



مطالعه عددی تأثیر پارامترهای هندسی تیوب شوک مخروطی انفجار زیر آب، بر عملکرد و بیشینه‌ی فشار تولیدی به منظور ارائه رابطه جرم معادل

مهران حشمتی¹، جمال زمانی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، آزمایشگاه شکل‌دهی نوین، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 اسفند 1393

پذیرش: 01 خرداد 1394

ارائه در سایت: 24 خرداد 1394

کلیدواژگان:

تیوب شوک

انفجار زیر آب

ALE چند ماده‌ای

موج شوک

چکیده

یکی از روش‌های بررسی پدیده انفجار زیر آب و اثرات آن بر روی سازه‌ها، استفاده از تیوب شوک مخروطی می‌باشد. این تیوب‌ها با استفاده از یک خرج انفجاری کوچک فشار بسیار زیادی را ایجاد می‌نمایند. در این مقاله با استفاده از کد LS-DYNA، انفجار مقدار معینی از یک خرج انفجاری در داخل تیوب شوک مخروطی مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش حل لاگرانژی - اویلری انتخابی چند ماده‌ای انجام گرفته است. برای اطمینان از صحت روش انتخاب شده در نرم‌افزار، ابتدا پژوهش تجربی انجام شده توسط لیانس و شوکلا شبیه‌سازی شده و بعد از اطمینان به‌دقت نتایج، نسبت به شبیه‌سازی مسئله موردنظر اقدام شده است. در این کار پژوهشی در ابتدا، اثر زاویه رأس مخروط در مقدار فشار ایجاد شده در تیوب شوک مورد بررسی قرار گرفته است. سپس عملکرد تیوب‌های شوک با طول‌های متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها با تغییر وزن خرج انفجاری و بررسی نتایج و بیان دلایل تغییرات در هر پارامتر و بررسی اثر نسبت حجم ماده منفجره به حجم آب موجود در تیوب شوک، رابطه‌ای برای جرم معادل برای تمامی تیوب‌های شوک با زوایای مختلف ارائه گردیده و رابطه تئوری موجود اصلاح گردیده است.

A Numerical Study of the Effects of Geometrical Parameters on the Performance and Maximum Pressure of Undex Conical Shock Tube to Provide Equivalent Mass Equation

Mehran Heshmati, Jamal Zamani*

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

* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 March 2015
Accepted 22 May 2015
Available Online 14 June 2015

Keywords:
Shock Tube
Under Water Explosion
Multi Material ALE
Shock Wave

ABSTRACT

One way to convey the occurrence of explosion under water and its effects on the structures is to use coning shock tube. By using a small explosive, this tube causes high pressure. In this essay, by using LS-DYNA code, the explosion of a subsidiary amount of an explosive in the conning shock tube has been scrutinized. A numerical simulation has been done by using the MMALE (Multi Material Arbitrary Eulerian Lagrangian) solving method. To verify the validity of the selected method in software, first, the empirical tests performed by LeBlanc and Shukla are simulated. After ensuring the precision of the results, simulation of the desired problem is performed. In this research, first, the effect of the angle of the cone's head in the pressure caused inside the tube has been checked. Then, the operation of shock tubes with different lengths is checked. At the end, with the conversion of the weight of explosive, the study of the results and the reasons of the conversions in each parameter, a bond for the equivalent mass for all the shock tubes with different angles is presented and the bond for the present theory has been revised.

1- مقدمه

پدیده انفجار زیر آب از موضوعاتی است که در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته و حل مسائل انفجار زیر آب کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف داشته است. در مطالعه پدیده انفجار زیر آب و اثرات آن بر سازه‌های مجاور، به علت پیچیدگی معادلات حاکم و هندسه سازه‌های مورد نظر،

استفاده از حل تحلیلی تقریباً غیرممکن است. با رشد و توسعه روش‌های عددی و محاسبات کامپیوتری در دو دهه اخیر، استفاده از کدهای کامپیوتری برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی چون انفجار در آب و هوا توسط محققان حوزه دفاعی افزایش داشته است. کم هزینه بودن این شبیه‌سازی‌ها نسبت به آزمون‌های پرهزینه و خطرناک تجربی، استفاده از کدهای کامپیوتری را تسریع بخشیده است. همواره پارامتر تعیین کننده در هنگام استفاده از این

Please cite this article using:

M. Heshmati, J. Zamani, A Numerical Study of the Effects of Geometrical Parameters on the Performance and Maximum Pressure of Undex Conical Shock Tube to Provide Equivalent Mass Equation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 321-328, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

این تیوب از دو قسمت تفنگ گاز و یک تیوب مخروطی تشکیل شده است. مواد ناریه باعث به وجود آمدن فشار بالا و نیز حرکت آنی صفحه پران³ شده که ایجاد ایمپالس در محیط آب که در قسمت مخروطی وجود دارد را سبب می‌شود. این نوع تیوب برای انتشار موج در محیط سیال بکار می‌رود. با توجه به وجود تفنگ گاز، استهلاک این تیوب بالا بوده و همچنین ظرفیت آزمون نیز محدود می‌باشد [9].

2-3- تیوب شوک مخروطی انفجاری

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

اگر دیواره تیوب شوک صلب فرض شود و میدان فشار گسترش یافته را محدود کند، آنگاه می‌توان کهری اصلی انفجاری را با یک بخش مخروطی کوچک در رأس مخروط جایگزین کرد. شکل 1 این مفهوم را توضیح می‌دهد. اگر امواج شوک تولید شده توسط تیوب شوک مخروطی با امواجی که از ماده منفجره مشابه در فضای آزاد تولید شده مقایسه شود، نتایجی حاصل خواهد شد. یکی از این نتایج عبارت است از این که موج فشاری تولید شده در تیوب شوک مخروطی بسیار بزرگتر از حالت محیط آزاد خواهد بود. این افزایش فشار به هندسه مخروط وابسته است و لازم است یک فاکتور تقویت کاربردی بر مبنای دامنه‌های فشار موج شوک اندازه‌گیری شده محاسبه شود. یک فاکتور تقویت⁴ تئوری برای تیوب شوک مخروطی را می‌توان توسط نسبت حجم کره مواد منفجره به حجم بخش کوچک مخروطی از یک ماده منفجره به دست آورد، این نسبت معادل ضریب تقویت نامیده می‌شود که عبارت است از نسبت وزن خرج کروی محیط آزاد به جرم قطاع قرار گرفته در تیوب شوک که خرج کروی در محیط آزاد همان فشاری را ایجاد می‌نماید که این قطاع خرج، همان فشار را در تیوب شوک ایجاد می‌کند. ضریب تقویت تئوری در رابطه (1) ارائه گردیده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که همواره ضریب تقویت واقعی به مقدار قابل‌توجهی از ضریب تئوری کوچک‌تر می‌باشد [10].

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

3- معادلات حاکم

3-1- معادلات حالت محصولات انفجاری

در حال حاضر محاسبات هیدرودینامیکی به صورت گسترده برای بررسی انفجار مواد منفجره و تزویج موج انفجار به کار می‌روند. در این تحقیقات معادلات حالت رفتار انرژی-حجم- فشار انفجار مواد منفجره را توصیف کرده و مهمترین عامل موثر بر دقت و صحت محاسبات می‌باشد. معادلات حالت‌های بسیاری نیز به همین دلیل پیشنهاد شده‌اند. در میان این معادلات، معادله حالت JWL⁵ توسط جونز، ویلکینز ولی پیشنهاد شده که می‌تواند به دقت حالت محصولات انفجار مواد منفجره را توصیف کند. این معادله به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. JWL یک معادله حالت استاندارد است که در سرتاسر جهان برای توصیف رفتار فشار-حجم- انرژی مواد منفجره استفاده شده و تقریباً در تمام کدهای دینامیکی محاسباتی سیالاتی (نرم‌افزارهای تحلیل عددی دینامیکی) مانند آباکوس، اتوداین، ادینا و ال‌اس-

کدها، قابل اعتماد بودن نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقدار اختلاف آن‌ها با نتایج واقعی بوده است.

چندین روش آزمایشگاهی برای به دست آوردن وضعیت‌های مختلف بارگذاری انفجاری به روی سازه وجود دارد که عبارت‌اند از: مواد منفجره در محیط باز، تیوب شوک و دستگاه بار ضربه‌ای. اگرچه استفاده از مواد منفجره در محیط باز، استفاده آسان و کم هزینه را فراهم می‌کند، اما استفاده از تیوب شوک مزیت‌هایی را شامل شده که نمی‌توان به‌راحتی از کنار آن‌ها عبور کرد. تیوب شوک مزیت‌هایی را از جهت قابل تکرار بودن و کنترل‌پذیر بودن امواج جلویی صفحه‌ای و پارامترها فراهم می‌سازد [1]. اسپینوسا در سال 2006 تحقیقاتی را در جهت گسترش تیوب‌های شوک انفجار زیر آب به انجام رساند. در مکانیزم تیوب شوک ساخته شده توسط این محقق، با استفاده از ضربه‌ای که به صفحه‌ی متحرک وارد شده، موج شوکی در محفظه مخروطی پر از آب گسترش داده می‌شود و اثرات آن بر روی ورق‌های فلزی مورد بررسی قرار می‌گیرد [2]. در یک پروژه تحقیقاتی دیگر در توسعه تیوب شوک مخروطی پر از آب، جوزف برای آزمایش شوک مبدل‌های کوچک را با شبیه‌سازی شرایط آزمایش برای آزمایش سنگین، مورد بررسی قرار داد [3]. تکالور و همکارانش در سال 2007 با استفاده از تیوب شوک دیافراگمی رفتار مکانیکی و شکست کامپوزیت‌های کربنی را بر اثر موج انفجار مورد مطالعه قرار داد [4]. نخستین تیوب شوک مخروطی که با استفاده از خرج انفجاری موج شوک را ایجاد می‌نماید، توسط کومبز و همکارش ساخته شده است. کومبز نام تفنگ شوک¹ را برای این دستگاه برگزید. نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان داد که به کمک یک خرج کوچک می‌توان موج شوکی را ایجاد نمود که در حالت آزاد برای ایجاد آن به جرمی چند هزار برابری نیاز است [5]. لی بلانک و همکارانش در سال‌های 2010 تا 2013 با استفاده از همین نوع تیوب شوک خواص کامپوزیت‌های مختلفی را در برابر موج شوک مورد بررسی قرار دادند. آنها ضریبی را تحت عنوان ضریب تقویت تئوری معرفی نموده و اعلام نموده که بین مقدار واقعی با مقدار تئوری تفاوتی فاحش وجود دارد [1,6,7]. در این مقاله با استفاده از کد غیرخطی ال‌اس- داینا، پدیده انفجار زیر آب در یک تیوب شوک شبیه‌سازی می‌شود. برای اطمینان از صحت روش حل انتخاب شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی سایر محققین مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاکی از دقت بالای روش انتخاب شده در شبیه‌سازی عددی می‌باشد. سپس ضریب تقویت واقعی برای زوایای مختلف ارائه شده و اثرات تغییر پارامترهای زاویه، طول تیوب شوک و وزن ماده منفجره بر روی فشار تولیدی بررسی می‌شود.

2- انواع تیوب‌های شوک

2-1- تیوب دیافراگمی

تیوب شوک دیافراگمی در ساده‌ترین شکل خود شامل یک سطح مقطع دایروی یکنواخت است که این استوانه با یک دیافراگم به دو بخش محرک و متحرک تقسیم شده است. بخش محرک توسط یک گاز فشار بالا با جرم مولکولی کم (H₂ یا He) و بخش متحرک یا قسمت آزمون، از گاز آزمون در فشار پایین تشکیل شده است. زمانی که دیافراگم به‌طور ناگهانی از بین برود یک موج شوک در تیوب ایجاد می‌گردد. از این نوع تیوب برای انتشار موج در آب استفاده نمی‌شود [8].

2-2- تیوب شوک تفنگ گازی²

3- flyer plate
4- amplification factor
5- Jones-Wilkins-Lee

1- shock gun
2- gas gun

از این معادله‌ی حالت در مدل مادی نول برای شبیه‌سازی محیط واسط آب استفاده می‌شود که ضرایب مربوط به این معادله در جدول 2 ارائه گردیده است.

3-3- معادله حالت چند جمله‌ای خطی⁶

این معادله حالت، در انرژی داخلی بر واحد حجم E ، خطی است. فشار در آن با رابطه‌ی (6) داده شده است:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + E(C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2) \quad (6)$$

که در آن که در آن C_i ها ثوابتی هستند که توسط کاربر تعریف می‌شوند.

اگر $\mu < 0$ باشد:

$$C_2\mu^2 = C_6\mu^2 = 0 \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (8)$$

که ρ و ρ_0 به ترتیب چگالی و چگالی اولیه هستند [14].

این نوع معادله حالت در نرم‌افزار دارای دو بخش است که در بخش اول ضرایب چند جمله‌ای خطی و در بخش دیگر حالت ترمودینامیکی اولیه ماده تعیین می‌شود.

پارامترهای E_0 و V_0 موجود در بخش دوم معرف انرژی داخلی بر واحد حجم مخصوص مرجع⁷ و حجم نسبی اولیه⁸ هستند. این معادله حالت برای مدل کردن گاز ایده آل به صورت قانون گاما⁹ هم استفاده می‌شود. برای این حالت به صورت رابطه (9) عمل می‌شود:

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0 \quad (9)$$

$$C_4 = C_5 = \gamma - 1$$

که در آن γ ضریب گرمای ویژه می‌باشد. در واقع فشار به صورت معادله

(10) درمی‌آید:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (10)$$

4-3- روابط تجربی انفجار زیر آب

حداکثر فشار موج اولیه نیز با واحد MPa توسط کول و اسویسداک به صورت رابطه (11) ارائه شده است [16,15]:

$$P_{\max} = 52.16 \left(\frac{W^{1/3}}{S} \right)^{1.13} \quad (11)$$

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

$$Z = S/W^{1/3} \quad (12)$$

در این رابطه نیز W وزن معادل TNT برای خرج انفجاری برحسب کیلوگرم، S فاصله از مرکز خرج برحسب متر است.

4- روش تحلیل ارائه شده در این تحقیق

در تکنیک‌های حل عددی به طور سنتی از دو روش اصلی لاگرانژی و اویلری استفاده می‌شود که هر یک از آن دو را می‌توان با توجه به رفتاری که برای مواد مورد استفاده در تحلیل پیش‌بینی می‌شود، با در نظر گرفتن مزایا و معایب این روش‌ها برگزید. روش حل ALE، ترکیبی از دو روش اویلری و لاگرانژی بوده که مزایای هر دو روش را در برمی‌گیرد.

داینا بکار گرفته شده است. برای مواد منفجره‌ی مختلف، ضرایب خاص معادله حالت JWL با انطباق معادله با وضعیت C-J تجربی، سرعت انفجار و داده‌های فشار تعیین شده است. این اطلاعات معمولاً از تست سیلندر بدست آمده و هزینه‌ی بالایی را به همراه دارد.

تابع JWL یک معادله‌ی حالت تجربی است. این معادله بر پایه‌ی تابعی که نخستین بار توسط جونز و میلر در 1984 بیان و تابعی که در 1964 توسط ویلکینز پیشنهاد شد، استوار است. این تابع‌ها در سال 1968 توسط لی توسعه داده شدند. معادله‌ی حالت JWL در نرم‌افزار ال‌اس-داینا به شکل رابطه‌ی (2) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} E \quad (2)$$

که در آن پارامترهای $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ مقادیر ثابت و P و V به ترتیب فشار و حجم بدون بعد می‌باشند [13-11].

ضرایب پارامترهای معادله حالت ماده منفجره تی.ان.تی مورد استفاده در این پژوهش، به صورت جدول 1 می‌باشد.

3-2- معادله حالت گرونینز¹

این معادله حالت با سرعت شوک - سرعت ذره²، فشار را برای مواد متراکم شده³ به صورت رابطه (3) به دست می‌دهد:

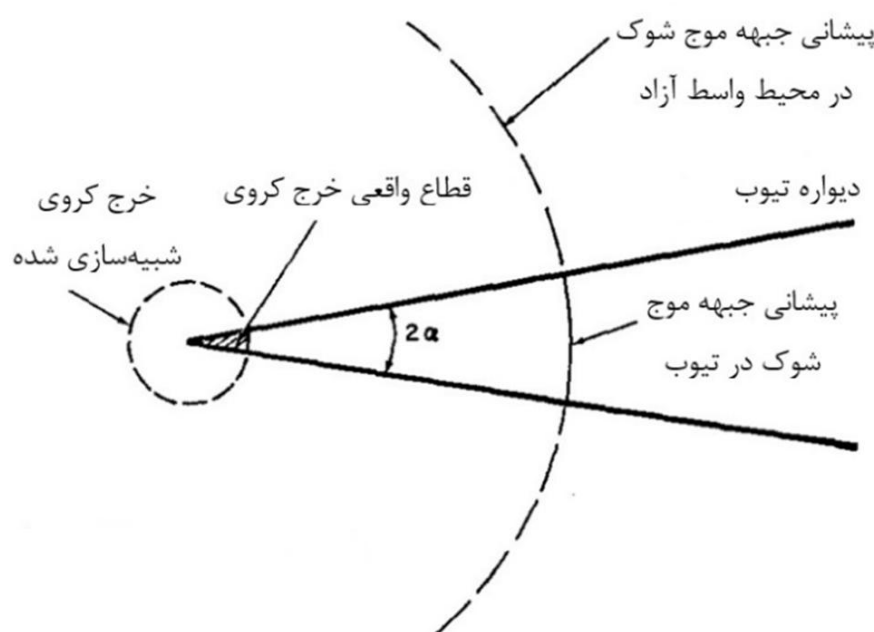
$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (3)$$

و برای مواد منبسط شده⁴ به صورت رابطه (4) است:

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (4)$$

که در آن C عرض از مبدأ⁵ منحنی $v_s - v_p$ ، S_i ضرایب مربوط به شیب منحنی $v_s - v_p$ ، γ_0 گامای گرونینز هستند و

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (5)$$



شکل 1 تقویت ماده منفجره در یک تیوب شوک مخروطی

- 1- Gruneisen
- 2- Cubic Shock Velocity-Particle Velocity
- 3- Compressed Material
- 4- Expanded
- 5- Intercept

- 6- linear polynomial
- 7- Reference Specific Volume
- 8- Initial Relative Volume
- 9- Gamma Law

جدول 1 مشخصات ماده منفجره تی.ان.تی و ضرایب مورد استفاده در معادله JWL [17]

ثابت	مقدار	واحد
چگالی	1/63	g/cm ³
سرعت دتونیشن D	0/6930	cm/μs
فشار چاپمن-جوگت P _{oj}	0/21	Mbar
انرژی ویژه بر واحد حجم	0/07	-
R ₁	4/15	-
R ₂	0/95	-
ω	0/3	-
A	3/712	Mbar
B	0/03231	Mbar
V ₀	1	-

جدول 2 ضرایب مورد استفاده برای محیط واسط آب [17]

ثابت	مقدار	واحد
چگالی	1/025	gr/cm ³
فشار نقطه برش ¹	1e-6	MBar
μ	1/13e-11	Mbar.μs
C	0/1480	cm/μs
ضریب S ₁	2/56	-
ضریب S ₂	-1/986	-
ضریب S ₃	0/2268	-
GAMAO	0/5	-
انرژی داخلی اولیه	1/89e-6	MBar
حجم نسبی اولیه	1	-

5- اعتبار سنجی روش حل مسئله

در این تحقیق فشار ایجاد شده ناشی از انفجار مقدار معینی از خرج انفجاری در داخل یک تیوب شوک، توسط کد غیرخطی ال.اس-داینات تخمین زده شده است. برای اطمینان از صحت روش انتخاب شده در شبیه‌سازی عددی، ابتدا پژوهش تجربی انجام شده توسط لبانس و شوکلا [7] شبیه‌سازی شده و بعد از اطمینان به دقت نتایج، نسبت به شبیه‌سازی مسئله مورد نظر اقدام شده است. شکل 2 نمایی از آزمایش انجام شده را نشان می‌دهد. طول تیوب شوک، 5/25 متر و زاویه رأس آن نیز 2/6 درجه می‌باشد. در آزمایش صورت گرفته، از کپسول انفجاری M6 با وزن معادل 1/32 گرم خرج انفجاری تی.ان.تی استفاده شده است. نقطه اندازه‌گیری فشار نیز در 0/5 متری انتهای تیوب شوک بوده است. بالاترین میزان فشار در محل قرارگیری سنسور (0/508 در جلوی قطعه نمونه) حدود 11 MPa گزارش شده است.

5-1- صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی به روش اجزاء محدود در سه مرحله کلی انجام شده است. در مرحله اول ساخت مدل هندسی مسئله شامل خرج انفجاری، آب، پوسته فولادی و هوای اطراف مدل با استفاده از نرم‌افزار ال.اس-پیش‌پردازش² انجام شده است. مدل شبیه‌سازی شده در شکل 3 به تصویر کشیده شده است. مش‌بندی مدل و محل قرارگیری خرج انفجاری نیز در شکل 4 نمایش داده شده است. در مرحله دوم تحلیل دینامیکی غیرخطی و سپس در مرحله سوم پس پردازش نتایج تحلیل با استفاده از نرم‌افزار ال.اس-پیش پردازش برای تفسیر نتایج به‌دست آمده انجام شده است. برای مدل‌سازی ماده منفجره از مدل مادی سوختار شدید³ و معادله حالت JWL استفاده شده است که ضرایب آن در جدول 1 آورده شده و برای محیط واسط آب نیز از مدل مادی نول⁴ و معادله حالت گرونیزن⁵ استفاده شده که ضرایب آن در جدول 2 نشان داده شده است. مشخصات فولاد به کار رفته در بدنه تیوب شوک نیز در جدول 3 ارائه گردیده است. مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی و با تقارن محوری 1/2 انجام شده است.

5-2 نتایج صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی

تغییرات فشار نسبت به زمان در نقطه موردنظر نیز، در شکل 5 نشان داده شده است. بیشینه فشار در این نقطه 10/6 MPa به دست آمده است. این فشار به مقدار ذکرشده در مرجع [7] که نمودار فشار زمان آن در شکل 6 به تصویر کشیده شده است، برابر با 10/3 MPa بوده، نزدیک می‌باشد. میزان خطای شبیه‌سازی حدود 3 درصد بوده که درصد بسیار قابل قبولی می‌باشد. انتشار موج شوک و حرکت آن در تیوب شوک در زمان‌های مختلف در شکل 7 به تصویر کشیده شده است.

جدول 3 مشخصات فولاد به کار رفته در بدنه تیوب شوک [19,7]

چگالی (kg/m ³)	7850
تنش تسلیم (MPa)	350
مدول یانگ (MPa)	210
ضریب پواسون	0/3
درصد ازدیاد طول	%28
تنش تسلیم (MPa)	260
مدل پلاستیسته	6400
کوپر-سایموند	0/25
	q

2- LS-Prepost

3- High explosive burn

4- Null

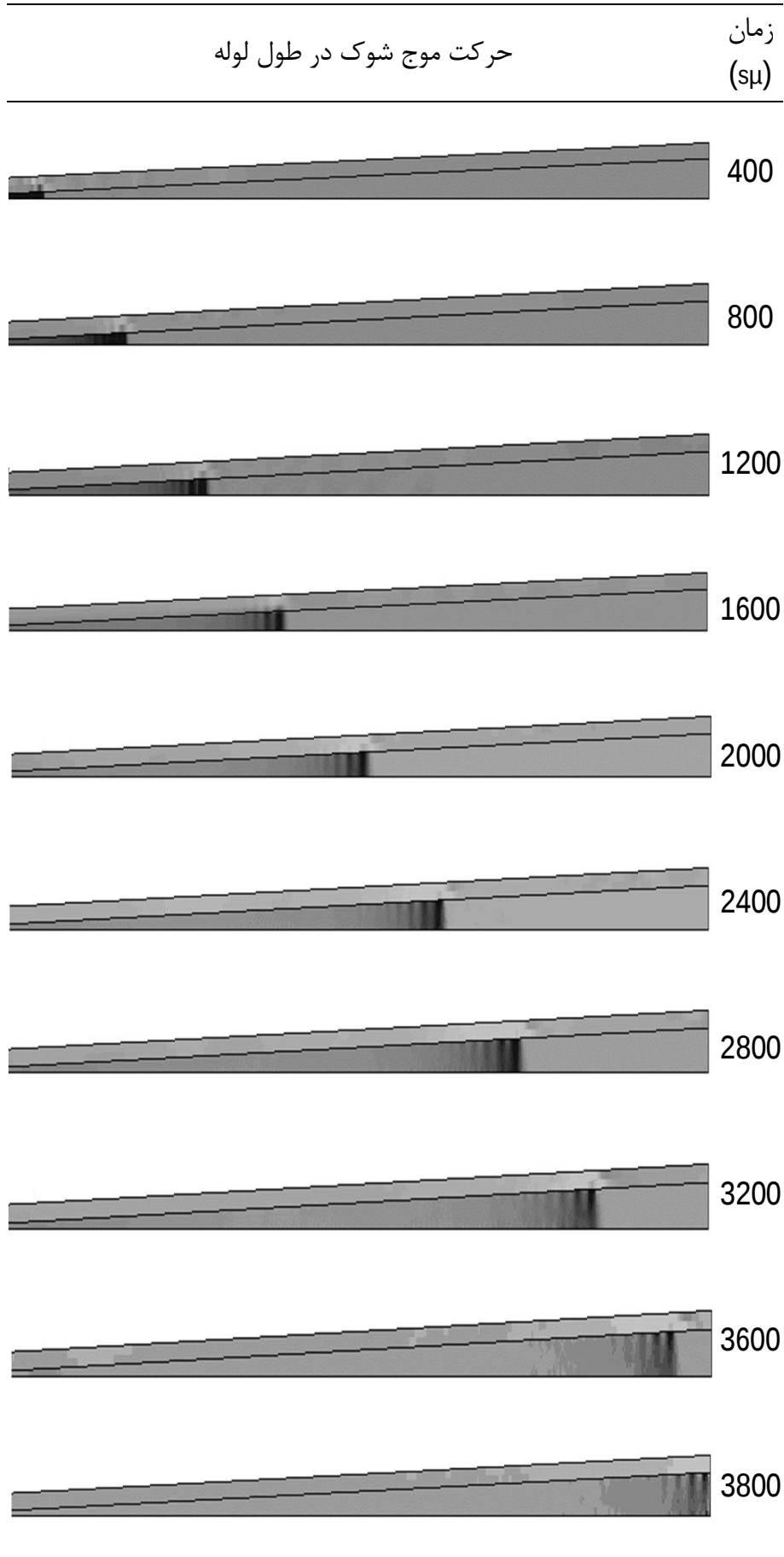
5- Gruneisen

در این روش نیاز به معرفی سطوح تماس بین مواد نیست. همانند روش حل اویلری امکان شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بسیار بزرگ با این روش وجود دارد. از آنجا که در این روش جریان جرم‌ها از مش مسئله عبور می‌کند تخمین سطوح آزاد هر ماده به‌سادگی روش حل لاگرانژی نیست. برای غلبه بر این مشکل باید تا حد امکان مش‌بندی مسئله را ریزتر کرد.

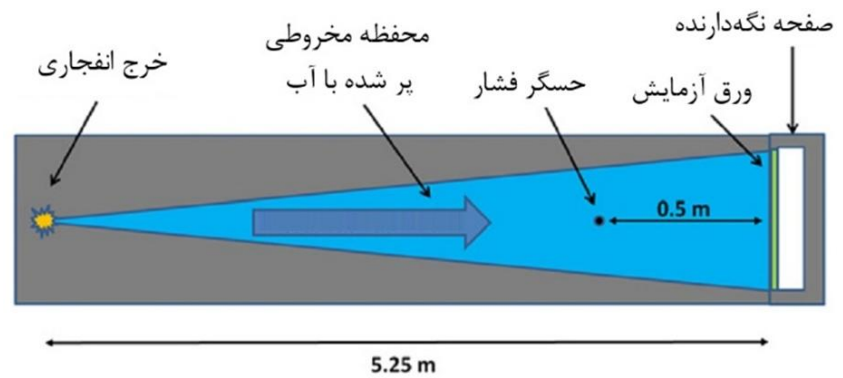
به علت آن‌که در این روش بایستی تمام فضای حل، المان بندی شود لذا این روش نسبت به سایر روش‌ها به زمان بیشتری برای حل مسئله نیازمند است. این روش نیز خود به دو صورت تک‌ماده‌ای و چند ماده‌ای است که در اینجا از روش حل ALE چند ماده‌ای با توجه به رفتار مواد استفاده شده است. در روش حل تک ماده‌ای هر المان مختص یک ماده می‌باشد. در این روش اگر یک دایره با استفاده از مش‌های مربعی مش زده شود، دایره به کمک این مربع‌ها ایجاد می‌گردد و مرز دایره به کمک این مربع‌ها ترسیم شده و مرز دایره منحنی شکل نخواهد بود؛ در نتیجه هر چه این المان‌های مربعی شکل بزرگتر باشند دقت شکل مش زده شده کاهش می‌یابد. در روش حل چند ماده‌ای یک المان می‌تواند در یک زمان توسط چندین ماده پر شود. این بدان معنی است که در این روش می‌توان یک دایره را به کمک المان‌های مربعی به گونه‌ای پر نمود که مرز دایره حالت دایره‌ای خود را از دست ندهد [18].

6-1- تأثیر طول تیوب شوک بر روی بیش فشار تولیدی در یک نقطه ثابت همانند قسمت قبل، ماده منفجره به صورت خرجی کروی شکل به شعاع 0/527 سانتی‌متر که معادل 1 گرم تی‌ان‌تی بوده، در مدل اعمال شده است. نقاط اندازه‌گیری فشار، در فواصل 0/5 تا 3 متری از ابتدای تیوب شوک، که می‌توان آن را به صورت تقریبی همان فاصله از مرکز خرج در نظر گرفت، انتخاب شده‌اند. ضخامت صفحه فولادی 5 میلی‌متر و جنس آن مشابه با پوسته فلزی تیوب انتخاب شده است. زاویه رأس مخروط تیوب شوک 2/6 درجه انتخاب شده است.

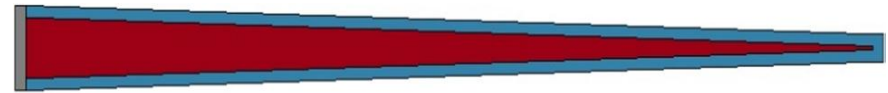
برای بررسی اثر طول تیوب شوک، تیوب‌هایی با طول 2، 3، 5/2، 7 و 10 متری شبیه‌سازی شده و فشار حاصله در فواصل مختلف در نمودار شکل 8 ارائه گردیده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که تقریباً می‌توان گفت که افزایش طول تیوب شوک تأثیری بر روی حداکثر فشار تولیدی در یک نقطه نداشته و اختلاف اندکی که مشاهده می‌شود نیز به دلیل اثرات بازتاب



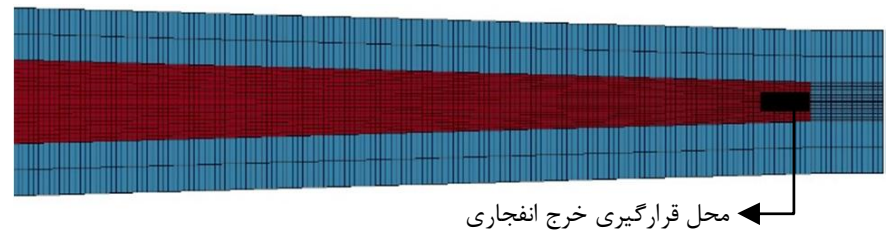
شکل 7 انتشار موج شوک در طول تیوب شوک (زمان به میکروثانیه)



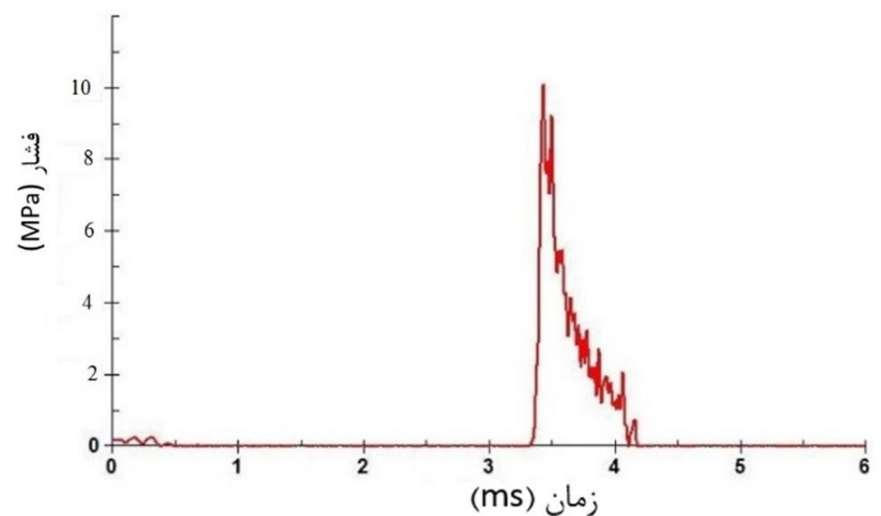
شکل 2 چیدمان پژوهش تجربی انجام انفجار زیر آب [10]



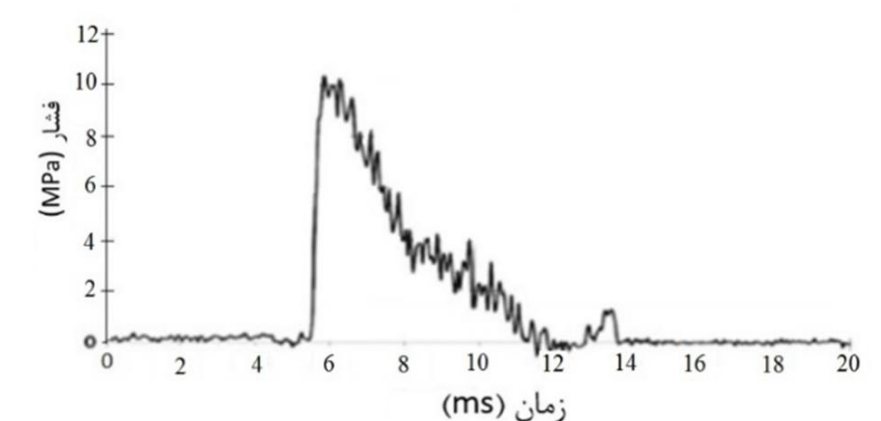
شکل 3 تیوب شوک شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار برای صحت‌سنجی



شکل 4 محل قرارگیری ماده منفجره و مش‌بندی ابتدای تیوب شوک



شکل 5 نمودار تغییرات فشار برحسب زمان در فاصله 0/5 از ورق آزمایش حاصل از شبیه‌سازی



شکل 6 نمودار تغییرات فشار برحسب زمان در فاصله 0/5 از ورق آزمایش حاصل از پژوهش تجربی

6- بررسی اثر پارامترهای هندسی بر بیش فشار تولیدی و ارائه نتایج بعد از اطمینان از دقت نتایج و صحت روش انتخاب شده در شبیه‌سازی عددی، مقدار فشار ایجاد شده در تیوب شوک در حالت‌های مختلف با تغییر پارامترهای هندسی، توسط کد غیر خطی ال‌اس-داینا مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای متغیر در هندسه تیوب شوک شامل طول مخروط و زاویه رأس مخروط بوده و اثر هریک از آن‌ها بر روی فشار تولیدی با ثابت نگه‌داشتن پارامتر دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

موج شوک بوده است.

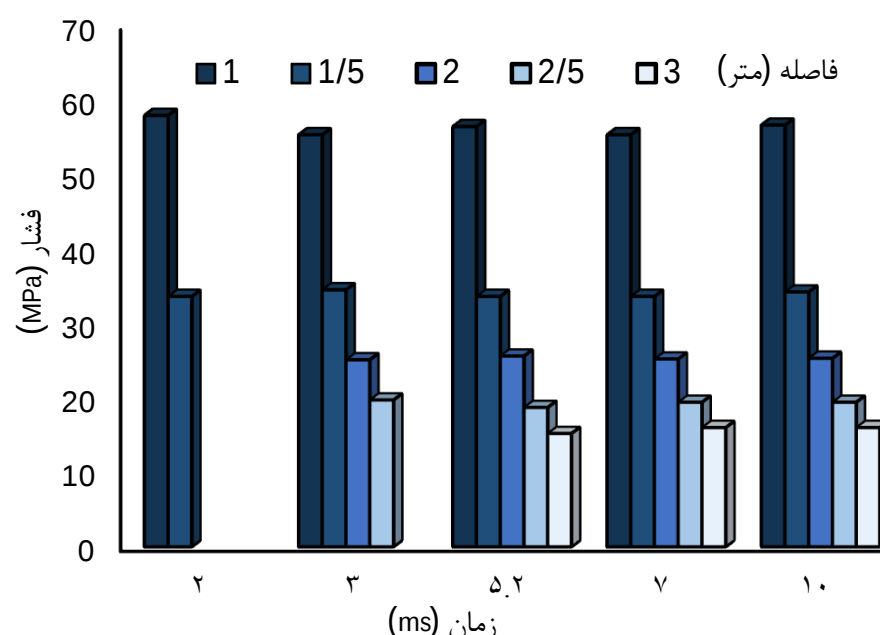
در قسمت بعد تغییرات حداکثر فشار تولیدی را بر اساس پارامتر بی بعد Z در تیوب‌های شوک 3، 5 و 7 متری در یک نمودار رسم نموده که حاصل آن شکل 9 خواهد بود. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که بیش‌فشار تولیدی در Zهای مختلف در تیوب شوک 5 متری بر نتایج 7 متری منطبق بوده و 3 متری بر هردوی آن‌ها منطبق است. نمودار شکل 9 کاهش نمایی بیش‌فشار را به خوبی به تصویر کشیده است.

2-6- بررسی اثرات تغییر زاویه تیوب شوک

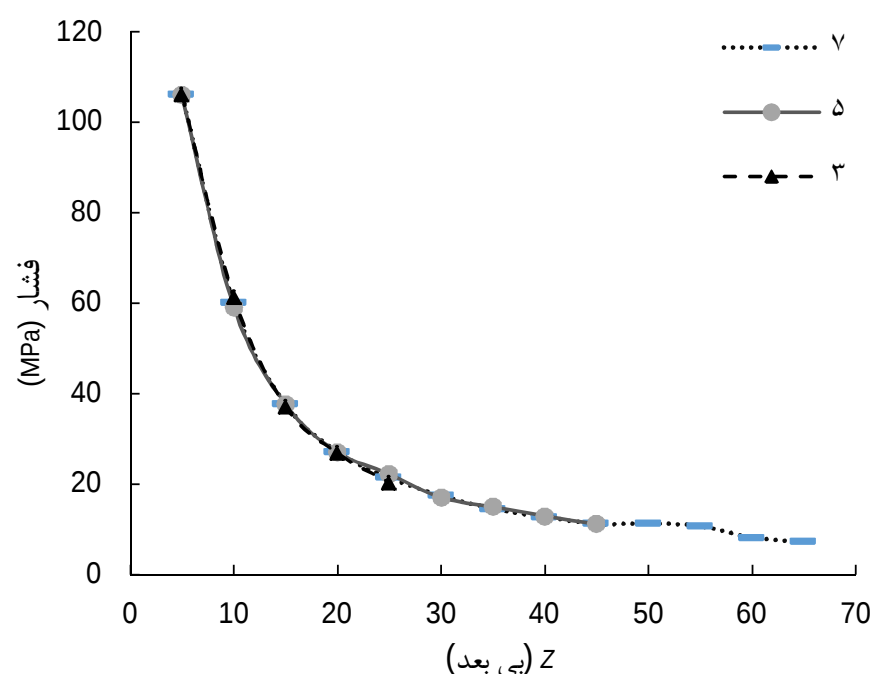
تغییر زاویه رأس مخروط تیوب شوک از 2 منظر قابل بررسی است. ابتدا تغییرات فشار در یک نقطه ثابت در زوایای متفاوت، درحالی‌که وزن ماده منفجره و طول تیوب شوک ثابت است بررسی شده و سپس با تغییر وزن ماده منفجره و استخراج نتایج حداکثر فشار تولیدی در فواصل مختلف، رابطه‌ای را برای محاسبه جرم معادل ارائه می‌گردد.

2-6-1- تغییرات فشار در یک فاصله ثابت با زوایای متفاوت

ماده منفجره به‌صورت خرجی کروی شکل به شعاع 0/527 سانتی‌متر که معادل 1 گرم تی‌ان‌تی بوده، در مدل اعمال شده است. طول تیوب شوک برابر با 7 متر در نظر گرفته شده و اندازه‌گیری فشار، در فواصل مختلف از ابتدای



شکل 8 مقایسه فشار حاصله در نقاط مختلف در تیوب‌های شوک با طول‌های متفاوت



شکل 9 نمودار تغییرات فشار در تیوب‌های شوک با طول متفاوت

تیوب شوک، که می‌توان آن را به‌صورت تقریبی همان فاصله از مرکز خرج در نظر گرفت، انجام شده است. ضخامت صفحه فولادی 5 میلی‌متر و جنس آن مشابه با پوسته فلزی تیوب انتخاب شده است. زاویه رأس مخروط تیوب شوک 2/6، 3/2، 3/8، 4/4 و 5 درجه انتخاب شده است.

در ابتدا در فواصل 0/5، 1 و 1/5 متری بیش‌فشار تولیدی را برای هر 5 زاویه استخراج نموده که منجر به رسم نمودار شکل 10 خواهد شد. مشاهده می‌گردد که با افزایش زاویه رأس مخروط، فشار تولیدی در یک نقطه ثابت کاهش پیدا می‌نماید.

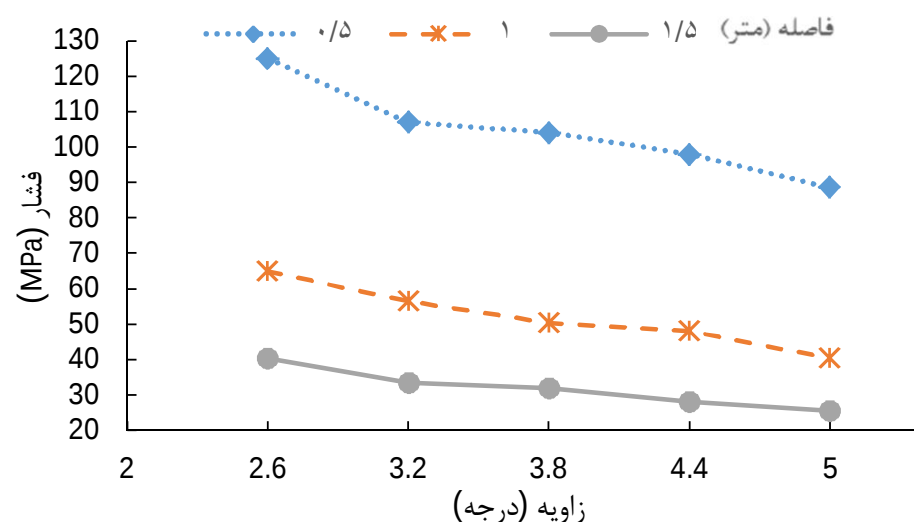
نمودار شکل 11 که تغییرات فشار را برای دو زاویه 2/6 و 3/8 درجه، نسبت به پارامتر بی‌بعد Z نشان می‌دهد نیز، کاهش فشار را بر اثر افزایش زاویه رأس مخروط اثبات می‌گرداند.

2-2-6- تأثیر زاویه بر جرم معادل در فواصل و جرم‌های متفاوت خرج انفجاری

در این قسمت ماده منفجره به‌صورت خرج‌های کروی شکل به شعاع‌های 0/468، 0/527 و 0/575 سانتی‌متر که معادل 0/7، 1 و 1/3 گرم تی‌ان‌تی بوده، در مدل‌ها اعمال شده است. طول تیوب شوک برابر با 7 متر در نظر گرفته شده و اندازه‌گیری فشار، در فواصل مختلف از ابتدای تیوب شوک، که می‌توان آن را به‌صورت تقریبی همان فاصله از مرکز خرج در نظر گرفت، انجام شده است. ضخامت صفحه فولادی 5 میلی‌متر و جنس آن مشابه با پوسته فلزی تیوب انتخاب شده است. زاویه رأس مخروط تیوب شوک 2/6، 3/2 و 3/8 درجه انتخاب شده است.

در ابتدا برای بررسی تأثیر تغییر زاویه بر روی جرم معادل، تغییرات جرم معادل برای 3 زاویه در وزن‌های 0/7، 1 و 1/3 گرم به ترتیب در شکل 12، شکل 13 و شکل 14 رسم گردیده است. وزن معادل عبارت است از وزن خرج کروی در محیط آزاد که در آن فاصله همان فشاری را ایجاد می‌نماید که خرج ذکرشده در آن فاصله در تیوب شوک آن را ایجاد می‌نماید. بررسی شکل 12، شکل 13 و شکل 14 نتایجی را به همراه دارد. نخستین نتیجه این است که با افزایش زاویه رأس مخروط وزن معادل در تمامی وزن‌ها کاهش پیدا می‌کند. معنی این نتیجه آن است که هرچه زاویه رأس مخروط افزایش یابد؛ فشاری که توسط یک خرج ثابت ایجاد می‌شود، کمتر خواهد بود و این فشار کمتر در فضای آزاد، ناشی از مقدار خرج کمتری خواهد بود.

نتیجه دوم این است که مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش وزن خرج، وزن معادل با افزایش فاصله از مرکز خرج افزایش بیشتری پیدا می‌کند. به زبان ساده‌تر، شیب نمودار با افزایش وزن خرج بیشتر می‌شود. این افزایش شیب در زوایای کمتر سریع‌تر اتفاق افتاده و نرخ بیشتری دارد. در



شکل 10 تغییرات فشار در 3 فاصله 0/5، 1 و 3 متری در زوایای رأس مختلف

کامل به توده گاز پرفشاری تبدیل می‌شود. این توده گاز به سرعت منبسط می‌گردد که این انبساط به دلیل تراکم ناپذیری آب، باعث افزایش فشار داخلی تیوب شوک خواهد شد. با افزایش وزن خرج، گاز تولیدی توسط ماده منفجره افزایش می‌یابد. حال هرچه حجم و فشار این گاز بیشتر باشد، فشار درون تیوب شوک نیز بیشتر خواهد بود. در رابطه با افزایش وزن معادل با افزایش فاصله نیز 2 دلیل قابل ذکر است. دلیل اول همان بزرگ شدن توده گاز و افزایش حجم آن بوده که سبب افزایش فشار داخلی شده که فشار بیشتر، وزن معادل بیشتری را معرفی می‌نماید. دلیل دوم کاهش فشار ناشی از موج شوک بوده که فشار ناشی از توده گاز خود را بیشتر نشان داده و تأثیرش نمایان تر خواهد بود. در رابطه با زاویه نیز همان دلیل اول، پدیده را به خوبی شرح خواهد داد. به شکلی که با کاهش زاویه، حجم فضای داخلی تیوب شوک و در نتیجه حجم آب موجود در مخروط نیز کاهش یافته و نسبت حجم گاز ایجاد شده توسط انفجار به فضای داخلی، افزایش یافته و بزرگ شدن حباب گاز تأثیر بیشتری بر روی فشار داخلی تیوب شوک خواهد داشت.

7- ضریب تقویت

همان‌طور که در قسمت تیوب شوک مخروطی انفجاری ذکر گردید؛ رابطه‌ای تئوری براساس مقایسه حجم قطاع خرجی که در تیوب شوک قرار دارد با حجمی معادل که در محیط آزاد واقع شده است، ارائه گردیده است. اما نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقدار واقعی، عددی بسیار کوچک‌تر در مقایسه با مقدار تئوری است. در این قسمت با محاسبه ضریب تقویت برای وزن‌ها و زوایای مختلف، ضریبی برای تصحیح رابطه‌ی فاکتور تقویت ارائه می‌گردد. خرج مورد استفاده کروی بوده و وزن‌های 0/7، 1، 1/3 و 1/6 گرم برای آن در نظر گرفته شده است. تیوب‌های شوک با طول 5 متر و زوایای رأس 2/6، 3/2 و 3/8 در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه خرج معادل از رابطه (11) استفاده شده است. پس از محاسبه خرج معادل، با تقسیم آن بر جرم خرج واقعی ضریب تقویت به دست می‌آید. جدول 4 ضریب تقویت را برای زوایا و وزن‌های مختلف نشان می‌دهد. پس از مقایسه‌ی ضریب تقویت میانگین تحلیل عددی با ضریب تقویت تئوری که از (1) محاسبه شده، ضریب تصحیحی برابر 0/2 برای ضریب تقویت تئوری پیدا می‌شود. رابطه (13) ضریب تقویت واقعی را برای تیوب‌های شوک با زاویه‌ی متفاوت نشان می‌دهد.

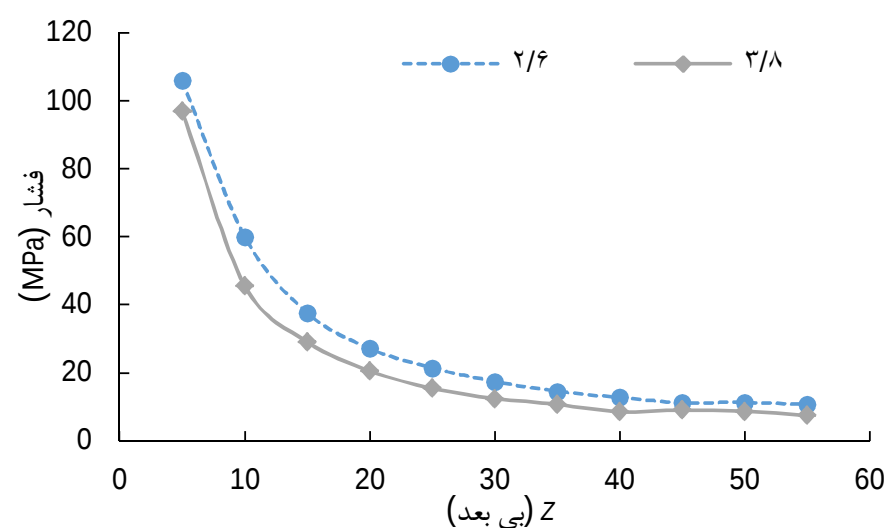
$$AF_{\text{real}} = 0.2 \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\alpha}{4}\right)} \quad (13)$$

ردیف آخر جدول 4 شامل ضرایب همبستگی وزن‌های معادل با تغییر زاویه است. ضریب همبستگی ابزاری آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. ضریب همبستگی، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین 1 تا -1 است و در عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. همبستگی بین دو متغیر تصادفی X و Y به صورت رابطه (14) تعریف می‌شود.

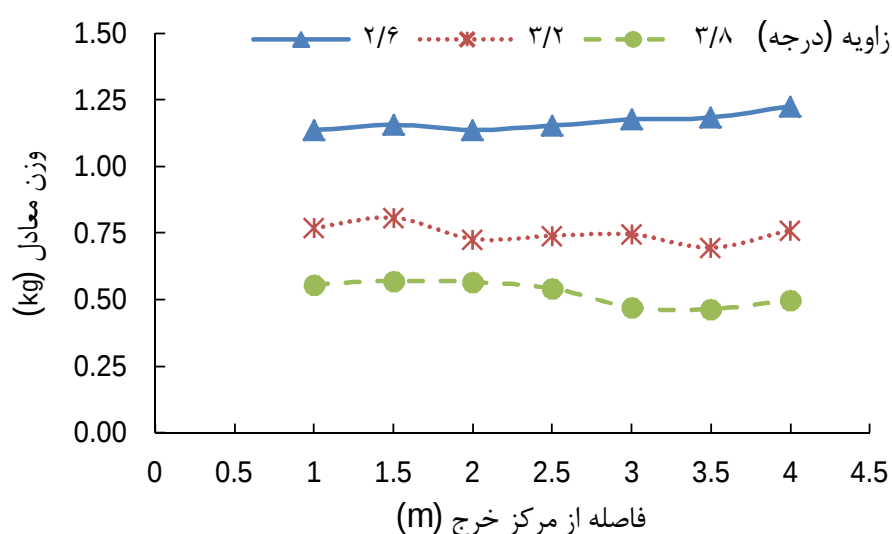
$$\text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (14)$$

که در آن E عملگر امید ریاضی (مقدار مورد انتظار)، cov به معنای کوواریانس، corr نماد معمول برای همبستگی (کوریلیشن) پیروسون و سیگما نماد انحراف معیار است.

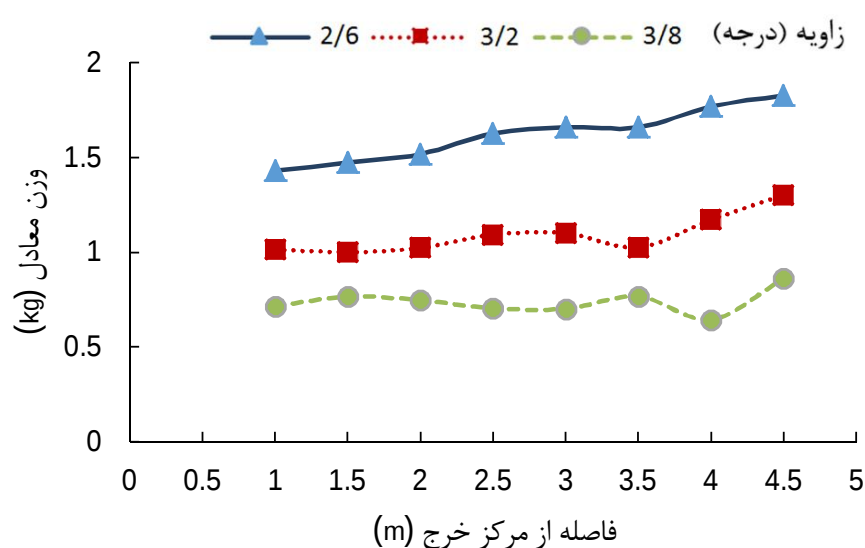
بررسی ردیف آخر نشان می‌دهد که ضریب همبستگی بین پارامتر زاویه و جرم معادل رابطه‌ی کاملاً معکوس بین این دو متغیر را به اثبات می‌رساند.



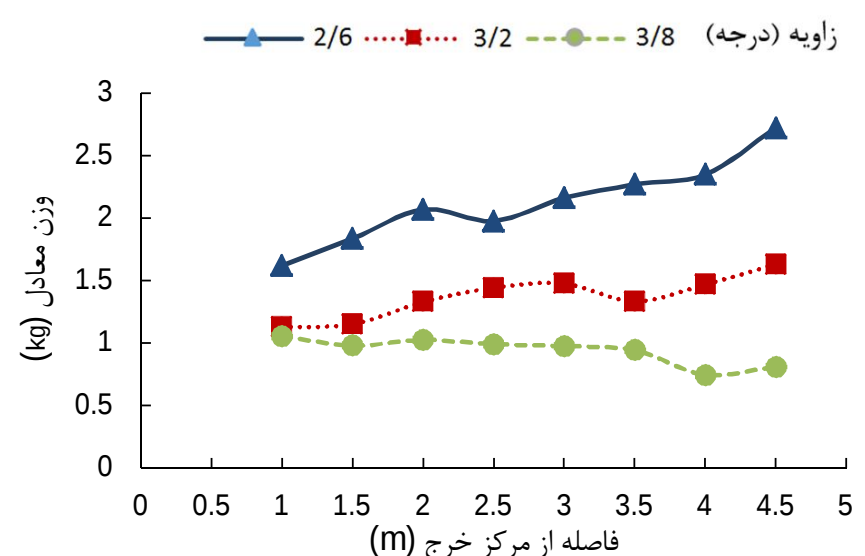
شکل 11 تغییرات فشار برحسب پارامتر Z در زوایای 2/6 و 3/8 درجه



شکل 12 نمودار تغییرات وزن معادل برحسب فاصله از مرکز خرج 0/7 گرم تی‌ان‌تی



شکل 13 نمودار تغییرات وزن معادل برحسب فاصله از مرکز خرج 1 گرم تی‌ان‌تی



شکل 14 نمودار تغییرات وزن معادل برحسب فاصله از مرکز خرج 1/3 گرم تی‌ان‌تی

توجیه این پدیده باید ذکر شود که پس از انفجار ماده‌ی منفجره به شکل

جدول 4 ضریب تقویت برای زوایا و وزن های مختلف

زاویه	ضریب تقویت						ضریب تصحیح AF
	0/7 گرم	1 گرم	1/3 گرم	1/6 گرم	میانگین	AF تئوری	
2/6	1651/624	1544/906	1568/361	1586/87	1587/94	7770/289	0/20436
3/2	1078/741	1035/586	1053/389	1068/71	1059/106	5129/718	0/20646
3/8	768/0789	761/455	729/6606	759/2588	754/6133	3637/792	0/20744
ضریب همبستگی	-0/9856	-0/9853	-0/9914	-0/9896	-0/9882	-0/9874	0/9787

نزدیک بودن این ضریب به 1- کیفیت بالای شبیه سازی و قابل اعتماد بودن نتایج این پژوهش را تضمین می کند.

σ_Y استحکام تسلیم استاتیکی
 σ_{Yd} استحکام تسلیم دینامیکی
 μ میکروثانیه

8- فهرست علائم

A	پارامتر ثابت A در معادله حالت JWL که به صورت تجربی تعیین می گردد.
AF	ضریب تقویت تئوری
AF_{real}	ضریب تقویت حقیقی
B	پارامتر ثابت B در معادله حالت JWL که به صورت تجربی تعیین می گردد.
C	پارامتر ثابت C در معادله حالت JWL که به صورت تجربی تعیین می گردد.
D	سرعت انفجار
E	مدول یانگ
E_0	انرژی داخلی بر واحد حجم مخصوص مرجع
$f(\varepsilon)$	پارامتر حساسیت به نرخ کرنش
M	متر
MPa	مگاپاسکال
Kg	کیلوگرم
P	فشار
P_{cj}	فشار چاپمن-جوگت
P_m	پیک فشار
R_1	پارامتر ثابت R_1 در معادله حالت JWL که به صورت تجربی تعیین می گردد.
R_2	پارامتر ثابت R_2 در معادله حالت JWL که به صورت تجربی تعیین می گردد.
V	حجم
V_0	حجم نسبی اولیه
S	فاصله از مرکز خرج
S_i	ضرایب مربوط به شیب منحنی $v_s - v_p$
W	وزن ماده ی منفجره
Z	عدد بی بعد برای مقیاس بندی انفجار
ϑ	ضریب پواسون
علایم یونانی	
α	زاویه راس مخروط تیوب شوک
ε	نرخ کرنش
γ	ضریب گرمای ویژه

9- مراجع

- [1] J. LeBlanc, A. Shukla, Response of E-glass/vinyl ester composite panels to underwater explosive loading: Effects of laminate modifications, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 10, pp. 796-803, 2011.
- [2] H. Espinosa, S. Lee, N. Moldovan, A novel fluid structure interaction experiment to investigate deformation of structural elements subjected to impulsive loading, *Experimental Mechanics*, Vol. 46, No. 6, pp. 805-824, 2006.
- [3] L. B. Poche, J. F. Zalesak, *Development of a Water-Filled Conical Shock Tube for Shock Testing of Small Sonar Transducers by Simulation of the Test Conditions for the Heavyweight Test of MIL-S-901D (NAVY)*, DTIC Document, pp. 1-25, 1992.
- [4] S. A. Tekalur, K. Shivakumar, A. Shukla, Mechanical behavior and damage evolution in E-glass vinyl ester and carbon composites subjected to static and blast loads, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 57-65, 2008.
- [5] A. Coombs, C. Thornhill, An underwater explosive shock gun, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 29, No. 02, pp. 373-383, 1967.
- [6] J. LeBlanc, N. Gardner, A. Shukla, Effect of polyurea coatings on the response of curved E-glass/vinyl ester composite panels to underwater explosive loading, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 44, No. 1, pp. 565-574, 2013.
- [7] J. LeBlanc, A. Shukla, Dynamic response of curved composite panels to underwater explosive loading: experimental and computational comparisons, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 11, pp. 3072-3081, 2011.
- [8] K. Bhaskaran, P. Roth, The shock tube as wave reactor for kinetic studies and material systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, No. 2, pp. 151-192, 2002.
- [9] F. Latourte, X. Wei, Z. D. Feinberg, A. de Vaucorbeil, P. Tran, G. B. Olson, H. D. Espinosa, Design and identification of high performance steel alloys for structures subjected to underwater impulsive loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 13, pp. 1573-1587, 2012.
- [10] L. B. Poche, J. F. Zalesak, *Development of a Water-Filled Conical Shock Tube for Shock Testing of Small Sonar Transducers by Simulation of the Test Conditions for the Heavyweight Test of MIL-S-901D (NAVY)*, DTIC Document, pp. 1992.
- [11] P. Urtiew, B. Hayes, Parametric study of the dynamic JWL-EOS for detonation products, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 27, No. 4, pp. 505-514, 1991.
- [12] B. Dobratz, *LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants*, Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), pp. 324-343, 1981.
- [13] S.M.Bagheri, J.ZamaniAshni, Evaluation of radial expansion behavior of thick-walled cylinder under internal explosive loading with numerical analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 251-259, 2015(In Persian).
- [14] M. Souli, LS-DYNA advanced course in ALE and fluid/structure coupling, *Livermore Scientific Technology Corp, Livermore*, 2004.
- [15] M. M. Swisdak Jr, *Explosion Effects and Properties. Part II. Explosion Effects in Water*, DTIC Document, pp. 25-29, 1978.
- [16] R. H. Cole, R. Weller, Underwater explosions, *Physics Today*, Vol. 1, pp. 35, 1948.
- [17] J. M. Brett, *Numerical Modelling of Shock Wave and Pressure Pulse Generation by Underwater Explosions*, DTIC Document, pp. 8-9, 1998.
- [18] D.-M. Bae, A. F. Zakki, H.-S. Kim, J.-G. Kim, Comparisons of Multi Material ALE and Single Material ALE in LS-DYNA for Estimation of Acceleration Response of Free-fall Lifeboat, *the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 48, No. 6, pp. 552-559, 2011.
- [19] N. Jones, *Structural impact*: Cambridge university press, 2011.