مجله علمی - پژوهشی "مواد پرانرژی"
سال دوازدهم، شماره ۴، شماره پیاپی ۳۶، زمستان ۹۶: ص ۲۶۳-۲۵۵

شبیه‌سازی آزمون ایمپالس متری VLIP و ارائه روشی برای تعیین معادل TNT انفجاری

حسین سوری[۱*]، سید هادی معتمد الشریعتی[۲]، خداکرم غلامی[۳]
۱- استادیار، ۲- مربی، ۳- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
(تاریخ وصول: ۹۶/۲/۲۷، تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۱۶)

چکیده

دستگاه VLIP یکی از ابزارهای مقایسه کارایی مواد منفجره با یکدیگر است. این دستگاه شامل یک صفحه فلزی است که بالای ماده منفجره قرارگرفته و در اثر انفجار به صورت عمودی پرتاب می‌شود. ایمپالس وارده به صفحه، سنجه‌ای برای قدرت مواد منفجره است. با توجه به ارزان قیمت بودن دستگاه VLIP، در این مقاله روشی برای تعیین معادل TNT مواد منفجره با استفاده از VLIP ارائه‌شده است. بدین منظور ابتدا پدیده انفجار در هوا در مجاورت صفحه VLIP شبیه‌سازی شده و با مقایسه با آزمون‌های تجربی از دقت شبیه‌سازی‌ها اطمینان حاصل‌شده است. سپس ارتباط بین ایمپالس وارده به صفحه VLIP و معادل TNT ماده منفجره مورد بررسی قرارگرفته است. نتایج نشان داد که از ابزار VLIP به صورت مستقیم برای تعیین معادل TNT مواد منفجره نمی‌توان استفاده کرد. بلکه لازم است تعدادی آزمون انفجار TNT در وزن‌های مختلف انجام و ایمپالس وارده به VLIP ثبت شود. به این طریق این دستگاه کالیبره شده و می‌توان از آن برای تعیین معادل TNT سایر خرج‌ها استفاده شود. بر این مبنا در مقاله حاضر روابطی برای تعیین معادل TNT مواد منفجره جدید با استفاده از آزمون VLIP استخراج شده است.

واژه‌های کلیدی: انفجار، معادل TNT، VLIP، ایمپالس، اتوداین.

Simulation of the VLIP Test and Presentation of a Method to Determine the TNT Equivalency of Explosive Materials

H. Soury[1*], S. H. Motamedoshariati[2], Kh. Gholami[3]
Maleke Ashtar Universityof Technology, Tehran
(Received: 5/17/2017, Accepted: 9/7/2017)

Abstract

The VLIP is a usefull system to compare the high explosives efficiency. This device includes a metallic plate which located above the explosive material and upthrown vertically due to the explosion. The exerted impulse on the plate is used as a meter to determine the explosives efficiency. Since the VLIP system has a low cost, in this paper a method based on VLIP is presented to determine the TNT equivalency of explosives. In this order airblast near the VLIP plate was simulated numerically at first and then compared with experimental results to confirm the simulation accuracy. Thereafter, relation between the exerted impulse on the VLIP plate and TNT equivalency of explosive material was studied. The results showed that VLIP could not be directly utilized for determination of the explosives TNT equivalency. In fact, performing of some explosion tests on the TNT samples with various weights and recording of the exerted impulse on VLIP plate is essential. These tests help to calibrate the VLIP and then it could be used to determine the TNT equivalence of other explosive materials. In the present paper, some equations were derived based on the mentioned method to determine the TNT equivalency of new explosives by VLIP apparatus.

Keywords: Explosion, TNT Equivalency, VLIP, Impulse, AUTODYN

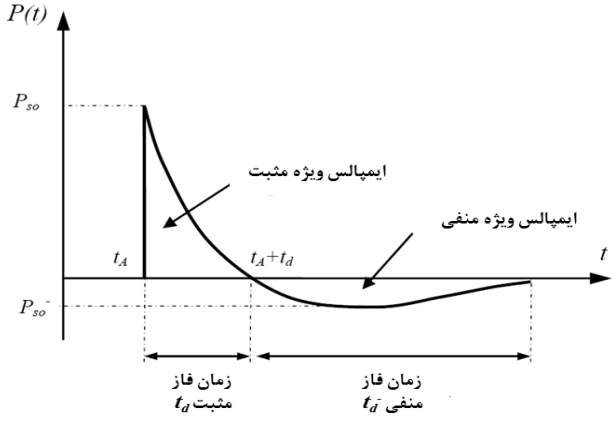
* Corresponding Author E-mail: h.soury@chmail.ir

۱- مقدمه

زمانی که انرژی با سرعت زیاد در اثر انفجار از یک منبع آزاد می‌شود، یک موج بلاست[1] با مجموعه‌ای از مشخصات فیزیکی تولید می‌کند. این مشخصات به مقدار انرژی که در قالب موج بلاست آزاد شده است و همچنین به نرخ آزاد شدن انرژی وابسته‌اند. باید توجه داشت که کل انرژی موجود در ماده منفجره صرف تولید موج بلاست نمی‌شود. به عنوان مثال در مورد انفجار اتمی، تقریباً تنها ۵۰٪ انرژی آزادشده در قالب موج بلاست اتفاق می‌افتد و مابقی به صورت تشعشعات اتمی و حرارتی ظاهر می شوند[۱]. در مواد منفجره شیمیایی نیز همین شرایط با درصد متفاوتی برقرار است. در مواردی مانند انفجار مواد ترموباریک[2]، مقدار انرژی آزادشده در قالب موج بلاست به درجه اختلاط با اکسیژن هوا نیز وابسته بوده و نرخ آزاد شدن آن در مقایسه با پدیده دتونیشن[3] خیلی کند است[۱]. در کاربردهای مهندسی به طور معمول قدرت مواد منفجره در مقایسه با ماده منفجره TNT سنجیده می‌شود. بعضاً کل انرژی آزادشده به هنگام دتونیشن مبنای این مقایسه قرار می گیرد. این در حالی است که کار مکانیکی صورت پذیرفته روی اجسام و محیط اطراف است که اهمیت دارد و این پارامتر در مواد منفجره مختلف لزوماً نسبت یکسانی با کل انرژی دتونیشن ماده ندارد[۲].

بنا به دلایل فوق برای مواد منفجره با کاربرد بلاست، بجای بحث در خصوص مقدار انرژی آزادشده از انفجار، مفیدتر است که مشخصات موج بلاست تولیدشده توسط یک خرج، با مشخصات موج حاصل از TNT مقایسه شود. به این ترتیب که قدرت بلاست خرج مذکور، معادل با مقدار TNT که موج بلاستی مشابه در فاصله مشابه از مرکز انفجار تولید خواهد کرد، بیان شود. از بین مواد منفجره مختلف، TNT به عنوان مبنا انتخاب‌شده است؛ چرا که ماده‌ای تک جزئی بوده و در دسترس است. همچنین از ایمنی خوبی برخوردار است. ضمناً در خصوص مشخصات فیزیکی امواج بلاست تولیدشده توسط TNT در هوای آزاد، در محدوده وسیعی از ارتفاع انفجار و همچنین انفجار روی سطح زمین، داده‌های بیشتری در دسترس هست. ازاین‌رو معادل TNT از دیرباز به عنوان مبنایی برای سنجش انرژی بلاست آزادشده توسط منابع انفجاری مختلف مورد استفاده قرارگرفته است[۳].

در شکل(۱) به صورت شماتیک تاریخچه فشار موج بلاست در محیط هوا در فاصله مشخصی از مرکز انفجار رسم شده است[۴]. در این نمودار، t زمان، t_A زمان رسیدن جبهه موج، t_d زمان ماندگاری فاز مثبت موج، P فرا فشار استاتیک[4] (فشار استاتیک نسبی)، P_{so} قله فرا فشار استاتیک[5]، P_{so}^- حداقل فرا فشار منفی می‌باشند. رفته‌رفته با فاصله گرفتن از مرکز انفجار، فشار موج بلاست کاهش می‌یابد. با انتگرال‌گیری سطح زیر این نمودار در فاز مثبت، فاز منفی و کل، به ترتیب ایمپالس ویژه[6] (ایمپالس بر واحد سطح) مثبت، منفی و کل موج بلاست به دست می‌آید.



شکل ۱- ساختار موج بلاست در هوای آزاد[۴]

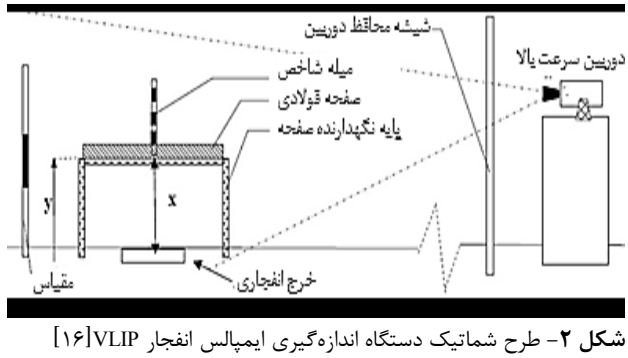
برای مقایسه قدرت منابع انفجاری مختلف با TNT، مشخصات متفاوتی از موج بلاست را می‌توان مدنظر قرارداد. در اغلب موارد قله فرا فشار استاتیک (به اختصار: قله فشار) و یا ایمپالس ویژه فاز مثبت موج (به اختصار: ایمپالس مثبت) برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد[۷- ۵]. بدین منظور نیاز به استفاده از حس‌گرهای فشار مناسب برای ثبت پروفیل موج بلاست در فواصل مختلف از مرکز انفجار است[۱۲-۸]. در مواردی نیز اثراتی که موج بلاست بر اهداف خاص ایجاد می‌کند، با اثرات ناشی از خرج TNT مقایسه می‌شود. در این راستا تاکنون ابزارهای مختلفی ابداع و به کار گرفته‌شده است. یکی از این ابزارها، دستگاه VLIP[7] است که توسط موسسه Council for Scientific and Industrial Research آفریقای جنوبی ابداع‌شده است[۱۳]. این روش در اصل برای ارزیابی قدرت مین‌های ضدتانک و ضد خودرو طراحی‌شده است؛ اما در مواردی نیز به عنوان ابزاری برای سنجش قدرت بلاست خرج‌های انفجار حجمی در فضای نیمه بسته به‌کاررفته است[۱۴].

موضوع اصلی مدنظر در این مقاله، بررسی امکان ارائه روشی برای استفاده از VLIP در تعیین معادل TNT مواد منفجره بلاست است. طرح این مسئله از آنجا نشئت گرفته که تعیین معادل TNT بر اساس مشخصات پروفیل موج بلاست، مستلزم صرف هزینه زیاد در تأمین تجهیزات مورد نیاز از قبیل حس‌گر فشار مینیاتوری و تجهیزات انتقال

1 -Blast
2 -Thermobaric
3 -Detonation
4 -Static (Side-On) Overpressure
5 -Static (Side-On) Peak Overpressure
6 -Specific Impulse
7 -Vertically Launched Impulse Plate

و ثبت داده است. این در حالی است که امکان آسیب دیدن این تجهیزات ناشی از اثرات انفجار همواره وجود دارد. علاوه بر آن تحلیل داده‌های حاصل از آزمون نیز به تخصص و تجربه به نسبت بالایی نیاز دارد. گذشته از این نمودارهای فشار به صورت بصری تفاوت قدرت دو ماده منفجره نسبت به هم را به کاربر نهایی که ممکن است به دانش تخصصی انفجار مسلط نباشد، منتقل نمی‌کند. ازاین‌رو شناسایی و یا طراحی ابزاری که به نسبت ارزان باشد و تحلیل نتایج حاصل از آن هم پیچیدگی زیادی نداشته باشد و درعین‌حال از طریق آن بتوان به صورت مستقیم قدرت ماده منفجره در مقایسه با خرج TNT و یا سایر خرج‌ها را عیناً مشاهده کرد، همواره از دغدغه‌های طراحان مواد منفجره بلاست بوده است. ابزار VLIP از مواردی است که به عنوان کاندیدا انتخاب‌شده و در این مقاله قابلیت آن در تعیین معادل TNT مورد بررسی قرارگرفته است. یکی از دلایل انتخاب این دستگاه، قابلیت استفاده از آن در سنجش کارایی خرج‌های انفجار حجمی در فضای نیمه بسته است[۱۴]. طراحی ترکیب و ارزیابی قدرت خرج‌های انفجار حجمی جدید نیز در حال حاضر از مسائل اصلی مطرح در بین طراحان مواد منفجره است.

یکی از پارامترهای مورد استفاده برای ارزیابی قدرت انفجار، ایمپالس ناشی از موج بلاست است. ایمپالس بر واحد سطح از لحاظ ریاضی برابر است با مساحت سطح زیر نمودار فشار-زمان موج بلاست. راه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ایمپالس وجود دارد. ازجمله می‌توان به طور کلی به روش‌های مکانیکی، الکترونیکی، اپتیکی و غیره اشاره کرد[۱۵]. استفاده از حس‌گرهای فشار در دسته روش‌های الکترونیکی قرار می‌گیرد. آزمون VLIP یکی از روش‌های مکانیکی تعیین ایمپالس موج بلاست است. روش VLIP برای سنجش ایمپالس از یک صفحه فولادی ضخیم که یک میله بلند فولادی به عنوان شاخص در بالای آن نصب‌شده، استفاده می‌کند (شکل ۲) . با دانستن سرعت پرتاب صفحه طی جابجایی عمودی و همچنین جرم صفحه، ایمپالس وارده به آن ناشی از موج انفجار قابل‌محاسبه خواهد بود[۱۶].



شکل ۲- طرح شماتیک دستگاه اندازه‌گیری ایمپالس انفجار VLIP[۱۶]

مقایسه‌ای بین سه ابزار مکانیکی اندازه‌گیری ایمپالس ناشی از موج انفجار توسط اسمیت و همکارانش[۱۳] انجام پذیرفته است. آن‌ها دستگاه VLIP را در مقایسه با دستگاه SIIMA[1] و شاخص تکانه هلد[2] به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که هر سه روش به عنوان ابزاری برای مقایسه قدرت مواد منفجره قابل‌استفاده هستند؛ اما به دلیل تفاوت هندسی و سازه‌ای این ابزارها، عدد به دست آمده ایمپالس توسط این ابزارها با یکدیگر متفاوت‌اند؛ لذا با توجه به کاربرد ماده منفجره، یکی از این ابزارها را می‌توان برای ثبت مقدار ایمپالس وارده به هدف مورداستفاده قرارداد. کوکر و همکاران[۱۶] با استفاده از VLIP به صورت تجربی به اندازه‌گیری ایمپالس حاصل از مین‌های ضدتانک پرداخته‌اند. سپس با استفاده از داده‌های تجربی، رابطه‌ای برای پیش‌بینی ایمپالس کل حاصل از مین‌ها بر حسب معادل TNT ماده منفجره ارائه نموده‌اند.

استفاده از VLIP در اندازه‌گیری قدرت نسبی موج بلاست خرج‌های حاوی پودر آلومینیوم در فضای نیمه بسته موضوع کار موسترت و همکارانش[۱۴] بوده است. آن‌ها اندازه‌گیری‌های تجربی برای خرج‌های با درصدهای مختلف پودر آلومینیوم با استفاده از VLIP، حس‌گر فشار و شاخص تکانه انجام داده‌اند. شاخص تکانه در واقع یک قطعه استوانه‌ای فولادی است که در داخل یک سیلندر روبروی ماده منفجره قرار داده‌شده است. تکانه ایجادشده در قطعه استوانه‌ای به عنوان مبنایی برای سنجش قدرت موج انفجار به کار می‌رود. سرعت این قطعه با پرتو لیزر اندازه‌گیری می‌شود. نتایجی که در این آزمودن‌ها توسط VLIP به دست آمده، نشان می‌دهد که دستگاه مذکور برای مقایسه قدرت خرج‌ها نسبت به هم به اندازه کافی قابل‌اطمینان هست.

در کارهای پیشین انجام‌گرفته در خصوص VLIP، عمدتاً مقدار ایمپالس حاصل از ماده منفجره به عنوان مبنای مقایسه آن‌ها با یکدیگر قرارگرفته است. این ایمپالس نیز در واقع ایمپالس کل حاصل از موج بلاست مقدار معینی از ماده منفجره در فاصله‌ای مشخص از آن است. موضوعی که در این تحقیق پیگیری می‌شود این است که آیا این امکان وجود دارد که با استفاده از دستگاه VLIP، مستقل از مقدار ماده منفجره و فاصله از مرکز انفجار، قدرت آن را در مقایسه با خرج مبنای TNT تعیین کرده و به عنوان یک مشخصه از ماده منفجره ثبت نمود؟ در صورتی که جواب مثبت باشد، راهکار آن به چه نحوی است؟ در کارهای پیشین پاسخی برای این دو سؤال وجود ندارد. لذا در ادامه مقاله حاضر این سؤال‌ها پاسخ داده خواهند شد.

1 -Scientifically Instrumented Impulse Measuring Apparatus

2 -The Held Momentum Method

۲- روش تحقیق

به منظور بررسی امکان استفاده از آزمون VLIP برای تعیین معادل TNT مواد منفجره بلاست، به این روش عمل شده که برای ماده منفجره TNT، نمودار تغییر ایمپالس مثبت موج بلاست با وزن ماده منفجره با استفاده از روابط تجربی استخراج‌شده است. این نمودار با نمودار ایمپالس ویژه حاصل از دستگاه VLIP مقایسه شده است. سپس ارزیابی‌شده که آیا با افزایش به عنوان مثال ۳ برابری وزن ماده منفجره، ایمپالس به دست آمده از این دو روش به یک نسبت افزایش خواهد یافت یا خیر؟ اگر جواب مثبت باشد، می‌توان به سادگی از دستگاه VLIP برای تعیین معادل TNT سایر مواد منفجره استفاده نمود. در غیر این صورت استخراج معادل TNT با استفاده از این دستگاه نیاز به یکسری اقدامات اولیه دارد که در ادامه مقاله به آن‌ها اشاره خواهد شد. برای تعیین ایمپالس ویژه حاصل از آزمون VLIP از شبیه‌سازی عددی استفاده خواهد شد. بدین منظور نرم‌افزار هیدرودینامیکی AUTODYN با توجه به توانایی‌ها و در دسترس بودن آن مورداستفاده قرارگرفته است. هیدروکد مذکور به روش عددی و با رویکرد صریح معادلات حاکم بر مسائل سازه‌ای را به روش المان محدود و مسائل سیالاتی را با روش حجم محدود حل می کند. معادلات حاکم شامل بقای جرم، تکانه و انرژی به همراه معادلات حالت و مدل مادی می‌باشند. در کار حاضر برای محصولات انفجار از معادله حالت JWL و برای صفحه فولادی از مدل مادی جانسون-کوک استفاده‌شده است. هوا نیز به عنوان یک گاز ایده‌آل در نظر گرفته‌شده است. بدین منظور از اطلاعات موجود در کتابخانه نرم‌افزار AUTODYN استفاده شده است.

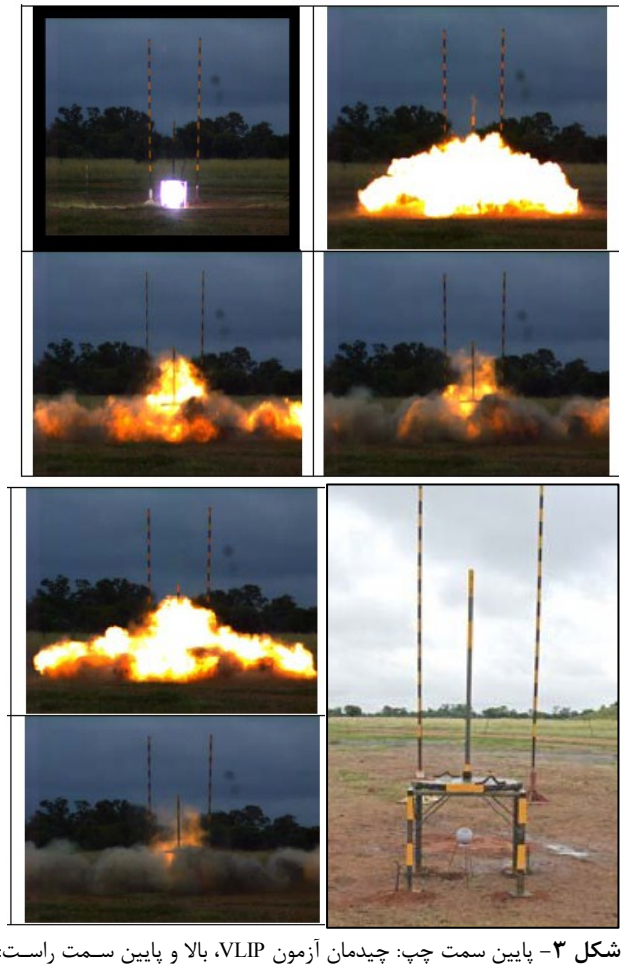
۳- صحت‌سنجی حل عددی

در اینجا یک مورد آزمون تجربی با دستگاه VLIP که توسط اسمیت و همکاران[۱۳] انجام پذیرفته به عنوان مبنا در نظر گرفته‌شده و این آزمون در محیط نرم‌افزار AUTODYN شبیه‌سازی‌شده است. به این طریق توانایی نرم‌افزار مذکور در شبیه‌سازی رخدادهای هنگام آزمون مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرارگرفته است. مشخصات کلی یکی از آزمون‌های تجربی VLIP گزارش‌شده توسط اسمیت و همکاران[۱۳] به شرح جدول (۱) است.

جدول ۱- مشخصات هندسی و وزنی آزمون VLIP اسمیت و همکاران[۱۳].

مشخصه	مقدار
قطر صفحه فولادی مدور	۱۲۷۰ میلی‌متر
ضخامت صفحه فولادی	۳۲/۵ میلی‌متر
وزن صفحه فولادی	۳۲۴ کیلوگرم
نوع ماده منفجره و وزن آن	۳ کیلوگرم TNT
ارتفاع صفحه از سطح زمین	۹۰۰ میلی‌متر
فاصله صفحه از ماده منفجره	۴۰۰ میلی‌متر

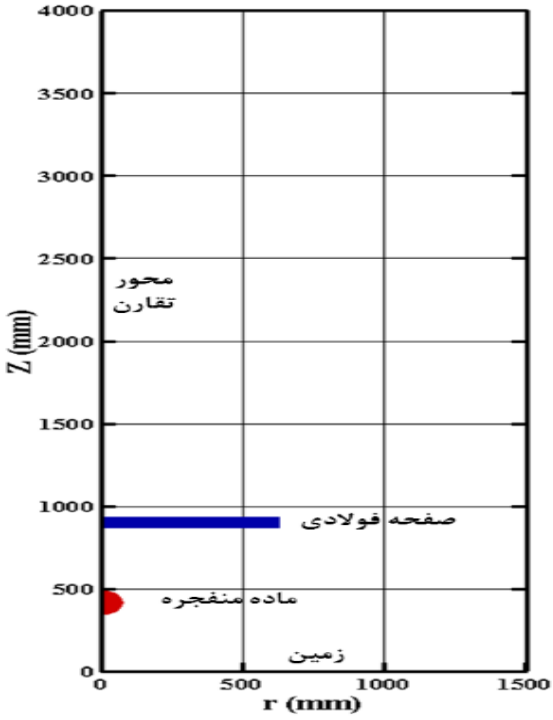
در شکل (۳) نحوه چیدمان به همراه تصاویر آزمون میدانی VLIP که توسط اسمیت و همکاران [۱۳] گزارش‌شده، از لحظه انفجار تا برخورد موج شاک به ورق فولادی و پرتاب صفحه به سمت بالا نشان داده‌شده است. مشاهده می‌شود که صفحه فولادی VLIP به صورت کامل در گوی آتش انفجار قرارگرفته است. وجود میله شاخص کمک می‌کند که در چنین شرایطی ثبت سرعت حرکت صفحه امکان‌پذیر شود.



شکل ۳- پایین سمت چپ: چیدمان آزمون VLIP، بالا و پایین سمت راست: تعدادی از تصاویر آزمون میدانی[۱۳].

ناحیه محاسباتی در شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار AUTODYN در شکل (۴) نشان داده‌شده است. ابعاد این ناحیه ۱۵۰۰ در ۴۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است. متناسب با شرایط آزمون، مسئله به صورت دوبعدی تقارن محوری حل‌شده است. مرز پایینی در شکل (۴)، سطح زمین و مرز سمت چپ محور تقارن است. برای دو سطح دیگر از شرط مرزی خروج سیال استفاده‌شده است. از وابسته نبودن نتایج به شبکه محاسباتی اطمینان حاصل‌شده و پس از ارزیابی این موضوع تعداد ۲۰۰۰۰۰ المان برای گسسته سازی میدان حل در نظر گرفته‌شده است. سرعت اولیه صفحه فولادی به همراه ایمپالس کل حاصل از شبیه‌سازی عددی آزمون VLIP توسط نرم‌افزار هیدرودینامیکی AUTODYN در مقایسه با نتایج تجربی اسمیت و

همکاران[۱۳] در جدول (۲) ارائه‌شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، ایمپالس ویژه به دست آمده از شبیه‌سازی، کمتر از ۹٪ با ایمپالس به دست آمده از آزمون تجربی اختلاف دارد.



شکل ۴- ناحیه محاسباتی در شبیه‌سازی عددی VLIP توسط نرم‌افزار AUTODYN.

منظور از ایمپالس ویژه، ایمپالس بر واحد سطح صفحه فولادی است. به این نکته باید توجه داشت که روش‌های تجربی هم با تمام اهمیتی که از نظر نتایج حاصله دارا است، علی‌الخصوص در مسائل انفجاری که همه رویدادها در زمان‌های بسیار کوتاه (میلی‌ثانیه) رخ می‌دهند و در کنترل کامل نیستند نیز خالی از خطا نخواهند بود؛ لذا بخشی از این اختلاف به همین موضوع برمی‌گردد. عوامل دیگر ازجمله در نظر گرفتن زمین به عنوان یک جسم کاملاً صلب و همچنین افت فشار به واسطه شرط مرزی خروج سیال نیز می‌تواند بر وجود اختلاف بین نتایج عددی و تجربی تأثیرگذار باشند. در مجموع اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی در حد قابل‌قبول و مطلوبی است و لذا می‌توان به نتایج شبیه‌سازی اطمینان کرد.

جدول ۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی آزمون VLIP با نتایج تجربی اسمیت و همکاران[۱۳] برای ۳ کیلوگرم ماده منفجره TNT.

	سرعت اولیه صفحه فولادی (m/s)	ایمپالس کل (N.s)	ایمپالس ویژه (bar.ms)
شبیه‌سازی عددی	۵/۳۵	۱۷۳۳/۵	۱۳/۵۴
آزمون تجربی	۵/۹	۱۹۰۲	۱۴/۸۶

۴- نتایج و بحث

همان‌گونه که پیش از این ذکر شد، یکی از مبناهای پرکاربرد در تعیین معادل TNT مواد منفجره، ایمپالس ویژه فاز مثبت موج بلاست است. برای پیش‌بینی ایمپالس مثبت موج بلاست، می‌توان از معادله (۱) که یک رابطه تجربی است استفاده نمود[۲]. این رابطه برای محاسبه ایمپالس مثبت موج بلاست خرج کروی در هوای آزاد (یعنی بدون انعکاس موج از سطح زمین) به کار می‌رود. در این معادله، Z فاصله مقیاس شده بر حسب $m/kg^{1/3}$ است که توسط معادله (۲) تعریف می‌شود. در این معادله R فاصله شعاعی از مرکز انفجار (بر حسب متر) و W وزن معادل TNT (بر حسب کیلوگرم) ماده منفجره است.

نمودار تغییرات ایمپالس مثبت موج بلاست برای خرج TNT از ۱ تا ۵ کیلوگرم در فاصله ۴ متری از مرکز انفجار با استفاده از معادله (۱) استخراج شده و در شکل (۵) رسم شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش وزن ماده منفجره، به همان نسبت ایمپالس افزایش پیدا نمی‌کند. به عنوان مثال با افزایش وزن TNT از ۱ به ۳ کیلوگرم (افزایش ۳۰۰ درصدی وزن)، تنها در حدود ۴۰ درصد به ایمپالس در فاصله ۴ متری از مرکز انفجار افزوده خواهد شد. این بدان معنی است که اگر ماده منفجره جدیدی داشته باشیم که ایمپالس مثبت ۱ کیلوگرم از آن در فاصله ۴ متری از مرکز انفجار به اندازه ۴۰ درصد نسبت به ایمپالس ۱ کیلوگرم TNT بیشتر باشد، معادل TNT آن در مقیاس ایمپالس مثبت موج بلاست برابر ۳ خواهد بود. نمودار تغییرات ایمپالس مثبت نسبت به ایمپالس مثبت ۱ کیلوگرم TNT در محدوده وزنی ۱ تا ۵ کیلوگرم در شکل (۶) رسم شده است.

در ادامه ایمپالس پیش‌بینی‌شده برای دستگاه VLIP در محدوده وزنی ۱ تا ۵ بررسی و نتیجه آن با شکل (۶) مقایسه خواهد شد.

$$I = \frac{0.067 \sqrt[2]{1+\left(\frac{Z}{0.23}\right)^4}}{Z^2 \sqrt[3]{1+\left(\frac{Z}{1.55}\right)^3}} \quad \text{(bar.ms)} \qquad (۱)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \qquad (۲)$$

پیش از این در خصوص دقت شبیه‌سازی آزمون VLIP توسط نرم‌افزار AUTODYN اطمینان حاصل شد و نتایج آن در جدول (۲) ارائه گردید. حال توسط نرم‌افزار مذکور و برای همان هندسه‌ای که مشخصات آن در بخش صحت‌سنجی آمده است، ایمپالس وارده به صفحه فولادی در آزمون VLIP برای خرج TNT با وزن ۱ تا ۵ کیلوگرم محاسبه می‌شود. در این محاسبات، فاصله صفحه فولادی از مرکز ماده منفجره برابر با ۴۵ سانتیمتر در نظر گرفته‌شده است. نتایج این محاسبات را می‌توان در قالب نمودار در شکل (۷) مشاهده نمود. اعداد ایمپالس در این نمودار با اعداد شکل (۵) از یک مرتبه نیستند. چرا که فاصله از مرکز انفجار برای این دو نمودار کاملاً باهم متفاوت است. با این حال چون هدف این تحقیق، بررسی امکان استفاده از VLIP برای تعیین معادل TNT ماده منفجره است، لذا نمودار تغییرات ایمپالس به دست آمده از VLIP برای ۱ تا ۵

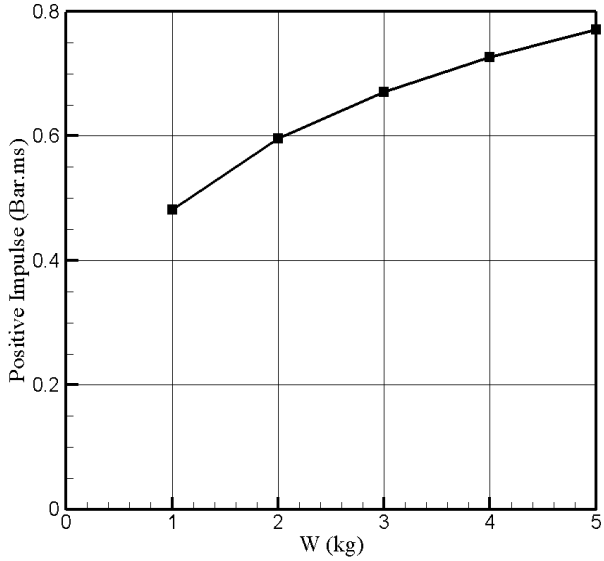
کیلوگرم TNT نسبت به ایمپالس ۱ کیلوگرم TNT استخراج‌شده و در شکل (۸) نشان داده‌شده است. از این نمودار مشاهده می‌شود که در فاصله ۴۵ سانتیمتری از مرکز انفجار، به عنوان مثال ایمپالس ویژه وارده به صفحه فولادی در اثر انفجار ۳ کیلوگرم TNT در حدود ۲/۳ برابر بیشتر از ایمپالس ناشی از ۱ کیلوگرم TNT است. این در حالی است که با توجه به شکل(۶) ایمپالس مثبت موج بلاست همین خرج ۳ کیلوگرمی در فاصله ۴ متری از مرکز انفجار در حدود ۱/۴ بیشتر از ایمپالس مثبت ناشی از ۱ کیلوگرم TNT خواهد بود.

اختلاف بین نسبت ایمپالس به دست آمده از انتگرال‌گیری فاز مثبت موج بلاست و نسبت ایمپالس به دست آمده از آزمون VLIP بیانگر این موضوع مهم است که استفاده از VLIP برای تعیین معادل TNT مواد منفجره نیاز به یکسری پیش‌شرط دارد. ازجمله مهم‌ترین آن‌ها اینکه لازم است هندسه دستگاه و وزن صفحه فولادی و فاصله آن از مرکز انفجار و همچنین فاصله از سطح زمین در ابتدا تثبیت شود و از آزمونی به آزمون بعد تغییر نکند. سپس با استفاده از این دستگاه برای وزن‌های مختلف TNT، آزمون اندازه‌گیری ایمپالس وارده به صفحه فولادی انجام پذیرد. به این ترتیب نموداری تجربی مشابه با شکل (۷) یا (۸) به دست آید تا از آن به عنوان مبنایی برای تعیین معادل TNT سایر مواد منفجره استفاده نمود. با توجه به اینکه دستگاه VLIP برای بازه وزنی محدودی از ماده منفجره استفاده می‌شود، استفاده از چنین نموداری برای تعیین معادل TNT مواد منفجره کاملاً توجیه‌پذیر است. می‌توان برای ساده کردن کار، نموداری تجربی برای ارتفاع پرتاب صفحه و یا سرعت اولیه آن بر حسب وزن TNT مورد آزمون استخراج کرد و با استفاده از آن بدون انجام محاسبات اضافی وزن معادل TNT مواد منفجره جدید را به دست آورد. تهیه چنین نموداری بهتر است بر مبنای آزمون‌های تجربی انجام پذیرد اما در ادامه‌ی تحقیق حاضر برای نمونه این کار با اتکا بر داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی عددی آزمون VLIP انجام می‌شود.

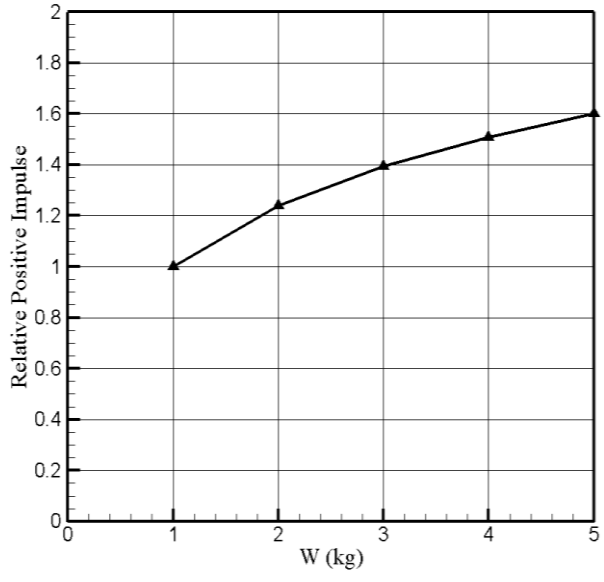
همان‌گونه که پیش از این ذکر شد، نتایج آزمون VLIP برای دستگاهی که مشخصات آن در جدول (۱) آمد، با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN به دست آمد. این شبیه‌سازی‌ها برای خرج TNT در محدوده وزنی ۱ تا ۵ کیلوگرم انجام‌شده است. نمودار سرعت به دست آمده برای صفحه فولادی در شکل(۹) و نمودار ارتفاع پرتاب صفحه در شکل (۱۰) قابل‌مشاهده است. ارتفاع پرتاب با صرف‌نظر کردن از نیروی پسآ با استفاده از معادله (۳) به دست آمده است. در این رابطه، h ارتفاع عمودی پرتاب، V سرعت اولیه و g شتاب جاذبه است. با توجه به تجهیزات موجود در میدان آزمون می‌توان یکی از دو پارامتر سرعت اولیه یا ارتفاع پرتاب صفحه فولادی را به عنوان مبنای تعیین معادل TNT انتخاب کرد.

$$h = \frac{V^2}{2g} \qquad (۳)$$

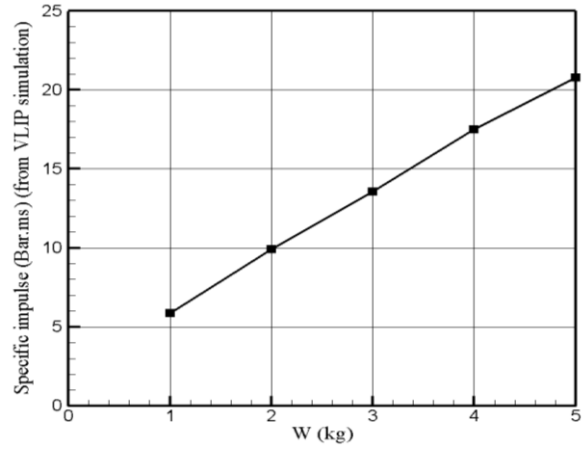
برای ساده‌تر شدن استفاده از VLIP، با برازش منحنی‌هایی بر داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی، روابطی بین وزن خرج TNT با سرعت اولیه و ارتفاع پرتاب صفحه فولادی استخراج‌شده است. معادله (۴) مقدار وزن TNT بر حسب سرعت اولیه صفحه فولادی و معادله (۵) وزن TNT بر حسب ارتفاع پرتاب صفحه را به دست می‌دهند. معیار کیفیت برازش (R^2) برای این دو نمودار برابر ۰/۹۹۸ است. نمودار این روابط به ترتیب در اشکال (۱۱) و (۱۲) رسم شده‌اند.



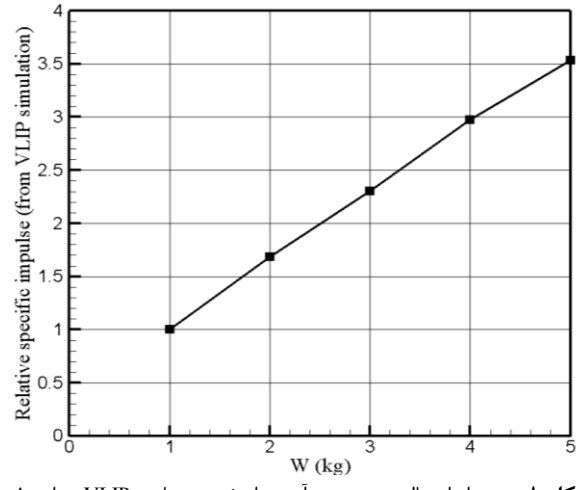
شکل ۵- نمودار تغییرات ایمپالس ویژه فاز مثبت موج بلاست برای خرج TNT از ۱ تا ۵ کیلوگرم در فاصله ۴ متری از مرکز انفجار با استفاده از معادله (۱).



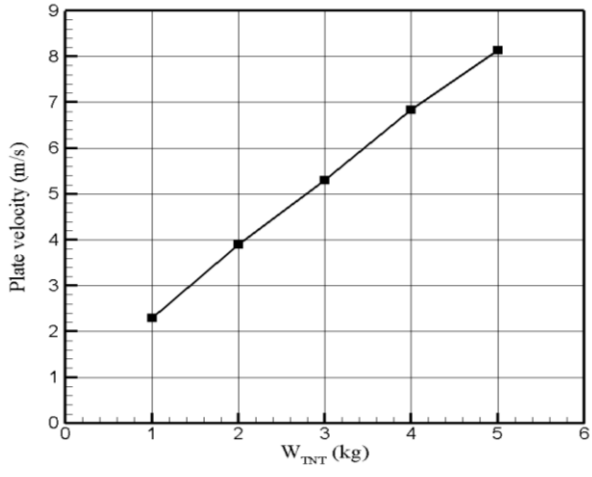
شکل ۶- نمودار ایمپالس مثبت موج بلاست نسبت به ایمپالس ۱ کیلوگرم TNT در فاصله ۴ متری از مرکز انفجار برای ۱ تا ۵ کیلوگرم TNT.



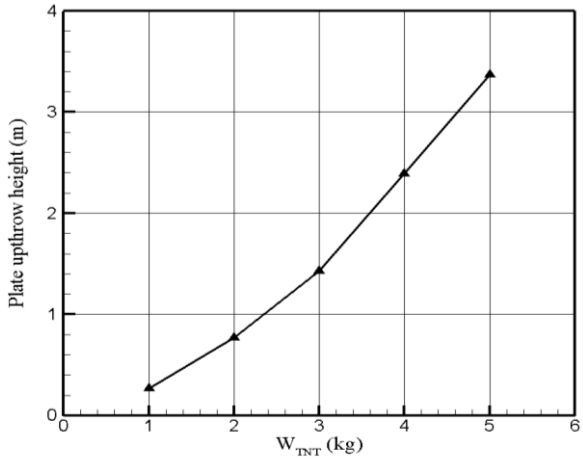
شکل ۷- نمودار تغییرات ایمپالس ۱ تا ۵ کیلوگرم خرج TNT حاصل از شبیه‌سازی دستگاه VLIP توسط نرم‌افزار AUTODYN. صفحه فولادی در فاصله ۴۵ سانتیمتری بالای ماده منفجره در نظر گرفته‌شده است.



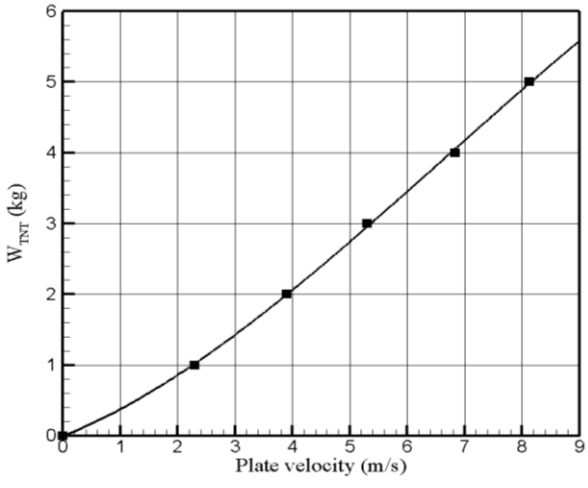
شکل ۸- نمودار ایمپالس به دست آمده از شبیه‌سازی VLIP برای ۱ تا ۵ کیلوگرم TNT نسبت به ایمپالس ۱ کیلوگرم TNT. صفحه فولادی در فاصله ۴۵ سانتیمتری بالای ماده منفجره در نظر گرفته‌شده است.



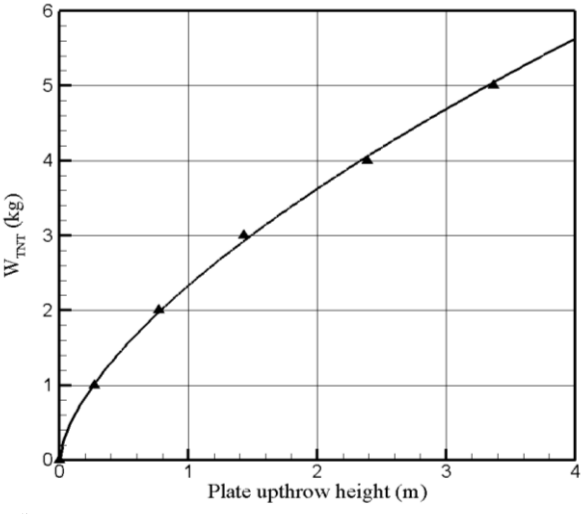
شکل ۹- نمودار سرعت صفحه فولادی بر حسب وزن خرج TNT، به دست آمده از شبیه‌سازی عددی آزمون VLIP.



شکل ۱۰- نمودار ارتفاع عمودی پرتاب صفحه فولادی بر حسب وزن خرج TNT، به دست آمده از شبیه‌سازی عددی آزمون VLIP.



شکل ۱۱- برازش چندجمله‌ای درجه سه بر داده‌های حاصل از شبیه‌سازی آزمون VLIP برای سرعت پرتاب صفحه فولادی.



شکل ۱۲- برازش منحنی توانی بر داده‌های حاصل از شبیه‌سازی آزمون VLIP برای ارتفاع پرتاب صفحه فولادی.

حال با داشتن این روابط و نمودارها، معادل TNT یک خرج جدید بر اساس آزمون VLIP به سادگی قابل تعیین خواهد بود. روش کار به این ترتیب خواهد بود که ابتدا مقداری از ماده مورد نظر برای آزمون انتخاب می‌شود (وزن ماده مذکور باید به اندازه‌ای باشد که سرعت و یا ارتفاع پرتاب صفحه فولادی در بازه‌ای که معادلات (۴) و(۵) اعتبار دارند قرار بگیرد). حال با استفاده از این روابط، وزن معادل TNT (W_{TNT}) ماده منفجره مذکور به دست می‌آید. پس از آن با استفاده از معادله (۶)، از تقسیم W_{TNT} بر وزن خود ماده منفجره (W_{ex})، عدد معادل TNT آن ماده بر اساس آزمون VLIP استخراج خواهد شد.

$$W_{TNT} = -5.714 + 3.251V + 5.991V^2 - 3.011V^3 \quad \text{for} \quad V < 8.2 \text{ m/s} \tag{۴}$$

$$W_{TNT} = exp(6.358\ log(h) + 8.465) \quad \text{for} \quad h < 3.4 \text{ m} \tag{۵}$$

$$TNT_{eq} = \frac{W_{TNT}}{W_{ex}} \tag{۶}$$

لازم به ذکر است که این امکان وجود دارد که نمودار ایمپالس مقیاس شده بر حسب فاصله مقیاس شده Z را به عنوان مبنای تعیین معادل TNT قرارداد؛ اما در عمل به دلیل اینکه دو دستگاه VLIP مختلف ممکن است از لحاظ وزن و شکل هندسی و فاصله صفحه از ماده منفجره و همچنین فاصله آن‌ها از سطح زمین با یکدیگر متفاوت باشند، لذا مقیاس کردن ایمپالس و فاصله نه‌تنها کمک خاصی به موضوع نمی‌کند بلکه به حجم محاسبات و پیچیدگی آن نیز می‌افزاید.

نکته‌ای که ذکر مجدد آن ضرورت دارد این است که لزوماً معادل TNT به دست آمده از روش آزمون VLIP با معادل TNT به دست آمده از آزمون بلاست در هوای آزاد یکسان نخواهد بود. برای این تفاوت چند دلیل می‌توان برشمرد. اول اینکه معادل TNT مواد منفجره بافاصله از مرکز انفجار تا حد قابل‌توجهی می‌تواند تغییر کند[۱۷]؛ لذا حتی در آزمون بلاست در هوای آزاد نیز با اندازه‌گیری و ثبت پروفیل موج بلاست در فواصل مختلف از مرکز انفجار و تحلیل آن ممکن است اعداد متفاوتی برای معادل TNT یک ماده منفجره به دست آید. دوم اینکه در آزمون بلاست در هوای آزاد، علی‌الخصوص برای خرج‌های انفجار حجمی، به طور معمول ایمپالس مثبت موج بلاست به عنوان مبنای تعیین معادل TNT استفاده می‌شود[۱, ۳, ۴, ۸, ۹, ۱۷-۲۰]. این در حالی است که در آزمون VLIP، ایمپالس کل موج بلاست به همراه ایمپالس ناشی از امواج بازگشتی از سطح زمین بر سرعت گرفتن و پرتاب صفحه فولادی تأثیرگذار خواهند بود. سومین دلیل این است که در آزمون بلاست در هوای آزاد، حس‌گرهای فشار در فاصله‌ای خارج از گوی آتش ناشی از انفجار مستقر می‌شوند؛ لذا برای خرج‌هایی که واکنش‌های پس‌سوز قابل‌توجه دارند، تأثیر این واکنش‌ها نیز در پروفیل موج فشار ثبت‌شده دخیل خواهند بود؛ اما در آزمون VLIP، صفحه فولادی در فاصله خیلی نزدیک به ماده منفجره و در داخل گوی آتش قرار می‌گیرد.

این وضعیت به وضوح در شکل (۳) قابل‌مشاهده است؛ لذا ممکن است بخشی از واکنش‌های پس‌سوز بعد از عبور محصولات انفجار از صفحه فولادی تکمیل شوند. همچنین ممکن است امواج فشاری بازگشتی از سطح صفحه فولادی و سطح زمین نیز بر تکمیل‌تر شدن واکنش‌های پس‌سوز تأثیر بگذارد. مجموع این تفاوت‌ها باعث می‌شود که بین معادل TNT به دست آمده از این دو روش اختلاف وجود داشته باشد.

۵- نتیجه‌گیری

آزمون ایمپالس متری توسط دستگاه VLIP به طور معمول برای اندازه‌گیری و مقایسه قدرت دو ماده منفجره با یکدیگر استفاده می‌شود. این دستگاه علی‌الخصوص برای مین‌های ضدتانک و ضد خودرو کاربرد بیشتری دارد. در مواردی نیز به عنوان ابزاری برای سنجش قدرت بلاست خرج‌های انفجار حجمی در فضای نیمه بسته به کار گرفته‌شده است. در تحقیق حاضر به بررسی امکان و نحوه استفاده از آزمون VLIP برای تعیین معادل TNT مواد منفجره پرداخته شد. در این راستا از روابط تجربی برای محاسبه ایمپالس مثبت موج بلاست و از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار AUTODYN برای پیش‌بینی ایمپالس ویژه وارده به صفحه VLIP استفاده شد. مشاهده شد که استفاده از VLIP برای تعیین معادل TNT مواد منفجره نیاز به یکسری پیش‌شرط دارد. ازجمله مهم‌ترین آن‌ها اینکه لازم است هندسه دستگاه و وزن صفحه فولادی و فاصله آن از مرکز انفجار و همچنین فاصله از سطح زمین در ابتدا تثبیت شود و از آزمونی به آزمون بعد تغییر نکند. سپس با استفاده از این دستگاه برای وزن‌های مختلف TNT آزمون اندازه‌گیری ایمپالس وارده به صفحه فولادی انجام پذیرد. حال با داشتن پیش‌بینی از عکس‌العمل صفحه VLIP در برابر انفجار وزن‌های مختلف TNT، می‌توان معادل TNT خرج‌های جدید را با استفاده از این آزمون به دست آورد. در این تحقیق، برای ساده‌سازی این رویه، روابطی برای محاسبه معادل TNT خرج‌های جدید بر اساس ارتفاع یا سرعت پرتاب صفحه VLIP ارائه شد. این روابط به کمک شبیه‌سازی عددی آزمون VLIP به دست آمدند. هرچند که شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با نتایج معتبر تجربی اعتبارسنجی شدند و از این رو روابط مذکور قابل‌اعتمادند؛ اما در عمل بهتر است با انجام تعدادی آزمون با ماده منفجره TNT در بازه وزنی مورد نیاز، به روشی که در این مقاله پیشنهاد شد روابطی تجربی برای استخراج معادل TNT مواد منفجره توسط دستگاه VLIP به دست آورد.

مرجع‌ها

[1] Hahma, A.; Palovuori, K.; Solomon, Y. "TNT-Equivalency of Thermobaric Explosives"; 36th International Annual Conference of ICT 2005, 632-644.

[2] Kinney, F.; Graham, K. J. "Explosives Shocks in Air"; 2nd ed. Springer, New York, 1985.

[3] Dewey, J. M. "TNT Equivalency of Explosive Sources"; MABS 18, 18th Symposium on Military Applications of Blast and shock 2004.

[4] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview"; EJSE Int. J. 2007, 76-91.

[5] Caggiano, T. "Calculation of TNT Air-Blast Equivalencies for Surface Bursts"; A D-775 422, Picatinny Arsenal: Dover, New Jersey, 1973.

[6] Cooper, P. W. "Explosives Engineering"; Wiley-VCH: New York, 1996.

[7] Fourmann, J.; Coustou, A.; Aubert, H.; Pons, P.; Luc, J.; Lefrançois, A.; Lavayssière, M.; Osmont, A. "Wireless Pressure Measurement in Air Blast Using PVDF Sensors"; Sensors, 2016 IEEE.

[8] Lee, J. W.; Lee, J.; Kuk, J. H.; Song, S.; Choi, K. Y. "Air-Blast Characteristics of an Aluminized Explosive"; Agency for Defense Development, Taejon, Korea, 1992.

[9] Anderson, J. G.; Katselis, G.; Caputo, C. "Analysis of Generic Warhead Part I: Experimental and Computational Assessment of Free Field Overpressure"; DSTO-1313, Weapons Systems Division, Systems and Sciences Laboratory, South Australia, Edinburgh, July 2002.

[10] Goodman, H. J.; Giglio-Tos, L. "Equivalent Weight Factor for Four Plastic Bounded Explosives: PBX-108, PBX-109, AFX-103, and AFX-7020"; US Army Armament Research and Development Command, Ballistic Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1978.

[11] Ngo, T.; Lumantarna, R.; Whittaker, A.; Mendis, P. "Quantification of the Blast-Loading Parameters of Large-Scale Explosions"; J. Struct. Eng. 2015, 141.

[12] Anastacio, A. C.; Knock, C. "Radial Blast Prediction for High Explosive Cylinders Initiated at Both Ends"; Propellant, Explos., Pyrotech. 2016, 41, 682 – 687.

[13] Smith, P.; Mostert, F.; Snyman, I. M. "Comparison of Methods to Measure the Blast of an Explosive Charge"; 24th International Symposium on Ballistics 2008.

[14] Mostert, F. J.; Toit, C. E. D. "Measuring the Blast Output of Aluminized Explosive Charges in a Semi-Confined Environment"; Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium 2010.

[15] Igra, O.; Seiler, F. "Experimental Methods of Shock Wave Research"; Springer International Publishing, Switzerland, 2016.

[16] Koker, P. M.; Pavkovic, N.; Dyk, J. T. V.; Stecker, I. "Measurement of Impulse Generated by the Detonation of Anti-Tank Mines by Using the VLIP Technique"; International Symposium on Humanitarian Demining 2009, 31-39.

[17] Esparza, E. D. "Blast Measurements and Equivalency for Spherical Charges at Small Scaled Distances"; Int. J. Impact Eng. 1986, 4, 23-40.

[18] Kingery, C. N.; Bulmas, G. "Airblast Parameters From TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst"; Technical Report ARBRL-TR-02555, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 1984.

[19] Rowland, R. H. "Blast and Shock Measurement, State-of-the-Art Review"; DASA, 1967.

[20] Gould, K. E.; Tempo, K. "High-Explosive Field Tests, Explosion Phenomena and Environmental Impacts"; DNA 6187F, Defence Nucelear Agency, USA, 1981.