

بررسی رفتار انفجاری خرج غیر حساس PBXN-111 با تغییر ابعاد و موقعیت قرص بوستر

محسن روح بخش^۱، سعید توانگر روستا^۲، محمدرضا صدیقی صابر^{۳*}، سید هادی معتمدالشریعتی^۴، محمدحسین قزل ایاغ^۵

۱- دانشجوی دکتری، ۲ و ۵- دانشیار، ۳ و ۴- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ وصول: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹)

چکیده

قدرت انفجار علاوه بر ویژگی‌های ذاتی مواد منفجره، متأثر از چیدمان زنجیره انفجار است. بنابراین طراحی صحیح زنجیره انفجار به خصوص برای خرج‌های انفجاری غیر حساس آلومینیوم دار به منظور اثربخشی هر چه بیشتر نقش اساسی دارد. در کار تحقیقاتی حاضر با تغییر ابعاد قرص بوستر و موقعیت آن نسبت به خرج اصلی، رفتار انفجاری خرج اصلی بررسی شده است. در این مطالعه رفتار قرص بوستر COMP-A3 با معادله حالت JWL و خرج اصلی PBXN-111 با معادله حالت آغازش و رشد مدل شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN انجام شده است. ضرایب به‌کار رفته در معادله حالت آغازش و رشد با نتایج تجربی از مقالات معتبر اعتبارسنجی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با کاهش قطر بوستر از ۵ سانتی‌متر به ۳ سانتی‌متر برای یک طول مشخص از قرص بوستر، بر اثر واگرایی بیشتر موج فشاری داخل خرج، طول ناحیه رسیدن به تراک پایا افزایش می‌یابد. در حالتی که قرص بوستر به صورت متداخل داخل خرج اصلی قرار گرفته، مقادیر بیشینه فشار در قسمت گوشه‌های خرج افزایش یافته و افت فشار در اثر واگرایی را تعدیل می‌کند. شبیه‌سازی نشان می‌دهد برای حالتی که بوستر و خرج اصلی بر روی هم قرار گرفته (مماس) بوستر با قطر دو سانتی‌متر با هر طولی از قرص بوستر قادر به ایجاد تراک پایا در خرج اصلی نیست اما در وضعیت متداخل می‌تواند تراک پایا در خرج اصلی ایجاد کند. این مطالعه نشان داد، قرص بوستر با قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۴ سانتی‌متر می‌تواند به انفجار کامل در خرج PBXN-111 بیانجامد. طول ناحیه رسیدن به تراک پایا با بوستر مذکور ۱۵ سانتی‌متر است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره انفجار، خرج غیر حساس آلومینیوم دار، PBXN-111، شبیه‌سازی، نرم‌افزار اتوداین.

Investigation of Detonation Behavior of the PBXN-111 Insensitive Charge, by Changing the Dimensions and Position of the Booster Pellet

M. Roohbakhsh, S. Tavangar, M. R. Sedighi Saber*, H. Motamedshariati, M. H. Ghezal Ayagh

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 07/09/2023, Accepted: 09/20/2023)

Abstract

In addition to the inherent characteristics of explosives, the power of the detonation is affected by arrangement of the explosive train. Therefore, the correct design of the explosive train, especially for insensitive explosive charges containing aluminum, play a fundamental role in order to be more effective. In the current research work, by changing the dimensions of the booster pellet and its position relative to the main charge; the detonation behavior of the main charge has been investigated. In this study, the booster pellet (COMP-A3) is modeled with JWL equation of state and the main charge (PBXN-111) is modeled with ignition and growth equation of state. The simulations has been done using AUTODYN software. The coefficient used in the equation of state (ignition and growth) has been evaluated with experimental results. The simulation results show that by reducing the diameter of the booster pellet from 5cm to 3cm, for a certain length of the booster pellet, reaching to the steady detonation increases due to the greater divergence of pressure wave into the charge. In the case where the booster is inside the charge, the peak pressure values increase in the corners of the charge and adjust the pressure drop due to the divergence. The simulation shows that for the case where the booster and the main charge are placed on top of each other, the booster with a diameter of two centimeters with any length of the booster pellet is not able to create stable detonation in the main charge. For a submerged condition of the same diameter, the booster can produce stable detonation in the main charge. This study showed that a booster pellet with a diameter of 5 cm and a length of 4 cm can cause a complete detonation in PBXN-111. The length of the region to reach stable detonation with this booster is 15 cm.

Keywords: Explosive Train, Insensitive Aluminized Explosive, PBXN-111, Simulation, AUTODYN Software.

* Corresponding Author E-mail: sedighisaber@gmail.com

۱- مقدمه

زنجیره انفجار شامل چاشنی، بوستر مناسب و خرج اصلی است. در واقع ابعاد و جنس بوستر، جنس و ضخامت پوسته بوستر و موقعیت قرارگیری بوستر نسبت به خرج بر قدرت انفجار مؤثر خواهد بود. آغازگری مناسب در خرج‌های انفجاری غیر حساس (خرجی که با چاشنی نمره ۸ فعال نمی‌شود) مستلزم شناخت پدیده‌های تأثیرگذار در این حوزه است. پدیده مهم اول در این زمینه تبدیل موج شک به موج تراک یعنی SDT^1 است. از مدت‌ها پیش مشخص شده است که آغازش در اثر شک در مواد منفجره غیر همگن با شکل‌گیری نقاط داغ به وجود آمده کنترل می‌شود. به موازات فشرده شدن خرج اصلی بر اثر موج شک ورودی از بوستر، نقاط داغ شکل گرفته و با شروع واکنش انرژی آزاد شده، این انرژی قدرت موج شک را تقویت نموده تا جایی که تراک پایا شکل می‌گیرد [۱]. در تحقیقات آزمایشگاهی آغازش با شک سنج‌های اندازه‌گیری فشار از نوع مگناین^۲ که داخل خرج قرار می‌گیرد نشان داده دامنه موج شک اولیه طی انتشار در خرج، بر اثر پالس‌های فشاری در اثر واکنش، افزایش یافته و تراک رخ می‌دهد [۱].

به فاصله‌ای که طول می‌کشد تا موج شک به موج تراک^۳ تبدیل شود فاصله گذار^۴ گفته می‌شود. فاصله گذار شک به تراک با استفاده از آزمون گوه برای چگالی‌های مختلف مواد انفجاری انجام شده است. در مراجع علمی ارتباط موج شک ورودی به خرج با فاصله گذار تحت عنوان نمودارهای پاپ^۵ شناخته می‌شود. تراک در مواد منفجره نه تنها تحت تأثیر بیشینه فشار موج شک ورودی است بلکه متأثر از بازه زمانی اعمال موج شک نیز است [۲]. در واقع جنس بوستر تعیین کننده دامنه فشار و طول ابعاد آن تعیین کننده مدت زمان اعمال موج شک است [۲].

آزمون مهم که برای تعیین حساسیت به شک یک ماده منفجره انجام می‌شود، آزمون گپ^۶ است. این آزمون آستانه مقدار فشار شک ورودی برای فعال شدن خرج انفجاری را تعیین می‌کند به طوری که در نیمی از دفعات تکرار آزمون، ماده منفجره یا خرج گیرنده فعال شود. در این آزمون ماده منفجره مورد نظر در معرض یک موج شک با فشار معین قرار می‌گیرد. این موج شک با فشار معین با استفاده از یک بوستر و یک تضعیف کننده فشار موج شک تولید می‌شود. تضعیف کننده فشار علاوه بر کاهش فشار موج شک، از پرتاب شدن ذرات به سوی خرج مورد آزمایش و یا انتقال حرارت مستقیم به خرج جلوگیری می‌کند. در نتیجه باعث می‌شود تنها انرژی منتقل شده از بوستر به خرج، انرژی موج شک باشد. اینکه موج شک اعمال شده، توانسته در ماده

منفجره انفجار کامل ایجاد کند و یا خیر، با توجه به اثرات مکانیکی باقیمانده پس از انفجار تعیین می‌گردد. اثراتی از قبیل سوراخ کردن یک صفحه فولادی، ایجاد گودی در یک بلوک فولادی، لهیدگی یک استوانه مسی و... البته در برخی گزارش‌ها با تعیین سرعت انفجار در طول خرج انفجاری و تحلیل آن، وقوع انفجار در ماده منفجره را مورد بررسی قرار می‌دهند [۳].

پدیده مهم دوم در ارتباط با آغازش، امواج انبساطی^۷ هستند. در حالتی که آغازش در اثر برخورد صفحات پُران نازک صورت گیرد یا قطر پرتابه^۸ کوچک انتخاب شود اثر امواج انبساطی مهم می‌شود. در اثر برخورد صفحه پُران به ماده انفجاری یک موج شک داخل ماده انفجاری به جلو پیش می‌رود و یک موج شک داخل صفحه به عقب منتشر می‌شود. زمانی که موج شک به انتهای صفحه رسید، یک موج انبساطی برمی‌گردد. این موج ضخامت صفحه پُران را پیموده و وارد خرج می‌شود. در نهایت ممکن است این موج به جبهه موج شک برسد. اگر این رسیدن قبل از شروع تراک باشد، یا شروع تراک به تعویق می‌افتد و یا تراک پیشرفت نخواهد کرد [۴].

پدیده مهم سوم موضوع کنج گردی^۹ و کاهش حساسیت^{۱۰} است که کاملاً به یکدیگر مرتبط هستند. کنج گردی به توانایی موج برای غلبه بر واگرایی به دلیل افزایش سطح و یا تغییر در جهت موج تراک گفته می‌شود. در این پدیده یک موج شک ضعیف پیشرو باعث فعال سازی سازوکارهای مؤثر در شکل‌گیری نقاط داغ شده اما توان فعال سازی واکنش شیمیایی را نداشته است. در ادامه موج شک اصلی نمی‌تواند بافت جدید خرج را فعال کند. اغلب هر دو پدیده به‌طور هم‌زمان فعال می‌شوند. واگرایی موج باعث شده شک ضعیف شود تا حدی که نتواند آغازش در ماده منفجره ایجاد کند. در واقع کنج گردی با دو عامل کنترل می‌شود، یکی واگرایی موج تراک و دیگری رسیدن پیش از موعد شک به نواحی از خرج، از طریق عبور شک از محیط مادی اطراف خرج [۵]. عدم ورود موج تراک در نهایت منجر به شکل‌گیری نواحی مرده می‌شود. لوآنو و نیکیفوراکیس با تغییر جنس و ضخامت پوسته چاشنی و نیز موقعیت چاشنی، نواحی مرده در یک بوستر از جنس COMP-B را به‌صورت عددی تعیین کردند [۶].

فرآیند انفجار با استفاده از یک دستگاه معادلات دیفرانسیل و به شکل عددی توصیف می‌شود. دستگاه معادلات دیفرانسیل قوانین سه گانه بقای جرم، مومنتم و انرژی و همچنین تعدادی معادلات کمکی و مدل مواد را شامل می‌شود. معادلات بقاء عبارتند از:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

7- Rarefaction Waves

8- Rod

9- Corner Turning

10- Desensitization

1- Shock to Detonation Transition

2- Manganin

3- Detonation Wave

4- Run Distance

5- Pop Plots

6- Gap Test

هایگن بسیار بیشتر است. دو نوع متفاوت برای این مدل از جهت وابستگی رفتار نرخ سوزش به هندسه وجود دارد. اولین نوع از مدل جریان واکنشی فاقد اثرات هندسی است و نرخ واکنش با یک عبارت کلی بیان می‌شود. ساده‌ترین عبارت در این رده، قانون فارست فایر^۳ است که صرفاً نرخ واکنش را وابسته به فشار می‌داند:

$$\dot{\alpha} = (1-\alpha) f(p) \quad (5)$$

که در آن، α کسر واکنش داده ماده انفجاری است و $f(p)$ یک چند جمله‌ای و نقطه بالای α بیانگر مشتق زمانی است. فارست فایر بیانگر فعال شدن تا رسیدن به وضعیت انفجار پایا از ایمپالس یک شاک مداوم است [۵]. نسل بعدی قوانین نرخ واکنش، واکنش پذیری ذاتی شیمیایی را با هندسه درهم می‌آمیزد. معادله آغازش و رشد لی و تارور^۴ از این نوع است:

$$\dot{\alpha} = I(1-\alpha)^x \left(\frac{v_0}{v} \right)^r + G(1-\alpha)^y \alpha^z p^z \quad (6)$$

در این رابطه، α کسر واکنش داده، v_0 حجم مخصوص اولیه، v حجم مخصوص جاری ماده انفجاری و p فشار است. ثوابت رابطه هستند. I, x, y, z, r, G پارامترهای نسبتاً کم برای کالیبراسیون است. میلر برای کالیبراسیون ضرایب I, G در معادله دو جمله‌ای لی و تارور، از تطبیق نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی برای قطر افت و آزمون گپ استفاده کرده است [۸]. استفاده از توان r برای مدل‌سازی فرآیندهای شکل‌گیری نقاط داغ مانند کار پلاستیک، شکل‌گیری جت و استفاده از x, y برای توصیف هندسی پیشروی واکنش است. محدودیت‌های این مدل شامل وابستگی غیر مستقیم به اندازه شبکه و گرانیوی بالک^۵ و نیز ناتوانی برای ارائه یک دسته ضرایب واحد برای پیش‌بینی آغازش در اثر موج شاک مداوم و موج شاک با پهنای پالس کوتاه است [۵]. در سال ۱۹۸۵ تارور و همکاران یک رابطه نرخ واکنش با سه جمله ارائه کردند که قادر است آغازش با شاک با پهنای پالس کوتاه را نیز با دقت پیش‌بینی نماید. رابطه مذکور به‌صورت معادله (۷) بیان شده است:

$$\dot{\alpha} = I(1-\alpha)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-\alpha)^c \alpha^d p^y + G_2(1-\alpha)^f \alpha^h p^z \quad (7)$$

در این رابطه، α کسر واکنش داده، ρ_0 چگالی اولیه، ρ چگالی جاری و a فشردگی بحرانی آغازش است.

$I, b, G_1, c, d, y, G_2, f, h, z$ ثوابت رابطه هستند که برای هر ماده باید کالیبره شوند. این رابطه شامل سه جمله است که هر یک بخشی از فرآیند آغازگری را توصیف می‌کند. جمله اول آغازش در نقاط داغ بر اثر موج فشاری پیشرو، جمله دوم بیانگر رشد آهسته واکنش از نقاط داغ منفرد و جمله سوم رشد سریع واکنش در شرایط فشار بالا، با به هم پیوستن نواحی داغ را توصیف می‌کند [۹ و ۱۰]. پارامتر a

$$\frac{dv_i}{dt} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} + v_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{e}_{ij} \quad (3)$$

در معادلات فوق، ρ چگالی، v_i مؤلفه سرعت، t زمان، x_i مؤلفه مکانی، f_i مؤلفه‌های نیروی حجمی، σ_{ij} تانسور تنش، E انرژی داخلی مخصوص بر واحد حجم، p فشار، s_{ij} مؤلفه‌های تنش برشی، $\dot{e}_{ij}$ مؤلفه‌های نرخ کرنش است. معادلات کمکی بیانگر تئوری انفجار مناسب است. مدل ماده‌ها نیز نقش مهمی در ارتباط دادن تنش با تغییر شکل و انرژی داخلی ایفاء می‌کنند. سیالات با معادله حالت مدل می‌شوند. معادله حالت رابطه بین فشار، حجم مخصوص و انرژی داخلی مخصوص را بیان می‌کند. برای مدل‌سازی جامدات معادلات دیگری علاوه بر معادله حالت مورد نیاز است، چرا که جامدات تنش برشی را تحمل می‌کنند. این معادلات باید هم‌زمان حل شوند. روش‌های عددی نظیر المان محدود، حجم محدود و تفاضل محدود برای حل این معادلات توسعه یافته است [۷].

به‌طور کلی دو نوع الگو برای مدل‌سازی انفجار مواد منفجره در هیدروکدها توسعه داده شده است. یکی روش محاسباتی هندسی و دیگری تکنیک پیچیده‌تر جریان واکنشی است [۵]. در مورد اول رفتار موج تراک در ماده منفجره مطابق با موج ایده‌آل چاپمن-ژوگت^۱، شبکه را در همه جهات با سرعت معین طی می‌کند. موقعیت جبهه موج بستگی به تعداد و محل مراکز انتشار موج دارد و مستقل از پوسته محصور کننده خرج و اثرات آغازگر است. اغلب این روش را تکنیک هایگن^۲ می‌نامند [۵]. در این تکنیک با رسیدن موج تراک به ماده انفجاری، انفجار آبی بوده و رفتار محصولات انفجار طبق معادله حالت JWL خواهد بود. این معادله در رابطه (۴) داده شده است.

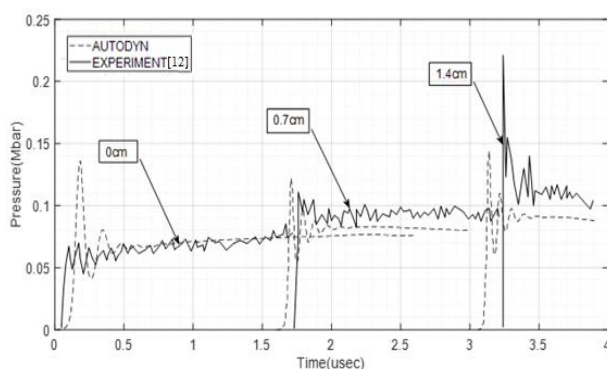
$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{wE}{V} \quad (4)$$

در این معادله، ثابت‌های w, R_2, R_1, B, A به جنس ماده منفجره وابسته است. متغیر $V = v/v_0$ بیانگر انبساط محصولات انفجار است و E انرژی انفجار بر واحد حجم است [۷].

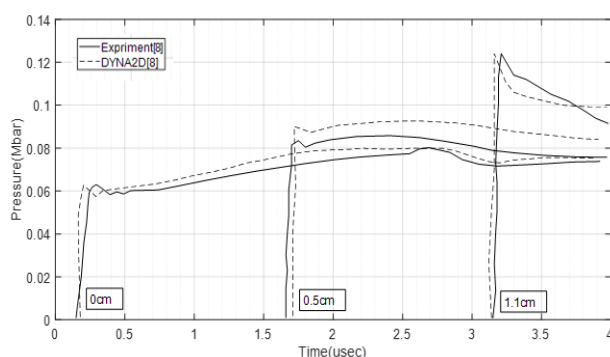
در مورد دوم ماده منفجره مانند یک محیط فعال شیمیایی رفتار می‌کند که تبدیل بین وضعیت واکنش داده و واکنش نداده صرفاً تحت تأثیر وضعیت ترمودینامیکی محلی ماده انفجاری است. ماده منفجره با معادله حالت برای مواد واکنش نداده و معادله حالت برای مواد واکنش داده و دسته‌ای از پارامترهای نرخ واکنش شیمیایی توصیف می‌شود. پیچیدگی‌های محاسباتی در این روش در مقایسه با تکنیک

قابل قبولی در سنج اول و دوم در فاصله صفر و ۰/۷ سانتی‌متر با نتایج آزمایشگاهی تطبیق دارد. در سنج سوم در فاصله ۱/۴ سانتی‌متر اختلاف وجود دارد. با توجه به وجود اختلاف چگالی ۰/۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای خرج PBXN-111 بین مراجع [۸] و [۱۲]، این اختلاف ناظر بر اختلاف جزئی در ترکیب درصد و یا اندازه دانه ذرات به کار رفته است که در نهایت بر کالیبراسیون ضرایب معادله لی و تارور مؤثر است.

میلر به منظور بررسی دقت ضرایب پیشنهادی خود برای معادله حالت لی و تارور مربوط به خرج PBXN-111 نتایج شبیه‌سازی با هیدروکد DYN2D را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نموده است. مطابق با شکل (۳) تطبیق بسیار خوبی به دست آمده است. بنابراین در ادامه از این ضرایب برای شبیه‌سازی‌های بعدی استفاده شده است.



شکل ۲- تغییرات فشار با زمان داخل خرج PBXN-111.



شکل ۳- تغییرات فشار با زمان داخل خرج PBXN-111 [۸].

۲-۲- شبیه‌سازی زنجیره انفجار

شبیه‌سازی به صورت دوبعدی متقارن محوری با حلگر اویلری انجام شده است. شرایط مرزی از نوع FLOW OUT لحاظ شده تا محصولات انفجار بتواند از مرزها خارج شود و در نتیجه شرایط محیط باز تأمین گردد. در این شبیه‌سازی‌ها زنجیره انفجار شامل بوستر و خرج اصلی است. محیط اطراف خرج را هوا با فشار یک بار پر کرده است. حالت به کار رفته برای هوا گاز ایده‌آل، برای بوستر JWLL و برای خرج اصلی معادله حالت لی تارور دو جمله‌ای از مرجع [۸] به کار رفته است.

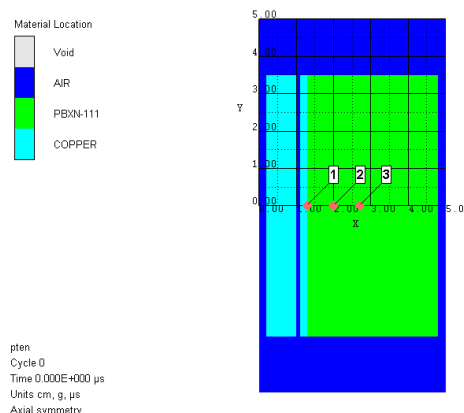
معیاری برای عدم آغازگری در خرجی بوده است که بر اثر عبور موج شاک ضعیف، خلل و فرج داخل خرج پر شده است و اساساً نقاط داغ شکل نمی‌گیرد [۱۱].

در کار تحقیقاتی حاضر با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN تأثیر ابعاد قرص بوستر و موقعیت آن بر رفتار تراک در خرج اصلی بررسی شده است. در این مطالعه بوستر از جنس COMP-A3 و خرج اصلی، خرج غیر حساس آلومینیوم دار PBXN-111 با ترکیب درصد (RDX/AP/AL/HTPB/20/43/25/12) و قطر افت ۳/۷ سانتی‌متر بوده است [۱۲]. قطر افت، قطری از خرج انفجار است که در مقادیر کمتر از آن امکان شکل گیری تراک وجود ندارد. توضیح اینکه این خرج برای کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- روش شبیه‌سازی

۲-۱- صحت سنجی روش

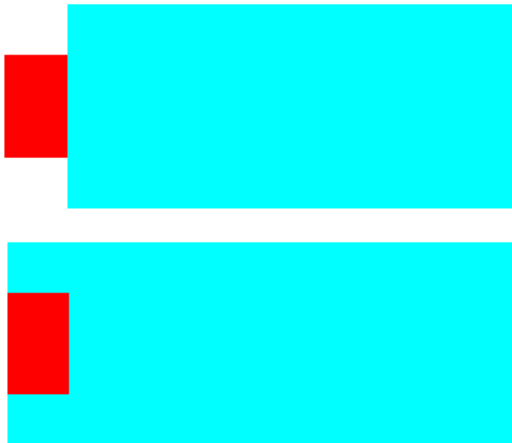
به منظور صحت گذاری روش حل اویلری با نرم‌افزار اتوداین و واریسی دقت ضرایب پیشنهاد شده توسط میلر برای معادله لی و تارور مربوط به خرج PBXN-111، آزمون صفحه پران^۱ شبیه‌سازی شده است. این آزمون توسط سادرلند و همکاران اجرا شده، به طوری که صفحه تخت از جنس مس با سرعت ۰/۱ سانتی‌متر بر میکرو ثانیه به خرج PBXN-111 برخورد داده شده است [۱۲]. یک صفحه از جنس مس روی خرج قرار گرفته است. در مرجع [۱۲] اشاره ای به ضخامت صفحات مسی نشده است. در شکل (۱) چیدمان آزمون و محل سنج‌های فشار در فاصله صفر (صفحه ورود موج به خرج)، ۰/۷ و ۱/۴ سانتی‌متر آمده است. ضخامت صفحه پران ۰/۸ سانتی‌متر و ضخامت صفحه روی خرج ۰/۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. اندازه شبکه مربعی در این شبیه‌سازی ۰/۰۱ سانتی‌متر است.



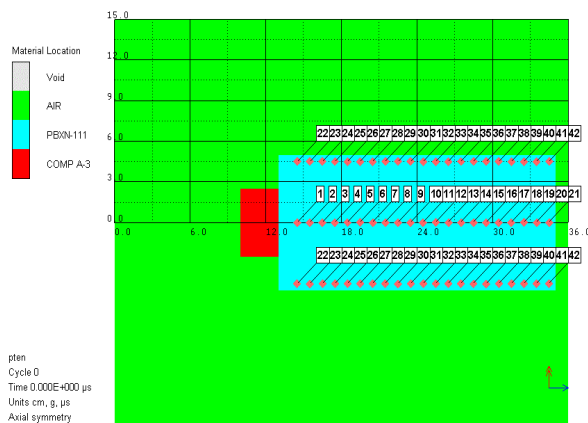
شکل ۱- چیدمان آزمون صفحه پران برای آغاز خرج PBXN-111.

در شکل (۲) نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار اتوداین و با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با دقت

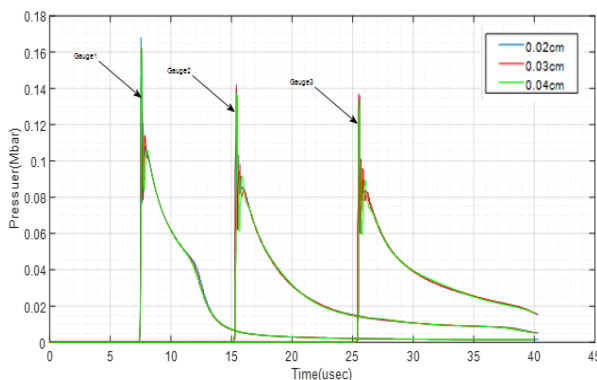
مشخص از قرص بوستر، اثر تغییر قطر بوستر بر تغییرات فشار داخل خرج در حالتی که قرص بوستر مماس بر روی کف خرج قرار گرفته است، آمده است. در شکل‌های (۱۷-۱۴) برای طول‌های مشخص از قرص بوستر، اثر تغییر قطر بوستر بر تغییرات فشار داخل خرج در حالتی که قرص بوستر به صورت متداخل داخل خرج قرار گرفته است، آمده است.



شکل ۴- نمایش وضعیت مماس و متداخل بوستر نسبت به خرج اصلی.



شکل ۵- چیدمان زنجیره انفجار و موقعیت سنج‌های فشار.



شکل ۶- تغییرات فشار با زمان برای اندازه شبکه ۰/۰۳ و ۰/۰۴ سانتی‌متر.

خواص انفجاری برای هر خرج و ضرایب معادلات حالت در بخش ضمائم گزارش شده است. به منظور بررسی اثر ابعاد قرص بوستر بر انفجار، بوستر با قطرهای ۵، ۴ و ۳ سانتی‌متر برای چهار طول مختلف ۴، ۳ و ۲ سانتی‌متر شبیه‌سازی شده است.

شبیه‌سازی‌ها مطابق با شکل (۴) برای دو وضعیت متفاوت قرارگیری بوستر نسبت به خرج اصلی یعنی وضعیت مماس و متداخل انجام شده است. در تمام موارد قطر خرج اصلی ۱۰ سانتی‌متر بوده و طول آن بیش از دو برابر قطر انتخاب شده است. ابعاد میدان حل ۳۶ سانتی‌متر در راستای طولی یا محور x و ۱۵ سانتی‌متر در راستای شعاعی یا محور y انتخاب شده است.

استقلال نتایج از اندازه شبکه بررسی شده است. در این بررسی قطر بوستر ۵ سانتی‌متر و طول آن ۳ سانتی‌متر بوده و سلول‌های شبکه به صورت مربعی با طول ضلع ۰/۰۴، ۰/۰۳ و ۰/۰۲ سانتی‌متر انتخاب شده است. در شکل (۵) چیدمان زنجیره انفجار در وضعیت مماس و موقعیت سنج‌های فشار آمده است.

در شکل (۶) تغییرات فشار با زمان برای اندازه شبکه‌های ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۲ سانتی‌متر آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد نتایج همگرا بوده اما مقادیر بیشینه فشار با کوچک تر شدن شبکه افزایش جزئی (۳/۷ درصد روی سنج ۱) داشته است. به منظور دقت هر چه بیشتر نتایج اندازه شبکه کوچک‌تر یعنی ۰/۰۲ سانتی‌متر مبنای ادامه کار قرار گرفته است. در شکل‌های (۷ و ۸) تغییرات فشار با زمان داخل خرج در موقعیت‌هایی که سنج‌ها قرار گرفته اند با اندازه شبکه ۰/۰۲ سانتی‌متر آمده است.

شکل (۷) نشان می‌دهد با پیشروی موج پیشرو از بوستر مقادیر بیشینه فشار افت کرده و در ادامه دوباره بالا رفته و ثابت می‌ماند. در شکل (۸) مقادیر بیشینه فشار با روندی صعودی افزایش یافته و در نهایت ثابت می‌گردد. واگرایی موج فشاری پیشرو داخل خرج و نیز رسیدن امواج انبساطی از سطوح آزاد خرج به موج پیشرو سبب شده موج تضعیف شده و در ادامه با برهم نهی پالس‌های فشاری حاصل از واکنش در خرج، موج پیشرو تقویت شده و به تراک پایا بیانجامد. زمانی که مقادیر بیشینه فشار ثابت شده تراک پایا شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بیشینه فشار در لایه‌های بیرونی استوانه خرج (حدود ۰/۱۲ مگابار) از مقادیر بیشینه فشار بر روی محور (۰/۱۴ مگابار) کمتر است. این موضوع به اتلاف انرژی به اطراف مربوط می‌شود. در شکل (۹) کانتور توزیع فشار در زمان ۴۰ میکروثانیه از آغاز انفجار نشان داده شده است. بیشترین فشار مربوط به ناحیه واکنش بوده و به سبب انبساط محصولات انفجار فشار پشت جبهه موج کاهش یافته است.

در جدول (۱) ابعاد و موقعیت قرص بوستر برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی داده شده است. در شکل‌های (۱۳-۱۰) برای طول‌های

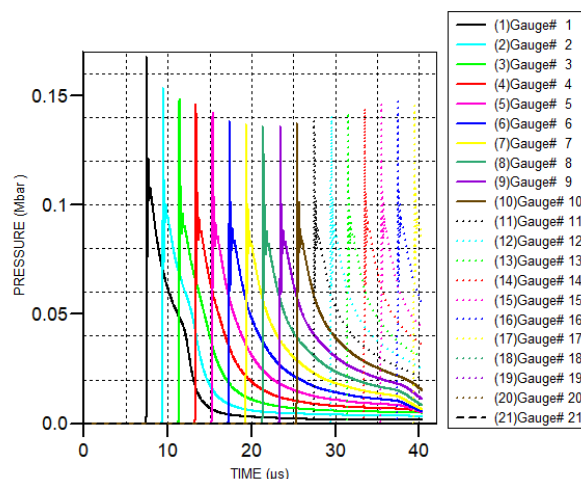
کاهش یافته و در نتیجه طول ناحیه رسیدن به تراک پایا افزایش یافته است. این کاهش در مقادیر فشار در اثر واگرایی بیشتر موج پیشرو داخل خرج اصلی، برای بوستر با قطرهای کمتر است. در واقع موج فشاری حاصل از بوستر، از سطح مقطع کوچک‌تر وارد سطح مقطع بزرگ‌تر داخل خرج اصلی شده است و این موضوع باعث افت مقادیر فشار می‌شود.

از شکل‌های (۱۰ و ۱۴) مشخص می‌شود، بوستر از جنس COMP-A3 با قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۴ سانتی‌متر برای انفجار کامل خرج PBXN-111 مناسب خواهد بود. رسیدن به انفجار پایا در زمان حدود ۳۵ میکروثانیه رخ داده است. بنابراین یک حداقل طول از خرج اصلی وجود دارد که موج پیشرو به تراک پایا تبدیل گردد. طول ناحیه رسیدن به تراک پایا برای خرج PBXN-111 که با بوستر با قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۴ سانتی‌متر فعال شده است، برابر ۱۵ سانتی‌متر است. با مقایسه قرص بوستر با قطر ۵ سانتی‌متر برای طول‌های ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر می‌توان نتیجه گرفت افزایش طول بوستر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روند انفجار ندارد. بنابراین برای بوستر با قطر ۵ سانتی‌متر، افزایش بیشتر طول بوستر فاقد اثرگذاری خاصی در جهت تقویت قدرت انفجار است.

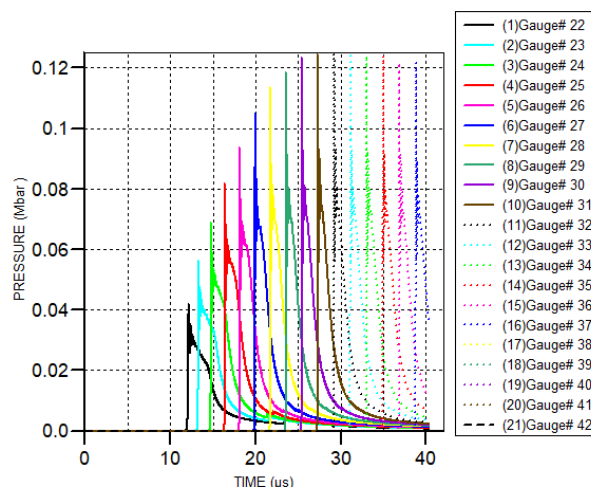
مطابق با شکل‌های (۱۳-۱۰) در وضعیتی که قرص بوستر بر روی خرج اصلی به صورت مماس قرار گرفته، بوستر با قطر دو سانتی‌متر با هر طولی قادر به ایجاد تراک پایا در خرج PBXN-111 نیست و انفجار دچار زوال خواهد شد. اما در حالت متداخل مطابق با شکل‌های (۱۷-۱۴)، بوستر با قطر دو سانتی‌متر و نسبت طول به قطر بیش از یک، به تراک پایا در خرج اصلی انجامیده است. لازم به ذکر است که قطر افت خرج PBXN-111 برابر ۳/۷ سانتی‌متر گزارش شده است [۹].

شکل‌های (۱۸ و ۱۹) تغییرات بیشینه فشار بر حسب زمان را در امتداد لبه استوانه خرج اصلی؛ به ترتیب در حالتی که بوستر مماس و بوستر متداخل است، نشان می‌دهد. مقادیر بیشینه فشار به‌طور قابل ملاحظه‌ای در حالت متداخل نسبت به حالت مماس بالاتر است. در واقع در وضعیت بوستر مماسی بخشی از انرژی بوستر در محیط اطراف آن تلف شده ولی در وضعیت بوستر متداخل این بخش از انرژی باعث ایجاد موج فشاری در گوشه‌های خرج اصلی شده است. این موضوع باعث جبران واگرایی موج پیشرو در خرج اصلی شده به‌طوری که برای بوستر با قطر ۳ سانتی‌متر و طول ۴ سانتی‌متر با مقایسه منحنی تغییرات بیشینه فشار از شکل‌های (۱۰ و ۱۴) مشاهده می‌شود، مقادیر بیشینه فشار در امتداد محور استوانه خرج، برای بوستر در وضعیت متداخل بیشتر از مقادیر بیشینه فشار در حالت بوستر مماسی است.

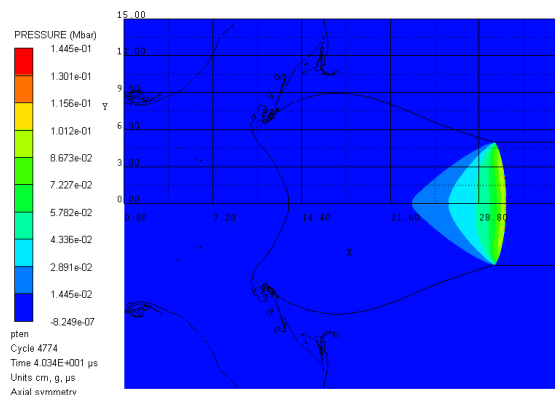
تغییرات سرعت تراک بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر مماس و متداخل به طول چهار سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر در شکل‌های (۲۰ و ۲۱) آمده است. تغییرات سرعت تراک رفتاری مشابه با تغییرات بیشینه فشار نشان می‌دهد.



شکل ۷- تغییرات فشار با زمان روی محور خرج با اندازه شبکه ۰/۰۲ سانتی‌متر.



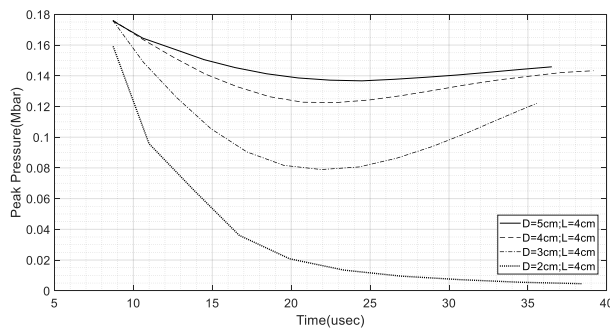
شکل ۸- تغییرات فشار با زمان در لبه بیرونی خرج با اندازه شبکه ۰/۰۲ سانتی‌متر.



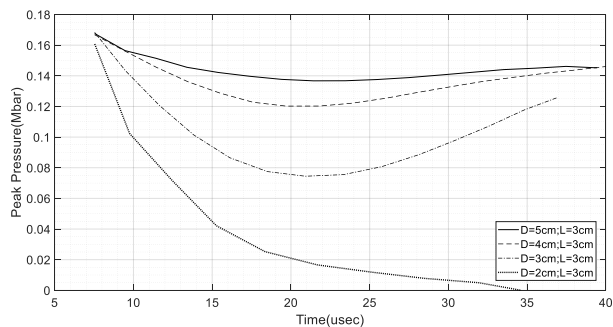
شکل ۹- کانتور توزیع فشار در خرج با اندازه شبکه ۰/۰۲ سانتی‌متر.

۳- نتایج و بحث

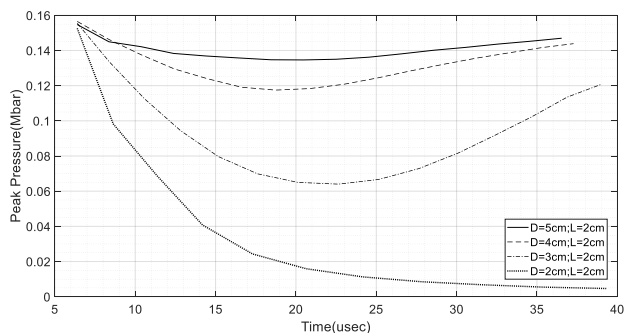
در چیدمان‌هایی از زنجیره انفجار که به تراک پایا انجامیده است، هر چقدر قطر بوستر کمتر شده، مقادیر بیشینه فشار با پیشروی موج



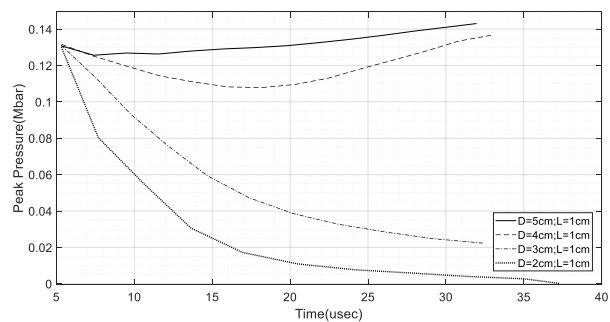
شکل ۱۰- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر مماس به طول چهار سانتی متر برای قطرهای مختلف بوستر.



شکل ۱۱- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر مماس به طول سه سانتی متر برای قطرهای مختلف بوستر.



شکل ۱۲- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر مماس به طول دو سانتی متر برای قطرهای مختلف بوستر.

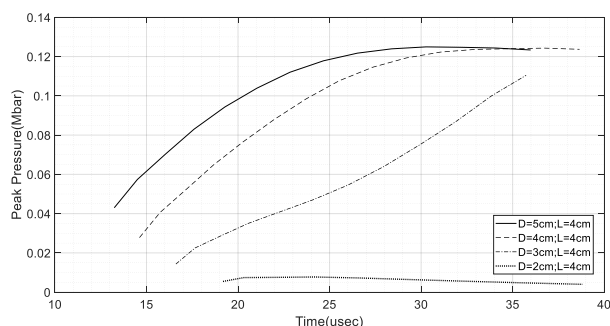


شکل ۱۳- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر مماس به طول یک سانتی متر برای قطرهای مختلف بوستر.

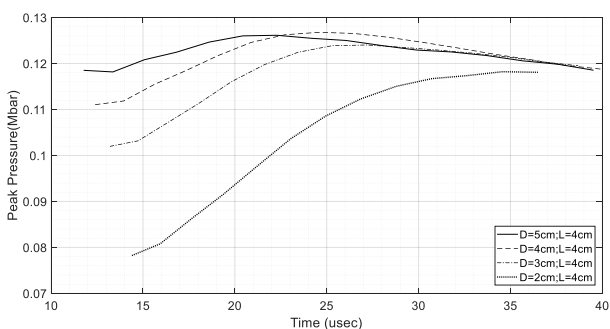
مقادیر سرعت تراک با کاهش قطر بوستر، کاهش یافته است. همچنین مقادیر سرعت تراک برای حالتی که بوستر متداخل بوده نسبت به حالتی که بوستر مماس قرار گرفته، افزایش نشان می دهد.

جدول ۱- ابعاد و موقعیت قرص بوستر در شبیه سازی ها.

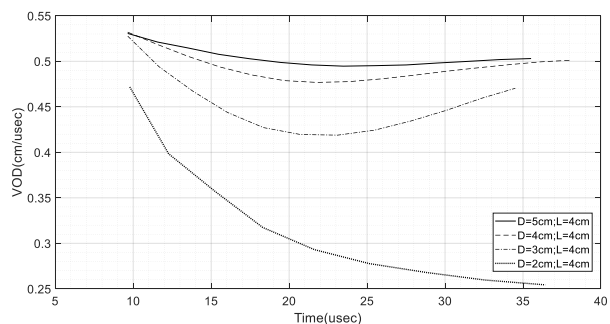
ردیف	قطر بوستر (cm)	طول بوستر (cm)	موقعیت بوستر	شماره شکل مرتبط
۱	۵	۴	مماسی	۹
۲	۴	۴	مماسی	
۳	۳	۴	مماسی	
۴	۲	۴	مماسی	
۵	۵	۳	مماسی	۱۰
۶	۴	۳	مماسی	
۷	۳	۳	مماسی	
۸	۲	۳	مماسی	
۹	۵	۲	مماسی	۱۱
۱۰	۴	۲	مماسی	
۱۱	۳	۲	مماسی	
۱۲	۲	۲	مماسی	
۱۳	۵	۱	مماسی	۱۲
۱۴	۴	۱	مماسی	
۱۵	۳	۱	مماسی	
۱۶	۲	۱	مماسی	
۱۷	۵	۴	متداخل	۱۳
۱۸	۴	۴	متداخل	
۱۹	۳	۴	متداخل	
۲۰	۲	۴	متداخل	
۲۱	۵	۳	متداخل	۱۴
۲۲	۴	۳	متداخل	
۲۳	۳	۳	متداخل	
۲۴	۲	۳	متداخل	
۲۵	۵	۲	متداخل	۱۵
۲۶	۴	۲	متداخل	
۲۷	۳	۲	متداخل	
۲۸	۲	۲	متداخل	
۲۹	۵	۱	متداخل	۱۶
۳۰	۴	۱	متداخل	
۳۱	۳	۱	متداخل	
۳۲	۲	۱	متداخل	



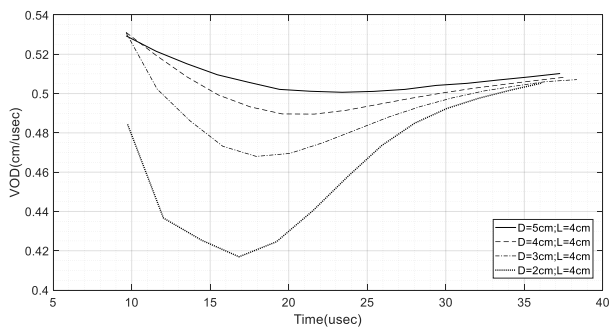
شکل ۱۸- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد لبه استوانه خرج اصلی با بوستر مماس به طول چهار سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.



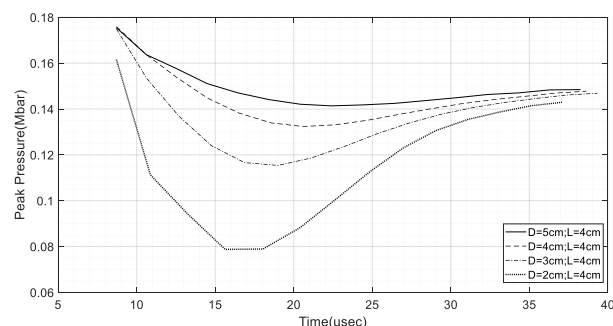
شکل ۱۹- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد لبه استوانه خرج اصلی با بوستر متداخل به طول چهار سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.



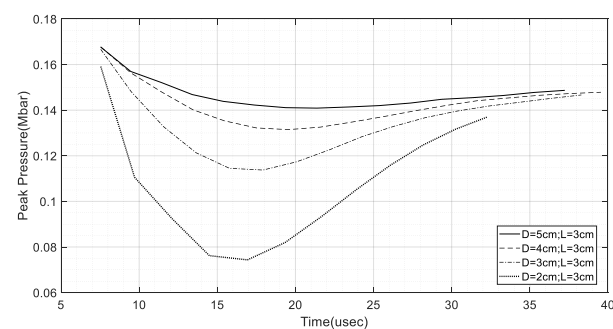
شکل ۲۰- تغییرات سرعت موج تراک بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر مماس به طول چهار سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.



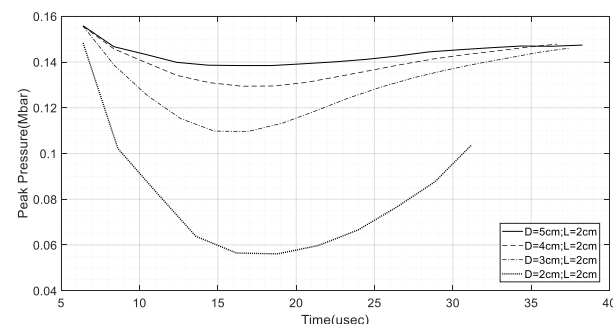
شکل ۲۱- تغییرات سرعت موج تراک بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر متداخل به طول چهار سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.



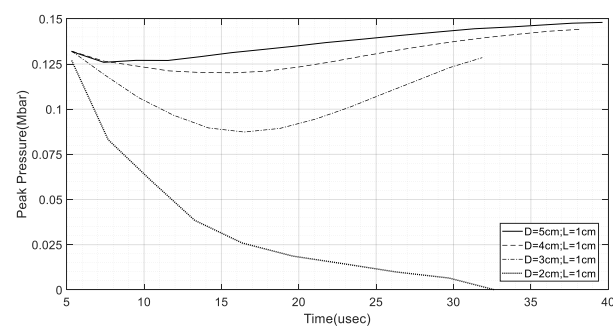
شکل ۱۴- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر متداخل به طول چهار سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.



شکل ۱۵- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر متداخل به طول سه سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.



شکل ۱۶- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر متداخل به طول دو سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.



شکل ۱۷- تغییرات بیشینه فشار موج بر حسب زمان در امتداد محور استوانه خرج اصلی با بوستر متداخل به طول یک سانتی‌متر برای قطرهای مختلف بوستر.

ضمائم: خواص انفجاری و ضرایب معادلات حالت

۴ نتیجه‌گیری

در کار تحقیقاتی حاضر تأثیر چیدمان زنجیره انفجار بر پدیده تراک در خرج غیر حساس آلومینیوم دار PBXN-111 بررسی شد. در این مطالعه قرص بوستر از جنس COMP-A3 در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با کاهش قطر بوستر برای یک طول مشخص از قرص بوستر، بر اثر واگرایی بیشتر موج فشاری داخل خرج، طول ناحیه رسیدن به تراک پایا افزایش می‌یابد. در حالتی که قرص بوستر به صورت متداخل داخل خرج اصلی قرار گرفته مقادیر بیشینه فشار در قسمت گوشه‌های خرج انفجاری افزایش یافته و افت فشار در اثر واگرایی را تعدیل می‌کند. شبیه‌سازی نشان می‌دهد برای حالتی که بوستر و خرج اصلی بر روی هم قرار گرفته بوستر با قطر دو سانتی‌متر با هر طولی از قرص بوستر قادر به ایجاد تراک پایا در خرج اصلی نیست در حالی که برای وضعیت متداخل با همین قطر، بوستر می‌تواند تراک پایا در خرج اصلی ایجاد کند. این مطالعه نشان داد، قرص بوستر با قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۴ سانتی‌متر می‌تواند به انفجار کامل در خرج غیر حساس PBXN-111 بیانجامد. بنابراین افزایش بیشتر نسبت طول به قطر بوستر در این قطر، سبب تقویت هر چه بیشتر قدرت انفجار خرج نخواهد شد. طول ناحیه رسیدن به تراک پایا با بوستر مذکور ۱۵ سانتی‌متر است.

علامه

ρ	چگالی جاری	ρ_0	چگالی اولیه
v	حجم مخصوص جاری	v_0	حجم مخصوص اولیه
σ_{ij}	مؤلفه‌های تانسور تنش	s_{ij}	مؤلفه‌های تنش برشی
x_i	مؤلفه مکانی	t	زمان
f_i	مؤلفه‌های نیروی حجمی	p	فشار
E	انرژی مخصوص داخلی	$\dot{\epsilon}_{ij}$	مؤلفه‌های نرخ کرنش
α	کسر جرمی واکنش داده	a	فشار بحرانی آغازش
v_i	مؤلفه‌های سرعت		

مراجع

- [1] Lee, E. L.; Tarver C. M. "Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosive"; Phys. Fluids 1980, 23, 12.
- [2] Raghavan, D., "Design Methodology for Understanding the Sympathetic Detonation Characteristics of Insensitive High Explosives"; ADA443340, 2005.
- [3] Sucasca, M. "Test Methods for Explosives"; Springer New York, 1995.
- [4] Gustavsen, R. L.; Dattelbaum, D. M.; Johnson, C. E.; Bartram, B. D. "Experimental Studies of Rod Impact on Bare/Uncovered PBX 9501 Explosive"; Procedia Eng. 2013, 58.

COMP-A3	
Reference density	1.65000E+00 (g/cm3)
Parameter A	6.11300E+00 (Mbar)
Parameter B	1.06500E-01 (Mbar)
Parameter R1	4.40000E+00 (none)
Parameter R2	1.20000E+00 (none)
Parameter W	3.20000E-01 (none)
C-J Detonation velocity	8.30000E-01 (cm/us)
C-J Energy / unit volume	8.90000E-02 (Gerg/mm3)
C-J Pressure	3.00000E-01 (Mbar)
PBXN-111	
Reference density	1.78000E+00 (g/cm3)
Parameter A	6.44930E+00 (Mbar)
Parameter B	3.97700E-03 (Mbar)
Parameter R1	5.40000E+00 (none)
Parameter R2	1.03000E+00 (none)
Parameter W	1.60000E-01 (none)
C-J Detonation velocity	5.77500E-01 (cm/us)
C-J Energy / unit volume	5.40000E-02 (Gerg/mm3)
C-J Pressure	1.30000E-01 (Mbar)
Ignition parameter I	3.00000E+00 (/us)
Ignition reaction ratio exp.	6.66666E-01 (none)
Ignition critical compression	0.00000E+00 (none)
Ignition compression exp.	4.00000E+00 (none)
Growth parameter G1	2.00000E+02 (none)
Growth reaction ratio exp. c	6.66666E-01 (none)
Growth reaction ratio exp. d	2.22222E-01 (none)
Growth pressure exp. y	2.00000E+00 (none)
Growth parameter G2	0.00000E+00 (none)
Growth reaction ratio exp. e	0.00000E+00 (none)
Growth reaction ratio exp. g	0.00000E+00 (none)
Growth pressure exp. z	0.00000E+00 (none)
Max. reac. ratio: ignition	3.00000E-01 (none)
Max. reac. ratio: growth G1	1.00000E+00 (none)
Min. reac. ratio: growth G2	1.00000E+00 (none)
Unreacted EOS	Shock
Gruneisen coefficient	9.00000E-01 (none)
Parameter C1	2.11700E-01 (cm/us)
Parameter S1	2.75800E+00 (none)
Reference Temperature	3.73000E+02 (K)
Specific Heat	2.39000E-05 (Terg/gK)
air	
Reference density	1.22500E-03 (g/cm3)
Gamma	1.40000E+00 (none)
Reference Temperature	2.88200E+02 (K)
Specific Heat	7.17600E-06 (Terg/gK)

- [9] Tarver, C. M.; Hallquist, J. O.; Erickson, L. M. "Modelling Short Pulse Duration Shock Initiation of Solid Explosive"; 8th Symp. (Int.) on Detonation, 1985.
- [10] Raghavan, D. "Design Methodology for Understanding the Sympathetic Detonation Characteristics of Insensitive High Explosives"; Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 2005.
- [11] Liu, Y.; Yin, J.; Wang, Z. "Study on Overdriven Detonation of Double-Layer Shaped Charge"; Propellants Explosive Pyrotechnics, 2019, 44.
- [12] Sutherland, G. T.; Ashwell, K. D.; O'Connor, J. H.; Baker, R. N. and Lemar, E. R. "Shock Response of Several Plastic Bonded Explosives"; AIP Conf. Proc. 1996, 370, 763.
- [5] Leiper, G. A., Kennedy, D. L. "Reactive Flow Analysis and its Applications"; Proc. Ninth Symp. (Int.) on Detonation, 1989.
- [6] Ioannou, E., Nikiforakis, N. "Multiphysics Modeling of the Initiating Capability of Detonators. II. Booster Initiation"; J. Appl. Phys. 2021, 129, 025903.
- [7] Fiserova, D. "Numerical Analyses of Buried Mine Explosions with Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading"; PHD Thesis; Cranfield University, January 2006.
- [8] Miller, P. J. "A Simplified Method for Determining Reactive Rate Parameters for Reaction Ignition and Growth in Explosives Materials"; Research Society Symp. Proc. 1996, 418.