

شبیه‌سازی عددی عملکرد یک پرتابه شکل یافته چندگانه

و مقایسه با نتایج تجربی

محمد کوزه‌گران^۱، حسین خدارحمی^{۲*}، رضا کسای^۳، علی خیر آبادی^۴، احسان باصری^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۳، ۴ و ۵- کارشناس، سازمان تحقیقات و خودکفایی نرسا

۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۴/۱/۱۸، تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۵)

چکیده

پرتابه‌های شکل یافته چندگانه میدان اثر بیشتری نسبت به انواع تکی آن دارند. یکی از مسائلی که مهندسان در طراحی چنین پرتابه‌هایی با آن روبرو هستند محاسبه و تخمین رفتار شکل‌گیری همزمان چند پرتابه است. با توجه به پیچیدگی تحلیل مسائل انفجار مواد منفجره، انتشار موج شوک، تغییر فرم آستر در هنگام شکل‌گیری پرتابه و نفوذ آن در هدف، شبیه‌سازی عددی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی پرتابه‌های شکل یافته چندگانه داشته باشد. در این مطالعه مراحل شکل‌گیری و نفوذ پرتابه اصلی و ترکش‌های محیطی با استفاده از کد اجزاء محدود «آل اس داین» برای یک آستری مرکزی و شانزده آستری محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. بعلاوه با ساخت نمونه و آزمون میدانی عملکرد این نوع سرچنگی بروش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. یافته‌های تجربی نفوذ حدود پنج سانتیمتر برای پرتابه اصلی و حدود یک سانتیمتر برای پرتابه‌های محیطی را نشان می‌دهد، که مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی تطابق خوبی با یافته‌های تجربی دارد. میزان انحراف محل برخورد پرتابه‌های محیطی از مرکز حدود ۱۳۰ سانتیمتر است که بیانگر حداکثر ۵ درصد اختلاف بین نتایج حل عددی و تجربی است.

واژه‌های کلیدی: پرتابه شکل یافته، شکل‌گیری، نفوذ، شبیه‌سازی عددی، آزمایش.

Numerical Simulation of Multiple Formed Projectile Performance and Comparison with Experimental Results

M. Kozehgaran, H. Khodarahmi*, R. Kasai, A. Kheirabadi, E. Basery

Imam Hossein University

(Received: 04/07/2015, Accepted: 08/27/2015)

Abstract

Multiple formed projectile is more effective than the single types. Calculation and estimation of multiple projectiles formation behavior is one of the problems that engineers face with it. Given the complexity of issues analysis of explosive detonation, shock wave propagation, liner deformation during the formation of projectiles and its penetration in target, numerical simulation of formation and penetration of the projectiles can play a decisive role in the anti-armor warheads design. In this study, the formation and penetration of central and lateral projectiles have been simultaneously investigated by lsdyna finite element code. Comparison of numerical simulation shows good agreement with experimental test. In addition, the empirical test show that the central projectile and the lateral projectiles have penetrated about 5 cm and about 1 cm, respectively. The hitting deviation of lateral projectiles from the center is about 130 cm, with a maximum of 5% difference between the experimental and numerical results.

Keywords: Multiple Formed Projectile, Formation, Penetration, Numerical Simulation, Test.

۱- مقدمه

آزمون تجربی یک مدل از پرتابه شکل یافته چندگانه چند منظوره انجام شده که در ادامه به آن اشاره می‌گردد.

فرآیند انجام گرفته در این مطالعه شامل مراحل شبیه سازی، ساخت و آزمون نمونه بوده، که جهت دستیابی به پرتابه چندگانه انجام شده است. در قسمت شبیه سازی ابتدا مدل هندسی دو بعدی پرتابه مرکزی و سپس مدل سه بعدی، در نرم افزار «ال اس داینال» آماده شده و سپس مش بندی المان‌ها انجام گردید. مش بندی‌ها به گونه‌ای انجام شدند که نتایج همگرا شده و جواب های تحلیل به مش وابستگی نداشته باشد. پس از مش بندی المان‌ها می‌بایست مدل رفتار ماده برای هر المان با توجه به جنس و نوع رفتار ماده و نیز اثر سایر پارامترهای مؤثر در رفتار آن، مدل مناسبی انتخاب گردد. برای فلزات از مدل جانسون کوک و معادله حالت گرونایزن و برای ماده انفجاری از مدل high explosive burn و معادله حالت JWL استفاده گردید. انتخاب مدل رفتار ماده موضوع بسیار با اهمیتی است که در نتایج حاصل از تحلیل اثر به سزایی دارد.

در قسمت ساخت، با توجه به هندسه بهینه به دست آمده از نتایج شبیه سازی، نمونه تجربی ساخته شد. سیستم پرتابه شکل یافته چندگانه دارای اجزاء متنوعی شامل پوسته، درپوش، آستر مرکزی، آسترهای محیطی، زنجیره انفجار و نگه‌دارنده آسترها است. با ساخته شدن قطعات و زیرمجموعه‌ها، کار مونتاژ قطعات، شارژ خرج و آماده سازی مجموعه برای آزمون میدانی صورت گرفت.

۲- شبیه سازی

با توسعه نرم افزارهای کامپیوتری المان محدود برای تحلیل تغییر شکل دینامیکی اجسام در بارگذاری های سرعت بالا، می‌توان مسائل غیرخطی هندسی و مادی را تحلیل نمود. نرم افزار ال اس داینال یک کد قوی برای این منظور است [۵]. این نرم افزار در حقیقت حاصل توسعه نرم افزار DYNA3D و روش حل مسائل در این نرم افزار بر پایه انتگرال زمانی صریح است. همچنین در این نرم افزار امکان استفاده از روش فرسایش المان برای تحلیل مسائلی که شبکه مش بندی دچار تغییر فرم های شدید می‌شود، وجود دارد. انتخاب صحیح مدل ماده و معادله حالت، همچنین اعمال صحیح شرایط فیزیکی مسئله، از قبیل شرایط مرزی و استفاده از سطوح تماس و المان‌های متناسب با نوع مسئله امکان انجام یک شبیه سازی صحیح، به کمک نرم افزار را فراهم می‌کند. در این بخش روش طراحی و شبیه سازی دو بعدی و سه بعدی پرتابه شکل یافته چندگانه چند منظوره، با استفاده از این نرم افزار تشریح می‌شود.

برای طراحی آستر مرکزی این نوع سرجنگی می‌توان از شبیه سازی دو بعدی استفاده نمود، ولی جهت تحلیل و بررسی شکل و رفتار پرتابه های محیطی به دلیل عدم تقارن محوری می‌بایست شبیه سازی سه بعدی انجام شود. لذا مدل اولیه پرتابه‌ها با فرض یک پرتابه میانی

در پرتابه های شکل یافته، با انفجار جهت دار و کنترل شده خرج، ورق های فلزی با شکل های خاص خود به نفوذکننده های پیوسته تبدیل می‌شوند. در این فرآیند شتاب گیری آستری فلزی در زمان بسیار کم و با سرعت های بسیار بالا صورت می‌گیرد که یک روش کارا برای ایجاد نفوذکننده های با انرژی جنبشی بالا است. در این مکانیزم تقریباً تمام جرم آستری به یک توده آیرودینامیکی متمرکز تبدیل شده و بعد از گذشت زمان مشخصی، گرادیان سرعت در طول پرتابه به صفر رسیده و تمام نقاط پرتابه دارای سرعتی حدود ۶ تا ۱۰ ماخ می‌شوند [۱].

در چند سال اخیر با پیشرفت فناوری ساخت و ابزار طراحی و شبیه سازی پرتابه های شکل یافته، تحقیقات گسترده ای پیرامون تلفیق مشخصه های مؤثر انواع آن‌ها صورت گرفته که منجر به ظهور نسل جدیدی از پرتابه های مؤثر و کارا از نوع پرتابه های شکل یافته شده است [۲]. این تحقیقات منجر به طراحی سه نوع پرتابه شکل یافته شده است. نوع پرتابه تکی برای ایجاد نفوذ بیشتر در هدف (شکل ۱-الف)، نوع چندگانه ترکشی جهت دار برای ایجاد ترکش های زیاد در یک جهت خاص (شکل ۱-ب)، و نوع چندگانه چند منظوره به منظور ایجاد یک پرتابه اصلی با نفوذ زیاد و ترکش های محیطی نافذ طراحی شده است (شکل ۱-ج). پرتابه شکل یافته چندگانه چند منظوره تلفیقی از پرتابه تکی و پرتابه شکل یافته چندگانه ترکشی جهت دار است که تلفیقی از کاربری دو نوع دیگر را دارد [۳].



(الف) (ب) (ج)

شکل ۱- پرتابه های شکل یافته تکی (الف)، چندگانه ترکشی جهت دار (ب)، چندگانه چند منظوره (ج) [۳].

در پرتابه شکل یافته چند منظوره قسمت مرکزی آستر می‌تواند مانند یک پرتابه تکی عمل نماید، و ترکش های تولید شده توسط آستر رینگی شکل اطراف آستر مرکزی، قابلیت تولید پرتابه هایی را دارد که از لحاظ برد، دقت و نفوذ، مانند پرتابه شکل یافته چندگانه ترکشی جهت دار رفتار می‌کند [۴]. در این تحقیق شبیه سازی و

سه هزار عدد المان تشکیل شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده با توجه به هندسه شکل و ماهیت مسئله، تعریف می‌شوند. گره‌های موجود بر روی محور تقارن با توجه به شرایط تقارن محوری مقید شده‌اند. یکی دیگر از نکات مهم در شبیه‌سازی، انتخاب و اعمال سطوح تماس و برخورد مناسب است که در این شبیه‌سازی، از الگوریتم تماس سطح به سطح برای تعیین وضعیت تماس بین پوسته، آستر و ماده منفجره استفاده شده است.

۲-۲-۲- انتخاب مدل ماده

برای به دست آوردن نتایج مطلوب از شبیه‌سازی، انتخاب مدل ماده و داده‌های ورودی به نرم‌افزار، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای آستر مدل مادی جانسون-کوک، برای پوسته و هدف مدل مادی الاستیک-پلاستیک هیدرو، برای ماده منفجره مدل مادی شدید انفجار و برای هوا مدل مادی نول مورد استفاده قرار گرفته، که هر یک به‌طور خلاصه شرح داده می‌شود.

مدل جانسون-کوک: در این مدل برای بیان اثرات کار پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دما بر روی تنش تسلیم رابطه‌ای به شکل زیر ارائه شده است:

$$\sigma_Y = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

که در آن A, B, c, n, m ثابت‌های مادی و $\bar{\epsilon}^n$ کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\epsilon}^*$ پارامتر بی بعد شده نرخ کرنش است که به صورت $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / 1.0s^{-1}$ تعریف می‌شود. T^{*m} پارامتر بی بعد شده دما است که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$T^{*m} = \frac{T - T_{Room}}{T_{Melt} - T_{Room}} \quad (2)$$

مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای ذکر شده در مدل جانسون-کوک برای آستر در جدول (۱) ارائه شده است.

الاستیک-پلاستیک هیدرو: مدل ماده در نظر گرفته شده برای پوسته و هدف، مدل الاستیک-پلاستیک هیدرو است. در این مدل رابطه ارائه شده برای تنش تسلیم به فرم زیر است:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_H \bar{\epsilon}^p + (a_1 + p a_2) \max[p, 0] \quad (3)$$

که در آن σ_0 تنش اولیه، E_H مدول سختی پلاستیک است که بر حسب پارامترهای مدول یانگ (E) و مدول مماسی (E_t) تعریف می‌شود:

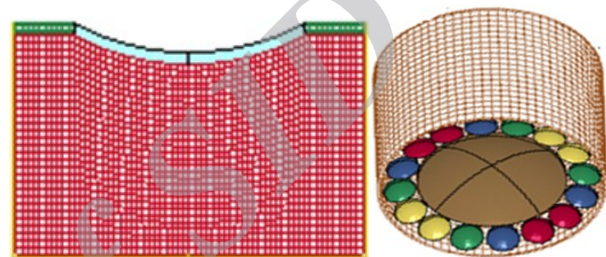
$$E_H = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (4)$$

P فشار، $\bar{\epsilon}^p$ کرنش پلاستیک موثر، a_1 و a_2 ضریب تصحیح فشار سختی است. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای ذکر شده در مدل الاستیک-پلاستیک هیدرو در جدول (۲) ارائه شده است.

و ۱۶ پرتابه محیطی مدنظر قرار گرفت. در تعریف اولیه مدل مقرر شد که پرتابه میانی دارای قابلیت نفوذ حداقل ۵ سانتیمتر و پرتابه‌های محیطی نیز دارای قابلیت نفوذ حداقل ۱ سانتیمتر در فولاد «اس تی ۵۲» داشته باشند.

۱-۲- مراحل شبیه‌سازی

مدل سازی و حل عددی پرتابه شکل یافته چندگانه در دو مرحله انجام پذیرفته است. ابتدا با فرض قرارگیری آستر مرکزی در مرکز پوسته و در نظر گرفتن فضای مورد نیاز برای پرتابه‌های محیطی، چگونگی تشکیل پرتابه مرکزی به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته و در گام دوم با در نظر گرفتن پرتابه‌های محیطی، شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام شده است.



شکل ۲- مدل دو بعدی پرتابه مرکزی (الف)، و مدل سه‌بعدی پرتابه‌های مرکزی و محیطی شکل یافته چندگانه (ب).

۲-۲- شبیه‌سازی دو بعدی پرتابه مرکزی

روش حل به صورت دوبعدی لاگرانژی با شرایط تقارن محوری انتخاب شده است. در مقایسه با روش اویلری، فرمول‌بندی لاگرانژی در محاسبات سرعت بیشتری دارد، چراکه محاسبه‌ای برای انتقال ماده از مش‌ها صورت نمی‌گیرد. بعلاوه دنبال کردن سطوح تماس ماده، سطوح آزاد و تاریخچه رفتار مواد به‌طور کلی برای روش لاگرانژی ساده‌تر است. از اشکالات اساسی این روش در تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های بزرگ است که مش‌ها بسیار تغییر شکل داده و منجر به حل بی‌دقت و غیر مؤثر می‌شود. در ادامه این اشکال باعث خطا و توقف محاسبات می‌گردد. یکی از روش‌هایی که برای حل این مشکل می‌توان در نظر گرفت، اصلاح مجدد مش بندی^۱ و ناحیه بندی مجدد^۲ محدوده حل است.

۱-۲-۲- مدل هندسی

با توجه به متقارن بودن شکل پرتابه مرکزی، به منظور کاهش حجم محاسبات، در این شبیه‌سازی از المان‌های پوسته با ویژگی تقارن محوری استفاده شده است. مش مورد استفاده در این تحلیل، از حدود

1- Remeshing
2- Rezoning

جدول ۱- ثابت‌های مدل مادی جانسون کوک برای ماده آستر از جنس مس خالص.

			CP	PR	E	G	چگالی (g/cm ³)
			۰/۳۸۳ e-۸	۰/۳۰۸	۱/۱۷	۰/۴۵	۸/۹۳۰
EPSO	TR	TM	M	C	N	B	A
۱e+۶	۳۰۰	۱۳۵۶	۱/۰۹	۰/۰۲۵	۰/۳۱	۲/۹۲ e-۳	۰/۸۹۶ e-۳

جدول ۳- ثابت‌های مدل مادی ماده شدید انفجار ترکیب بی.

چگالی g/cm ³	فشار چایمن-ژاکوت Mbar	سرعت انفجار cm/μs
۱/۷۱۷	۰/۲۹۵	۰/۷۹۸

که در آن σ_{ij} تنش‌های دیویاتوریک، μ ضریب گرانروی سیال و ϵ'_{ij} نرخ کرنش دیویاتوریک است. با استفاده از رابطه فوق می‌توان تنش‌های دیویاتوریک را محاسبه نمود. این مدل مادی نیازمند معادله حالتی برای تعیین فشار است. از ترکیب معادله مشخصه و معادله حالت می‌توان تنش‌های کلی را برآورد نمود.

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} = \mu \epsilon'_{ij} + P \delta_{ij} \quad (۷)$$

از الزامات ورودی برای این معادله مشخصه در بیان رفتار سیال، ضریب گرانروی سیال، فشار برش^۲ و حجم وابسته (V/V_0) است. ضریب حجم وابسته برای فرسایش در کشش معمولاً عددی بزرگ‌تر از واحد و برای فرسایش در فشار معمولاً عددی کوچک‌تر از واحد است. با استفاده از معادلات الاستیک نیز می‌توان با اعمال شرایط و ضرایب ورودی خاص و مناسب رفتار سیال را به صورت تقریبی مدل‌سازی نمود. در این تحلیل عددی، رفتار هوا با استفاده از این مدل مادی بیان شده است. در جدول (۴) ثابت چگالی هوا مورد استفاده در این مدل داده شده است.

جدول ۴- ثابت‌های مدل مادی نول برای هوا.

نوع ماده	چگالی (g/cm ³)
هوا	۱/۲۹۳ e-۳

۲-۲-۳- انتخاب معادله حالت

علاوه بر معادلات اساسی بقاء که شامل معادلات بقای جرم، بقای اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای و بقای انرژی است، در مسائلی که با تنش یا فشار شدید و تغییر حجم همراه باشند، علاوه بر مدل ماده به معادله‌ای که رابطه بین خصوصیات ترمودینامیکی ماده (مثل فشار، جرم حجمی و دما) را بدهد، نیاز است. در این تحلیل، از دو معادله حالت JWL (جونز-ویلکنز-لی) برای ماده انفجاری و چندجمله‌ای برای هوای اطراف مدل استفاده شده است.

معادله حالت JWL: این معادله حالت معمولاً برای تشریح رفتار محصولات انفجار مواد منفجره سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲- ثابت‌های مدل مادی الاستیک پلاستیک هیدرو برای جنس پوسته و هدف.

ماده پوسته و هدف	ρ (g/cm ³)	G (Mbar)	σ_y (Mbar)
پوسته	۲/۷۸۵	۰/۲۷۶	۰/۰۲۶۵
هدف	۷/۸۶	۰/۶۴۱	۰/۰۱۵

مدل مادی شدید انفجار: این مدل مادی برای بیان رفتار شدید انفجار بکار می‌رود. با استفاده از این مدل می‌توان رفتار بسیاری از مواد منفجره شدید انفجار نظیر TNT، RDX، HMX و ... را تحلیل و مدل‌سازی نمود. در طی فرآیند انفجار، می‌توان منطقه انفجار در ماده منفجره را به دو منطقه تقسیم نمود. یک قسمت ناحیه‌ای است که موج شوک از آن گذشته و فقط محصولات انفجار در آن وجود دارد و در قسمت دیگر ماده منفجره بر اثر سوزش، به محصولات انفجار تبدیل می‌گردد. در این ناحیه مخلوطی از مواد اولیه و محصولات انفجار وجود دارد. بنابراین برای محاسبه مجموع فشار داخلی مواد منفجره، از معادله حالت JWL و یک ضریب کنترل سوزش استفاده می‌شود.

ضریب F که در معادله حالت مواد منفجره ضرب می‌شود، آزادسازی انرژی شیمیایی را در شبیه‌سازی انفجار ماده منفجره کنترل می‌نماید. در هر زمان، مجموع فشار در هر المان ماده منفجره شدید انفجار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P = F P_{eos}(V, E) \quad (۵)$$

که در آن P_{eos} فشار معادله حالت، $V = \frac{\rho_0}{\rho}$ حجم وابسته و یا نسبت چگالی اولیه ماده به چگالی فعلی آن و E چگالی انرژی داخلی در واحد حجم اولیه است. مدل مادی شدید انفجار نیز همانند سایر مدل‌های مادی نیازمند ثابت‌های مختلفی است. بعضی از این ثابت‌ها جزء خصوصیات ذاتی ماده منفجره بوده و به صورت تجربی حاصل می‌شوند. در تحلیل عددی حاضر رفتار خرج با جنس «ترکیب بی^۱» با استفاده از این مدل مادی بیان شده است. در جدول (۳) ثابت‌های این مدل مادی داده شده است.

مدل مادی نول: مدل مادی نول برای بیان رفتار موادی با تغییر فرم‌های شبه سیال (هوا، آب و غیره) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل مادی تنش ویسکوز در ماده را ارائه می‌دهد. تنش ویسکوز دارای همان مشخصات تنش دیویاتوریک است.

$$\sigma_{ij}^v = \sigma_{ij} = \mu \epsilon'_{ij} \quad (۶)$$

9- Pressure Cutoff
10- Polynomial

8- CompB

۲-۲-۴- نتایج شبیه سازی دو بعدی شکل گیری پرتابه مرکزی

مشخصه های متغیر در شبیه سازی عبارت بودند از: زاویه رأس آستر، جنس آستر، ضخامت آستر و نسبت طول به قطر پوسته (L/D) و روش آغازگری انفجار به صورت چاشنی تکی یا حلقوی. هدف از انجام این شبیه سازی ها، دست یابی به یک پرتابه میله ای شکل مناسب و یکپارچه (با گرادیان سرعت یکنواخت) بوده است. جدول (۸) چکیده برخی از شبیه سازی های دو بعدی انجام شده را نشان می دهد.

این نتایج نشان می دهند که برای جلوگیری از تکه شدن پرتابه، ابتدا باید بر مشکل وجود گرادیان شدید سرعت غلبه کرد و سپس با اعمال تغییراتی در طرح، سرعت نهایی پرتابه را افزایش داد. توجه شود که کاهش ضخامت آستر، باعث افزایش گرادیان سرعت پرتابه شده که مطلوب نیست. همچنین افزایش ضخامت به کاهش سرعت نهایی پرتابه می انجامد که باز هم مطلوب نخواهد بود [۱].

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول (۸) هنگامی که زاویه رأس آستر حدود ۱۵۵ درجه، جنس آستر از نوع مس، ضخامت آستر حدود ۱۰ میلی متر و نسبت طول به قطر پوسته حدود ۰/۹۲ با آغازگر از نوع تکی باشد پرتابه مرکزی تشکیل شده به صورت یک تکه بوده ولی شکل آیرودینامیکی مناسبی نداشته و سرعتی در حدود ۲۰۰۰ متر بر ثانیه دارد، که با توجه به نتایج جدول (۹) سعی می گردد با کاهش ضخامت آستر سرعت پرتابه افزایش یافته و با تغییر نوع آغازش از تکی به حلقوی شکل آیرودینامیکی آن اصلاح گردد.

۲-۳- نتایج شبیه سازی سه بعدی

در این مدل سازی آسترهای محیطی چندگانه نیز از جنس مس خالص و پوسته از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شده است. پس از دست یابی به یک پرتابه میانی مناسب در شبیه سازی دو بعدی، شبیه سازی سه بعدی با استفاده از نرم افزار ال اس داینما و در حالت لاگرانژی سه بعدی انجام گردید و به علت تقارن بارگذاری و هندسی تنها یک چهارم آن مدل شده است. برای المان بندی مدل از المان های سالیید چهار گرهی استفاده شده است [۸]. بعد از المان بندی، تعداد کل المان های بکار رفته در مدل به بیش از ۱۷۶۰۰۰ المان رسید. هدف از انجام این مرحله، بررسی رفتار پرتابه میانی شبیه سازی شده در حالت دو بعدی و ۱۶ پرتابه مستقل محیطی بوده است. شکل (۳) نحوه شکل گیری و انحراف پرتابه های مرکزی و محیطی سرچنگی طراحی شده را در حالت آغازش چند تایی (حلقوی) [۹ و ۱۰] و به صورت سه بعدی نشان می دهد.

این معادله حالت ارتباط بین فشار، حجم متغیر و انرژی داخلی را بیان می کند. این معادله به صورت زیر تعریف می شود:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V'}\right) e^{-R_1 V'} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V'}\right) e^{-R_2 V'} + \frac{\omega}{V'} E \quad (۸)$$

که در آن ω ، R_1 ، R_2 و B ثابت های مواد انفجاری، V' حجم وابسته و E انرژی داخلی وابسته است. در جدول (۵) ضرایب مورد استفاده در این معادله حالت ارائه شده است.

جدول ۵- ضرایب معادله حالت JWL برای ماده منفجره ترکیب بی.

E0	ω	R_2 (Mbar)	R_1 (Mbar)	B (Mbar)	A (Mbar)
۸/۵e-۲	۰/۳۴	۱/۱	۴/۲	۰/۰۷۶۷۸	۵/۲۴۲

معادله حالت چند جمله ای خطی: معادله حالتی که برای هوای اطراف مدل استفاده شده، معادله حالت چند جمله ای خطی، که به صورت زیر تعریف می شود:

$$P = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E_0 \quad (۹)$$

که در آن c_1, \dots, c_6 ضرایب ثابت معادله حالت چند جمله ای خطی و پارامترهای μ و E_0 به ترتیب تراکم و انرژی داخلی است. این ضرایب برای مواد مختلف متفاوت و به صورت تجربی قابل محاسبه اند. در جدول (۶) ضرایب مورد استفاده در این معادله حالت نشان داده شده است.

جدول ۶- ثابت های معادله حالت چند جمله ای خطی برای هوا

نوع ماده	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
هوا	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	۰

معادله حالت گرونایزن: معادله حالتی که برای فلزات موجود در مسئله استفاده شده معادله حالت گرونایزن است، که به صورت زیر تعریف می شود:


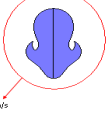
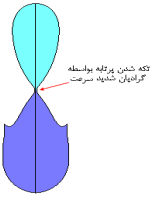
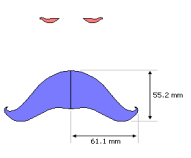
$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2\right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}\right]} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (۱۰)$$

در جدول (۷) ضرایب این معادله حالت که در تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته، ارائه شده است.

جدول ۷- ثابت های معادله حالت گرونایزن.

نوع ماده	C	S_1	S_2	S_3	GAMAO	A	E0
مس	۰/۳۹۴	۱/۴۹	۰	۰	۱/۹۶	۰	۰
آلومینیوم	۰/۵۳۲۸	۱/۳۳۸	۰	۰	۲	۰	۰
فولاد زرهی	۰/۴۶۱	۱/۷۳	۰	۰	۱/۶۷	۰	۰

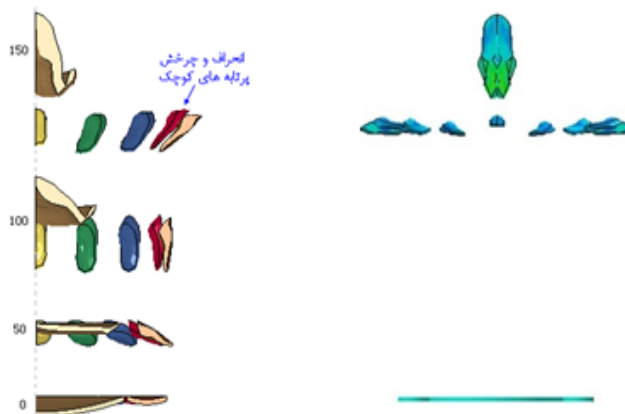
جدول ۸- چکیده اطلاعات برخی از شبیه‌سازی‌های دوبعدی انجام شده.

شکل پرتابه	سرعت (m/s)	نوع آغازش	L/D	جنس آستر	زاویه رأس آستر	ردیف
	۱۹۰۰	تکی	۰/۹۲	فولاد	۱۴۰	۱
	۳۰۰۰	تکی	۰/۹۲	فولاد	۱۴۵	۲
	۲۱۰۰	تکی	۰/۹۲	مس	۱۴۵	۳
	۲۰۰۰	تکی	۰/۹۲	مس	۱۵۵	۴

جدول ۹- اطلاعات شبیه‌سازی‌های دوبعدی انجام شده با زاویه رأس آستر ۱۵۵ درجه.

شکل پرتابه	سرعت (m/s)	نوع آغازش	L/D	ضخامت آستر (mm)	جنس آستر	زاویه رأس آستر	ردیف
	۳۲۰۰	تکی	۱	۵	مس	۱۵۵	۱
	۳۳۹۵	حلقوی	۱	۵	مس	۱۵۵	۲

همان‌گونه که از شکل (۳) مشخص است پرتابه‌های کوچک به صورت غیر محوری، حرکت می‌کنند. پرتابه میانی همانند نتایج شبیه‌سازی‌های دوبعدی دارای شکل میله‌ای بوده و همچنین شانزده پرتابه جانبی آن به صورت یکپارچه و بدون گرازیان سرعت بوده و دارای چرخش می‌باشند. بنابراین بر اساس نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام شده، زاویه واگرایی پرتابه‌های محیطی حدود ۷/۵ درجه بوده و لذا شعاع پراکندگی این پرتابه‌ها در فاصله ۱۰ متری، حدود ۱۳۱/۵ سانتیمتر خواهد بود.



شکل ۳- نحوه تشکیل پرتابه‌های میانی و کناری در حالت سه‌بعدی.

۳- آزمون‌های تجربی

به منظور بررسی تجربی رفتار پرتابه شکل یافته چندگانه و مقایسه نتایج آن با شبه‌سازی‌های انجام شده، مقرر گردید دو نمونه از طرح نهایی آن ساخته و آزمایش شود. در این مرحله پارامترهایی نظیر نفوذ، شعاع پراکندگی و ... بررسی می‌گردد.

سیستم پرتابه شکل یافته چندگانه دارای اجزاء متنوعی است، که می‌توان به پوسته، درپوش، آستر مرکزی، آسترهای محیطی، خرج، زنجیره انفجار و نگه‌دارنده آسترها اشاره کرد.

در نهایت با ساخته شدن قطعات و زیر مجموعه‌ها، کار مونتاژ قطعات، شارژ خرج و آماده‌سازی مجموعه برای آزمون میدانی صورت گرفت (شکل ۴). دقت ساخت و مونتاژ مجموعه نقش تأثیرگذاری در نتیجه آزمون خواهد داشت.



شکل ۴- نمونه مونتاژ شده جهت آزمون میدانی.

آزمون تجربی پرتابه شکل یافته چندگانه با هدف بررسی نحوه شکل‌گیری پرتابه‌های چندتایی (یکی در وسط و ۱۶ عدد در محیط)، به صورت استاتیکی انجام گردید. در این آزمون نمونه‌های ساخته شده بر روی پایه چوبی در فاصله ۱۰ متری از هدف‌ها مستقر گردید.

صفحه هدف مورد استفاده از جنس «اس تی ۵۲»، به ضخامت ۱۰ سانتیمتر و دارای ابعاد ۲ در ۲ متر بوده است. برای شکار پرتابه‌های محیطی نیز از تعدادی هدف با ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد ۱ در ۳ متر استفاده گردیده است (شکل ۵).



شکل ۵- نحوه انجام آزمون تجربی پرتابه شکل یافته چندگانه.

۴- نتایج و بحث

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول (۹) هنگامی که زاویه رأس آستر حدود ۱۵۵ درجه، جنس آستر از نوع مس، نسبت طول به قطر پوسته حدود ۱ و آغازگر از نوع حلقوی باشد پرتابه مرکزی تشکیل شده دارای شکل آیرودینامیکی مناسب و سرعتی در حدود ۳۰۰۰ متر بر ثانیه است، که به عنوان طرح انتخابی مدنظر قرار گرفت [۱۱ و ۱۲].

نتایج آزمون میدانی نشان داد که پرتابه شکل یافته چندگانه طراحی شده دارای قدرت نفوذ مناسب، هم در پرتابه میانی و هم در پرتابه‌های محیطی است (جدول ۱۰).

پراکندگی پرتابه‌های محیطی از مرکز، به صورت تقریباً یکسان بوده، به نحوی که پرتابه‌های محیطی در آزمون اول حدود ۱۳۰ سانتیمتر و در آزمون دوم حدود ۱۲۰ سانتیمتر از مرکز فاصله داشتند (شکل ۶). با توجه به اینکه در شبه‌سازی سه‌بعدی طرح، انحراف پرتابه‌های کناری در ۱۰ متری حدود ۱۳۱/۵ سانتیمتر بوده، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمون و شبه‌سازی تطابق خوبی باهم دارند. مقایسه نتایج نفوذ پرتابه مرکزی در حالت تجربی و شبه‌سازی نشان می‌دهد که حداکثر خطا حدود ۸ درصد است.

جدول ۱۰- مقایسه نتایج آزمون میدانی و شبه‌سازی.

انحراف پرتابه‌های محیطی (سانتیمتر)	نفوذ پرتابه‌های محیطی (میلی‌متر)	نفوذ پرتابه اصلی (میلی‌متر)	تعداد پرتابه محیطی اصابت کرده به هدف	تعداد قطعات حاصل از پرتابه میانی	کد آزمون
۱۳۰	۸ تا ۱۷	۵۱	۱۵	۳	آزمون اول
۱۲۰	۹ تا ۱۵	۵۳	۱۲	۲	آزمون دوم
۱۳۱/۵	۹ تا ۱۸	۵۵/۵	۱۶	۱	شبه‌سازی



شکل ۶- محل اصابت پرتابه اصلی و پرتابه‌های محیطی در آزمون میدانی پرتابه شکل یافته چندگانه.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق پرتابه شکل یافته چندگانه طراحی شد که این پرتابه شامل ۱۶ آستر محیطی و یک آستر مرکزی است که امکان ایجاد چندین پرتابه را دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که آستر مرکزی شکل آیرودینامیکی مناسبی را داشته و آسترهای محیطی در طول پرواز دارای چرخش بوده و رفتار یکسانی را نداشته‌اند و شعاع پراکندگی این پرتابه‌ها در فاصله ۱۰ متری، حدود ۱۳۰ سانتیمتر است. نتایج آزمون تجربی نیز نشان می‌دهد که پرتابه مرکزی نفوذ حدود ۵ سانتیمتر و آسترهای محیطی نفوذ بین ۱۰ الی ۱۵ میلی‌متر را بر روی هدف از جنس اس تی ۵۲ را ایجاد نموده است، و همان‌طور که پیش‌بینی می‌گردید نفوذ پرتابه‌های محیطی بر روی هدف متغیر بوده و رفتار یکسانی را از خود بروز نداده‌اند. پرتابه‌های محیطی نیز انحرافی نزدیک به ۱۲۰ الی ۱۳۰ سانتیمتر از آستر مرکزی دارند. همچنین با ساخت نمونه‌هایی از این پرتابه‌ها و آزمون تجربی آن مشخص شد که نتایج آزمون در زمینه عمق نفوذ و میزان انحراف پرتابه‌های محیطی تطابق خوبی با شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده دارد.

مراجع

- [4] Ove, D. "Cluster Weapons—Military Utility and Alternatives"; Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 2008, 113-170.
- [5] Carleone, J. "Tactical Missile Warheads"; University of Colorado, AIAA, 1993.
- [6] Changxiao, Z.; Yuan, L.; Yuansong, S.; Chong, J.; Xiang, Z. "Influence of Initiation Methods on Formation of Integral Warhead Parameter"; Journal of PLA University of Science and Technology 2012, 5, 620-627.
- [7] Jun, H.; Wei, Z.; Qiansheng, L. "Numerical Simulation of Formed Projectile Penetration the Target"; Journal of Academy of Armored Force Engineering 2011, 1, 38-45.
- [8] Reddy, J. "An Introduction to the Finite Element Method"; Texas A & M University College Station, Texas, 2005.
- [9] Weibing, L.; Wang, X.; Li, W. "The Effect of Annular Multi-Point Initiation on the Formation and Penetration of an Explosively Formed Penetrator"; Int. J. Impact Eng. 2010, 37, 414-424.
- [10] Liu, L. A.; Du, Z. "The Effect of Different Multi-Point Initiation on the Formation and Penetration of Annular Formed Projectiles"; Applied Mechanics and Materials 2013, 246, 718-722.
- [11] Yang, Z.; Yuan, L.; Chong, L.; Haiyang, M.; Xiang, Z.; Yang, H. "Superposition Effect of Shock Waves on Formation of a Gouped Multiple Formed Projectile"; Journal of Vibration and Shock 2012, 1, 24-30.
- [12] Changxiao, Z.; Yuan, L.; Daoqiang, Y.; Chong, J.; Yang, Z.; Haoming, X. "Formation of Incised Multiple -Formed Projectiles and their Armor-Piercing Effect Against Steel Target"; Explosion and Shock Waves 2013, 2, 83-88.
- [1] William, N. "Long Standoff Demolition Warheads for Armor, Masonry and Concrete Targets"; U.S. Army TACOM-ARDEC, 2002, 12-17.
- [2] Matthew, C. "Combined Effects Formed Penetrator Warhead Development"; U.S. Army RDECOM-ARDEC, 2004.
- [3] Richard, F.; William, N. "Multiple Formed Penetrator Warhead Technology Development"; 19th International Symposium of Ballistics, 2001, 225-239.