیلر شامل چهار قطعه به طول های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۳۰ سانتی متری است که توسط پیچ M12 که روی فلنج کلاس ۲۰۰ در ناحیه محرک جوش شده، وصل می شوند. برای تطابق با قطر انطباق عبوری و جلوگیری از گیرکردن آن در طول های بلند) روی آن ماشینکاری انجام گرفته و در قطعات مورد نظر برش داده شده و بعد از پیشانی تراشی در هر دو طرف تا عمق ۴سانتی متری سوراخکاری و سپس قلاویززنی انجام گرفت. شکل ۳ اجزای ساخته شده برای این منظور را نشان می دهد.

گام سوم کاهش قطر خروجی لوله در انتهای ناحیه متحرک است که برای این منظور نازلهایی برای الحاق در قسمت انتهای لوله طراحی و ساخته شد. مشخصات ابعادی و هندسی نازلها و نحوه انطباق بخشهای مختلف با جزییات 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

<u>برسی تجربی اثر تغییر پارامترهای هندسی لوله شوک بر میزان شدت مع انفجار ArC ۶۳۱ از</u> 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 ۲۰درجه برای این منظور در نظر گرفته شد.



**شکل ۳)** فیلرهای لولهشوک برای تغییر طول موثر محرک



شکل ٤) 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 ۲۳m۳، ساخته شد (شکل ۴). با ساخت این چهار قطعه امکان انجام آزمایش با پنج قطر مختلف ۴، ۱۲، ۲۲، ۲۳ و ۲۰میلیمتر وجود دارد. این نازل با پیچنمودن دو قطعه با مخروط داخلی (یا به تنهایی) و جاسازی در داخل لولهشوک موقعیتدهی شده که برای اجتناب از گیرکردن نازل داخل لولهشوک، جزء سومی طراحی شده که با پیچشدن به نازل، نازل به کمک آن بیرون کشیده میشود. شکل ۵ نحوه قرارگیری نازل در قسمت انتهایی لولهشوک را نشان میدهد. چیدمانی از دستگاه برای آزمایش دینامیکی ورق آلومینیوم در ضخامت های مختلف در نظر گرفته شد (شکل ۵). بعد از انفجار غشا، موج شوک ایجادشده با برخورد به ورق انتهایی باعث تغییر فرم دینامیکی آن میشود (قسمت ساخت حذف شد.)



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

## 

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 نرمافزار المان محدود آباکوس- حل صریح بسط داده شد. از آنالیز صریح برای شبیه سازی مساله غیر خطی 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:

۱- از برخورد مجدد موج انعکاسی در لولهشوک صرفنظر شده است.
۲- توزیع فشار روی نمونه یکنواخت در نظر گرفته شده، چراکه موج انفجار پیش از برخورد با قطعه، پیشانی موج صفحهای شده است.
۳- تعریف بارگذاری با استفاده از وزن معادل ماده منفجره TNT انجام شده است.

۴- 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<sup>[18]</sup>.

# ۱-۴- مدلسازی ماده

خواص مکانیکی و حرارتی ورق و غشا مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. انتخاب مدل مادی مناسب برای شبیهسازی 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 بهصورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما مطابق رابطه (٦) بیان میکند:

$$\begin{split} \sigma &= \left[A + B\varepsilon_p^n\right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\varepsilon_0}\right] (1 - T^*)^m \\ T^* &= \frac{T - T_{room}}{T_{Melt} - T_{room}} \end{split} \tag{9}$$

در این رابطه  $\sigma$  تنش جریان،  $r_p^n$  کرنش پلاستیک،  $\frac{e_p}{\epsilon_0}$  نرخ کرنش پلاستیک نرمالیزه، T دمای  $T_{melt}$  دمای ذوب ماده و  $T_{room}$  دمای محیط است. ضرایب A، B، R، و C ثوابت ماده هستند که از نتایج آزمایش کشش و آزمایشهای استاندارد در نرخ کرنشهای بلا استخراج میشوند. برای تعیین این ضرایب برای شبیهسازی عددی تغییر فرم ورق آلومینیومی در آزمایش تجربی از مرجع<sup>[19]</sup>

جدول ۱) خواص مکانیکی و حرارتی ورق های مورد آزمایش

خواص	<b>ρ</b> (g/cc)	<b>S</b> t (Mpa)	<b>S</b> <sub>Y</sub> (Мра)	V	<b>E</b> (Gpa)	С (J/g-К)
Al 6060	۲/۷۰	110	۱۰۳	∘/٣٣	۶۹	۰/۹
Mylar MD	١/٣٩	۲۰	-	۰/۳۸	۴٩.	١/١٢

**جدول ۲)** ضرایب معادله جانسون- کوک برای شبیهسازی تغیّیر فرم ورق آلومینیوم ۵-۱۰<sup>[۱۹]</sup>

A (Mpa) D	(мра)	n	C	m
۷∘/۲۸	۳۰۲/۵	°/48	o/ooo1	∘/γ۰

# ۲-۴- بارگذاری

برای این منظور (بر اساس مطالب ارایهشده در بخش ۲-۱) میتوان انفجار در لولهشوک 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 شبيهسازى تحليلى انجامشده توسط برنامه متلب استفاده شده است. مقادیر وزن معادل ماده منفجره با انفجار غشا در لولهشوک در نسبتهای مختلف فشار محرک به متحرک محاسبه شده است (جدول ۳). در آزمایش تجربی از گیجهای فشار برای اندازهگیری فشار اولیه در دو ناحیه محرک و متحرک استفاده شده است. با توجه به اینکه گیجهای فشار، فشار نسبی را اندازهگیری میکنند، 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 چناچه اشاره شد، مقدار اندازهگیریشده توسط گیج (معادل انگلیسی؟) فشار بایستی با فشار محیط (فشار هوا در تهران) جمع شود. به این ترتیب با واردکردن دادههای تجربی اندازهگیریشده در برنامه تحلیلی میتوان وزن معادل ماده منفجره را محاسبه نمود (جدول ۳).

معادل ماده منفجره	تعيين وزن	تحليلى براى	عاصل از محاسبات	<b>جدول ۳)</b> نتایج -
-------------------	-----------	-------------	-----------------	------------------------

W (Kg)	Z	Ms	P2 (kPa)	P1 (kPa)	P4 (kPa)
∘/Y∘	٣/٧١	١/٢٩	100/00	٨٨	۲۷۷
١/٣٩	٢/٩٦	١/٣٩	184/44	77	٤١٦
۲/01	אר/ץ	١/٤٦	४०१/४٣	77	٥٣٨
۳/٦٩	٢/١٤	۲۲/۱	402/90	77	۹۱۸
१/४९	۲/۰۳	١/٦٢	471/22	77	۱۰۲۳
٦/٥٩	١/٨١	۱/۸∘	٣١٧/٦٦	٨٨	1715
٧/٥٣	١/٦٨	١/٨٩	207/EV	٨٨	2122
٩/٩٦	1/04	۲/۰۳	٤٥٧/٧٣	٨٨	277 <i>W</i>
۱۰/۲۹	1/04	۲/۰0	٤١٥/١٤	٨٨	٣٤٠٢

# ۳-۴- تایید مدل برای تحلیل

بهمنظور اعتبارسنجی شبیهسازی عددی آزمایش تغییر فرم ورق و بررسی صحت تحلیل انجامگرفته برای معادلسازی انفجار در لولهشوک با انفجار ماده منفجره TNT و همچنین تعیین اندازه مش مطلوب یک نمونه از شبیهسازیهای انجامشده با نتایج تجربی مقایسه خواهد شد. برای نمونه آزمایش ٦ را در نظر بگیرید. در این آزمایش ورق آلومینیومی به ضخامت ۷۳m۳/۰ در قسمت انتهای

ناحیه آزمایش متصل به بارل که در مجموع ناحیه متحرک به طول ۳/٤m را تشکیل میدهند، تعبیه شده است.

در آزمایش ۶ از سه لایه ورق مایلار به ضخامت ۱۳۳۳، به عنوان غشا استفاده شده که در هنگام انفجار گیج فشار، فشاری برابر ۲۵/۵bar را نشان میدهد. در نتیجه با اضافهکردن فشار محیط، فشار اولیه محرک در لحظه انفجار معادل ۲۵/۵ka ۲۶/۰۸bar  $\frac{P_4}{P_1}$  و به این ترتیب نسبت فشار محرک به متحرک برابر ۲۹/۶۴ و به خواهد بود که با مراجعه به جدول ۳ و روش میانیابی وزن معادل ماده منفجره TNT برابر ۸/۵kg خواهد بود. میزان خیز ماکزیمم گنبد شکل گرفته برابر ۱۳/۲mm است که در شکل ۶ نشان داده شده است.

بهمنظور تعیین اندازه دانه مطلوب شبیهسازی عددی در اندازه دانههای ۵۰۰/۵، ۶۰۰/۵، ۳۰۰/۵، ۲۰۰/۵، ۵۰۰/۵ و ۳۰۰/۵۰ با توجه به معلوماتی که در بخشهای قبلی توضیح داده شد، انجام شد. به این منظور مقدار خیز ماکزیمم یا ارتفاع حداکثری تغییر فرم ورق آلومینیومی برای اندازه دانههای مختلف را بهدست آورده که کانتورهای ارتفاع گنبد در راستای z برای ورق به ضخامت ۷/۰ میلیمتر و وزن TNT معادل ۵/۸کیلوگرم در فاصله ۶/۴متری از ناحیه انفجار غشا را میتوانید در شکل ۷ مشاهده کنید.



**شکل ٦)** آزمایش ۶



**شکل Y)** کانتور ارتفاع گنبد در راستای z برای ورق به ضخامت ۷۳m و وزن TNT معادل ۸/okg در فاصله ۳/٤m از ناحیه انفجار غشا در اندازه دانه ۰/۰۰۱

**جدول ۴)** مقایسه دقت شبیهسازی عددی تغییر فرم ورق با مقایسه خیز ماکزیمم مقدار تجربی با نتایج عددی بهدستآمده در اندازه دانههای مختلف

درصد خطا	$h_{max}$ (mm)	تعداد المان	تعداد نود	اندازه دانه
۲۸/۲	٩/٨٣	194	3454	۵/۰۰۵
41/F	۱۰/۷۶	۳۲۰	۵۵۳	0/00F
۱۲/۵	۱۱/۹۸	540	٩١٣	۰/۰۰۳
۴/۵	۱۳/₀۸	1100	1881	o/ooY
١/٢	۱۳/۵۰	۲۰۸۰	۳۳۰۱	۰/۰۰۱۵
۱/۵	१७/५१	۴۷۰۰	7771	۰/۰۰۱
۲/۸	14/14	18918	22618	۵/۰۰۰۵
۲/۸	14/14	24128	٨٥۶٢۶	۰/۰۰۰۳

### ۵- نتایج

نمودارهای ۲ تا ۴، آزمایش دینامیکی تغییر فرم ورق آلومینیوم به ضخامت ۱۲۳۳۳ مبا قراردادن یک لایه ورق مایلار را نشان می دهند. در این آزمایشها شرایط ثابت نگه داشته شده و خیز ماکزیمم ورق 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 شکمدادن (Bulging) ورق در تغییر فرم ورق در اثر موج شوک ایجادشده 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 ۱۲mm/ و فشار اولیه محرک ۴/۵bar بدون فیلر در آزمایش ۳۰

Volume 20, Issue 3, March 2020 www.SID.ir



**نمودار ۳)** تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت mm ۰/۱۲ وفشار اولیه محرک ۵/۱bar با قرارگیری فیلر به طول ۲۰cm در آزمایش ۳۱



**نمودار ٤)** تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت ۰/۱۲mm و فشار اولیه محرک ۴/۵bar با قرارگیری فیلر به طول ۴۰cm در آزمایش ۲۹

همچنین در نمودارهای ۲ تا ٤، اثر تغییر طول محرک بر خیز ورق بررسی شده که نتایج تجربی نشان می دهند که در طول محرک های مختلف (۸/۰، ۱ و ۲/۱متر) 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 ۱/۰۹بار افزایش یافت.

آزمایشهای ۳۲ تا ۳۵، آزمایش استاتیکی انجامشده بر ورق ۱۲٫۰میلی متری در فشارهای بهترتیب ۱٫۵، ۲٫۵، ۳ و ۲٫۳۰۰ هستند. مقایسه خیز ورق این چهار آزمایش در نمودار ۵ نشان داده میشود. اولین موضوع در این نوع تغییر فرم عدم مشاهده اثر برآمدگی در ناحیه مرکزی ورق است. خیز ماکزیمم به ترتیب افزایش فشار گاز ۱۰، ۱۴، ۱۶ و ۱۸٫۵میلی متر است. آزمایش ۳۵ (۱۸٫۵) در فشار ۲٫۳۰۱ بسیار نزدیک به خیز آزمایشهای مشابه مثلاً در آزمایش ۲۶، ۲۹ و ۱۰۰ فشار پارگی ۲٫۵بار و مقدار خیز ۱۹٫۲میلی متر است.



**نمودار 0)** مقایسه تغییر فرم استاتیکی ورق به ضخامت mm ۱۲/۰۰ در فشارهای مختلف

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 فرم ورق در حالت استاتیکی بیشتر از حالت دینامیکی در اثر موج شوک است. البته ماهیت تغییر فرم ورق در این دو حالت کاملاً فشار گاز fbar در مدت زمان ۲ تا ۳ دقیقه قرار دارد ولی در حالت دینامیکی در فشار انفجار ۱۹۵۵ ورق مایلار، پیک بیش فشار موج برابر ۲بار با سرعت ۸/اماخ به ورق آلومینیومی برخورد می کند و تغییر فرم ورق در عرض یک یا چند میلی ثانیه اتفاق میافتد.

تغییرات خیز دو آزمایش ۳۲ و ۳۹ برای ورق آلومینیوم به ضخامت ۸/ممیلیمتر در نمودار ٦ نشان داده شده است. با توجه به نمودار مقایسه ای که در نمودار ٦ نشان داده شده، الگوی تغییر شکل ورق کر 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 ۲/۳متری با هم دارند و مقدار خیز ماکزیمم در آزمایش ۳۹ بیشتر از آزمایش ۳۷ است که این موضوع به علت بالاتربودن پیک

نمودار نتایج تجربی تغییرات تغییر فرم سه آزمایش ۱، ۲ و ٤ بهمنظور بررسی تاثیر نازل مخروطی شکل بر میزان ارتفاع گنبد با ضخامت یکسان ۷۳mm/ تحت بار دینامیکی حاصل از فشار محرک یکسان ۸/٥bar قبل از انفجار دیافراگم بهترتیب در نمودار ۲ نشان داده شده است. قطر خارجی نازل در این آزمایش ها بهترتیب برابر ٤، ۳۲ و ۲۰میلیمتر است. نمودار ۲ نشان میدهد که ارتفاع گنبد در نازل ۳mm حتی کمتر از ۱ میلیمتر بوده و با یک نسبت مشخص با افزایش قطر خارجی نازل افزایش مییابد، به گونهای که در نازل ۲۰mm



**نمودار ٦)** مقایسه تغییر فرم دینامیکی ورق به ضخامت ۸mm/۰ در دو طول متحرک مختلف

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس **www.SID.ir** 



**نمودار ۲)** 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 دقیق تری به نمودارهای خیز ورق در سه نمونه شود، متوجه خواهید شد که گنبد شکل گرفته در آزمایش ۱ با نازل با سوراخ انتهای کوچکتر، در مرکز برآمدگی بیشتری نسبت به لبهها دارد که در دو نمونه دیگر مشاهده نمیشود. این موضوع میتواند به دلیل متمرکزشدن موج شوک باشد. همان طور که اشاره شد نازلها در فشار پایین انفجار دیافراگم ایمپالس موج برخوردی به ورق را تضعیف میکنند، این پدیده در دینامیک گازها تحت عنوان خفگی (Choking) شناخته میشود. به این معنا محض اینکه جریان در گلوگاه نازل و جریان بالادست گلوگاه فریز میشود. به بهطور پیوسته کاهش مییابد. این وضعیت، زمانی که دبی جریان بهلور پیوسته کاهش مییابد. این وضعیت، زمانی که دبی جریان بیابت 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 ۷۳mm/، بر خیز ورق تحت بارگذاری دینامیکی پرداخته خواهد شد. فشار انفجار دیافراگم در این سه آزمایش بهترتیب 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 موفقیتآمیزبودن پروژه لولهشوک برای شبیهسازی انفجار و بررسی فصل قبل بیان شد، برای مثال در آزمایش ۶ ایمپالس اعمالی به ورق حاصل از موج شوک ناشی از انفجار دیافراگم در فشار بالای متحرک) است. این موضوع نشان میدهد که این لولهشوک در شبیهسازی اثر موج بلاست بر تغییر فرم ورق ایزوتروپ آلومینیوم بهطور موفقیتآمیزی عمل کرده است.

در پنج آزمایش ۵، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۲ 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/۰ بدون

<u>برسی تجربی اثر تغییر پارامترهای هندسی لوله هوک برمیزان هیت موم انفجار ۸۳٬۵۶۵ ج</u>ایگذاری فیلر استفاده شده و در هر پنج نمونه فشار انفجار دیافراگم ۱۷۰بار و طول متحرک ۲/۴متری است. قطر انتهای نازل بهترتیب برابر ۱۷۰، ۲۳، ٤، ۲۲ و ۱۲میلیمتر 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 v/Ymm√ 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 متمرکزشدن 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 متمرکزنمودن موج شوک حاصل از انفجار در لولهشوک بهتر عمل میکند.

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

#### ۶۴۶ جمال زمانی و رامیار حسینزاده ــــ

همان طور که مشاهده میشود، نسبت خیز ماکزیمم در دو قطر مختلف ٤ و mw۰۷ در فشار محرک ۸/۵bar برابر ۸/۸ 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 پارهشدن غیرهمگن مایلار در دیافراگم صرفنظر شود، دو نازل با خروجی ٤ 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 ٤ 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 میزان تغییر فرم ورق بیشتری را نتیجه خواهد داد. پس از این بازه اثر خفگی به صورت پله ای افزایش داشته و موج شوک را تضعیف میکند.

# ۶- نتیجهگیری

در این مطالعه تجربی به بررسی مولفههای عملکردی لولهشوک محرک گازی ۳اینچی انتها بسته، روی تغییر فرم استاتیکی و دینامیکی ورقهای ایزوتروپ آلومینیوم پرداخته شد. همچنین تاثیرات پارامترهای هندسی لولهشوک روی ایمپالس موج شوک حاصل از انفجار دیافراگم در لولهشوک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بهدست آمده با افزایش فشار، ارتفاع گنبد ورق با نسبت مشخص افزایش مییابد که این موضوع نشاندهنده موفقیت آمیزبودن پروژه لوله شوک برای شبیه سازی انفجار و بررسی تاثیر بارگذاری با نرخ کرنش بالا روی نمونهها است. دومین مشاهده اثر شکمدادن در نمونه های تغییر فرم دینامیکی ورق آلومینیوم است، این در حالی است که شکم دادن ورق در نمونه های تغییر فرم با فشار استاتیکی گاز مشاهده نمی شود، از این رو میزان خیز ماکزیمم در نمونه های دینامیکی ۲ تا ۷میلیمتر بیشتر از نمونه های تغییر فرم استاتیکی قبل از پارگی و تسلیم ورق آلومینیوم است. افزایش خیز ورق در نمونه های 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 حملشده 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 ایجادشده موثر نیست که در نتیجه میتوان بیان کرد که طول محرک بر خیز ورق تحت بار دینامیکی بیاثر است. اثر متمرکزشدن موج برخوردی به ورق در نمونههایی که نازل در آنها تعبيه شده، قابل مشاهده است. به اين حالت كه ميزان تغيير فرم ورق در مرکز نسبت به کنارههای ورق در مقایسه با تغییرات ارتفاع

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 متمرکزنمودن موج شوک حاصل از انفجار در لولهشوک 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 متمرکزکردن بیشتر موج شوک میزان تغییر فرم ورق بیشتری را نتیجه خواهد داد. پس از این بازه اثر خفگی به صورت پله ای افزایش داشته و موج شوک را تضعیف میکند.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است. **تاییدیه 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 علايم

а	سرعت صوت در سیال (ms <sup>-1</sup> )
С	ظرفیت گرمای ویژه (J/g-K)
Ε	مدول الاستيسيته (Gpa)
$h_{max}$	خیز ماکزیمم (mm)
М	سرعت (ماخ)
p	فشار (kPa; bar)
R	ثابت جهانی گاز (Jkg <sup>-1</sup> K)
$S_t$	استحکام کششی نهایی (Mpa)
$S_Y$	استحكام تسليم (Mpa)
t	زمان (ms)
Т	دمای سیال (K)
Vs	سرعت جبهه شوک (ms <sup>-1</sup> )
x	موقعیت مکانی موج (m)
علائم يونانى	
ρ	چگالی (kgm <sup>-3</sup> )
γ	نسبت گرمای ویژه (Cp/Cv)
V	ضريب پواسان
زيرنويسها	
1	ناحیه متحرک قبل از پارهشدن دیافراگم
2	ناحیه تحت تاثیر موج شوک
2'	سطح تماس گاز محرک و متحرک
3	ناحيه تحت تاثير موج انبساطي
4	ناحیه محرک قبل از پارهشدن دیافراگم
5	ناحيه تحت تاثير موج شوك انعكاسى
S	موج شوک برخوردی

#### منابع

 Duff RE, Blackwell AN. Explosive driven shock tubes. Review of Scientific Instruments. 1966;37(5):579-586.
Davis WC, Salyer TR, Jackson SI, Aslam TD. ExplosiveAr CPFY برسی تجربی اثر تغییر پارامترهای هندسی لوله شوک بر میزان شدت موج انفجار 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, Bednarcyk 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. Oxyacetylene 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.