

اثر پودر آلومینیوم بر قابلیت نفوذ یک نمونه خرج گود خاص

احمد ملائی^۱، محمد رضا رحیمی پور^{۲*}، محمد علی دهنوی^۳

۱- دانشجوی دکترا، ۲- استاد پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج ۳- دانشیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران
(تاریخ وصول: ۹۳/۱۱/۸، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۰۳)

چکیده

خرج گودها با ایجاد جت بسیار سریع حاصل از متلاشی شدن یک لاینر فلزی در اثر انفجار یک ماده منفجره، موجب انهدام زره می‌شوند. فرمولاسیون ماده منفجره از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در میزان نفوذ یک خرج گود است. مواد منفجره بکار رفته در این مهمات عمدتاً دارای سرعت انفجار و چگالی بالایی هستند. در این تحقیق، ترکیباتی بر پایه HTPB و حاوی مقادیر مختلف پودر آلومینیوم (از صفر تا ۴۰ درصد وزنی) در یک خرج گود خاص مورد مطالعه قرار گرفتند. خرج گودهای شارژ شده، با فاصله توقف ۲۵ mm بر روی یک هدف استوانه‌ای از جنس فولاد نرم تست شدند. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد مربوط به فرمولاسیون فاقد پودر آلومینیوم است. جت خرج گود حاصل از انفجار این فرمولاسیون در مقایسه با دیگر PBX ها دارای بیشترین عمق و حجم نفوذ می‌باشد. با افزایش پودر آلومینیوم، میزان نفوذ در هدف به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی نفوذ با نرم‌افزار LS-DYNA و مقایسه آن با مقادیر تجربی نشان داد که با افزایش میزان پودر آلومینیوم، تفاوت نتایج این دو روش بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خرج گود، تست نفوذ، پودر آلومینیوم، فرمولاسیون PBX.

Effect of Aluminum Powder on Penetration Capability of a Specific Shaped Charge

A. Mollaei¹, M. R. Rahimipour^{2*}, M. A. Dehnavi³

1, 2- Materials and Energy Research Center, Karaj

3- Imam Hossein University, Tehran

(Received: 16/12/2014, Accepted: 04/05/2015)

Abstract

Shaped charges defeat armors by means of high velocity jets formed by the collapse of a metallic liner as a result of the detonation of an explosive. The explosive formulation is an important factor influencing the properties of a shaped charge. Explosive charges used in penetrating devices have usually high detonation velocity and high density. In this research, five compositions based on HTPB having different amount of aluminum (0 up to 40 percent by weight) were examined in a specific shape charge. After charging the samples by PBX materials, the penetration experiments were carried out at 25 mm stand-off distance on mild steel targets. The results showed high penetration capability of aluminum-free formulation. The jet resulted by detonation of this charge has a maximum depth and volume of penetration in comparison with other PBXs. There is a nonlinear decrease in the penetration of the shaped charges by adding aluminum in the formulation of explosives. The difference of results obtained via experimental and numerical simulation method (LS-DYNA) increases in compositions containing more percentage of aluminum powder.

Keywords: Shaped Charge, Penetration, Aluminum Powder, PBX Formulation.

* Corresponding Author E-mail: m-rahimipoor@merc.ac.ir

"Journal of Energetic Materials" Volume 10, No.1, Serial No.25, Spring 2015

۱- مقدمه

درصد بایندر HTPB و ۸۵ درصد فیلر (ماده منفجره RDX و پودر آلومینیوم) مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیقات عمدتاً عملکرد انفجاری فرمولاسیون‌های حاوی آلومینیوم را در سیستم‌های بلسر مورد بررسی قرار داده‌اند و اثر آلومینیوم در سرچنگی‌های نفوذ کننده مطالعه نشده است. در تحقیق حاضر اثر افزایش پودر آلومینیوم بر پارامترهای نفوذ یک خرج گود خاص به دو روش شبیه‌سازی و تجربی بررسی شده است. سایر پارامترهای تأثیر گذار بر میزان نفوذ ثابت نگه داشته شد.

۲- بخش تجربی

۱-۲- مواد و تجهیزات

برای تهیه نمونه‌ها از گرید صنعتی پلی‌بوتادیان با انتهای هیدروکسی^۴ (HTPB) به عنوان جزء اصلی بایندر، آکتوژن (HMX) به عنوان ماده منفجره و پودر آلومینیوم (۲۵μ) به عنوان سوخت استفاده شد. سایر مواد از جمله نرم‌کننده دی‌اکتیل آدیپات (DOA)، عامل پخت ایزوفورن دی‌ایزوسیانات (IPDI)، کاتالیزور دی‌بوتیل‌تین دی‌لورات (DBTDL)، ترکننده لیسیتین و آنتی‌اکسیدان ۲،۲ متیلن بیس (۴-متیل ۶-ترشیو بوتیل فنل) تولید شرکت Merck آلمان بودند. ماده منفجره C4 با گرید صنعتی به عنوان خرج بوستر در تست‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. از یک مخلوط کن دو پروانه‌ای با چرخش سیاره‌ای و دارای حجم مفید ۲ لیتر با ظرف دوجداره و امکان ایجاد خلأ جهت اختلاط مواد اولیه استفاده شد. مخلوط حاصل در آون ساخت شرکت Memmert آلمان پخت شد. چگالی نمونه‌ها به روش غوطه‌وری و با بهره‌گیری از ترازوی Mettler Toledo مدل AG285 ساخت سوئیس اندازه‌گیری شد. برای آغاز انفجار خرج گود از چاشنی الکتریکی آنی M8 استفاده شد. عمق و قطر حفره‌های حاصل از نفوذ خرج گود به کمک کولیس دیجیتالی مدل 1108-200-Q با دقت ۰/۰۱ mm ساخت شرکت INSIZE اندازه‌گیری شد.

۲-۲- تهیه فرمولاسیون‌ها

فرمولاسیون PBX های تهیه شده در این تحقیق از نوع ریخته‌گری-پخت^۵ و بر پایه رزین HTPB می‌باشد. این فرمولاسیون‌ها در مقدار پودر آلومینیوم و HMX با یکدیگر تفاوت دارند. درصد پودر آلومینیوم از صفر تا ۴۰ درصد وزنی متغیر بوده، با افزایش پودر آلومینیوم، از وزن ماده منفجره HMX کاسته می‌شود ولی میزان بایندر (بایندر) تغییری نداشته است. اجزاء PBX های تهیه شده در جدول (۱) ارائه شده است. برای تهیه نمونه‌های ۵۰۰ گرمی از هر فرمولاسیون، ابتدا بخشی از اجزاء بایندر (HTPB، DOA، آنتی‌اکسیدان و لیسیتین) پس از توزین با دقت

در سرچنگی‌های خرج گودی، با انفجار جهت‌دار و کنترل شده ماده منفجره در پشت یک لاینر فلزی قیفی شکل، جریانی از فلز به نام جت با انرژی جنبشی بالا تشکیل می‌شود که موجب انهدام هدف می‌گردد. از خرج گودها در سلاح‌های ضد زره استفاده می‌شود. عملکرد سرچنگی‌های خرج گود به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به چگالی، فشار و سرعت انفجار خرج، جنس و هندسه لاینر، نقطه آغازش و همچنین فاصله توقف اشاره کرد [۱ و ۲]. در یک پرتابه مشخص، با افزایش سرعت انفجار، فشار انفجار و چگالی خرج، انرژی جنبشی لاینر نفوذ کننده افزایش یافته و در نتیجه با افزایش سرعت جت، نفوذ بیشتری اتفاق می‌افتد [۳ و ۴]. از طرفی طراحی سرچنگی‌هایی با قابلیت عملکردی متنوع از موضوعات مهم تحقیق در زمینه مواد پرنرژتی محسوب می‌شود [۵]. این سرچنگی‌ها همزمان دارای ویژگی نفوذ پذیری همراه با ایجاد موج انفجار قوی و ایمپالس^۱ و حرارت مؤثر هستند. پودر آلومینیوم به عنوان سوخت در ترکیبات منفجره موجب واکنش‌های پس‌سوزی^۲ می‌شود که این فرایند با ایجاد موج فشار پایین‌تر ولی با ماندگاری بالایی همراه بوده که نهایتاً به افزایش قدرت بلسر و ایمپالس انفجار می‌انجامد. پس‌سوزی پودر آلومینیوم شامل واکنش‌های آن با محصولات انفجار و اکسیژن محیط است [۶ و ۷]. هر چند استفاده از فلز آلومینیوم در فرمولاسیون مواد منفجره منجر به کاهش سرعت انفجار و در نتیجه کاهش قدرت نفوذ خرج گود می‌شود ولی اثرات جانبی آن از جمله افزایش حرارت، ایمپالس و ایجاد حباب زیاد در اثر واکنش آن با آب، می‌تواند در کارایی سرچنگی‌های زیر آبی دو منظوره بسیار مؤثر باشد.

تا به حال تحقیقات بسیار متنوعی برای ارزیابی اثر پودر آلومینیوم در مواد منفجره پلاستیکی^۳ (PBX) انجام شده است. در این تحقیقات اثر پودر آلومینیوم بر پارامترهایی نظیر خواص انفجاری، حرارتی و مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۸ و ۹]. گوردانا و همکاران [۱۰]، اثر مقادیر مختلف پودر آلومینیوم را بر چگالی، خواص مکانیکی (استحکام کششی، مدول الاستیک و ازدیاد طول)، دمای تجزیه و خواص انفجاری (سرعت و فشار انفجار) بررسی کردند. در تحقیقی دیگر، تأثیر افزایش ۲۰ درصدی پودر آلومینیوم و همچنین توزیع اندازه ذرات ماده منفجره HMX بر طول عمر و خواص حرارتی (از جمله گرمای ویژه، ضریب انبساط حرارتی، دمای خود اشتعالی و دمای انفجار) سه نمونه PBX مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. پراکاش و همکاران [۱۲]، اثر میزان پودر آلومینیوم بر چگالی، سرعت انفجار، ماکزیمم فشار انفجار، مدت زمان اعمال فشار، ایمپالس، پایداری حرارتی، پایداری تحت خلأ و حساسیت به ضربه و اصطکاک را برای فرمولاسیون‌هایی حاوی ۱۵

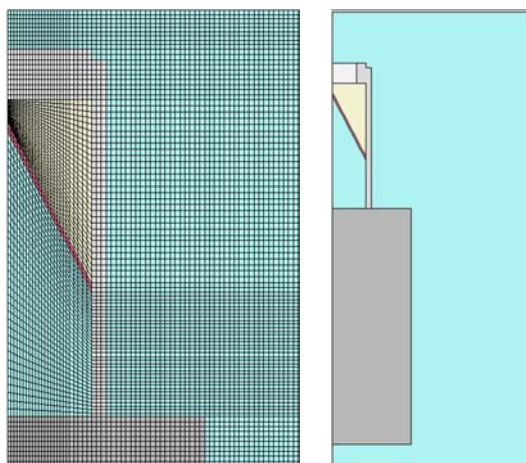
4- Hydroxyl Terminated Polybutadiene
5- Cast-Cure

1- Impulse
2- After Burning Reactions
3- Plastic Bonded Explosives

پس از مونتاژ لاینر کیفی شکل در بدنه، خرج کامپوزیتی PBX در پشت آن شارژ شده و بعد از بستن درپوش پلی اتیلنی، پخت صورت گرفت. این درپوش به منظور جلوگیری از افزایش حجم مواد در حین فرایند پخت بسته می‌شود. وزن متوسط مواد شارژ شده در حدود ۳۰ گرم بوده است. در ادامه و پس از پخت یک هفته‌ای در دمای ۷۰°C، درپوش پلی اتیلنی باز شده و به جای آن یک استوانه پلی اتیلنی مخصوص خرج منفجر کننده (بوستر) بسته شد. حجم داخلی این استوانه در حدود ۵ cm³ بوده که با ۸ گرم ماده منفجره C4 پر شد.

۲-۴- شبیه‌سازی نفوذ در هدف فولادی

برای شبیه‌سازی شکل‌گیری و نفوذ جت حاصل از عملکرد خرج گود حاوی PBX مختلف در هدف فولادی، از نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده است. در این شبیه‌سازی، انتخاب صحیح مدل ماده و معادله حالت، همچنین اعمال صحیح شرایط فیزیکی مسئله از قبیل شرایط مرزی و استفاده از المان‌های متناسب با نوع مسئله دارای اهمیت است. با توجه به مقارن بودن شکل خرج گود و هدف و به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه، برای مدل‌سازی از المان‌های پوسته با تقارن محوری نسبت به محور Y استفاده شده است. اجسام همانند شکل (۲) مدل شده‌اند و برای مش‌بندی از مش‌های مربعی با اندازه حدود ۱ میلی‌متر استفاده شده است. تعداد نودها برابر ۲۵۹۴۲ و تعداد المان‌ها برابر ۲۵۵۹۶ المان است.



شکل ۲- مدل متقارن شبیه‌سازی و مش‌بندی بخش‌ها.

با توجه به این که خرج C4 به عنوان بوستر عمل می‌کند، تنها شرط اولیه مسئله نقطه شروع انفجار است که در وسط بوستر و در فاصله عمودی ۶ میلی‌متری از خرج اصلی قرار دارد. از آنجائی که انفجار خرج و تشکیل جت با تغییر فرم و اندازه بسیار زیادی همراه است، لذا نمی‌توان از روش المان محدود لاگرانژی برای حل مسئله استفاده کرد [۱۳]. از طرفی روش اویلری نیز به دلیل عدم توانایی در شناسایی دقیق سطوح تماس اجسام، کارایی لازم را ندارد. برای عبور از این نواقص دیدگاه جدیدی در نرم‌افزار

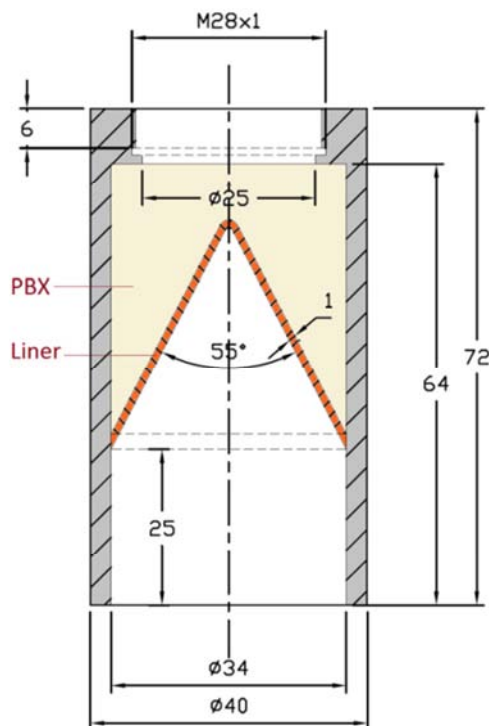
۰/۰۱ گرم در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و تحت خلأ به مدت ۱۵ دقیقه گاز زدایی شدند. سپس به ترتیب HMX و پودر آلومینیوم، هر کدام در سه مرحله به ظرف مخلوط کن اضافه شدند. در هر مرحله افزایش پودرهای جامد، عمل اختلاط به مدت ۱۰ دقیقه انجام می‌شد. در پایان عامل پخت IPDI و کاتالیزور DBTDL به مخلوط افزوده شد. مخلوط نهایی پس از اعمال خلأ تا ۰/۳ bar، به صورت دستی در قالب آزمون نفوذ (خرج گودی) ریخته‌گری و در آن به مدت یک هفته در دمای ۷۰°C پخت شد.

جدول ۱- فرمولاسیون‌های کامپوزیتی تهیه شده با مقادیر متفاوت اکتوزن و پودر آلومینیوم.

کد فرمولاسیون PBX	A00	A10	A20	A30	A40
بایندر	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
آکتوزن (HMX)	۸۴	۷۴	۶۴	۵۴	۴۴
پودر آلومینیوم	-	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰

۲-۳- معرفی خرج گود و نحوه مونتاژ نمونه‌ها

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، بمبلیت نفوذی استفاده شده در این تحقیق شامل سه قسمت اصلی بدنه، لاینر مسی و خرج PBX بوده است. بدنه از جنس فولاد ST-37 و به صورت یک استوانه به ضخامت ۳ mm، قطر بیرونی ۴۰ mm و ارتفاع ۷۲ mm ساخته شد. لاینر مسی دارای ضخامت ۱ mm و زاویه داخلی ۵۵° بوده است.



شکل ۱- طرح بمبلیت نفوذی مورد استفاده در تست‌های مقایسه‌ای.

تسلیم در نظر گرفته شده است. ضرایب مدل ماده لاینر مسی و پوسته و هدف فولادی در جدول (۲) نشان شده است.

جدول ۲- ضرایب مدل ماده مس (لاینر) [۱۶ و ۱۵] و فولاد (پوسته و هدف) [۱۷ و ۳].

ماده	چگالی (g/cm ³)	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	T _{Melt} (K)
مس OHFC	۸/۹۶	۸۶	۲۹۱	۰/۰۲۵	۰/۳۱	۱/۰۹	۱۳۵۶
ST-37	۷/۸۹	۷۹۲	۵۱۰	۰/۰۱۴	۰/۲۶	۱/۰۳	۱۸۰۰

مدل ماده استفاده شده برای تعریف خرج‌های PBX و بوستر از نوع شدیدالانفجار می‌باشد. پارامتر سوزش (F) در رابطه (۴) آزادسازی انرژی شیمیایی را برای شبیه‌سازی انفجار کنترل می‌نماید. در این رابطه P_{eos} فشار معادله‌ی حالت، V حجم نسبی و E چگالی انرژی داخلی در واحد حجم اولیه است.

$$P = FP_{eos}(V, E) \quad (۴)$$

ضرایب مدل ماده شدیدالانفجار برای خرج‌های مدل (PBX) با استفاده از کد CHEETAH و برای بوستر (C4) از مراجع موجود استخراج شده است [۴]. از آنجائی که در نمونه‌سازی خرج‌های PBX همیشه چگالی تجربی کمتر از مقدار تئوری (TMD) است، لذا در استخراج ضرایب مدل ماده فرمولاسیون‌های PBX، چگالی معادل با ۹۶ درصد مقدار TMD لحاظ شده تا به مقادیر تجربی آن نزدیک‌تر باشد. این ضرایب در جدول (۳) نشان داده شده‌اند:

جدول ۳- ثابت‌های مدل ماده شدیدالانفجار خرج‌های مدل و بوستر.

ماده منفجره	D_{ej} (cm/μs)	P_{ej} (Mbar)	چگالی (g/cm ³) TMD% = 96
A00	۰/۷۲۵۳	۰/۲۰۵۲	۱/۵۸۵۹
A10	۰/۶۹۴۵	۰/۱۷۷۴	۱/۶۱۰۳
A20	۰/۶۶۷۵	۰/۱۵۵۹	۱/۶۵۴۰
A30	۰/۶۳۸۳	۰/۱۳۵۶	۱/۶۹۹۶
A40	۰/۶۱۴۲	۰/۱۱۵۴	۱/۷۴۸۰
C4	۰/۸۱۹۰	۰/۲۸۰۰	۱/۶۰۱۰

۲-۴-۲- معادلات حالت

معادله حالت رابطه‌ای است که فشار را با چگالی ماده و انرژی داخلی مشخصه آن مرتبط می‌سازد. معادله حالت گرونایزن^۶ در فلزات و JWL مخصوص فرمولاسیون‌های انفجاری از معادلات حالت رایج محسوب

غیر خطی LS-DYNA به نام روش حل ALE معرفی و استفاده می‌شود. در این دیدگاه گره‌ها در شبکه محاسباتی گاهی ممکن است تحت یک تابع لاگرانژی به صورت پیوسته حرکت کنند و یا مانند روش اویلری سر جای خود ثابت بمانند و یا در یک مسیر اختیاری حرکت کنند. به خاطر این آزادی عمل در حرکت، تغییر شکل مش در روش ALE بیشتر از لاگرانژی تنها و همچنین تجزیه و تحلیل در این روش نیز بیشتر از اویلری تنها می‌باشد. روش مورد استفاده در این تحلیل ALE Multi Material می‌باشد. در این روش مواد می‌توانند داخل شبکه ثابت و یا متحرک جریان پیدا کنند، به این معنی که دو یا چند ماده می‌توانند در یک المان قرار بگیرند. تقابل بین جریان ماده و سطوح جامد در این روش با استفاده از یک الگوریتم خاص به خوبی مدل می‌شود. در اینجا تحلیل و آنالیز مسئله پس از تعیین مشخصات، قیود و شرایط مرزی با استفاده از حلگر نرم‌افزار انجام شد. در شبیه‌سازی انجام شده کلیه پارامترها از جمله ابعاد و جنس پوسته و لاینر خرج گود، هدف فولادی و فاصله توقف^۱ ثابت در نظر گرفته شد و تنها نوع خرج PBX بکار رفته در خرج گود متغیر بوده است.

۲-۴-۱- مدل ماده

در تحلیل پدیده انفجار، مدل ماده و داده‌های ورودی آن تقریباً مهم‌ترین عامل در رسیدن به نتایج مطلوب است. معادله ساختاری مدل ماده در واقع رابطه‌ای است که تنش σ را به کرنش ϵ ، نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ ، انرژی داخلی e و تخریب D مرتبط می‌سازد و شکل کلی آن به صورت معادله (۱) می‌باشد. مدل‌های ماده برای فلز، خرج و هوا به ترتیب مدل‌های جانسون-کوک^۲، شدیدالانفجار^۳ و خلا^۴ در نظر گرفته شد.

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, e, D) \quad (۱)$$

رابطه ارائه شده توسط جانسون و کوک برای بیان اثرات کار پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دما بر روی تنش تسلیم مطابق رابطه (۲) می‌باشد [۳]:

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T_H^m) \quad (۲)$$

که در آن σ تنش جریانی دینامیکی، ϵ کرنش پلاستیک مؤثر، A استحکام تسلیم، B ثابت سختی، n توان سختی، C ثابت نرخ کرنش و m ثابت توان گرمایی است. $\dot{\epsilon}^*$ پارامتر بی‌بعد شده نرخ کرنش پلاستیک نرمالیزه شده است که از تقسیم نرخ کرنش واقعی بر نرخ کرنش مرجع بدست می‌آید. T_H دمای همسان^۵ یا پارامتر بی‌بعد شده دما است که از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد [۱۴ و ۳]. در این رابطه T_{Room} دمای اتاق و T_{melt} دمای ذوب ماده است.

$$T_H = \frac{T - T_{Room}}{T_{melt} - T_{Room}} \quad (۳)$$

در این مدل اثرات نرخ کرنش پلاستیک نسبت به زمان بر روی تنش

6- Gruneisen
7- Jones-Wilkins-Lee

1- Stand-off
2- Johnson-Cook Model
3- High Explosive Burn Model
4- Vacuum Model
5- Homologous Temperature



شکل ۳- شمایی از چیدمان تست نفوذ.

در این آزمون‌ها میزان نفوذ در سه پارامتر عمق، قطر حفره و حجم ایجاد شده در استوانه‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری عمق نفوذ، از یک سیم مفتولی با ضخامت ۱ mm استفاده شد. طولی از سیم که وارد حفره می‌شد، نشان‌دهنده میزان نفوذ نمونه مربوطه در هدف می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری قطر حفره از یک کولیس دیجیتال استفاده شد. قطر حفره در بالاترین نقطه استوانه فولادی هدف و در چند جهت مختلف اندازه‌گیری شده و میانگینی از آن گزارش شد. همچنین از تولوئن موجود در سرنگ مدرج برای سنجش حجم حفره ایجاد شده استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی نفوذ

فرایند شبیه‌سازی برای پیش‌بینی میزان نفوذ خرج گود حاوی فرمولاسیون‌های مختلف ماده منفجره انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با انفجار خرج PBX درون پوسته، لاینر مسی تحت فشار بسیار زیاد موج انفجار تغییر شکل یافته و به تدریج کشیده شده و نهایتاً شکل پرتابه‌ای تیز (جت) را به خود می‌گیرد. جت حاصل به سمت هدف فولادی حرکت کرده و به سطح آن برخورد می‌کند و سپس در هدف نفوذ می‌کند. شکل (۴) نحوه تشکیل و نفوذ جت حاصل از انفجار نمونه فاقد آلومینیوم (A00) را در هدف نشان می‌دهد. مطالعه کانتور فشار موج انفجار در لحظه برخورد به لاینر نشان می‌دهد که فشار در لحظه $t = 1 \mu\text{sec}$ حدوداً برابر با ۲۸۰۰ مگاپاسکال است که این مقدار در مقایسه با تنش تسلیم مس خالص (۲۷۰ MPa) [۳]، بالغ بر ۱۰ برابر بیشتر است. بنابراین فشار موج انفجار باعث می‌شود که لاینر مسی به راحتی سیلان کرده و تغییر شکل دهد.

می‌شوند. معادله حالت گرونایزن رابطه بین فشار، حجم و انرژی داخلی فلز را در حالت خمیری و در دو حالت تراکمی و انبساطی بیان می‌کند [۱۳]. در حالتی که ماده همانند لاینر مسی یا هدف فولادی تحت فشار باشد این معادله مطابق رابطه (۵) بیان می‌شود و در حالت انبساطی، نظیر پوسته فولادی خرج گود رابطه (۶) برای آن ارائه شده است:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right) \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) - S_2 \frac{\mu^2}{\mu - 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a\mu) E_{\text{int}} \quad (5)$$

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E_{\text{int}} \quad (6)$$

در این روابط P فشار، E_{int} انرژی داخلی، C فاصله از مبدأ منحنی سرعت شوک بر حسب سرعت ذرات، ρ_0 چگالی ماده منفجره، μ حجم نسبی، γ_0 ضریب گامای گرونایزن، a ضریب تصحیح حجم مرتبه اول و S ضریب شیب منحنی سرعت شوک بر حسب سرعت ذرات می‌باشد.

معادله حالت JWL معمولاً برای تشریح رفتار محصولات انفجار مواد منفجره سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود که در آن، ضرایب A ، B ، R_1 و R_2 ثابت‌های خرج انفجاری هستند، V' حجم نسبی یا حجم ماده منفجره عمل نکرده نسبت به حجم گازهای تولیدی (معادل $1/\rho$) و E انرژی داخلی وابسته است. ضرایب معادله حالت مواد منفجره خالص یا متعارف در کتابخانه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی موجود است ولی این اطلاعات برای مواد منفجره ترکیبی نظیر خرج‌های PBX مورد مطالعه از کد CHEETAH استخراج می‌شود که مقادیر آن در جدول (۴) نشان داده شده است.

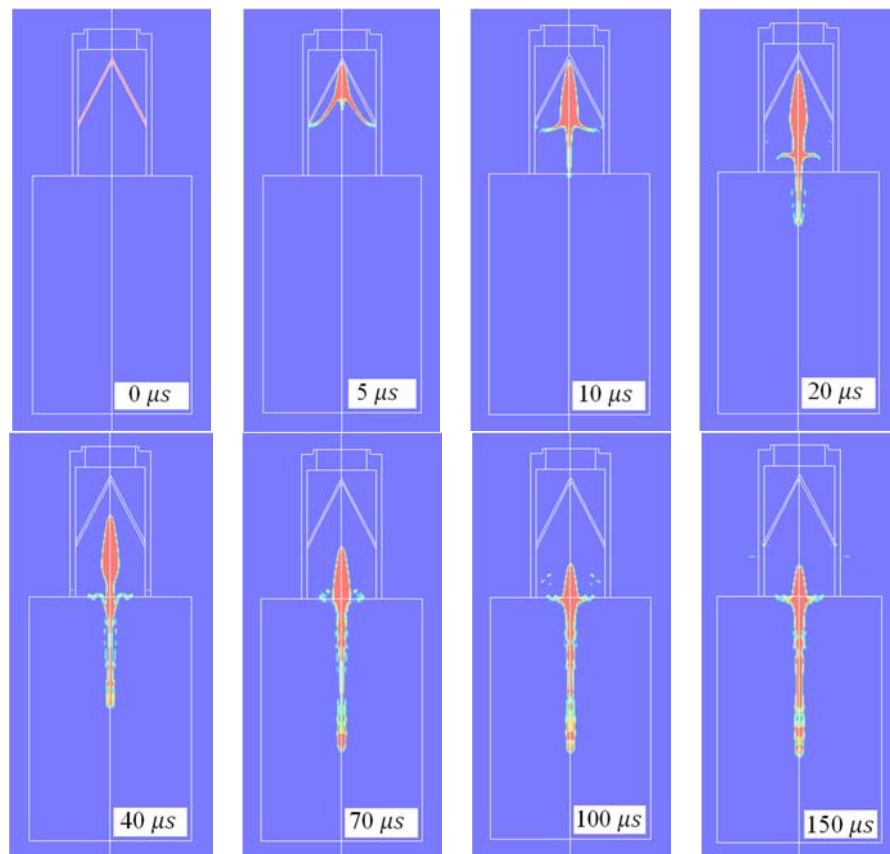
$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V'} \right) e^{-R_1 V'} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V'} \right) e^{-R_2 V'} + \frac{\omega}{V'} E \quad (7)$$

جدول ۴- ضرایب معادله‌ی حالت JWL فرمولاسیون‌ها.

ماده منفجره	A00	A10	A20	A30	A40	C4 [4]
A (Mbar)	۶/۰۵۵۴	۷/۴۹۱۱	۱۰/۰۱۵۱	۱۲/۶۵۹۴	۲۴/۷۸۳۰	۶/۰۹۷۷
B (Mbar)	۰/۰۷۴۳	۰/۰۲۲۷	۰/۰۶۰۸	۰/۰۴۹۷	۰/۰۴۴۸	۰/۱۲۹۵
R1	۴/۸۳	۴/۴۰	۵/۵۶	۵/۸۸	۶/۶۷	۴/۵۰
R2	۱/۰۵	۰/۴۲	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۶	۱/۴۰
ω	۰/۳	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۲۵
E (Mbar)	۰/۰۸۵۳۷	۰/۰۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۰۹	۰/۰۷۲۱	۰/۰۹

۵-۲- انجام تست تجربی نفوذ

برای انجام تست نفوذ، مطابق شکل (۳) بمبلیت‌های مونتاژ شده به صورت هم محور بر روی یک استوانه فولادی از جنس $ST - 37$ (به عنوان هدف) به قطر ۸ cm و ارتفاع ۱۲ cm قرار گرفتند تا نفوذ درون آن صورت گیرد. دهانه قیف لاینر به سمت پایین بوده است. شروع انفجار با استفاده از چاشنی الکتریکی آبی M8 انجام گرفت.



شکل ۴- مراحل تشکیل و نفوذ جت حاصل از نمونه خرج گود حاوی خرج A00.

سرعت نفوذ جت تشکیل شده پس از برخورد به هدف، تابعی از زمان است. شکل (۵) نشان می‌دهد که جت مربوط به خرج گود نمونه‌های PBX در لحظات اولیه نفوذ، عمق بیشتری را در هدف طی می‌کند و با افزایش زمان از سرعت نفوذ آن کاسته می‌شود تا به نقطه توقف برسد. توقف جت در هدف، با افزایش میزان آلومینیوم موجود در ماده منفجره عمدتاً سریع‌تر اتفاق می‌افتد. زمان توقف جت پس از تماس با هدف در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶- زمان توقف جت پس از برخورد به هدف.

کد فرمولاسیون	زمان توقف جت پس از تماس با هدف (μs)
A00	۱۰۵
A10	۱۰۶
A20	۹۸
A30	۸۵
A40	۷۳

فاصله زمانی آغاز تا لحظه برخورد جت به هدف در نمونه‌های مختلف متفاوت است. همچنین جت نفوذ کننده پس از گذشت زمان‌های متفاوتی، در هدف فولادی متوقف می‌شود. طبق نتایج شبیه‌سازی با افزایش پودر آلومینیوم در خرج‌های PBX، جت حاصل در زمان دیرتری به هدف برخورد می‌کند. از طرفی با در اختیار داشتن زمان برخورد جت به هدف (t) و فاصله توقف (۲/۵ mm) می‌توان سرعت متوسط جت از لحظه تشکیل تا زمان برخورد را محاسبه کرد. نتایج محاسبات مربوطه در جدول (۵) نشان داده شده است.

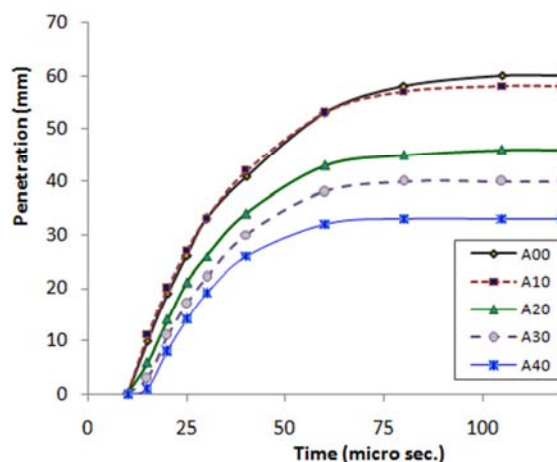
جدول ۵- زمان برخورد جت به هدف در نمونه‌های تست‌شده.

کد فرمولاسیون	زمان برخورد جت به هدف (μs)	سرعت جت در لحظه برخورد به هدف (m/s)
A00	۱۰/۵	۲۳۸۰
A10	۱۰/۵	۲۳۸۰
A20	۱۳	۱۹۲۳
A30	۱۴	۱۷۸۵
A40	۱۵	۱۶۶۶

خرج‌های مختلف (TMD%)، دقت ساخت قطعات، اجرای آزمون و نیز ثبت نتایج از جمله مواردی هستند که می‌توانند بر نتایج اثر بگذارند.

جدول ۷- نتایج تجربی تست نفوذ.

نمونه	عمق نفوذ بر اساس شبیه‌سازی (mm)	نتایج تجربی	
		عمق نفوذ (mm)	حداکثر قطر حفره ایجاد شده (mm)
A00	۶۰	۶۱	۱۸/۵
A10	۵۸	۵۹	۱۷/۵
A20	۴۶	۱۸	۱۰
A30	۴۰	۱۱	۹
A40	۳۳	Failed	Failed



شکل ۵- مقادیر نفوذ در لحظات مختلف پس از آغازش.

۲-۳- نتایج تست‌های تجربی

جهت ارزیابی نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های خرج گود حاوی مقادیر مختلف پودر آلومینیوم در شرایط استاتیکی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که میزان پودر آلومینیوم بر نفوذ خرج گود اثر گذار است. تست‌های تجربی همانند نتایج شبیه‌سازی تأیید کننده این واقعیت بوده که با افزایش مقدار آلومینیوم، از میزان نفوذ کاسته می‌شود. با این تفاوت که روند نزولی رابطه عمق نفوذ به درصد آلومینیوم، نسبت به نتایج شبیه‌سازی دارای اختلافاتی است که در فرمولاسیون‌های حاوی مقادیر بالاتر آلومینیوم بیشتر مشهود است. تصاویر مربوط به استوانه فولادی هدف پس از انجام تست‌های تجربی در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. طبق شکل (۷)، حفره حاصل از نفوذ خرج گود در سطوح عمیق‌تر دارای قطر کمتری است که نشان‌دهنده آفت انرژی جت نفوذ کننده است. سطح داخلی حفره ایجاد شده کاملاً با مس پوشانده شده است. در تست نمونه‌های حاوی مقادیر ۲۰٪ و ۳۰٪ آلومینیوم که عمق حفره کمتر بوده، مس اضافی باقیمانده از جت با انرژی تحلیل رفته در انتهای حفره تجمع پیدا می‌کند. مقادیر پارامترهای نفوذ حاصل از شبیه‌سازی و تست‌های تجربی در جدول (۷) گزارش شده است. نمونه A40 به خاطر فعال نشدن با خرج بوستر C4، عملاً نفوذی در هدف نداشته است. کاهش نسبتاً زیاد HMX و در نتیجه آن کاهش حساسیت خرج به موج شوک انفجار بوستر را می‌توان دلیل اصلی عدم عملکرد این خرج دانست.

مطابق شکل (۸) رابطه بین میزان نفوذ و درصد آلومینیوم در دو حالت بررسی شده، غیر خطی است. اثر افزایش پودر آلومینیوم بر میزان نفوذ خرج گود، در نتایج تجربی مشخص‌تر از نتایج شبیه‌سازی است. این امر نشان می‌دهد که هر چند سرعت انفجار مواد منفجره با افزایش مقدار آلومینیوم به صورت خطی کاهش می‌یابد ولی پارامترهای دیگری وجود دارند که بر میزان نفوذ در شرایط تجربی تأثیر گذار هستند. مقادیر چگالی تجربی PBX های شارژ شده و تفاوت آن با چگالی تئوری در



شکل ۶- اثر نفوذ نمونه‌های مختلف خرج گود در هدف فولادی.



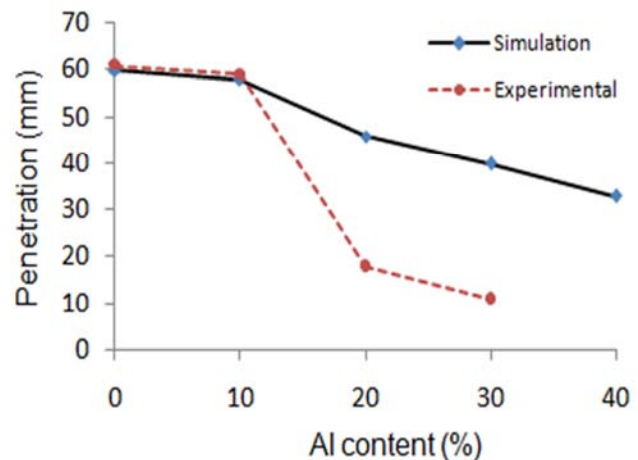
شکل ۷- حفره برش خورده هدف فولادی در تست نمونه‌های A00 و A10.

پارامترهای نفوذ حاصل از عملکرد فرمولاسیون‌های A00 و A10، هم در حالت شبیه‌سازی و هم در تست تجربی دارای اختلافات ناچیزی نسبت به یکدیگر هستند. این نشان می‌دهد که با افزایش ۱۰ درصد آلومینیوم به فرمولاسیون ماده منفجره خرج گود آفت چندانی در نفوذ پذیری اتفاق نمی‌افتد. علاوه بر این امکان افزایش حرارت و ایمپالس انفجار نیز فراهم خواهد شد که این فرمولاسیون را به عنوان گزینه مناسب در سرچنگی‌های دو منظوره به ویژه در خرج‌های زیر آبی مناسب می‌سازد. این در حالی است که با افزایش بیشتر آلومینیوم، از شدت نفوذ خرج گود شدیداً کاسته می‌شود.

نتیجه آن عمق، قطر و حجم حفره ایجاد شده در هدف فولادی کاهش می‌یابد. کاهش پارامترهای نفوذ در نتیجه افزایش پودر آلومینیوم به صورت غیر خطی است که نشان می‌دهد عوامل دیگری از جمله اختلاف چگالی تئوری و تجربی فرمولاسیون‌ها، دقت ساخت و مونتاژ قطعات خرج گود بر نتایج تأثیر می‌گذارند. با افزایش میزان پودر آلومینیوم، تفاوت نتایج نفوذ در دو بررسی شبیه‌سازی و تجربی بیشتر می‌شود. این امر به دلیل رفتار غیر قابل پیش‌بینی خرج‌های منفجره آلومینیوم‌دار و عدم دقت در محاسبه ضرایب معادله حالت آن‌ها با کدهای کامپیوتری موجود می‌باشد. فرمولاسیون A10 حاوی ۱۰ درصد وزنی پودر آلومینیوم می‌تواند به عنوان یک خرج PBX آلومینیوم‌دار در سرچنگی‌های چند منظوره (نفوذی و بلست) بکار گرفته شود.

مراجع

- [1] Ou, J. H.; Ou, J. B.; Jhu, Y. J. "The Design and Analysis for Shaped Charge Liner Using Taguchi Method"; *Int. J. Mechanics* 2014, 8, 53-61.
- [2] Jaramaz, S.; Micković, D.; Elek, P.; Jaramaz, D.; Micković, D. "A Model for Shaped Charge Warhead Design"; *J. Mechanical Engineering* 2012, 58, 6, 403-410.
- [3] Elshenawy T. A. E. "Criteria of Design Improvement of Shaped Charges Used as Oil Well Perforators"; A Thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 2012.
- [4] Blache, A.; Weimann, K. "Generation of Different Detonation Wave Contours"; 16th International Symposium on Ballistics, San Francisco, CA, USA, 1996.
- [5] Samudre, S. S.; Nair, U. R.; Gore, G. M.; Sinha, R. K.; Sikder, A. K.; Asthana, S. N. "Studies on an Improved Plastic Bonded Explosive (PBX) for Shaped Charges"; *Propellants, Explos., Pyrotech.* 2009, 34, 145-150.
- [6] Peuker, J. M.; Krier, H.; Glumac, N. "Particle Size and Gas Environment Effects on Blast and Overpressure Enhancement in Aluminized Explosives"; *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34, 2205-2212.
- [7] Gelfand, B. E.; Medvedev, S. P.; Khomik, S. V.; Silnikov, M. V. "Comparative Study of Pressure-Temperature Effects from TNT AND RDX-IPN-AL Explosions"; *Military Aspects of Blast and Shock -MABS20*, Oslo, 2008, 1-8.
- [8] Siviour, C. R.; Gifford, M. J.; Walley, S. M.; Pround, W. G.; Field, J. E. "Particle Size Effects on the Mechanical Properties of a Polymer Bonded Explosive"; *J. Mater. Sci.* 2004, 39, 1255-1258.
- [9] Antić, G.; Džingalašević, V.; Stanković, M.; Borković, Z. "Explosive Characteristics of Cast PBX Based on HMX, Ammonium Perchlorate and Aluminum"; *Scientific Technical Review* 2004, Vol. LIV, No. 3-4, 38-44.
- [10] Antić, G.; Džingalašević, V. "Characteristics of Cast PBX with Aluminum"; *Scientific Technical Review* 2006, Vol. LVI, No. 3-4, 52-58.
- [11] Lee, J. S.; Hsu, C. K. "Thermal Properties and Shelf Life of HMX-HTPB Based Plastic-Bonded Explosives"; *Thermochemica Acta* 2002, 392-393, 153-156.
- [12] Prakash, V.; Phadke, V. K.; Sinha, R. K.; Singh, H. "Influence of Aluminum on Performance of HTPB-Based Aluminized PBXs"; *Defence Sci. J.* 2004, 54, 475-482.



شکل ۸- رابطه عمق نفوذ با درصد آلومینیوم در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی.

در نمونه‌های A20 و A30 تفاوت نسبتاً زیادی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. مهم‌ترین دلیل این اختلاف را باید به رفتار غیر قابل پیش‌بینی خرج‌های آلومینیوم‌دار نسبت داد. طبق نظر V. W. Manner [۱۸] و J. F. Moxnes [۱۹] مواد منفجره حاوی آلومینیوم غیر ایده‌آل و دارای مناطق واکنش متوالی و طولانی هستند که این خواص ممکن است به اندازه ذرات و دیگر فاکتورهای آن‌ها مربوط باشد. واکنش‌های گرمایی ثانویه‌ای که محصولات انفجار در خارج از مرکز انفجار انجام می‌دهند از ویژگی‌های مواد منفجره غیر ایده‌آل محسوب می‌شود. به همین خاطر مدل‌سازی این مواد مشکل است. آن‌ها مدعی هستند که اگرچه ترکیبات پرنرژي آلومینیوم‌دار دارای کاربردهای زیادی هستند و مطالعات زیادی بر روی آن‌ها انجام شده است، ولی واقعیت این است که تاکنون حقایق زیادی در خصوص رفتار انفجاری این مواد کشف نشده است. با افزایش میزان پودر آلومینیوم، رفتار خرج PBX از حالت یک ماده منفجره ایده‌آل فاصله می‌گیرد و به همین خاطر محاسبات تئوریک و مدل‌سازی رفتار آن‌ها با خطا همراه خواهد بود. به عبارتی دیگر، کدهای کامپیوتری موجود نظیر RUBY، BKW و نسل‌های بعدی آن‌ها همچون TIGER، CHEQ و CHEETAH که پارامترهای انفجاری مواد منفجره را قابل تخمین ساخته‌اند، در محاسبات خواص انفجاری مواد منفجره حاوی آلومینیوم چندان دقیق نیستند؛ چرا که تعادل ترمودینامیکی آنی در انفجار این مواد مطابق با تئوری چاپمن-ژوگت (C-J) برقرار نمی‌شود [۱۹]. به همین خاطر در تحقیق حاضر با افزایش میزان پودر آلومینیوم در فرمولاسیون PBX، تفاوت بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تغییر فرمولاسیون ماده منفجره موجود در خرج گود، بر پارامترهای نفوذ تأثیر زیادی دارد. با افزایش میزان پودر آلومینیوم از سرعت انفجار ماده منفجره کاسته شده و در

- [17] Kennedy, D. R. "Warheads: An Historical Perspective, in: J. Carleone (Ed.), Tactical Missile Warheads"; Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 155, AIAA, Washington DC, 1993.
- [18] Manner, V. W.; Pemberton, S. J.; Gunderson, J. A.; Herrera, T. J.; Lloyd, J. M.; Salazar, P. J.; Rae, P.; Tappan, B. C. "The Role of Aluminum in the Detonation and Post-Detonation Expansion of Selected Cast HMX-Based Explosives"; Propellants, Explos., Pyrotech. 2012, 37, 198-206.
- [19] Moxnes, J. F.; Jensen, T. L.; Unneberg, E. "Energetic Measures of Effectiveness of Aluminized Explosives"; Adv. Studies Theor. Phys. 2013, 7, 1051-1069.
- [۱۳] خدارحمی، حسین؛ خلجی، حمید رضا؛ محسنی، رضا "تحلیل عددی و تجربی شکل گیری و نفوذ پرتابه های شکل یافته انفجاری" مجله علمی- پژوهشی مکانیک و هوا فضا، جلد ۱، شماره ۲، آبان ۱۳۸۴.
- [14] Junqing, H.; Wei, Z.; Wenyue, W.; Kelei, H. "The 3D Numerical Simulation of the Shaped Charge Jet Penetration through the Steel Target"; The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling, Paris, France, 2012, 236-239.
- [15] Jintao, L.; Hongnian, C.; Fuchi, W.; Qunbo, F. "Multiscale Numerical Simulation of the Shaped Charge Jet Generated from Tungsten-Copper Powder Liner"; J. Phys.: Conference Series, 2013, 419, 012045.
- [۱۶] علوی نیا، علی؛ احمدی کیا، حسین؛ حجتی، اصغر "تحلیل عددی انفجار و تشکیل جت در خرج گود" مجله علمی- پژوهشی مواد پرانرژی، سال دوم، شماره ۲، شماره پیاپی ۴، پاییز و زمستان ۱۳۸۶.

