

## مقایسه عملکرد اکتول و PBXN-110 در یک سرچنگی خرج گود

رضا کسایه<sup>۱</sup>، احمد ملایی<sup>۲\*</sup>، وحید افشاری<sup>۳</sup>، علی خیرآبادی<sup>۴</sup>

۴- کارشناس ۲- دکترا ۳- کارشناس ارشد دانشگاه امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۶/۸/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۱)

### چکیده

تشکیل جت حاصل از فروپاشی لاینر در سرچنگی‌های خرج گود تا حد زیادی به مشخصات ماده منفجره شارژ شده در آن بستگی دارد. هدف اصلی در این تحقیق، مقایسه اثرات به کارگیری اکتول و PBXN-110 در عملکرد نوعی سرچنگی خرج گودی خاص بوده است. این مواد در یک پوسته آلومینیومی خرج گود با لاینر مسی ۳۵ درجه و ظرفیت ۵۱۰ سانتی‌متر مکعب شارژ شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار LS-Dyna نشان داد که مؤثرترین فاصله توقف این سرچنگی تحقیقاتی، ۵۰ cm است. بر اساس این شبیه‌سازی، خرج اکتول نفوذ بیشتری نسبت به PBXN-110 ایجاد می‌کند. هم‌چنین نتایج آزمون‌های تجربی هم نشان داد که عمق نفوذ سرچنگی‌های حاوی اکتول و PBXN-110 به ترتیب ۴۴۴ و ۳۲۴ میلی‌متر است. سرعت انفجار و چگالی پایین‌تر خرج PBXN-110 نسبت به اکتول، موجب عملکرد ضعیف‌تر آن در سرچنگی نفوذ کننده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خرج گود، نفوذ، اکتول، PBXN-110، شبیه‌سازی.

## Performance Comparison of Octol and PBXN-110 in a Shaped Charge Warhead

R. Kasaie, A. Mollaie\*, V. Afshari, A. Kheyrabadi

Imam Hossein University

(Received: 11/4/2017, Accepted: 2/10/2018)

### Abstract

The jet formation caused by the collapse of a liner mainly depend on the characteristics of explosive loaded in the shaped charge warhead. The aim of this study was to compare the influence of Octol and PBXN-110 fillers on the performance of a specific shaped charge warhead is made. These materials are loaded into the aluminum-cased shaped charge having a 35° copper liner and 510 cm<sup>3</sup> of capacity. Obtained results by numerical simulation (LS-Dyna) indicated that the most effective stand-off is 50 cm. Based on simulation data, octol has a higher penetration compared to PBXN-110 for the same stand-off. Results from the experimental tests also showed that the warheads loaded with octol and PBXN-110 have penetration about 444 mm and 324 mm respectively. PBXN-110 exhibited a weak penetration effect due to its lower density and detonation velocity compared to Octol.

**Keywords:** Shaped Charge, Penetration, Octol, PBXN-110, Simulation.

## ۱- مقدمه

## جدول ۱- مشخصات اکتول و PBXN-110

عنوان خرج	اکتول (نوع ۱)	PBXN-110
روش تهیه	ذوب- ریخته‌گری	ریخته‌گری- پخت
فرمولاسیون	HMX (۷۵٪) TNT (۲۵٪)	HMX (۸۸٪) HTPB (۱۲٪) [۱۵]
چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	۱/۸۱ [۱۶]	۱/۶۲-۱/۷۰ [۱۷]
سرعت انفجار (m/s)	۸۶۴۳ [۱۶]	۸۳۳۰ [۱۸]
تنش (psi)	-	۲۰ < [۱۷]
کرنش (%)	-	۹ < [۱۷]
سختی (Shore A)	-	۲۰ < [۱۷]
پایداری تحت خلأ (ml/g.48h @ 100°)	۰/۴ > [۱۹]	۰/۴ > [۱۷]
پایداری حرارتی (°C)	۱۰۰ [۱۹] (خوداشتعالی)	۲۵۴
حساسیت به ضربه (N.m)	۹/۳۳ [۲۰]	۱۰ <
فشار انفجار (GPa)	۳۲/۲ [۲۱]	۲۹/۲ [۲۲]

## ۲- بخش تجربی

## ۱-۲- مواد اولیه و تجهیزات

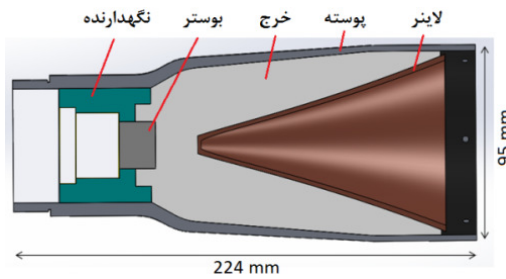
خرج اکتول صنعتی با چگالی  $1/8 \text{ g/cm}^3$  شارژ شد. برای تهیه نمونه PBXN-110، رزین HTPB با متوسط عددی جرم مولکولی ( $\bar{M}_n$ )  $5250 \text{ g/mol}$  و دمای انتقال شیشه‌ای  $76/8^\circ \text{C}$  - استفاده شد. ماده منفجره HMX در دو فرم درشت (کلاس ۳ با متوسط اندازه ذرات  $400$  میکرون) و ریز (کلاس ۵ با متوسط اندازه ذرات  $45$  میکرون) با نسبت ۳ به ۱ به کارگیری شد. نرم کننده ایزودسیل پلارگونات (IDP) دارای گرید صنعتی بوده و سایر مواد اولیه از جمله عامل پخت ایزوفورن دی‌ایزوسیانات (IPDI)، کاتالیزور دی‌بوتیل تین دی‌لورات (DBTDL) و آنتی‌اکسیدان ۲،۲' متیلن بیس (۴- متیل-۶- ترشیو بوتیل فنول) از تولیدات شرکت مرک<sup>۳</sup> آلمان تأمین شد.

از یک میکسر دو پروانه‌ای با چرخش سیاره‌ای، دارای حجم مفید ۲ لیتر با ظرف دوجداره و امکان ایجاد خلأ جهت اختلاط اجزای PBXN-110 استفاده شد. مواد اولیه با ترازوی دیجیتال مدل GF-600 شرکت AND ژاپن با دقت  $0/001 \text{ g}$  و حداکثر کاربری  $610 \text{ g}$  توزین شدند. مخلوط پس از ریخته‌گری در پوسته خرج گود 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. در آزمون‌های تجربی برای آغاز انفجار خرج گود از چاشنی الکتریکی آنی M8 استفاده شد. هم‌چنین قرص پرس شده پتن به وزن  $20$  گرم با گرید صنعتی به‌عنوان خرج بوستر مورد استفاده قرار گرفت.

در سرچنگی‌های خرج گود، با انفجار جهت‌دار و کنترل شده ماده منفجره در پشت یک لاینر فلزی کیفی شکل، جریانی از جت فلزی 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 آغاز 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 یکی از رویکردهای مهم در حوزه سرچنگی، تولید مهمات غیر حساس<sup>۱</sup> (IM) با قابلیت‌های ایمنی و عملکردی مناسب است. ترکیب B و اکتول از رایج‌ترین مواد مورد استفاده در سرچنگی‌های خرج گود هستند. این ترکیبات از خانواده مواد منفجره پایه TNT محسوب می‌شوند. اگرچه اجزای این فرمولاسیون‌ها با هزینه‌های پایینی تأمین می‌شوند ولی خواص حرارتی، ایمنی و مکانیکی ضعیف آن‌ها به خاطر نقطه ذوب پایین TNT و وجود ترک‌ها و حباب‌هایی ناشی از انقباض فرمولاسیون پس از عملیات ریخته‌گری، موجب بروز خطراتی در زمان انبارداری، حمل‌ونقل و به‌کارگیری مهمات جنگی می‌شود [۵]. به‌همین خاطر در سال‌های اخیر طراحی و تولید مواد منفجره پلاستیکی<sup>۲</sup> (PBX) رشد چشمگیری داشته و در اغلب مهمات جدید در حال جایگزینی با سایر خرج‌های متداول است. مواد منفجره پلاستیکی به دو روش پرس و ریخته‌گری تهیه می‌شوند. درصد باینر در PBX پرس کمتر بوده و به‌همین دلیل این دسته از مواد منفجره دارای چگالی و سرعت انفجار بالاتری بوده و لذا پس از مواد منفجره پایه TNT، بیشترین کاربرد را در خرج گودها دارند. با این حال به دلیل محدودیت‌های خرج‌های پرس از جمله فرایند پذیری سخت در تولید خرج، توزیع غیر یکنواخت چگالی [۶]، احتمال تغییر فرم لاینر خرج گود در حین پرس [۷] و عدم امکان شارژ در سرچنگی‌های بزرگ تمایل به سمت PBX قابل ریخته‌گری در حال گسترش است [۸ و ۹]. از جمله خرج‌های قابل ریخته‌گری که در سرچنگی‌های نفوذ کننده به‌کارگیری شدند می‌توان به PBXN-110 در سرچنگی اژدر MK-146 [۱۰]، [۱۱] PBXW-108 و [۱۲] PBXW-114 در سرچنگی راکت دوش‌پرتاب SMAW HEAA [۱۳ و ۱۴] اشاره کرد.

در تحقیق حاضر از PBXN-110 به‌عنوان جایگزین اکتول در یک نوع سرچنگی خرج گود خاص استفاده و اثرات به‌کارگیری آن مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصات این خرج با اکتول در جدول (۱) مقایسه شده است.



شکل ۱- طرح خرج گود مورد استفاده در آزمون‌های مقایسه‌ای.

پس از قرار گرفتن لاینر قیفی شکل در پوسته، PBXN-110 در پشت آن شارژ شده و بعد از بستن درپوش پلی‌اتیلنی، پخت صورت گرفت. این درپوش به منظور پیشگیری از تغییر حجم PBX در حین فرایند پخت بسته می‌شود. متوسط وزن اکتول و PBXN-110 شارژ شده به ترتیب ۹۳۰ و ۸۶۰ گرم بوده است. در ادامه و پس از پخت یک‌هفته‌ای PBX در دمای ۶۵ °C، درپوش پلی‌اتیلنی باز شده و به جای آن نگهدارنده بوستر قرار گرفت.

برای انجام آزمون تجربی، مطابق شکل (۲) خرج گود مونتاژ شده به صورت عمودی بر روی بلوک‌های فولادی از جنس ST-37 (به عنوان هدف) به ضخامت مجموع ۵۰ سانتی‌متر قرار گرفت تا نفوذ درون آن صورت گیرد. دهانه قیف لاینر به سمت پایین بوده و فاصله توقف<sup>۱</sup> ۵۰ سانتی‌متر است. شروع انفجار خرج اصلی با استفاده از چاشنی الکتریکی آنی M8 و بوستر قرص پتن با وزن ۲۰ گرم انجام شد. این مقدار بوستر قادر به انفجار کامل خرج‌های بررسی شده است.



شکل ۲- شمایی از چیدمان آزمون نفوذ.

در این آزمون‌ها میزان نفوذ در پارامتر عمق حفره ایجاد شده در بلوک‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری عمق نفوذ، از سیم مفتولی با ضخامت ۱ mm استفاده شد. طولی از سیم که وارد حفره می‌شد، نشان‌دهنده میزان نفوذ نمونه مربوطه در هدف است.

## ۲-۲- فرمولاسیون PBXN-110 و روش تهیه آن

فرمولاسیون و ترکیب درصد وزنی اجزای PBXN-110 در جدول (۲) نشان داده شد. مواد اولیه با دقت ۰/۲٪ توزین شدند. پیش از شروع فرایند اختلاط، رزین HTPB، نرم‌کننده IDP و HMX به مدت ۴ روز در آن ۶۰ درجه قرار گرفتند تا رطوبت احتمالی آن‌ها حذف شود. برای شروع کار، ابتدا اجزای بایندر شامل HTPB، لیستین و نرم‌کننده در یک بشر ۲۵۰ cc به مدت ۱۵ دقیقه با همزن مغناطیسی در دمای ۷۰ °C به هم زده شد. سپس محلول بایندر به ظرف پیش‌گرم شده همزن منتقل و به آن آنتی‌اکسیدان ۲،۲ متیلن بیس (۴-متیل ۶-ترشیو بوتیل فنول) اضافه شد. محتویات همزن به مدت ۱۰ دقیقه در فشار محیط و دمای ۶۵ °C با دور ۴۰ Hz و سپس ۵ دقیقه تحت خلأ ۰/۸ bar به هم زده شد. در ادامه HMX کلاس ۲ (~۴۵ μm) به ظرف همزن اضافه شد. پس از ۱۰ دقیقه اختلاط، HMX کلاس ۳ (~۴۰ μm) طی دو مرحله مجزا (هر مرحله نصف وزن) اضافه و در هر مرحله محتویات همزن به مدت ۱۰ دقیقه در فشار محیط و دمای ۶۵ °C با دور ۴۰ Hz و سپس ۵ دقیقه تحت خلأ ۰/۸ bar مخلوط شد. سپس ایزوفورون‌دی‌ایزوسیانات (IPDI) به ظرف همزن منتقل و پس از ۱۵ دقیقه اختلاط، کاتالیزور دی‌بوتیل‌تین‌دی‌لورات (DBTDL) به کمک سرنگ به آن اضافه شد. در پایان خمیر PBX، تحت خلأ و درون قالب پیش‌گرم شده ریخته‌گری و به مدت ۷ روز در آن ۶۰ °C پخت شد.

جدول ۲- ترکیب درصد وزنی اجزای PBXN-110.

درصد وزنی	نام جزء
۶۶	HMX کلاس ۳
۲۲	HMX کلاس ۲
۵/۳۸	HTPB
۵/۳۸	ایزودسیل پلارگونات
۰/۷	لیستین
۰/۵۲	ایزوفورون‌دی‌ایزوسیانات
۰/۰۲	دی‌بوتیل‌تین‌دی‌لورات

## ۲-۳- معرفی خرج گود و نحوه اجرای آزمون

خرج گود استفاده شده در این تحقیق شامل چهار قسمت اصلی پوسته، لاینر مسی، بوستر و خرج PBX است. پوسته از جنس آلیاژ آلومینیم 6061-T6 است که مطابق شکل (۱) در قطر و ضخامت متغیر است. حداقل و حداکثر ضخامت این پوسته بین ۳ تا ۶ میلی‌متر است. لاینر مسی دارای ضخامت ۳-۱/۵ mm و زاویه داخلی آن ۳۵° است.

## ۲-۴- شبیه‌سازی نفوذ

حل‌کننده نرم‌افزار (d-R700) انجام شد. در شبیه‌سازی انجام شده کلیه پارامترها از جمله ابعاد و جنس پوسته و لاینر خرج گود، هدف فولادی و فاصله توقف ثابت در نظر گرفته شد و تنها نوع خرج انفجاری به‌کار رفته 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  $\sigma$  را به کرنش  $\epsilon$ ، 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 مدل جانسون- کوک<sup>۱</sup>، شدیدالانفجار و خلأ در نظر گرفته شد.

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, e, D) \quad (1)$$

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

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T_H^m) \quad (2)$$

که در آن،  $\sigma$  تنش جریانی دینامیکی،  $\epsilon$  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 به‌دست می‌آید.  $T_H$  دمای همسان یا پارامتر بی‌بعد شده دما است که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۳ و ۲۵]. در این رابطه  $T_{Room}$  دمای اتاق و  $T_{melt}$  دمای ذوب ماده است.

$$T_H = \frac{T - T_{Room}}{T_{melt} - T_{Room}} \quad (3)$$

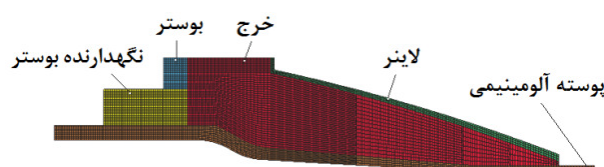
در این مدل اثرات نرخ کرنش پلاستیک نسبت به زمان بر روی تنش تسلیم در نظر گرفته شده است. ضرایب مدل ماده لاینر مسی و هدف فولادی در جدول (۳) نشان شده است.

جدول ۳- ضرایب مدل ماده مس (لاینر) [۲۶ و ۲۷] و فولاد (هدف) [۳ و ۲۸].

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

برای تعریف خواص پوسته آلومینیومی از مدل Elastic Plastic Hydro و معادله حالت گرونایزن استفاده شد. ضرایب مربوطه در جدول (۴) ارائه شده است:

در پژوهش حاضر جهت شبیه‌سازی فرایند شکل‌گیری و نفوذ جت خروجی خرج گود در یک هدف فولادی، از نرم‌افزار LS-DYNA نسخه ۲۸ 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 تقارن سرچنگی خرج گود حول محور عمودی، برای مدل‌سازی تشکیل پرتابه و پس‌از آن برخورد با هدف از محیط ۲ بعدی و از مدل تقارن محوری استفاده شد. با توجه به متقارن بودن شکل خرج گود حول محور عمودی و به‌منظور کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه، برای مدل‌سازی تشکیل پرتابه از المان‌های پوسته با تقارن محوری نسبت به محور  $Y$  و محیط ۲ بعدی استفاده شده است. اجسام همانند شکل (۳) مدل شده‌اند و برای مش‌بندی از مش‌های مربعی با اندازه حدود ۱ میلی‌متر استفاده شده است. تعداد نودها برابر ۱۹۴۱۹۸ و تعداد المان‌ها برابر ۱۹۵۴۶۸ است.



شکل ۳- مدل تقارن محوری المان‌بندی شده برای شبیه‌سازی خرج گود.

با توجه به این‌که خرج پتن به‌عنوان بوستر عمل می‌کند، تنها شرط اولیه مسئله نقطه شروع انفجار است که در وسط بوستر و مماس با خرج اصلی قرار دارد. از آنجایی‌که انفجار خرج و تشکیل جت با تغییر فرم و اندازه بسیار زیادی همراه است، بنابراین نمی‌توان از روش المان محدود لاگرانژی برای حل مسئله استفاده کرد [۲۳]. 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 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 به‌صورت 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 است [۲۴].

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 به‌خوبی مدل می‌شود. در اینجا تحلیل و آنالیز مسئله پس از تعیین مشخصات، قیود و شرایط مرزی با استفاده از

جدول ۶- ضرایب معادله‌ی حالت اجزای فلزی سرجنگی و هدف.

جنس	$E_0$	A	$\gamma_0$	$S_3$	$S_2$	$S_1$	C
آلومینیوم	۰	۰	۲	۰	۰	۱/۳۳۸	۰/۵۳۲۸
مس	۰	۰	۱/۹۶	۰	۰	۱/۴۹۰	۰/۳۹۴۰
فولاد	۰	۰	۲/۱۷	۰	۰	۱/۴۹۰	۰/۴۵۶۹

معادله حالت<sup>۱</sup> 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 مورد استفاده، در کتابخانه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی موجود بوده و مقادیر آن در جدول (۷) ارائه 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 ۷- ضرایب معادله حالت JWL مواد منفجره برگرفته از مراجع و نرم‌افزار CHEETAH.

ماده منفجره	A (Mbar)	B (Mbar)	$R_1$	$R_2$	$\omega$	E (Mbar)
اکتول [۱۱]	۷/۴۸۶	۰/۱۳۳۸	۴/۵	۱/۲	۰/۳۸	۰/۰۹۶
اکتول [Cheetah]	۹/۰۰۳	۰/۱۰۲۵	۴/۶۷	۱/۰۷	۰/۳۵	۰/۰۹۶
PBXN-110 [Cheetah]	۷/۱۵۷	۰/۰۸۶۱	۴/۷۹	۱/۰۶	۰/۳۲	۰/۰۹۲
PBXN-110 [۲۹]	۴/۶۹۰	۰/۰۰۱۱	۳/۸۶	۱	۰/۴	۰/۰۹۲
پتن [۱۱]	۶/۱۷۰	۰/۱۶۹۳	۴/۴	۱/۲	۰/۲۵	۰/۱۰۱

### 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. در این شبیه‌سازی با توجه به تأثیرگذاری بالای فاصله توقف (Stand-off) و نوع خرج به‌کار رفته در میزان نفوذ این نوع از سرجنگی‌ها و با توجه به محدودیت‌های ابعادی جهت ساخت قطعه مورد نظر، از دو نوع خرج (اکتول و PBXN-110) و ۶ فاصله توقف متفاوت (۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر) جهت تحلیل میزان نفوذ استفاده شده است. مدل‌های اولیه برای شبیه‌سازی از خرج اکتول استفاده شده و فاصله توقف بهینه برای سرجنگی خرج گود به‌دست آمد. سپس جهت بررسی تأثیر نوع خرج بر میزان نفوذ، از خرج جایگزین PBXN-110 استفاده شد. مقادیر نفوذ حاصل از انفجار خرج اکتول در فواصل توقف مختلف و

جدول ۴- ضرایب مدل ماده Elastic Plastic Hydro پوسته آلومینیوم.

ماده	چگالی ( $g/cm^3$ )	G	SIGY
6061-T6 Al	۲/۷۸۵	۰/۲۷۶	۰/۰۰۲۶۵

مدل ماده استفاده شده برای تعریف خرج‌های اکتول، PBXN-110 و بوستر پتن از نوع شدیدالانفجار است. 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.

$$P = F P_{eos}(V, E) \quad (4)$$

ضرایب مدل ماده شدیدالانفجار برای خرج‌های مدل با استفاده از کد CHEETAH و مراجع موجود [۱۱] استخراج شده است. این ضرایب در جدول (۵) نشان داده شده‌اند:

جدول ۵- ثابت‌های مدل ماده شدیدالانفجار خرج‌های مدل و بوستر.

ماده منفجره	$P_{ej}$ (Mbar)	$D_{ej}$ (cm/ $\mu$ s)	چگالی ( $g/cm^3$ )
اکتول	۰/۳۴۲	۰/۸۴۸	۱/۸۱
PBXN-110	۰/۲۷۵	۰/۸۳۳	۱/۶۷
بوستر (پتن)	۰/۳۳۵	۰/۸۳	۱/۷۷

#### ۲-۴-۲- معادلات حالت

معادله حالت رابطه‌ای است که فشار را با دانسیته ماده و انرژی داخلی مشخصه آن مرتبط می‌سازد. معادله حالت گرونایزن در فلزات و JWL مخصوص فرمولاسیون‌های انفجاری از معادلات حالت رایج محسوب می‌شوند. معادله حالت گرونایزن<sup>۱</sup> رابطه بین فشار، حجم و انرژی داخلی فلز را در حالت خمیری و در دو حالت تراکمی و انبساطی بیان می‌کند [۲۳]. 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 آلومینیومی خرج گود رابطه (۶) برای آن ارائه شده است.

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

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

در این روابط، P فشار،  $E_{int}$  انرژی داخلی، C فاصله از مبدأ منحنی سرعت شوک بر حسب سرعت ذرات،  $\rho_0$  چگالی ماده منفجره،  $\mu$  حجم نسبی،  $\gamma_0$  ضریب گامای گرونایزن، a ضریب تصحیح حجم مرتبه اول و S ضریب شیب منحنی سرعت شوک بر حسب سرعت ذرات می‌باشد. ضرایب معادله حالت اجزای فلزی در شبیه‌سازی انجام شده در جدول (۶) آمده است.

جدول ۸- نتایج شبیه‌سازی نفوذ با ضرایب مختلف معادله حالت.

خرج	مرجع ضرایب	عمق نفوذ (mm)	حداکثر قطر نفوذ (mm)
اکتول	[۱۱]	۵۴۸	۳۰/۱
	CHEETAH	۴۷۸	۲۷/۴
PBXN-110	[۲۹]	۳۸۵	۲۲/۹
	CHEETAH	۳۷۵	۲۲/۰

مطالعه کانتور فشار موج انفجار در لحظه برخورد به لاینر نشان می‌دهد که فشار در لحظه  $t = 1 \mu\text{sec}$  حدوداً برابر با ۲۷۵۰ 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.

### ۲-۳- نتایج آزمون‌های تجربی

برای ارزیابی بیشتر نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های خرج گود حاوی خرج‌های مختلف اکتول (با چگالی  $1/81 \text{ g/cm}^3$ ) و PBXN-110 (با چگالی  $1/67 \text{ g/cm}^3$ ) در شرایط استاتیکی و در فاصله توقف ۵۰ cm با یکدیگر مقایسه شدند. از هر مدل دو نمونه آزمون شده و میانگین نتایج برای مقایسه دو خرج محاسبه شده است. بر اساس اطلاعات جدول (۹) که نتایج دو سری آزمون تجربی را گزارش می‌کند، میزان نفوذ حاصل از انفجار خرج گود حاوی اکتول بیشتر از نمونه PBXN-110 است.

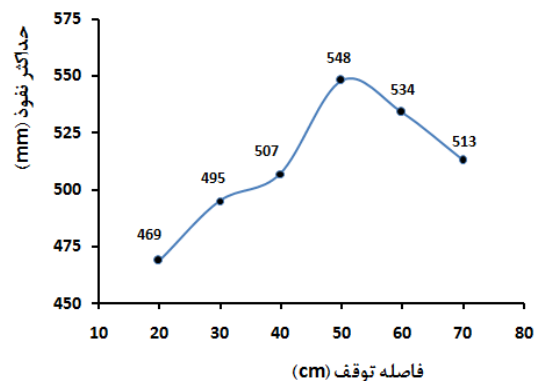
جدول ۹- پارامترهای نفوذ در آزمون‌های تجربی.

ماده منفجره			عمق نفوذ (mm)
اکتول	PBXN-110	سری اول	
۴۵۲	۳۳۷	سری دوم	حداکثر قطر حفره (mm)
۴۳۶	۳۱۱	سری اول	
۶۶	۴۷	سری دوم	

تصاویر مربوط به بلوک فولادی هدف پس از انجام آزمون‌های تجربی در شکل (۶) نشان داده شد. در این تصاویر ۲ حفره مربوط به نفوذ جت حاصل از انفجار خرج گود حاوی اکتول و PBXN-110 قابل مشاهده است. همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی قابل پیش‌بینی بود، اثر خرج اکتول بیشتر از نمونه PBXN-110 بوده است. میانگین عمق حفره حاصل از عملکرد این دو سرجنگی به ترتیب،  $444 \pm 8 \text{ mm}$  و  $324 \pm 13 \text{ mm}$  و حداکثر قطر حفره حاصل نیز به ترتیب  $64 \pm 2 \text{ mm}$  و  $46 \pm 1 \text{ mm}$  است.

شکل (۷) عملکرد دو خرج اکتول و PBXN-110 در دو حالت شبیه‌سازی و آزمون تجربی در فاصله توقف ۵۰ cm را با یکدیگر مقایسه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در این شکل، میانگینی از داده‌های جدول (۸) است. مطابق این شکل، PBXN-110 در هر دو حالت دارای عملکرد نفوذ کمتری نسبت به اکتول است. میزان کاهش نفوذ طی جایگزینی

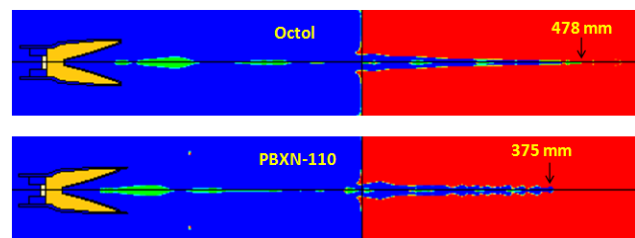
با در نظر گرفتن ضرایب معادله حالت ارائه شده در مرجع [۱۱] در شکل (۴) آمده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده مناسب‌ترین فاصله توقف برای این سرجنگی، ۵۰ سانتی‌متر است.



شکل ۴- رابطه عمق نفوذ با فاصله توقف برای خرج اکتول.

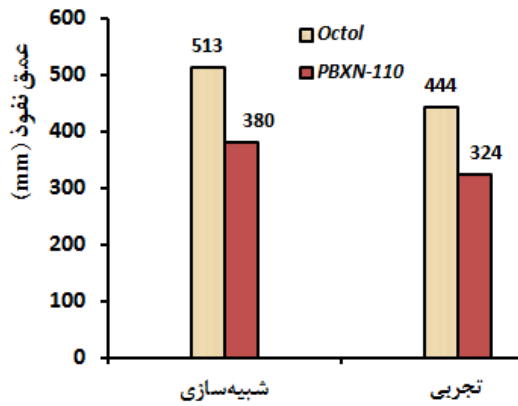
جت حاصل از انفجار خرج‌های اکتول و PBXN-110 با در نظر گرفتن ضرایب معادله حالت JWL استخراج شده از نرم‌افزار CHEETAH در شکل (۵) نشان داده شده است. داده‌های این نرم‌افزار به‌عنوان ورودی شبیه‌سازی در کنار ضرایب معادله حالت ارائه شده در منابع، جهت تکمیل و مقایسه دقیق‌تر نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

در این شبیه‌سازی، فاصله توقف برای هر دو نمونه ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همان‌طور که مشخص است، با انفجار خرج درون پوسته، لاینر مسی تحت فشار بسیار زیاد موج انفجار تغییر شکل داده و به تدریج کشیده شده و در نهایت 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. قطر سوراخ به تدریج با پیشروی جت کاهش می‌یابد. با جایگزینی خرج PBXN-110 به جای اکتول، حداکثر میزان نفوذ در حدود ۲۱/۵ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۵- شبیه‌سازی نفوذ جت حاصل از انفجار خرج‌های اکتول و PBXN-110 از فاصله توقف ۵۰ cm در هدف.

نتایج مشابهی در شبیه‌سازی با استفاده از ضرایب معادله حالت قبلا گزارش شده [۱۱ و ۲۹]، حاصل شد. عمق نفوذ جت و حداکثر قطر سوراخ ایجاد شده در انفجار خرج‌های بررسی شده از فاصله توقف ۵۰ cm، در جدول (۸) گزارش شده است.



شکل ۷- مقایسه نفوذ خرج گودهای بررسی شده در دو حالت شبیه‌سازی و آزمون تجربی.

#### ۴- نتیجه‌گیری

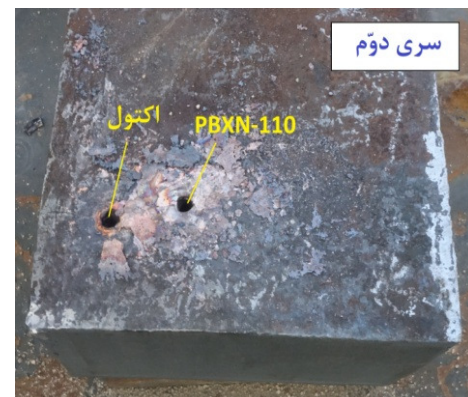
نتایج این تحقیق نشان داد که تغییر فرمولاسیون ماده منفجره موجود در یک خرج گود مشخص، بر پارامترهای نفوذ از جمله عمق و قطر سوراخ نفوذ تأثیر زیادی دارد. خرج پلاستیکی و قابل ریخته‌گری PBXN-110 اگرچه بر اساس اطلاعات موجود، دارای خواص حرارتی، ایمنی و مکانیکی مناسب‌تری نسبت به اکتول است، ولی به دلیل داشتن چگالی و سرعت انفجار پایین‌تر، در سرچنگی خرج گود از عملکرد و نفوذ پایین‌تری برخوردار است. با جایگزینی PBXN-110 به جای اکتول، کاهش در حدود ۲۷ درصدی در عمق نفوذ جت و حداکثر قطر حفره در هدف فولادی مشاهده شد. اولویت‌بندی دو پارامتر مهم ایمنی و قدرت نفوذ در سرچنگی‌های مشابه توسط کاربر می‌تواند به انتخاب یکی از این دو خرج منجر 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. Mech. 2014, 8, 53-61.
- [2] Jaramaz, S.; Micković, D.; Elek, P.; Jaramaz, D.; Micković, D. "A Model for Shaped Charge Warhead Design"; J. Mech. Eng. 2012, 58, 6, 403-410.
- [3] Elshenawy, T. A. E. "Criteria of Design Improvement of Shaped Charges Used as Well Perforators"; A Thesis Submitted to The Univ. of Manchester for the Degree of Doctor of Philosophy, School of Mechanical, Aerospace and Civil Eng. 2012.
- [4] Blache, A.; Weimann, K. "Generation of Different Detonation Wave Contours"; 16<sup>th</sup> Int. Symposium on Ballistics, San Francisco, CA, USA, 1996.
- [5] Agrawal, J. P. "Recent Trends in High Energy Materials"; Prog. Energy Combust. Sci. 1998, 24, 1-30.
- [6] Kumar, A. S.; Samudre, S. S.; Waghmare, N. G.; Gharia, J. S. "A Facile Pressing Technique for Preparation of Small Calibre Dual Role Explosive Charge"; Propell. Explos. Pyrotech. 1996, 21, 106-110.

PBXN-110 نسبت به اکتول در شرایط شبیه‌سازی و آزمون تجربی به ترتیب ۲۱/۵ و ۲۷ درصد است. در مقایسه انجام شده به غیر از نوع خرج، کلیه اجزاء، قطعات و روش اجرای آزمون ثابت در نظر گرفته شد. بنابراین کاهش نفوذ حاصل از انفجار PBXN-110 را می‌توان عمدتاً به سرعت انفجار و چگالی پایین‌تر آن در مقایسه با اکتول و هم‌چنین مسئله شارژ که در خرج‌های قابل ریخته‌گری اهمیت دارد، نسبت داد. در خرج گودها با کاهش سرعت انفجار و کاهش چگالی، میزان نفوذ کاهش می‌یابد [۳]. با توجه به حجم یکسان دو نمونه و چگالی پایین‌تر PBXN-110، طبیعی است که وزن کمتری از آن در سرچنگی شارژ شود. کاهش وزن در حدود ۷/۵ درصدی آن در مقایسه با نمونه اکتول یکی از دلایل مهم کاهش نفوذ است.

اختلاف نفوذ در نتایج شبیه‌سازی و تجربی نمونه‌های PBXN-110 و اکتول به ترتیب ۱۴/۷ و ۱۳/۴ درصد است. این اختلاف را می‌توان به خطای مدل‌سازی یا کیفیت ساخت قطعات مربوط دانست. علاوه‌براین، شارژ نمونه به‌ویژه در خرج پلاستیکی PBXN-110 به دلیل بالا بودن گرانشی پایان اختلاط<sup>۱</sup> مواد اولیه ( $> 1000000$  cP) [۳۰]، که می‌تواند به شدت بر نتایج نفوذ تأثیر داشته باشد، می‌تواند یکی از عوامل اختلاف نتایج تجربی با شبیه‌سازی باشد.



شکل ۶- اثر نفوذ خرج گودهای مختلف در هدف فولادی.

- [19] TM 9-1300-214: "Military Explosives", 1984.
- [20] MIL-STD-1751A, "Safety and Performance Tests for the Qualification of Explosives (High Explosives, Propellants and Pyrotechnics)"; 20 August 1982.
- [21] Agrawal, J. P. "High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics"; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
- [22] Hollands, R.; Fung, V.; Burrows, K. S. "High Performance Polymer-Bonded Explosive Containing PolyNIMMO for Metal Accelerating Applications"; NDIA IMEMT Symposium, 2004.
- [۲۳] خدارحمی، حسین؛ خلجی، حمید رضا؛ محسنی، رضا "تحلیل عددی و تجربی شکل گیری و نفوذ پرتابه‌های شکل یافته انفجاری"؛ مجله علمی- پژوهشی مکانیک و هوا فضا، جلد ۱، شماره ۲، صفحه ۹۵، آبان ۱۳۸۴.
- [24] 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.
- [25] Junqing, H.; Wei, Z.; Wenyue, W.; Kelei, H. "The 3D Numerical Simulation of the Shaped Charge Jet Penetration through the Steel Target"; The 2nd Int. Conf. on Computer Application and System Modeling, Paris, France, 2012, 236-239.
- [26] Jintao, L.; Hongnian, C.; Fuchi, W.; Qunbo, F. "Multiscale Numerical Simulation of the Shaped Charge Jet Generated from Tungsten-Copper Powder Liner"; J. Phys.: Conf. Series, 2013, 419, 012045.
- [۲۷] علوی‌نیا، علی؛ احمدی‌کیا، حسین؛ حجتی، اصغر "تحلیل عددی انفجار و تشکیل جت در خرج گود"؛ مجله علمی- پژوهشی مواد پرنرزی، سال دوم، شماره ۲، شماره پیاپی ۴، صفحه ۶۹، پاییز و زمستان ۱۳۸۶.
- [28] 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.
- [29] Chen, J. K.; Ching, H. K.; Allahdadi, F. A. "Shock-Induced Detonation of High Explosives by High Velocity Impact"; J. Mech. Mat. Struc. 2007, 2, 1701-1721.
- [30] Boggs, B.; Carrillo, A.; Guntrum, K.; Owens, J. "Improved Processability of Cast-Cure PBX's by Modification of Particle Shape"; NDIA Insensitive Munitions & Energetic Materials Technol. Symposium, 2007.
- [7] Elshenawy, T. "Density Effect of the Compacted Copper-Tungsten Shaped Charge Powder Liners on its Penetration Performance"; J. Powder Metall. Min. 2017, 6, 172-178.
- [۸] ملایی، احمد؛ رحیمی‌پور، محمدرضا؛ دهنوی، محمدعلی "اثر پودر آلومینیوم بر قابلیت نفوذ یک نمونه خرج گود خاص"؛ مجله علمی- پژوهشی مواد پرنرزی، سال دهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۲۵، صفحه ۳۱، بهار ۱۳۹۴.
- [9] 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"; Propell. Explos. Pyrotech. 2009, 34, 145-150.
- [10] Kentagens, H; Zhang, J; Heigh, D; Schneebaum, Y; Eliash, T; Yarom, T. "Anti Structure Shoulder Launched System – Insensitive Munition Program"; Insensitive Munitions & Energetic Materials Technol. Symposium, Munich, Germany, 2010.
- [11] Carleone, J. "Tactical Missile Warheads"; AIAA Inc, 1993, 155, 81-158.
- [۱۲] بیگی مقدم، علیرضا "ساخت و به‌کارگیری یکی از انواع خرج‌های PBX به‌عنوان خرج اصلی در سرچنگی‌های نیمه‌نفوذی"؛ ششمین همایش سراسری و اولین همایش بین‌المللی مواد منفجره، پیشرانها و پیروتکنیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تیر ۱۳۹۰.
- [13] Johnson, N. C.; Gonzalez, C. W.; Reed, K. W.; Kowalczyk, L. A.; Myers, W. L.; Beam, V. L.; Fields, V. A. "IM Explosive for SMAW HEAA Warhead"; Indian Head Division, Naval Surface Warfare Center Indian Head, MD. NDIA Gun and Missile Systems Conf., 2009.
- [14] Gonzalez, C. W.; Johnson, N. C.; Reed, K. W.; Kowalczyk, L. A.; Myers, W. L.; Beam, V. L.; Fields, V. A. "Replacement of Octol with IM Explosive in SMAW HEAA Warhead"; Insensitive Munitions and Energetic Materials Technol. Symposium, Tucson, 2009.
- [15] Blumenthal, W. R.; Thompson, D. G.; Cady, C. D.; Gray, G. T. Idar, D. J. "Compressive Properties of PBXN-110 and with HTPB –Based Binder as a Function of Temperature and Strain Rate"; Proc.12<sup>th</sup> Int. Det. Symposium, San Diego, CA, 2002.
- [16] Meyer, R.; Kohler, J.; Homburg, A. "Explosives"; 6th Ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- [17] MIL-E-82901(OS), Military Specification "Explosive, Plastic Bonded, Cast PBXN-110"; 4 September 1990.
- [18] Antic, G.; Džingalašević, V. "Characteristics of Cast PBX with Aluminium"; Sci. Technol. Rev. 2006, LVI (3-4), 52-58.