

## مطالعه عددی تأثیر موانع مختلف بر پیشگیری از انفجار سمپاتیک در ماده منفجره Comp-B

مسعود ندرلو<sup>۱</sup>، حسین سوری<sup>۲\*</sup>، سیدمحمد رضا صدیقی صابر<sup>۴</sup>، یونس کریمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، ۳- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۴- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ وصول: ۹۹/۰۱/۰۲، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۴)

### چکیده

در مقاله حاضر به مطالعه انفجار سمپاتیک پرداخته شده است. در این نوع انفجار، موج شاک حاصل از یک ماده منفجره با عبور از محیط‌های خنثی، باعث القای انفجار در ماده منفجره دوم می‌شود. مطالعه این پدیده در محث ایمنی انبارهای مهمات و حمل و نقل آن‌ها دارای اهمیت است. در تحقیق حاضر انفجار سمپاتیک در خرج Comp-B مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا تأثیر ضخامت ماده میانجی (گپ) و نوع و ساختار مواد به کار رفته به عنوان مانع در پیشگیری از وقوع انفجار سمپاتیک بررسی شده است. نتایج نشان داد که یک لایه شن با ضخامت مناسب که توسط لایه‌های نازکی از مواد پلیمری نگه داشته شده است، در مقایسه با سایر مواد کارایی بالاتری دارد و به خوبی از بروز انفجار سمپاتیک پیشگیری می‌کند. بررسی‌ها در این پژوهش گویای عدم انفجار القایی در خرج گیرنده از جنس Comp-B با فاصله ۲۰ میلی‌متری در حضور تک مانع آهن و همچنین موانع تشکیل شده از جنس شن + پلکسی، شن + اپوکسی، شن + لاستیک به صورت لایه‌ای است.

**واژه‌های کلیدی:** آغازش، انفجار سمپاتیک، مواد شدید الانفجار، موج شاک، اتوداین.

## Numerical Study of the Effect of Different Barriers on Sympathetic Detonation Prevention in Comp-B

M. Naderlou, H. Soury\*, M. R. Sedighi Saber, Y. Karimi

Malek Ashtar University of Technology, Iran

(Received: 03/21/2020, Accepted: 07/04/2020)

### Abstract

In this paper, the sympathetic detonation is studied. In this type of detonation, the shock wave of an explosive by passing through a neutral environment (gap) induces the detonation in the second explosive. The study of this phenomenon is important to the safety of the ammunition depot and their transportation. In the present study, the sympathetic detonation in Comp-B has been studied. In this regard, the effect of the thickness of the gap and the type and composition of the materials used as the barrier in preventing the occurrence of sympathetic detonation has been investigated. The results showed that a thick layer of fine sand, held by thin layers of polymeric material, is more efficient than other materials and can prevent sympathetic detonation well. The results indicate that a 20 mm single iron barrier and also 20 mm barriers consisting of sand + Plexiglas, sand + epoxy and sand + rubber prevent from the sympathetic detonation of the Comp-B acceptor.

**Keywords:** Initiation, Sympathetic Detonation, Explosive Materials, Shock Wave, Autodyn.

## ۱- مقدمه

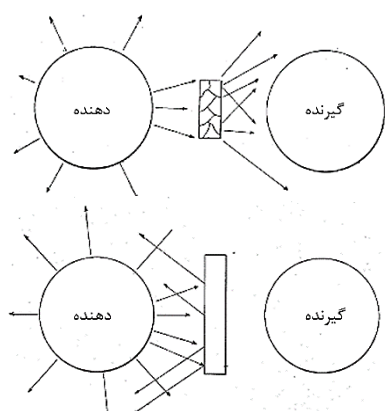
انفجار سمپاتیک یا انفجار مجاورتی به معنی آغازش انفجار در یک مهمات در اثر موج شاک یا ترکش ناشی از انفجار مهمات مجاور است. به اولین ماده منفجره‌ای که با انفجار خود تولید موج شاک و ترکش می‌کند، دهنده<sup>۵</sup> گویند. دومین ماده منفجره‌ای که تحت تأثیر نیرو انفجار اول منفجر می‌شود، گیرنده<sup>۶</sup> نامیده می‌شود. در مباحث ایمنی و انبارداری و حمل و نقل و بارگیری مواد منفجره، همچنین در مواردی که چندین تیر به صورت هم‌زمان در سلاح بارگذاری می‌شود می‌بایست از این موضوع اطمینان حاصل کرد که در صورت انفجار یکی از مهمات، سایر مهمات مجاور منفجر نخواهد شد. طراحی سلاح و مهمات می‌بایست به نحوی انجام پذیرد که در صورت انفجار ناخواسته یکی از سرچنگی‌ها، مابقی آن‌ها منفجر نشوند.

هر ساله ده‌ها مورد حوادث مرگبار در کار با مهمات و مواد منفجره رخ می‌دهد. جهت رعایت مسائل ایمنی، باید ماهیت انفجار به ویژه انفجار سمپاتیک روشن شود تا بتوان با شناخت از ابعاد آن راه‌های ایمنی آن را جستجو کرد<sup>[۱]</sup>. بنابراین کاهش خطرات ناشی از انفجار سمپاتیک برای چندین دهه مورد مطالعه بسیاری قرار گرفته است. عواقب ناشی از این گونه انفجار فاجعه‌بار بوده و اغلب در مواردی منجر به از دست رفتن جان بسیاری از انسان‌ها و عامل زیان رسیدن به بسیاری از تجهیزات شده است. فعالیت در این زمینه به این دلیل که موارد متعددی از این نوع انفجار در انبارهای مهمات سراسر جهان اتفاق می‌افتد، ضروری است. عامل اصلی اکثر انفجارها در انبارها یا حین حمل و نقل و بارگیری مواد منفجره، انفجار سمپاتیک است که در آن‌ها، انفجار ناخواسته یکی از مهمات، باعث ایجاد زنجیره‌ای از انفجارها می‌شود.

مطالعه انفجار و بررسی اثرات آن با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام می‌شود. آزمایش‌های تجربی با وجود نتایج قابل اعتماد، هزینه بالایی نیز دارند و کمتر انجام می‌شوند. شبیه‌سازی‌های عددی بر روابط ریاضی استوارند و قوانین فیزیکی پدیده انفجار را توصیف می‌کنند. مزیت‌های اصلی شبیه‌سازی‌های عددی، پایین بودن هزینه انجام آن‌ها و امکان پذیر بودن ساخت مدل‌های عددی با دقت و تنوع بالاست. از جمله راه‌های کاهش احتمال انفجار سمپاتیک، استفاده از موانع جداکننده (میانجی) با جنس و ضخامت مناسب مابین مواد منفجره دهنده و گیرنده است. در تحقیق حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار هیدرودینامیکی اتوداین<sup>۴</sup>، تأثیر ضخامت و جنس موانع بر انفجار سمپاتیک بررسی می‌شود. این کار با هدف دستیابی به حداقل ضخامت مورد نیاز برای پیشگیری از انفجار سمپاتیک صورت می‌پذیرد. همچنین جهت شناسایی بهترین جنس مانع، شبیه‌سازی‌های متعددی با مواد مانع مختلف و با چیدمان‌های متفاوت انجام می‌گیرد.

## ۱-۱- تاریخچه انفجار سمپاتیک

همراه با توسعه و تولید سوخت‌های جامد و مواد منفجره جدید، نگرانی در خصوص کنترل خطرات آن‌ها حین حمل‌ونقل، انبارداری و استفاده از آن‌ها همواره مطرح بوده است. در مطالعه‌ای که توسط سالتانوف و همکارانش<sup>[۲]</sup> در خصوص انفجار سمپاتیک انجام شده، با تغییر جنس مانع میانجی بین خرج گیرنده و دهنده به دنبال کاهش خسارت ناشی از وقوع انفجار بوده‌اند. برای این فاصله به جز هوا از چوب، سرب و استیل نیز استفاده کردند و پس از انجام مراحل مختلف آزمایش، نموداری بر پایه کاهش حساسیت و تلفات ناشی از این مواد ارائه داده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱) نمایان است، مهم‌ترین نکته در جاگذاری مواد مختلف به خصوص مواد جامد در بین فضای خالی، توانایی به وجود آوردن ترکش است. ترکش یکی از عوامل مهم برای شروع انفجار و فراهم کننده انرژی اولیه انفجارهای بعدی بیان شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، استفاده از موانع بین مهمات ایده خوبی برای جلوگیری از انفجار سمپاتیک است.



شکل ۱- اثر جنس مانع در تأثیر امواج شاک.

بومن و همکارانش<sup>[۳]</sup> با هیدروکدهای دینامیک دوبعدی و با مدل سوزش فورست فایر<sup>۵</sup> مدل‌سازی عددی انفجار سمپاتیک پرداخته‌اند. هدف آن‌ها بررسی تأثیر اندازه، فاصله، میزان آسیب و نحوه شروع انفجار بود. هانگ و آربوکل<sup>[۴]</sup> نیز با انجام آزمایش‌ها و محاسبات به این نتیجه رسیدند که با قرار دادن مانعی میان خرج گیرنده و دهنده می‌توان از وقوع انفجار سمپاتیک جلوگیری کرد.

سانچیدراین<sup>[۵]</sup> با انجام آزمایش‌ها و محاسبات فراوان به رابطه‌ای بهینه به فرم  $P = ke^{-ax}$  برای تعیین میزان کاهش فشار موج خروجی از ماده میانجی پلی متیل متا کریلات (PMMA) رسید. در این معادله  $k$  تابع تراکم و ثابت  $a$ ، ثابت انقباض تعریف می‌شود. موج شوک می‌تواند نتیجه انفجار مواد پراثری همچون پنتولیت، تتریل و موارد دیگر باشد. فاصله

5- Forest Fire

6- Poly Methyl Meta Acrylat

1- Sympathetic Detonation

2- Donor

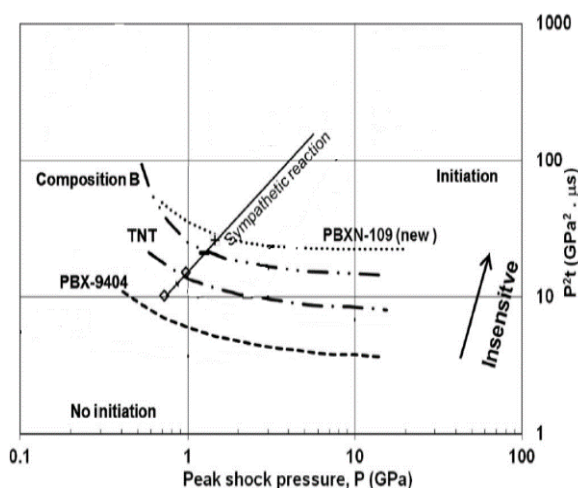
3- Acceptor

4- Autodyn

منفجره PBXN-109 پرداخته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده‌اند. در این مطالعه که توسط نرم‌افزار LS-DYNA صورت پذیرفته، از مدل سوزش I&G استفاده شده است. پارامتر اساسی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته، فواصل مناسب جهت جلوگیری از وقوع انفجار سمپاتیک در خرج‌های استوانه‌های موازی و تعیین سرعت انفجار است. در این پژوهش نتایج شبیه‌سازی توسط مدل I&G تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی داشته است.

شروع و گسترش انفجار سمپاتیک می‌تواند توسط موج شاک و توسط خرده‌های پوسته (ترکش) صورت گیرد. در تحقیقی توسط لانگ و همکارانشان [۹]، به بررسی تئوری تولید ترکش و اثر آن بر انفجار سمپاتیک پرداخته شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار LS-DYNA و با استفاده از مدل سوزش I&G و معادله نرخ سوزش و مطابقت آن‌ها با داده‌های تجربی موجود، ترکش به‌عنوان عامل مهم در شروع انفجار سمپاتیک گزارش شده است.

یکی دیگر از راه‌های کاهش احتمال انفجار سمپاتیک، کاهش حساسیت ماده منفجره مصرفی است. لو و همکارانش [۱۰] به مقایسه آزمون‌های تجربی خود با شبیه‌سازی با استفاده از هیدروکد ال‌اس‌داین و بر اساس مدل I&G پرداختند. آن‌ها این کار را برای ماده‌ای با حساسیت پایین‌تر از مواد موجود انجام داده و همچنین تأثیر تغییر فاصله بین مهمات را بررسی کردند. پس از انجام آزمایش‌های تجربی و مطابقت آن‌ها با داده‌های شبیه‌سازی، این نتیجه حاصل شد که ماده منفجره با فرمولاسیون جدید تولید شده، توانایی کاهش احتمال انفجار سمپاتیک را داراست. بنابراین در نمودار شکل (۲) منحنی حساسیت شوک را ارائه کردند. با توجه به شکل (۲) ماده تولید شده با فرمولاسیون جدید که با نام (PBXN-109(new)) در شکل معرفی شده، کمترین حساسیت به انفجار را دارا بوده و بهترین گزینه برای استفاده در مهمات است.



شکل ۲- نمودار کلی منحنی حساسیت مواد منفجره [۱۰].

بین مواد منفجره را می‌توان با مواد میانجی همچون چوب، آلومینیوم، فولاد، PMMA، و موارد دیگر پر کرد. آن‌ها بعد از محاسبات بسیار بر روی آزمایش‌های انجام شده روی ماده PMMA و با استفاده از معادلات هوگونیوت، HOM و دیگر معادلات لازم، به معادله (۱) جهت بیان میزان کاهش فشار در اثر استفاده از ماده PMMA رسیدند:

$$P = k e^{-0/406x} \quad (1)$$

هالسی و بری [۶] در تحقیقی، آزمایشی بر روی انواع مهمات انجام دادند تا امکان استفاده از ماده پومیس به‌عنوان یک مانع برای جلوگیری از انفجار سمپاتیک را ارزیابی کنند. مهمات درون یک ظرف پر شده از ماده پومیس، احاطه شده بود. نتایج آزمایش نشان داده است که ظروف پر از پومیس می‌تواند به‌طور مؤثر از انفجار سمپاتیک مهمات جلوگیری کند. در جدول (۱) اطلاعات مربوط به مشخصات ماده پومیس ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فرمولی و ترکیب درصد اجزای تشکیل دهنده ماده پومیس [۶].

| درصد  | فرمول مولکولی                  | ترکیب شیمیایی |
|-------|--------------------------------|---------------|
| ۶۶/۶٪ | SiO <sub>2</sub>               | سیلیکا        |
| ۱۸/۶٪ | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | آلومینا       |
| ۰/۹٪  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | اکسید آهن     |
| ۳/۹٪  | CaO                            | کلیسیم اکسید  |
| ۱/۴٪  | MgO                            | منیزیم        |
| ۳/۷٪  |                                | سایر          |
| ۴/۹٪  |                                | از دست رفته   |

هاگر و همکارانش [۷] در تحقیقات خود از لایه‌های پوششی ARMCO جهت جلوگیری از انتشار ترکش‌ها و امواج میان مواد منفجره استفاده کرده‌اند. دیواره‌های ARMCO مجموعه‌ای از پانل‌هایی هستند که در انبارداری و حمل‌ونقل مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پانل‌ها می‌توانند به صورت U شکل باشند و مهمات را احاطه کنند. این مطالعه، پارامترهای لایه پوششی ARMCO از قبیل: واکنش لایه ARMCO به انفجار، همچنین میزان فشار عبوری از این لایه و میزان دفرمه شدن گیرنده را مورد بررسی قرار داده است. برای شبیه‌سازی، از نرم‌افزار اتوداین استفاده شده تا میزان فشار وارده و نیروی حاصل بر خرج گیرنده و تغییر شکل‌ها و حداکثر فشار یافته شود. آزمون‌های تجربی انجام شده به گونه‌ای بوده که بتوانند نحوه چیدمان مهمات را نیز بررسی کنند، بنابراین با قرار دادن مهمات به وزن ۳۰۰۰ پوند در ۲ ردیف یا ۳ ردیف، احتمال کاهش مقدار ضربه و فشار ناشی از انفجار را بررسی کردند. نتایج مطالعات بیانگر این موضوع بوده که لایه پوششی ARMCO گزینه مناسبی برای جلوگیری از انفجار سمپاتیک است. لو و همکارانش [۸] در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی انفجار سمپاتیک ماده

$$S = \sigma_t - \sigma_{Hyd} \quad (۵)$$

$$\sigma_{Hyd} = \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})}{3} \quad (۶)$$

که در آن،  $\sigma_t$  تانسور تنش است. معادلات بالا اگر چه در حالت تک بعدی نوشته شده‌اند اما می‌توان آن‌ها را برای حالت سه‌بعدی هم گسترش داد.

فرم‌های زیادی برای مدل سوزش ارائه شده است. از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مدل سوزش فورست فایر
- مدل سوزش DAGMAR
- مدل سوزش I&G (لی تارور)
- مدل سوزش JTF
- مدل سوزش HVRB
- مدل سوزش CREST

مدل‌های سوزش ذکر شده با توجه به کاربردها در شرایط متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر کدام از این مدل‌ها دارای مزیت‌ها و معایبی هستند که باید مورد توجه قرار داده شود. در این پژوهش، از مدل سوزش I&G بهره برده شده است. مدل آغازش و رشد (I&G) که با نام مدل لی تارور نیز شناخته می‌شود، پرکاربردترین مدل سوزش در مواد شدید الانفجار است و علاوه بر مدل‌سازی انفجار، فرایند آغازش با موج ضربه‌ای را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. در نرم‌افزار هیدرودینامیکی اتوداین که در کار حاضر مورد استفاده قرار گرفته نیز از مدل سوزش لی تارور استفاده شده است [۱۵].

فرم معادله نرخ سوزش در مدل لی تارور به صورت معادله (۷) است:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = I(1-\lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x \quad (۷)$$

$$+ \underbrace{G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y}_{0 < \lambda < \lambda_{ig\max}} + \underbrace{G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z}_{\lambda_{G2\max} < \lambda < 1}$$

$$0 < \lambda < \lambda_{G1\max}$$

جمله اول معادله (۷)، نشان‌دهنده آغازش در نقاط داغ در اثر تراکم حاصل از عبور موج ضربه‌ای است. جمله دوم، رشد آهسته واکنش از این نقاط داغ مجزا و جمله سوم، تکمیل سریع واکنش به هنگام یکی شدن نقاط داغ را مدل می‌کند. در این معادله،  $t$  زمان،  $\rho_0$  چگالی اولیه ماده منفجره،  $P$  فشار بر حسب مگابار و  $G_1, G_2, I, a, b, c, d, e, x, y, z$  کمیت‌های ثابت تجربی هستند. کمیت  $a$  یک تراکم بحرانی بوده که برای جلوگیری از آغازش تا قبل از ایجاد درجه مشخصی از تراکم (یا یک فشار ورودی مخصوص) به کار می‌رود.

در چند دهه گذشته معادلات حالت گوناگونی برای گازهای حاصل از انفجار پیشنهاد شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به معادلات حالت HOM، BKW، JWLL اشاره کرد. برای معادله حالت ماده اولیه نسوخته

انبارهای معمولی برای جلوگیری از خطر انفجار با استفاده از آجر و بتن ساخته می‌شوند. اما تاکور و همکارانش [۱۱]، در مطالعه‌ای با موضوع طراحی و تأیید لایه مانع غیر انفجاری برای ساخت انبار از مواد کامپوزیتی با نام LRC استفاده کرده‌اند. این دیواره‌ها با کم کردن انرژی انتقالی و با توجه به آزمایش‌های عملی صورت گرفته، قابلیت جلوگیری از انتقال انرژی و وقوع انفجار سمپاتیک را دارا هستند. بنابراین در ساخت انبار می‌توان از این نوع مانع استفاده کرد.

## ۲- روش تحقیق

در بررسی انفجار سمپاتیک، آزمایش‌های عملی و همچنین شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار داده می‌شود. در این پژوهش رویکرد بر این بوده که ابتدا به صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی پرداخته شود. سپس برای یک مسئله خاص با استفاده از ابزار شبیه‌سازی عددی، پارامترهای اساسی تأثیرگذار بر انفجار سمپاتیک مورد بررسی قرار گرفته و به این طریق بهینه‌ترین شرایط برای کاهش احتمال بروز این نوع انفجار شناسایی شود. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، شبیه‌سازی‌ها با کمک نرم‌افزار اتوداین و با استفاده از مدل سوزش لی تارور صورت می‌پذیرند. همچنین خواص تمام مواد به کار رفته در شبیه‌سازی به جز خرج گیرنده که از جنس Comp-B Military بوده از کتابخانه نرم‌افزار اتوداین انتخاب شده‌اند.

### ۲-۱- معادلات حاکم بر جریان موج بلاست

جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی آغازش انفجار سمپاتیک در مواد شدید الانفجار، نیاز به تحلیل ناحیه واکنش است. بدین منظور علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی، به مدل سوزش نیاز خواهد بود. یک مدل سوزش شامل چهار بخش زیر است:

- معادله نرخ سوزش
- معادله حالت ماده اولیه
- معادله حالت محصولات انفجار
- قواعد مخلوط

معادله‌های (۲، ۳ و ۴)، به ترتیب فرم یک‌بعدی معادلات جرم، مومنتوم و انرژی هستند [۱۴-۱۲].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (۲)$$

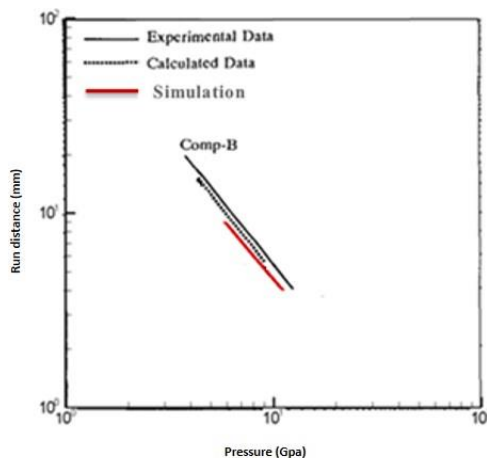
$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho V \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial x} + \rho f \quad (۳)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho V \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{P}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + S \varepsilon \quad (۴)$$

در روابط بالا،  $\rho$  چگالی،  $P$  فشار،  $e$  انرژی داخلی مخصوص،  $\dot{m}$  نرخ کرنش،  $f$  نیروی خارجی،  $t$  زمان و  $V$  سرعت است.  $S$  از رابطه‌های (۵) و (۶) به دست می‌آید.

ضرایب استفاده شده برای نرخ سوزش و معادلات حالت خرج گیرنده در جدول (۲) گزارش شدند.

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی، نتایج با داده‌های ارائه شده در مقاله [۲۱] مقایسه می‌شوند. این مقایسه که در نمودار شکل (۳) ارائه شده، بیانگر تطابق داده‌های آزمایش عملی و محاسبات عددی است. محور افقی این نمودار بر حسب فشار و محور عمودی آن بر حسب مسافت تا تراک است. منظور از مسافت تا تراک، مسافتی است که موج شاک از لبه خرج گیرنده تا لحظه تبدیل به تراک طی می‌کند. این مسافت با پیدا کردن اولین مکانی که فشار در آن از فشار CJ در ماده گیرنده فراتر رفته به دست آمد. در نمودار شکل (۳)، خط قرمز حاصل از شبیه‌سازی با اندازه گپ‌های ۱۵، ۲۰ و ۳۲ میلی‌متر است. مشاهده می‌شود که نتایج محاسبات مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته و در پیش‌بینی مسافت تا تراک، خطای کمتر از ۱۰٪ دارد. به این ترتیب می‌توان از شبیه‌سازی عددی و پارامترهای ارائه شده در جدول (۲) اطمینان حاصل کرد و در ادامه به بررسی تأثیر دیگر عوامل بر انفجار سمپاتیک پرداخت.



شکل ۳- نمودار ارزیابی صحت نتایج کار حاضر در مقایسه با مرجع [۲۱].

### ۳- نتایج و بحث

در ادامه پارامترهایی که بر انفجار سمپاتیک بیشترین تأثیر را دارند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. از جمله می‌توان به تأثیر چسبیده یا جدا بودن مانع میانجی از خرج دهنده و خرج گیرنده، تأثیر اندازه مانع بین دو ماده منفجره و همچنین جنس مانع میانجی اشاره نمود. در مرحله نخست، تأثیر چسبیده یا جدا بودن مانع از خرج دهنده و خرج گیرنده بررسی می‌شود. به همین منظور همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده، مدلی جهت شبیه‌سازی تأثیر گپ ۱۵ میلی‌متری در حالتی که مانع به مواد منفجره چسبیده باشند طراحی شد. مشخصات ابعادی شکل (۴) در جدول (۳) ارائه شده است.

نیز فرم‌های مختلفی پیشنهاد شده که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- JWL
- مای \_ گرونازن
- مورناکان
- بیرچ \_ مورناکان
- رز \_ وینت [۲۰-۱۶].

در مدل سوزش لی‌تارور به کار رفته در نرم‌افزار اتوداین برای مواد اولیه و محصولات انفجار از معادله حالت JWL استفاده شده است.

فرم JWL معادله حالت وابسته به دما مخصوص محصولات انفجار و مواد واکنش نداده به صورت زیر است:

$$P_s = A e^{-R_1 v_s} + B e^{-R_2 v_s} + \frac{\omega_s C_{v_s} T}{v_s} \quad (8)$$

$$P_g = A e^{-R_1 v_g} + B e^{-R_2 v_g} + \frac{\omega_g C_{v_g} T}{v_g} \quad (9)$$

در معادله‌های (۸ و ۹)،  $v_s$  حجم ویژه نسبی ماده منفجره واکنش نداده و  $v_g$  حجم ویژه نسبی محصولات گازی،  $C_{v_s}$  ظرفیت گرمایی ویژه ماده منفجره واکنش نداده و  $C_{v_g}$  ظرفیت گرمایی ویژه محصولات گازی،  $T$  دمای میانگین مخلوط،  $A$ ،  $B$ ،  $\omega_s$  و  $R_1$  و  $R_2$  ثابت‌های معادله هستند.

قواعد مخلوط، روابطی هستند که نحوه محاسبه خواص ترمودینامیکی مخلوط در هر نقطه از ناحیه واکنش بر حسب خواص مواد اولیه و محصولات واکنش در همان نقطه را تعیین می‌کنند.

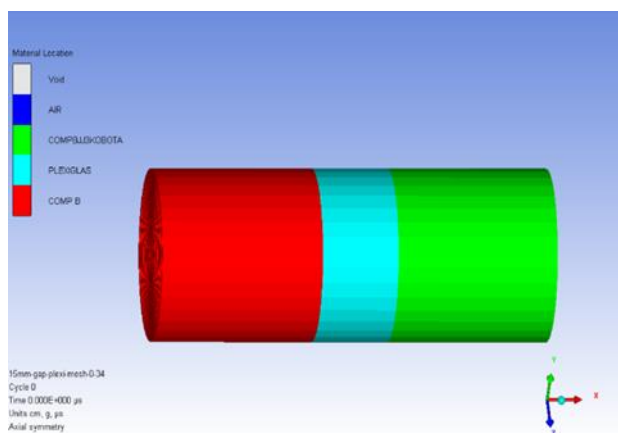
فرم قواعد مخلوط به کار رفته در کار حاضر به صورت (۱۰) است [۱۲]. در این قواعد فرض شده که در هر نقطه دلخواه در ناحیه واکنش، فشار و دمای هر دو فاز در تعادل هستند. فشار کمیتی است که به سرعت از فاز گاز به فاز جامد منتقل می‌شود. تعادل دمایی به این معنی است که فرض شده ذرات جامد به اندازه کافی کوچک هستند. حجم ویژه و انرژی داخلی مخلوط نیز بر مبنای کسر جرمی اجزای آن محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} P_g &= P_s = P_t \\ T_g &= T_s = T_t \\ V &= (1 - \lambda)V_s + \lambda V_g \\ e &= (1 - \lambda)e_s + \lambda e_g \end{aligned} \quad (10)$$

### ۲-۲- اعتبار سنجی شبیه‌سازی عددی

جهت صحت‌سنجی انفجار سمپاتیک از نتایج ارائه شده پژوهش آقایان لی و مورفی [۲۱] و کوبوتا [۲۲] استفاده شده است. در ابتدا شبیه‌سازی‌های مختلفی با اندازه المان ۰/۲ تا ۴ میلی‌متر انجام شد و مشاهده شد که برای المان بین ۰/۳ تا ۰/۴ میلی‌متر نتایج از شبکه محاسباتی مستقل می‌شود. بنابراین در ادامه شبیه‌سازی انفجار سمپاتیک با استفاده از المان‌های ۰/۳۴ میلی‌متری و با به کار بردن مدل I&G لی - تارور انجام می‌پذیرد. ماده منفجره Comp-B به عنوان خرج دهنده از کتابخانه اتوداین و ماده Military Comp-B به عنوان خرج گیرنده انتخاب شده‌اند. همچنین گپ بین خرج دهنده و گیرنده، هوا در نظر گرفته شد.

در ادامه، جهت بررسی تأثیر فاصله بین جسم مانع و خرج‌ها، حالتی که جسم مانع از خرج‌ها جدا بوده و لایه هوایی بین آن‌ها وجود داشته باشد مطابق شکل (۵) شبیه‌سازی انجام شده است. در این حالت، شبیه‌سازی برای دو ماده آلومینیوم و پلکسی گلس انجام پذیرفته است. برای خواص این مواد از کتابخانه اتوداین استفاده می‌شود.



شکل ۴ - مدل دوران داده شده تقارن محوری در حالتی که موانع چسبیده به مواد منفجره هستند.

جدول ۳ - مشخصات ابعادی اندازه گپ ۱۵ میلی‌متری بدون فاصله هوایی و به صورت چسبیده به خرج‌ها.

| بخش       | جنس                          | اندازه      |
|-----------|------------------------------|-------------|
| خرج دهنده | Comp-B                       | ۳۲ میلی‌متر |
| فاصله     | ۱- آلومینیوم<br>۲- پلکسی گلس | ۱۵ میلی‌متر |
| گیرنده    | Military Comp-B              | ۳۲ میلی‌متر |

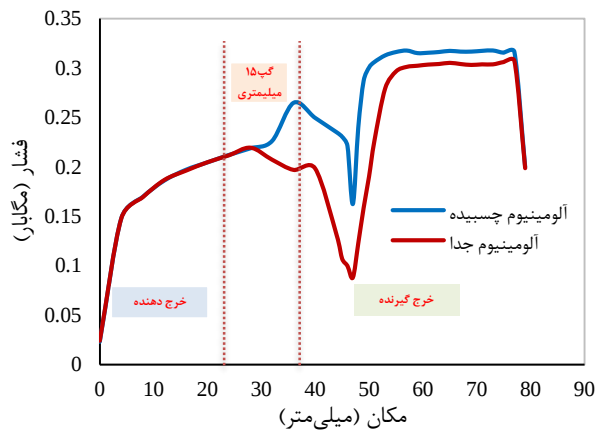
مشخصات ابعادی مدل شکل (۵) که مانع از مواد منفجره جدا بوده و هوا بین مانع و مواد منفجره قرار داده شده، در جدول (۴) گزارش شده است. فاصله بین مواد منفجره ۱۵ میلی‌متری بوده و ضخامت مانع در این مدل، ۱۰ میلی‌متر و کمتر از مدل شکل (۴) در نظر گرفته شده است. در عوض از دو لایه هوایی به اندازه ۵ میلی‌متر، بین مانع و خرج‌ها بهره گرفته شد.

در اینجا معیار تشخیص گذر از شاک به تراک، بالاتر رفتن فشار خرج گیرنده از فشار CJ آن است. با توجه به جدول (۲)، فشار گزارش شده برای خرج گیرنده (Military Comp-B)، ۰/۲۵ مگابار است. اگر حسگری در خرج گیرنده بیشتر از این فشار را نمایش دهد، نشان دهنده وقوع تراک در این ماده خواهد بود.

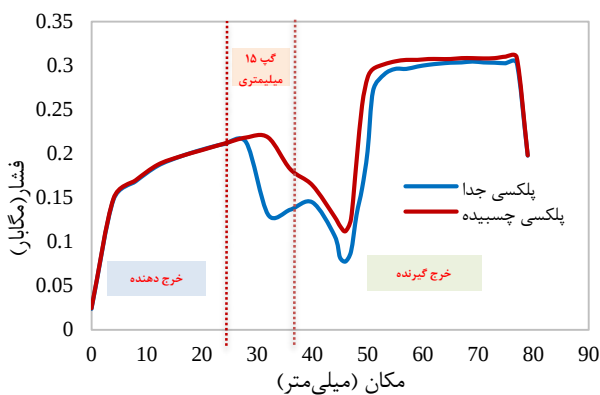
در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌شوند. در ابتدا حالتی که از آلومینیوم به تنهایی (بدون فاصله هوایی) به عنوان مانع استفاده شده است را بررسی می‌شود. در نمودار شکل (۶) مطابق انتظار در ناحیه گپ ۱۵ میلی‌متری فشار حاصل از خرج دهنده در حال کاهش است. اما با ورود موج شاک به خرج گیرنده، فشار دوباره افزایش یافته به‌طوری که تا بیش از ۰/۳ مگابار نیز افزایش یافته

جدول ۲ - ضرایب نرخ سوزش و معادلات حالت [۲۱].

| Explosive                                       | Military Comp-B        |
|-------------------------------------------------|------------------------|
| $\rho_0(\text{g/cm}^3)$                         | ۱/۶۳                   |
| A(Mbars)                                        | ۱۴۷۹                   |
| B(Mbars)                                        | -۰/۰۵۲۶۱               |
| R1                                              | ۱۲                     |
| R2                                              | ۱/۲                    |
| $\omega$                                        | ۰/۹۱۲۰                 |
| $C_V(\text{Mbar/k})$                            | $۲/۴۸۷ \times ۱۰^{-۵}$ |
| $T_0(\text{k})$                                 | ۲۹۸                    |
| $E(\text{Mbar-cm}^3/\text{cm}^3)$               | $۶/۷۵۹ \times ۱۰^{-۲}$ |
| Yield Strength (Mbars)                          | ۰/۰۰۲                  |
| Shear Modulus (Mbars)                           | ۰/۰۲۵۴                 |
| Von Neumann Spike Values                        |                        |
| D(mm/ $\mu\text{sec}$ )                         | ۷/۷                    |
| P(Mbars)                                        | ۰/۲۶۸                  |
| $\rho_0/\rho$                                   | ۰/۷۲۲۸                 |
| $U_F(\text{mm}/\mu\text{sec})$                  | ۲/۲۶                   |
| Reacted Product Equation Of State And CJ Values |                        |
| A(Mbars)                                        | ۵/۵۷۴۸                 |
| B(Mbars)                                        | ۰/۰۷۸۳                 |
| R1                                              | ۴/۵                    |
| R2                                              | ۱/۲                    |
| $\omega$                                        | ۰/۲۴                   |
| $C_V(\text{Mbar/k})$                            | $۱ \times ۱۰^{-۵}$     |
| $E_0(\text{Mbar-cm}^3/\text{cm}^3)$             | ۰/۰۸۱                  |
| Chapman-Jouguet(CJ) values                      |                        |
| D (mm/ $\mu\text{sec}$ )                        | ۷/۷                    |
| P (Mbars)                                       | ۰/۲۵                   |
| $\rho_0/\rho$                                   | ۰/۷۴۱۳                 |
| $U_F(\text{mm}/\mu\text{sec})$                  | ۱/۹۹                   |
| Reaction Rate Parameters For two Term Model     |                        |
| I ( $\mu\text{sec}^{-1}$ )                      | ۴۴                     |
| G (Mbars $^2\mu\text{sec}^{-1}$ )               | ۵۱۴                    |
| Z                                               | ۲                      |
| Reaction Rate Parameters For three Term Model   |                        |
| I ( $\mu\text{sec}^{-1}$ )                      | ۴۴                     |
| b                                               | ۰/۲۲                   |
| a                                               | ۰/۰۱                   |
| x                                               | ۴                      |
| G1 (Mbars $^2\mu\text{sec}^{-1}$ )              | ۵۱۴                    |
| c                                               | ۰/۲۲                   |
| d                                               | ۰/۶۶                   |
| y                                               | ۲                      |
| G2 (Mbars $^2\mu\text{sec}^{-1}$ )              | ۰                      |
| e                                               | ۰                      |
| G                                               | ۰                      |
| Z                                               | ۰                      |
| F <sub>igmax</sub>                              | ۰/۳                    |
| F <sub>G1max</sub>                              | ۱                      |
| F <sub>G2max</sub>                              | ۱                      |



شکل ۶- نمودار مقایسه فشار عبوری در حالت چسبیده و جدا از هم برای گپ ۱۵ میلی متری از جنس آلومینیوم.

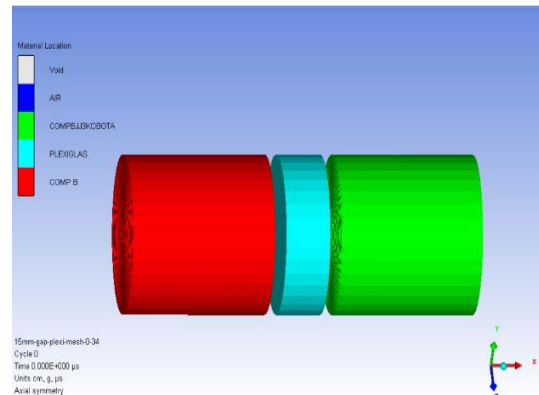


شکل ۷- نمودار مقایسه فشار عبوری در حالت چسبیده و جدا از هم برای گپ ۱۵ میلی متری از جنس پلکسی گلس.

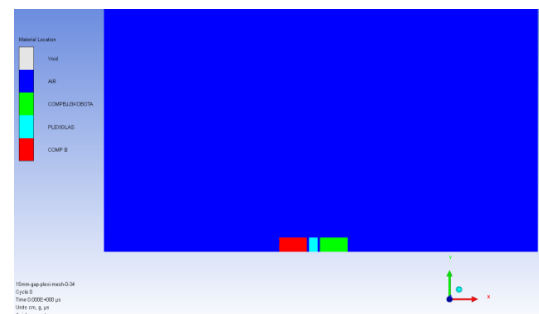
با توجه به نتایج مطالعات سایر محققین [۶، ۷ و ۱۱] در استفاده از مواد مختلف به عنوان مانع، و همچنین با توجه به نتایج شبیه سازی تأثیر مانع با فاصله هوایی و بدون آن که در بالا ارائه شد، در ادامه تأثیر وجود چندین لایه مانع از جنس های مختلف بر بروز انفجار سمپاتیک مورد بررسی قرار می گیرد. این کار با هدف یافتن بهینه ترین فاصله و بهترین ترکیب مانع انجام می پذیرد. در این راستا ۱۰ ترکیب زیر برای گپ ۱۵ و ۲۰ میلی متری مورد بررسی قرار گرفته اند:

۱. آلومینیوم
۲. هوا
۳. پلکسی گلس
۴. پلی یورتان
۵. اپوکسی
۶. لاستیک
۷. آهن
۸. لاستیک + شن + لاستیک
۹. اپوکسی + شن + اپوکسی
۱۰. پلکسی گلس + شن + پلکسی گلس

است. بنابراین مسلماً گذر از شک به تراک رخ داده است. با توجه به نمودار شکل (۶)، آلومینیوم به عنوان مانع نتوانسته در فاصله ۱۵ میلی متری از انفجار سمپاتیک جلوگیری کند. با این حال جدا بودن مانع از خرج ها و وجود فاصله هوایی بین آن ها موجب کاهش میزان فشار شده است.



(الف)



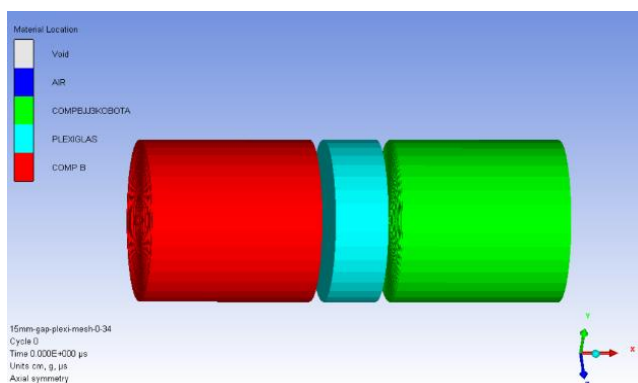
(ب)

شکل ۵- (الف): مدل دوران داده شده تقارن محوری در حالتی که مانع و مواد منفجره جدا از هم هستند. (ب): تصویری از کل ناحیه محاسباتی شامل هوا و void.

جدول ۴- مشخصات ابعادی مدل با اندازه گپ ۱۵ میلی متری با وجود فاصله هوایی بین مانع و خرج ها.

| بخش       | جنس             | اندازه       |
|-----------|-----------------|--------------|
| خرج دهنده | Comp-B          | ۳۲ میلی متر  |
| فاصله     | هوا             | ۲/۵ میلی متر |
|           | ۱- آلومینیوم    | ۱۰ میلی متر  |
|           | ۲- پلکسی گلس    | ۲/۵ میلی متر |
| گیرنده    | Military Comp-B | ۳۲ میلی متر  |

در نمودار شکل (۷)، ماده پلکسی گلس به تنهایی به عنوان مانع انتخاب شده است. در این حالت هم، خرج گیرنده منفجره شده است. در این نمودار نیز تأثیر فاصله هوایی میان مانع و خرج ها بر کاهش میزان فشار منتقل شده از خرج دهنده به خرج گیرنده نمایان است. از نمودارهای شکل های (۶ و ۷) این نتیجه حاصل می شود که وجود فاصله هوایی بین خرج و مانع، تأثیر قابل توجهی بر کاهش فشار در خرج گیرنده دارد.



شکل ۹- مدل دوران داده شده با وجود تک مانع در حالتی که مانع از خرج‌ها جدا هستند.

جدول ۶- مشخصات ابعادی گپ ۱۵ میلی‌متری با وجود تک مانع.

| بخش        | جنس             | اندازه      |
|------------|-----------------|-------------|
| خرج دهنده  | Comp-B          | ۳۲ میلی‌متر |
| فاصله      | هوا             | ۲ میلی‌متر  |
|            | آهن             | ۱۱ میلی‌متر |
|            | هوا             | ۲ میلی‌متر  |
| خرج گیرنده | Military Comp-B | ۳۲ میلی‌متر |

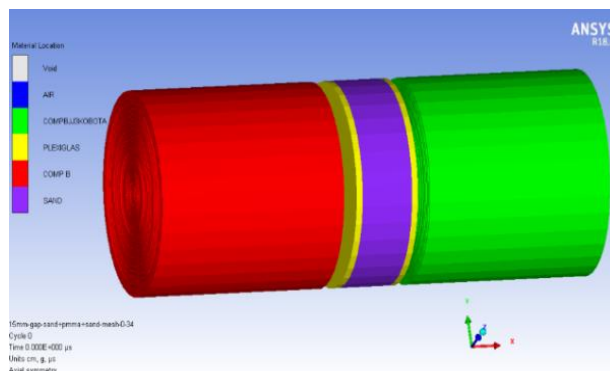
با توجه به اینکه ماده منفجره خرج دهنده (Comp-B) در تمامی موانع یکسان بوده، بنابراین تمامی خطوط فشاری در بخش خرج دهنده بر روی هم قرار گرفته‌اند. همچنین در بخش گپ ۱۵ میلی‌متری، مانع آهن به تنهایی بیشترین توانایی را در جلوگیری از انفجار سمپاتیک دارا است. اما بقیه مواد به‌عنوان مانع توانایی جلوگیری از انفجار سمپاتیک را نداشته و فشار در خرج گیرنده مجدد افزایش یافته و فراتر از ۰/۲۵ مگاپا یعنی فشار CJ ماده Military Comp-B رفته و انفجار رخ داده است. فشار آهن بین دو خط قرمز که فاصله بین دو خرج را مشخص کرده، بالاتر از بقیه مواد قرار گرفته است. این بالا بودن فشار، احتمال خرد شدن و تولید ترکش توسط آهن را بالا می‌برد.

جهت درک بهتر مسئله، نتایج مواد مختلف مورد استفاده در شبیه‌سازی به‌صورت تفکیک‌شده در قالب نمودارهای شکل‌های (۱۱ و ۱۳) مشخص شده‌اند.

در شکل (۱۱)، اختلاف مقدار فشار در ناحیه فاصله بین مواد منفجره مشهود است. فشار پس از عبور از لایه نازک هوا به مانع آهن برخورد کرده و افزایش یافته است. موج حاصله پس از تراکم آهن و ادامه حرکت رو به جلوی خود، به ناحیه بعدی لایه هوایی رسیده و به دلیل اختلاف چگالی در محیط هوا، افت فشار رخ می‌دهد. در طی مسیر پس از کاهش فشار موج به بخش خرج گیرنده رسیده و با توجه به پایین بودن فشار برخوردی به گیرنده، انفجاری رخ نمی‌دهد و فشار در خرج گیرنده افزایش نمی‌یابد. اما مانع آلومینیوم با توجه به تفاوت‌های ساختاری نسبت به آهن، فشار عبوری را از خود عبور داده و توانایی جلوگیری از انفجار را ندارد.

در شکل (۸) مدلی که جهت بررسی حالت‌های ۸ تا ۱۰ ساخته شده، مشاهده می‌شود که بین دو ماده منفجره و مانع، فاصله هوایی در نظر گرفته شده است. در تمامی حالات، شن در وسط مانع قرار دارد. برای شن دیواره‌هایی با ضخامت کم از جنس اپوکسی، پلکسی گلس و لاستیک در نظر گرفته شده است. از جمله مزایای این طرح‌ها، استفاده از توانایی شن در جلوگیری از انتقال شاک و ترکش احتمالی از خرج دهنده به خرج گیرنده است. علاوه بر این فاصله هوایی و روکش‌های اطراف شن کمک زیادی به کاهش انتقال فشار می‌کنند. ابعاد هندسی شکل (۸) که در آن از موانع ترکیبی در یک گپ ۱۵ میلی‌متری استفاده شده، به شرح جدول (۵) هستند.

علاوه بر بررسی میزان تأثیر ترکیب مواد مختلف به‌عنوان مانع، مطابق شکل (۹) مدل دیگری طراحی شده و از موادی همچون آلومینیوم، هوا، پلکسی گلس، پلی‌یورتان، اپوکسی، لاستیک و آهن، به تنهایی به‌عنوان مانع استفاده شده و نتایج حاصله با نتایج موانع ترکیبی مقایسه شده است. مشخصات ابعادی مدلی که تنها از یک ماده به همراه فاصله هوایی برای پرکردن گپ استفاده شده، در جدول (۶) آمده است. نمودار شکل (۱۰) حاوی نتایج کلیه حالاتی است که گپ بین دو ماده منفجره ۱۵ میلی‌متر باشد و از یک یا سه لایه ماده به‌عنوان مانع به همراه فاصله هوایی استفاده شده است.



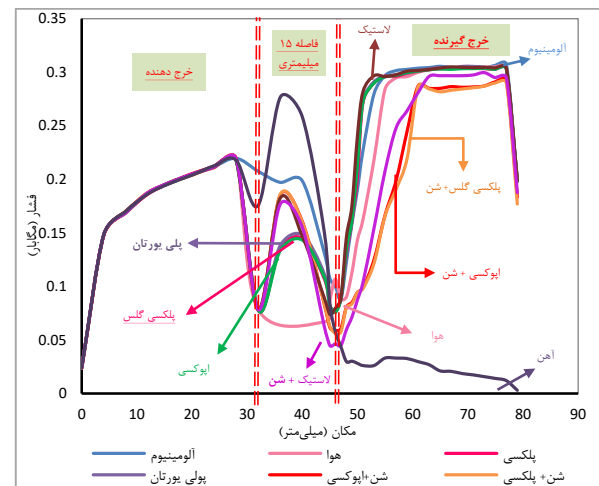
شکل ۸- مدل دوران داده شده با وجود مانع ترکیبی از جنس موارد ۸ تا ۱۰ در حالتی که مانع از خرج‌ها جدا هستند.

جدول ۵- مشخصات ابعادی اندازه گپ ۱۵ میلی‌متری با وجود موانع ترکیبی.

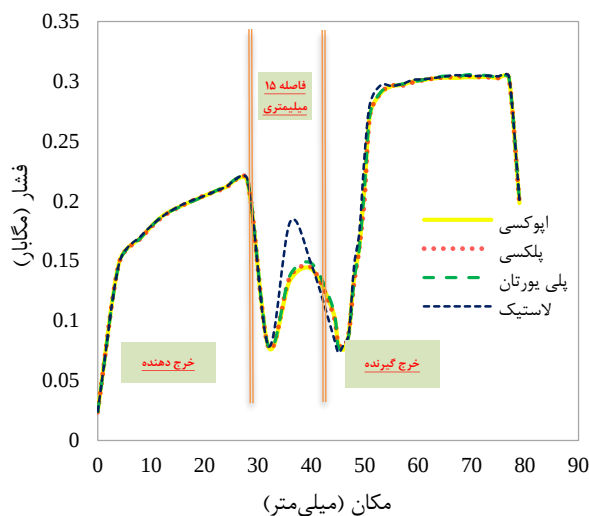
| بخش        | جنس             | اندازه      |
|------------|-----------------|-------------|
| خرج دهنده  | Comp-B          | ۳۲ میلی‌متر |
| فاصله      | هوا             | ۲ میلی‌متر  |
|            | پلکسی گلس       | ۱ میلی‌متر  |
|            | شن              | ۹ میلی‌متر  |
|            | پلکسی گلس       | ۱ میلی‌متر  |
|            | هوا             | ۲ میلی‌متر  |
| خرج گیرنده | Military Comp-B | ۳۲ میلی‌متر |

مختلف فشار متفاوتی را به لبه خرج گیرنده منتقل می‌کنند. مانع‌ها از جنس تک ماده نتوانستند فشار شاک عبوری را به خوبی کاهش دهند. موانع از جنس ماده‌های ترکیبی نتایج بهتری نسبت به تک مانع داشته و از توانایی بیشتری در کاهش فشار ورودی به خرج گیرنده برخوردار هستند. تک مانع آهن در بین تمامی موانع بیشترین کاهش فشار را ثبت کرده است. این میزان کاهش فشار کمک بسیاری به کاهش احتمال انفجار سمپاتیک می‌کند. اما با توجه به مشکلات استفاده از مانع آهن از جمله گرانی و احتمال ترکش‌زایی، باید با دقت و احتیاط بیشتری از آن استفاده کرد.

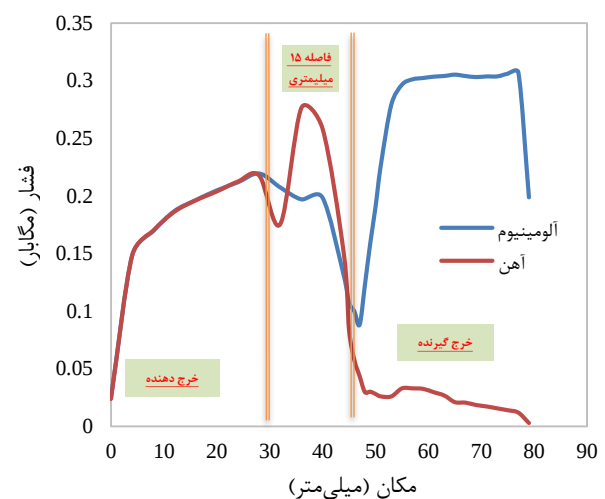
در شکل (۱۵)، فاصله حرکت شاک در خرج گیرنده تا تبدیل آن به تراک گزارش شده است. با توجه به اینکه موانع ترکیبی بیشترین فاصله تا وقوع تراک در خرج گیرنده را ثبت کردند، بنابراین در ادامه روند بررسی مسئله بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند.



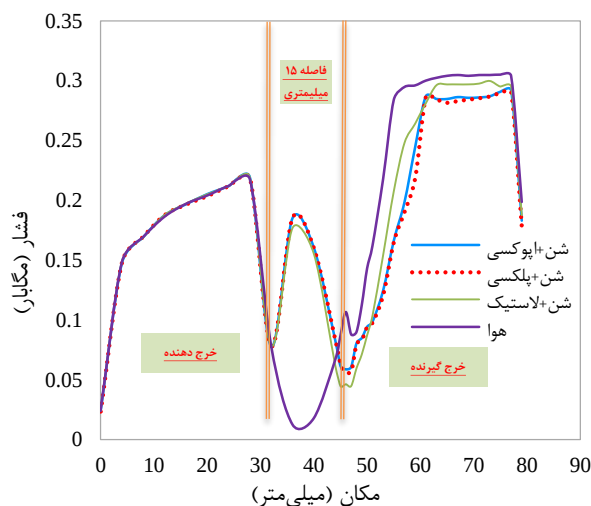
شکل ۱۰- نمودار کلی مقایسه تأثیر ساختار موانع بر تغییر فشار در اندازه گپ ۱۵ میلی‌متری.



شکل ۱۱- نمودار مقایسه تأثیر مانع آلومینیوم و آهن به عنوان تک مانع بر تغییر فشار در اندازه گپ ۱۵ میلی‌متری در خرج‌های از جنس Comp-B.



شکل ۱۲- نمودار مقایسه تأثیر موانع پلیمری بر تغییر فشار به عنوان تک مانع در اندازه گپ ۱۵ میلی‌متری در خرج‌های از جنس Comp-B.



شکل ۱۳- نمودار مقایسه تأثیر موانع ترکیبی و همچنین هوا بر تغییر فشار در اندازه گپ ۱۵ میلی‌متری در خرج‌های از جنس Comp-B.

در نمودار شکل (۱۲)، نتایج حاصل در مدل‌سازی با تک مانع از جنس مواد پلیمری به صورت مجزا گزارش شدند. نمودارها روند یکسانی داشتند. لاستیک به عنوان تک مانع، در بخش فاصله بین مواد منفجره فشار بالاتری را ثبت کرده که ناشی از تفاوت چگالی این ماده است. بالا رفتن نمودار در بخش مانع و کاهش بیشتر فشار حاصل از مانع لاستیک در بخش لبه خرج گیرنده می‌تواند در ادامه بررسی‌ها و در بخش عملیاتی مسئله مفید باشد.

نمودار شکل (۱۳) نتایج حاصل از تأثیر موانع ترکیبی و همچنین هوا بر فشار عبوری است. هوا پایین‌ترین فشار را در فاصله ۱۵ میلی‌متری بین مواد منفجره نشان می‌دهد. سایر موانع ترکیبی نمودارهای مشابهی دارند. همچنان که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است، ترکیب شن + لاستیک پایین‌ترین فشار در لبه خرج گیرنده را محقق می‌کند.

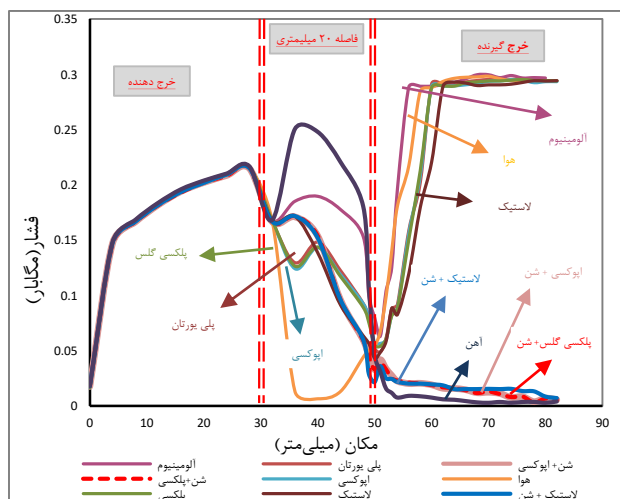
در نمودار شکل (۱۴)، نمودار میله‌ای فشار شاک به هنگام ورود به خرج گیرنده پس از عبور از موانع قابل مشاهده است. موانع با جنس‌های

جدول ۸- مشخصات ابعادی اندازه گپ ۱۵ میلی متری با وجود تک مانع.

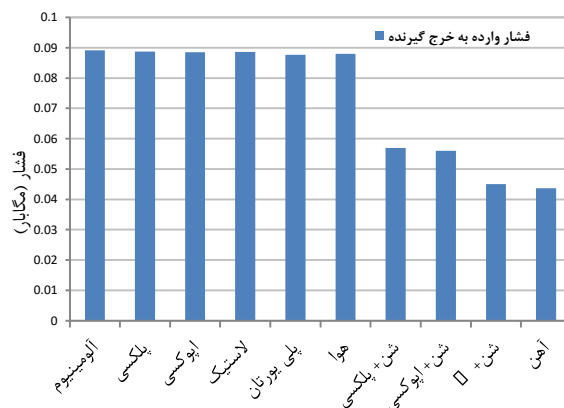
| بخش        | جنس             | اندازه      |
|------------|-----------------|-------------|
| خرج دهنده  | Comp-B          | ۳۲ میلی متر |
| فاصله      | هوا             | ۲ میلی متر  |
|            | مانع            | ۱۶ میلی متر |
|            | هوا             | ۲ میلی متر  |
| خرج گیرنده | Military Comp-B | ۳۲ میلی متر |

در شکل (۱۶) نتیجه کل شبیه سازی ها برای حالتی که گپ بین دو ماده منفجره ۲۰ میلی متر است، نمایش داده شده است. مطابق این نمودار، با استفاده از موانع با جنس (۱) پلکسی گلس + شن + پلکسی گلس، (۲) آهن، (۳) لاستیک + شن + لاستیک و (۴) اپوکسی + شن + اپوکسی، انفجار سمپاتیک مشاهده نمی شود. این نمودار نشان می دهد که موانع ترکیبی چند لایه با لایه داخلی شن، در مقایسه با مانع تک لایه دارای کارایی بالاتری در جلوگیری از انفجار سمپاتیک هستند. به نحوی که مانع بروز تراک در خرج گیرنده شده اند.

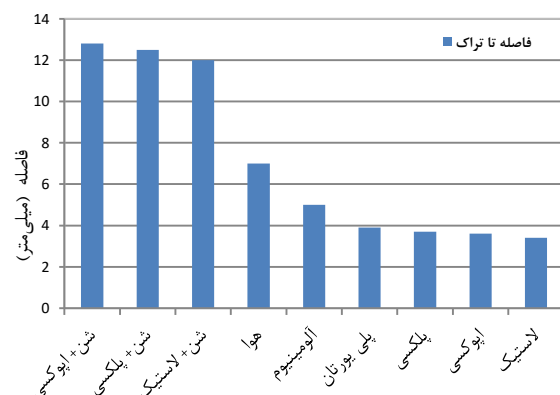
به طوری که بعد از گذشت از خط قرمز دوم در نقطه ۵۲ میلی متر (لبه خرج گیرنده)، فشار روند کاهشی خود را ادامه می دهد. این کاهش فشار بیانگر عدم انفجار خرج گیرنده است. به دلیل پایین بودن فشار خرج گیرنده از فشار CJ، انفجار سمپاتیک رخ نداده است. آهن توانایی جلوگیری از انفجار سمپاتیک در فاصله ۲۰ میلی متری مواد منفجره، همانند فاصله ۱۵ میلی متری را دارا است. اما برای آهن و در کل مواد فلزی احتمال خرد شدن و تولید ترکش دور از انتظار نیست. ترکش، عامل مخرب برای خرج گیرنده بوده و ممکن است خرج گیرنده به دلیل برخورد ترکش دچار تغییر شکل و حتی انفجار شود. مواد فلزی آهن و آلومینیوم که در شبیه سازی مورد استفاده گرفتند به دلیل وجود تفاوت در ویژگی های ساختاری خود قادر به تحمل فشار متفاوتی در میان مواد منفجره هستند.



شکل ۱۶- نمودار کلی مقایسه تأثیر ساختار موانع بر تغییر فشار در اندازه گپ ۲۰ میلی متری.



شکل ۱۴- نمودار میله ای مقایسه فشار شاک هنگام ورود به خرج گیرنده از جنس Comp-B با عبور شاک از اندازه گپ ۱۵ میلی متری در جنس های مختلف موانع.



شکل ۱۵- نمودار میله ای مقایسه فاصله گذر از شاک به تراک در خرج گیرنده از جنس Comp-B پس از عبور شاک از اندازه گپ ۱۵ میلی متری

با توجه به اینکه گپ ۱۵ میلی متری در اغلب موارد مانع بروز تراک در خرج گیرنده نمی شود، در ادامه با افزایش ضخامت اندازه گپ به ۲۰ میلی متر، شبیه سازی ها مجدداً تکرار شده اند.

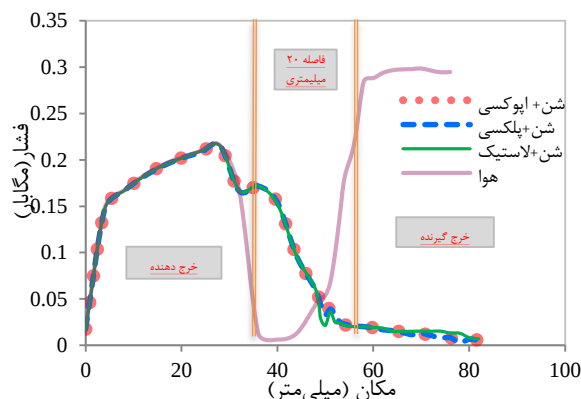
در جدول (۷) مشخصات ابعادی مدل طراحی شده با اندازه گپ ۲۰ میلی متری با موانع ترکیبی ارائه شده است. در جدول (۸) مشخصات ابعادی برای حالتی که تنها از یک لایه مانع در اندازه گپ ۲۰ میلی متری استفاده شده باشد ارائه شده است.

جدول ۷- مشخصات ابعادی اندازه گپ ۲۰ میلی متری با وجود مانع ترکیبی.

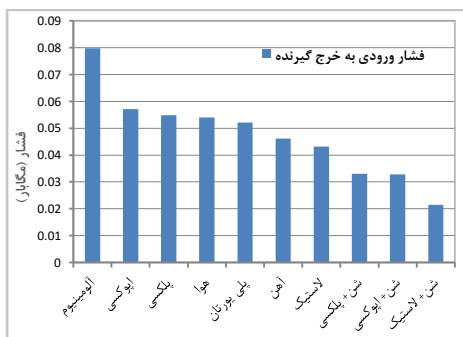
| بخش        | جنس             | اندازه      |
|------------|-----------------|-------------|
| خرج دهنده  | Comp-B          | ۳۲ میلی متر |
| فاصله      | هوا             | ۲ میلی متر  |
|            | پلکسی گلس       | ۱ میلی متر  |
|            | شن              | ۱۴ میلی متر |
|            | پلکسی گلس       | ۱ میلی متر  |
| خرج گیرنده | هوا             | ۲ میلی متر  |
|            | Military Comp-B | ۳۲ میلی متر |

شکل (۱۹) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای موانع ترکیبی و همچنین هوا است. مانع شن به صورت لایه میانی قرار داده شده و دو لایه از جنس پلیمر در دو طرف شن قرار داده شدند. همچنین لایه‌های هوایی از دو طرف، حائل میان مانع و مواد منفجره هستند. موج ورودی به بخش فاصله بین مواد منفجره، ابتدا وارد لایه هوایی شده و سپس با برخورد به لایه پلیمری به لایه شن می‌رسد. سپس با خروج از لایه شن به لایه پلیمری بعدی رسیده و با عبور از لایه هوایی به لبه خرج گیرنده می‌رسد. پایین‌ترین فشار در لبه خرج گیرنده متعلق به مانع ترکیبی شن + لاستیک است. با توجه به نمودار شکل (۱۹) تمامی موانع ترکیبی توانایی جلوگیری از انفجار سمپاتیک را دارا هستند. با ادامه روند کاهشی فشار در خرج گیرنده، انفجاری در خرج گیرنده رخ نمی‌دهد.

نمودار شکل (۲۰)، بیانگر فشار ورودی به خرج گیرنده پس از گذر از فاصله ۲۰ میلی‌متری مواد منفجره است. مانع آلومینیوم کمترین توانایی را در کاهش فشار عبوری داشته و در نتیجه بیشترین فشار در لبه خرج گیرنده را به ثبت رسانده است. سایر موانع از جنس تک ماده پس از آلومینیوم بیشترین فشار را از خود عبور داده‌اند. موانع ترکیبی (تشکیل شده از شن + لایه پلیمری در دو طرف آن) توانستند کمترین فشار در میان موانع مختلف را منتقل کنند. مانع شن + لاستیک با کمترین میزان فشار عبوری، بهترین نتیجه را حاصل کرده‌است.



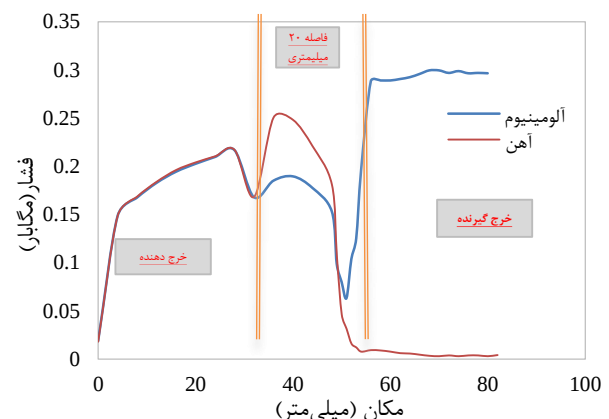
شکل ۱۹- نمودار مقایسه فشار موانع ترکیبی و همچنین هوا به‌عنوان مانع در اندازه گپ ۲۰ میلی‌متری در خرج‌های از جنس Comp-B.



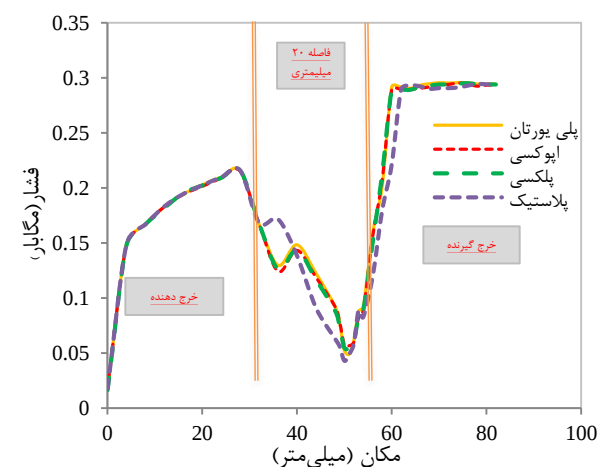
شکل ۲۰- نمودار میله‌ای مقایسه فشار شک هنگام ورود به خرج گیرنده از جنس Comp-B با عبور شک از اندازه گپ ۲۰ میلی‌متری در جنس‌های مختلف موانع.

همان‌طور که در شکل (۱۷) نمایان است، نمودار فشار عبوری آلومینیوم در فاصله بین مواد منفجره همواره روند رو به کاهش داشته اما در مانع آهن پس از افزایش فشار، مقدار آن به حداقل رسیده است. شکل (۱۷) فشار مدل تک مانع از جنس آلومینیوم و آهن را مورد بررسی قرار داده است. به دلیل تفاوت چگالی و ساختاری آهن و آلومینیوم، فشار موج عبوری دست‌خوش تغییرات می‌شود. موج حاصل از انفجار دهنده پس از عبور از لایه هوایی با آهن برخورد کرده و فشار مانع آهن را افزایش می‌دهد. مانع آهن در برابر عبور موج مقاومت کرده و فشار در لبه خرج گیرنده را تا ۰/۰۵ مگابار کاهش می‌دهد.

شکل (۱۸) نتایج حاصل از پیش‌بینی فشار ورودی به خرج گیرنده پس از عبور از تک مانع پلیمری در اندازه گپ ۲۰ میلی‌متری است. در این موانع با رسیدن به بخش فاصله بین مواد منفجره، فشار کاهش می‌یابد. تک مانع لاستیک فشار بیشتری را در بخش فاصله ۲۰ میلی‌متری مواد منفجره محقق می‌کند. همچنین با توجه به نمودار شکل (۱۸) مانع لاستیک در بین سایر موانع پلیمری بیشترین کاهش فشار را در لبه خرج گیرنده نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- نمودار مقایسه فشار آلومینیوم و آهن به‌عنوان تک مانع بر تغییر فشار در اندازه گپ ۲۰ میلی‌متری در خرج‌های از جنس Comp-B.



شکل ۱۸- نمودار مقایسه فشار موانع پلیمری به‌عنوان تک مانع در اندازه گپ ۲۰ میلی‌متری در خرج‌ها از جنس Comp-B.

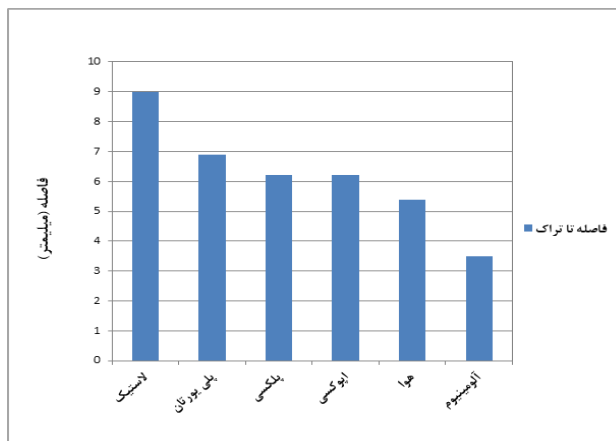
ابتدا عبور موج شاک از گپ ۱۵ میلی متری شبیه سازی شد. در این فاصله، آهن به دلیل داشتن چگالی بالاتر نسبت به مواد دیگر تنها مانعی بود که از انفجار سمپاتیک جلوگیری کرد. بقیه مواد به دلیل کم بودن ضخامت اندازه گپ قادر به جلوگیری از انفجار سمپاتیک نبودند. به همین دلیل ضخامت اندازه گپ بین مواد منفجره به ۲۰ میلی متر افزایش داده شد.

در اندازه گپ ۲۰ میلی متری، مانع از جنس آهن از انفجار سمپاتیک جلوگیری کرد. با توجه به ساختار و ویژگی های فیزیکی فلزات، با فراتر رفتن فشار عبوری آهن از آستانه فشار قابل تحمل توسط این مانع خطر خردشدگی و تولید ترکش محتمل می شود. باید توجه داشت که ترکش های تولیدی از آهن می تواند عاملی برای ایجاد انفجار القایی شوند. بنابراین در ادامه، از مواع پلیمری و مواع ترکیبی در طی روند شبیه سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که مواع ترکیبی توانایی کاهش فشار ورودی به خرج گیرنده را دارا هستند. مواع تشکیل شده از جنس شن + پلکسی، شن + لاستیک، شن + اپوکسی با ضخامت اندازه گپ ۲۰ میلی متری از انفجار القایی در خرج گیرنده جلوگیری کردند. با بررسی و مقایسه نمودارهای میله ای مقایسه فشار شاک هنگام ورود به خرج گیرنده تحت تأثیر مواع از جنس های مختلف (شکل (۲۰)) می توان به کارایی بسیار مؤثر مواع ترکیبی در انتقال فشار شاک اطمینان حاصل کرد. تمامی مواع ترکیبی کمترین فشار را به خرج گیرنده منتقل کرده اند. از این رو این لایه ترکیبی را می توان برای پیشگیری از انفجار سمپاتیک در انبار مهمات و حتی جعبه حمل مهمات پیشنهاد نمود. در ادامه کار حاضر پیشنهاد می شود مواع مناسب برای پیشگیری از شروع انفجار ناشی از حرارت مورد بررسی قرار گیرد.

## مراجع

- [۱] ذری، محمد علی؛ کاردان حلوائی، حمید؛ قربانی، مصطفی؛ دهقانی، حسین "بررسی سازوکارهای ایجاد یک انفجار و کار با مواد پراثری": هفتمین همایش سراسری مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشران، اسفند ۱۳۹۳.
- [2] Sultanoff, M.; Paszek, J. "Shock Induced Sympathetic Detonation in Solid Explosive Charges"; Army Ballistic Res. Lab. Rep. BRL-TN-1413, 1961, 1-22.
- [3] Bowman, A. L.; Forest, C. A.; Kershner, J. D.; Mader, C. L.; Pimbley, G. H. "Numerical Modeling of Shock-Sensitivity Experiments"; Proc. of the Int. Symposium on Detonation 1981, 1-8.
- [4] Huang, Y. K.; Arbuckle, A. L. "Numerical Experiments on the Shock Sensitivity of Munitions"; Army Ballistic Res. Lab. Rep. ARBRL-TR-02387, 1982.
- [5] Sanchidrián, J. A. "Analytical and Numerical Study of The Shock Pressures in the Gap Test"; Propellants, Explos, Pyrotech. 1993, 325-331.
- [6] Halsey, C. C.; Berry, S. L. "Expanding Pumice Technology to the Protection of Missile Warheads from Sympathetic Detonation"; Nav. Air Warfare Cent. Rep. CA-93555-6001, 1996.

با توجه به نمودار شکل های (۱۷ و ۱۹)، مواع ترکیبی شامل شن + پلکسی، شن + لاستیک، شن + اپوکسی و همچنین تک مانع آهن با ضخامت ۲۰ میلی متر از انفجار سمپاتیک جلوگیری کردند. فاصله پیمایش تا تراک در خرج گیرنده برای سایر مواعی که توانایی کاهش فشار عبوری به اندازه کافی را نداشته و خرج گیرنده با وجود حضور آن ها منفجر شده اند (شکل (۲۱)).



شکل ۲۱- نمودار میله ای مقایسه فاصله گذر از شاک به تراک در خرج گیرنده از جنس Comp-B پس از عبور شاک از اندازه گپ ۲۰ میلی متری.

## ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به مطالعه انفجار سمپاتیک و راه های پیشگیری از آن پرداخته شد. بدین منظور خرج Comp-B به عنوان یک نمونه خرج گیرنده که کاربرد زیادی در صنعت دارد، انتخاب شد. جهت ارزیابی و صحت سنجی شبیه سازی ها، از داده های تجربی [۲۱] استفاده شد. مقایسه صورت گرفته نشان داد که کمتر از ۴٪ بین داده های تجربی و نتایج کار حاضر اختلاف وجود دارد.

در ادامه به طریق شبیه سازی عددی، جنس، ترکیب و ضخامت مواع مختلف با هدف پیشگیری از وقوع انفجار سمپاتیک در این خرج مورد بررسی قرار گرفت. خرج دهنده موج نیز از جنس Comp-B در نظر گرفته شد.

نتایج شبیه سازی های عددی نشان داد که با به کار گرفتن ترکیب مواع با جنس و ترتیب مناسب، به کمترین ضخامت مانع لازم برای پیشگیری از انفجار سمپاتیک دست یافت. لازم به ذکر است که از منظر مقایسه تأثیر مواع، نتایج حاصله برای سایر خرج ها نیز قابل استفاده خواهد بود.

در ابتدا، تأثیر وجود و عدم وجود فاصله هوایی بین مانع و مواد منفجره مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که جدا بودن مانع از خرج ها و وجود فاصله هوایی بین آن ها، فشار موج شاک ورودی به خرج گیرنده را کاهش می دهد. در ادامه تأثیر نوع ماده مانع، مناسب ترین ضخامت گپ بین مواد منفجره، و همچنین تأثیر استفاده مواد مختلف به عنوان مانع مورد بررسی قرار گرفت.

- [۱۵] امامی کوپائی، سیحان؛ مظاهری، کیومرث؛ سوری، حسین "بررسی مقایسه‌ای مدل‌های سوزش برای مواد شدید انفجار"; مجله تحقیق و توسعه مواد پرانرژی، سال چهارم شماره ۲، صفحه ۲۹، ۱۳۸۷.
- [16] Roberts, J. K.; Miller, A. R. "Heat and Thermodynamics"; John Wiley & Sons, 1954.
- [17] Burshtein, A. I. "Introduction to Thermodynamics and Kinetic Theory of Matter"; John Wiley & Sons, 2008.
- [18] Murnaghan, F. D. "The Compressibility Of Media Under Extreme Pressures"; Proc. Natl. Acad. Sci. 1944, 30, 244-247.
- [19] Birch, F. "Finite Elastic Strain of Cubic Crystals"; Phys. Rev. 1947, 71, 809.
- [20] Vinet, P.; Smith, J. R.; Ferrante, J.; Rose, J. H. "Temperature Effects on the Universal Equation of State of Solids"; Phys. Rev. B. 1987, 35, 1945.
- [21] Murphy, M. J.; Lee, E. L.; Weston, A. M.; Williams, A. E. "Modeling Shock Initiation in Composition B"; Lawrence Livermore Nat. Lab. Rep. UCRL-JC-111975, 1993.
- [22] Kubota, S.; Liu, Z. Y.; Otsuki, M.; Nakayama, Y.; Ogata, Y.; Yoshida, M. "A Numerical Study of Sympathetic Detonation in Gap Test"; Mater. Sci. Forum 2004, 465, 163-168.
- [7] Hager, K.; Tancreto, J.; Swisdak, M. "Analytical Certification of ARMCO Revetments for Preventing Sympathetic Detonation"; Nav. Surf. Warfare Cent. Rep. 93043, 1996.
- [8] Lu, J. P.; Lochert, I. J.; Kennedy, D. L.; and Hamshire, B. L. "Simulation of Sympathetic Reaction Tests for PBXN-109"; Proc. of the Int. Symposium on Detonation 2006, 1210-1218.
- [9] Chen, L.; Wang, C.; Feng, C. G.; Lu, F.; Lu, J. Y.; Wang, X. F.; Guo, X. "Study on Random Initiation Phenomenon for Sympathetic Detonation of Explosive"; Defence Tech. 2013, 9, 224-228.
- [10] Lu, J. P.; Lochert, I. J.; Daniel, M. A.; Franson, M. D. "Shock Sensitivity Studies for PBXN-109"; Propellants, Explos., Pyrotech. 2016, 41, 562-571.
- [11] Thakur, P. K.; Mishra, R.; Tanwar, R. K.; Mishra, G. K.; Narang, R. "Design and Validation of Blast Non-Propagation Wall for Multi-Compartmented Explosive Storage Structure of Capacity 5T NEC per Compartment"; Defence Sci. J. 2018, 68, 432-437.
- [12] Anderson, J. D. "Fundamentals of Aerodynamics"; McGraw-Hill: New York, 2001.
- [13] Gebbeken, N.; Ruppert, M. "A New Material Model for Concrete in High-Dynamic Hydrocode Simulations"; Arch. Appl. Mech. 2000, 70, 463-478.
- [14] Tham, C. Y. "Reinforced Concrete Perforation and Penetration Simulation Using Autodyn-3d"; Finite Elem. Anal. Des. 2005, 41, 1401-1410.